

6-5 ФЕВ 1934

Проф. Е. А. СВИРСКИЙ

621.3.08

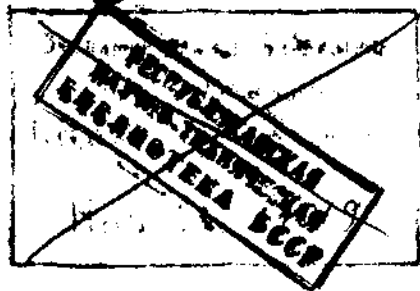
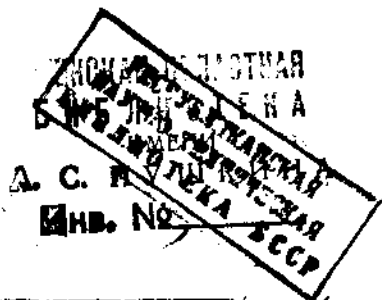
С24

ДЕП



ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ПРИБОРЫ

второе издание,
исправленное
и дополненное



МОСКВА — 1934 — ЛЕНИНГРАД



ПРЕДИСЛОВИЕ КО 2-МУ ИЗДАНИЮ.

Второе издание курса „Электротехнические и магнитные измерения“ преследует, в основном, ту же задачу, что и первое его издание.

Материал, в нем излагаемый, охватывает вопросы принципа действия, свойств и области применения технических электроизмерительных приборов и, на базе этих сведений, — начала методики измерения основных электрических и магнитных величин в объемах, доступных для студентов II курса электротехнических вузов.

Кроме того, излагаемый в курсе материал может быть полезен и инженерам-электрикам в процессе их практической деятельности. Область измерений специального характера, как-то: радионизмерений, телеграфных, телефонных, высоковольтных и т. п., в настоящем курсе не затронута, так как изучение этих разделов электрометрии требует уже достаточно основательных знаний по специальным дисциплинам.

Общий курс электрометрии, руководством для которого настоящая книга и предназначается, по учебным планам вузов проходит, в лучшем случае, параллельно с курсом теории переменных токов, что крайне осложняет задачу подробного теоретического и достаточно глубокого математического обоснования ряда вопросов как при изложении принципа действия некоторых систем приборов, так и при рассмотрении самой методики измерения таких величин, как мощность, работа, емкость и индуктивность.

Это обстоятельство, наряду с крайне ограниченным объемом времени, отводимым во вузах на курс электрометрии, заставляет автора, при рассмотрении ряда вопросов, обращать главное внимание на пояснение их физической сущности, вынося в приложения к соответствующим главам курса ряд математических выводов и пояснений, не являющихся, по нашему мнению, материалом, обязательным для проработки его студентами.

По сравнению с первым изданием в настоящей книге добавлен ряд сведений о приборах и электроизмерительных устройствах, ныне только входящих в обиход электроизмерительной практики, а также дополнены главы о методике измерений емкости, индуктивности и, отчасти, о магнитных измерениях.

В отличие от первого издания, в настоящей книге не приводятся примеры лабораторных работ — поскольку характер их зависит от оборудования электроизмерительной лаборатории данного вуза.

Контрольные вопросы по каждой главе курса сохранены и в настоящем издании; в них фиксируется внимание обучающегося на главнейшем по каждому разделу курса.

При просмотре рукописи настоящего издания научным редактором, инж. И. Б. Мандельштамом, был дан ряд весьма ценных указаний, а со стороны зав. издат. частью ЛЭТИ Ф. М. Каролинского было проявлено весьма предупредительное отношение к пожеланиям автора, за что последний приносит им глубокую благодарность.

ИЗ ПРЕДИСЛОВИЯ К 1-МУ ИЗДАНИЮ.

Предлагаемое пособие названо „Общим курсом электротехнических и магнитных измерений“, ибо оно преследует цель дать учащемуся тот исходный материал, который необходим студенту-электрику в процессе его дальнейшей учебы и будущему инженеру-электрику в его практической работе вне непосредственной зависимости от их специализации по той или иной из самостоятельных отраслей электротехники.

Составляя это пособие, автор имел в виду, что курс будет прорабатываться бригадно-лабораторным методом или в порядке самостоятельной работы студентов с последующей консультацией преподавателя. Учитывая это, каждая глава курса завершается рядом контрольных вопросов, подытоживающих проработанный материал и фиксирующих внимание учащегося на самом главном по данному разделу курса. Помимо этого, каждая глава курса сопровождается приложением, где для желающих дается вывод тех формул, которые в тексте приведены в окончательном виде и подробного вывода которых от учащегося едва ли следует требовать, учитывая малый бюджет времени на теоретическую часть этого курса. Стремясь объединить в одной книге курс и пособие к лабораторным работам, автор ввел в конце каждой главы краткое описание лабораторных работ, иллюстрирующих данный раздел курса. Содержание последних соответствует лабораторному оборудованию в тех вузах, где автор ведет этот курс.

Порядок проработки курса, проверенный в течение двух последних лет и оправдавший себя, сводился автором к следующему. Первая часть курса, трактующая о системах электроизмерительных приборов, и вторая часть, охватывающая ограниченное число основных методов измерения электрических и магнитных величин, прорабатываются в той последовательности, как это изложено в курсе. Проработке каждой главы предшествует весьма краткое сообщение руководителя, имеющее целью заострить внимание обучающегося на самом

основном, затем идет самостоятельная проработка текста (лучше в составе бригады), которая завершается бригадной проработкой контрольных вопросов. За этим следует конференция с преподавателем, разъясняющим недостаточно хорошо понятое и дополняющим курс сообщением о новейших достижениях и перспективах развития и уточнения метрики, и наконец — выполнение лабораторных работ по данному разделу курса.

Курс написан в весьма короткий срок и является первой попыткой дать пособие для самостоятельной проработки материала, почему автор заранее приносит читателю благодарность за указания и пожелания, способствующие исправлению возможных недостатков этого труда.

Автор.

Ленинград
Апрель 1932 года.

ОТДЕЛ ПЕРВЫЙ.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЕДИНИЦЫ И ИХ ЭТАЛОНЫ. ВСПОМОГАТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА, ПРИМЕНЯЕМАЯ ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЯХ. СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ.

ГЛАВА I.

Электрические единицы и их эталоны.

§ 1. Практическая система электрических единиц.

Конечным результатом технического измерения любой электрической или магнитной величины является ее цифровое представление в величинах практической системы единиц. Последняя, как известно из курса „Электричество и магнетизм“, является кратной от единиц абсолютной электромагнитной системы (CGS), т. е. образуется умножением величин абсолютной системы единиц на коэффициенты, кратные 10. Необходимость в установлении этой системы единиц вызывалась стремлением изжить присущее абсолютной системе практическое неудобство, заключающееся в том, что числовые значения электрических величин выражаются в единицах этой системы слишком большими или, наоборот, чересчур малыми числами.

Основными практическими единицами являются единица работы—джоуль $= 10^7$ эргов, и единица сила тока—ампер $= 10^{-1}$ CGS.

Остальные практические единицы являются производными от этих двух: их числовое соотношение с единицами абсолютных электромагнитной и электростатической систем приведено в нижеследующей таблице.

Единицы	Условные обозначения	Практич. система единиц		Числовое соотношение практ. единицы к	
		Название	Связь с основ. практ. еднн.	электромагнитным единицам	электростатическим единицам
Количество электричества	Q	Кулон С	Ампер-сек.	10^{-1}	$3 \cdot 10^9$
Сила тока	I	Ампер А	Основная	10^{-1}	$3 \cdot 10^9$
Разность потенциалов (электродвижущая сила)	$V(E)$	Вольт В	$\frac{\text{Джоуль}}{\text{Кулон}}$ Вольт	10^8	$3, (3) 10^{-3}$
Электрическое сопротивление	R	Ом Ω	$\frac{\text{Вольт}}{\text{Ампер}}$	10^9	$1, (1) 10^{-12}$
Энергия (работа) электр. тока	$W(A)$	Джоуль J Ватт-час	} Основная	10^7	10^7
Мощность электр. тока	P	Ватт W		10^7	10^7
Емкость	C	Фарада F	$\frac{\text{Джоуль}}{\text{Секунда}}$ Кулон	10^{-9}	$9 \cdot 10^{11}$
Коэффициент самоиндукции	L	Генри Н	} Вольт	10^9	$1, (1) 10^{-12}$
взаимной индукции	M	Генри Н			
Напряженность магнитн. поля (магн. сила) .	H	Эрстед	} Секунда	1	$3 \cdot 10^{10}$
Магнитная индукция	B	Гаусс		1	$3 \cdot 10^{10}$
Магнитный поток	Φ	Максвелл		1	$3 \cdot 10^{10}$
Магнитодвижущая сила	E, S	Гильберт		1	
Магнитное сопротивление				1	

В следующей таблице приводятся символы, принятые Международной электротехнической комиссией для обозначения различных величин, а также наименования и обозначения практических единиц.

Наименование величины	Символ	Наимен. единиц	Обознач.
Длина	l	Сантиметр	l
Масса	m	Грамм	gr
Время	t	Секунда	sec
Электрическая работа	A	Вольт-кулон	VC
		Ватт-час	Wh
		Киловатт-час	kWh
Мощность	P	Вольт-ампер	VA
		Ватт	W
		Киловольт-ампер	kVA
		Киловатт	kW
Период	T		
Угловая частота пер. тока	ω		
Частота	f		
Сдвиг фазы	φ		
Электродвижущая сила	E	Вольт	V
Разность эл. потенциал.	U	Вольт	V
Сила тока	$I (I)$	Ампер	A
		Миллиампер	mA
		Микроампер	μA
Сопротивление (активное)	R	Ом	Ω
Удельное сопротивление	ρ	Ом-метр (сант.)	
Количество электричества	Q	Кулон	C
		Ампер-час	Ah
Емкость	C	Фарад	F
		Микрофарад	μF
Самостоятельная индукция	L	Генри	H
Взаимная индукция	M	Миллигенри	mH
Реактивное сопротивление	X		
Полное сопротивление	Z		
Магнитный поток	Φ		
Магнитное сопротивление	S		
Магнитная индукция	B		
Магнитная сила	H		
Магнитодвижущая сила	F		

Эти обозначения должны употребляться только после числовых значений

§ 2. Эталоны электрических и магнитных единиц.

Эталоном какой-либо величины называется ее вещественный образец, с помощью которого или сравнением, с которым мы можем измерить данную величину.

В отношении основных электрических единиц, после довольно длительного согласования этого вопроса среди

заинтересованных стран, для установления единства метрики электрических величин, на Лондонском Конгрессе в 1908 году была принята практическая международная система главных электрических единиц, а именно:

Международный ом — сопротивление, оказываемое неизменяющемуся электрическому току, при температуре тающего льда, ртутным столбом, имеющим массу 14,4521 г, повсюду одинаковое сечение и длину 106,300 см.

Международный ампер — сила неизменяющегося электрического тока, который, проходя через водный раствор азотно-кислого серебра, выделяет в секунду 0,001 118 00 г серебра.

Международный вольт — напряжение на концах проводника сопротивлением в 1 международный ом при силе проходящего по нему тока в 1 международный ампер.

При выборе перечисленных основных единиц Конгресс руководствовался расчетом, чтобы эти международные единицы по своей числовой величине отвечали тем практическим единицам, кои, как указано в § 1, являются производными (кратными) от абсолютных электрических единиц электромагнитной системы.

Таким образом, в период узаконения международных практических единиц считали, например, что абсолютный ом, равный 10^9 электромагнитных единиц сопротивления, в точности воспроизводится в виде эталона международного ома. Точно так же считалось, что абсолютный ампер, равный 10^{-1} электромагнитных единиц силы тока, и абсолютный вольт, равный 10^8 электромагнитных единиц напряжения, в точности равны международным амперу и вольту. Однако прогресс электроизмерительной техники уже к 1914 году показал, что этого равенства нет, и что

- а) международн. ом = 1,0005₂ абс. ом = 1,0005₂ · 10⁹ CGS μ,
- б) " ампер = 0,9999₇ " амп. = 0,9999₇ · 10⁻¹ CGS μ,
- в) " вольт = 1,0004₉ " вольт = 1,0004₉ · 10⁸ CGS μ.

Соответственно этому и остальные международные единицы (производные от трех выше приведенных) оказались связанными с абсолютными единицами следующими соотношениями:

- а) международн. ватт — 1,00034 абс. ватта
- б) " джоуль — 1,00034 " джоуля
- в) " кулон — 0,99991 " кулона
- г) " фарада — 0,99948 " фарады
- д) " генри — 1,00052 " генри
- е) " максвелл — 1,00043 " максвелла.

Так как точность измерений основных электрических единиц все повышается и к настоящему времени достигает значений $0,2 \times 10^{-6}$ для ома, 1×10^{-4} для ампера и 1×10^{-6} для вольты, то в 1929 году на собраниях Международного Комитета мер и весов, где представлялись и уполномоченные СССР, вновь возник вопрос о замене произвольно выбранных международных практических единиц абсолютными. В связи с этим всем организациям, аналогичным нашему Гос. Метрологическому Институту, поручено вести изыскания для установления такой системы практических единиц, которая воспроизводила бы абсолютные единицы.

До разрешения этого вопроса и установления эталонов абсолютных единиц страны-участницы обязались пользоваться международными единицами и их эталонами-прототипами, особо тщательно изготовленными, хранящимися в особых условиях (помещения с постоянной температурой и т. п.) и периодически сверяемыми с эталонами других стран. Эти эталоны носят наименование „первичных“; они применяются в целях выверки так называемых „вторичных“ эталонов, служащих для непосредственных измерений.

1. Эталоны сопротивлений и магазины. Первичный эталон (прототип) международного ома представляет собою ряд стеклянных трубок, наполненных ртутью (материалом, который легко получить в чистом виде) и снабженных на концах стеклянными приливами для включения их в цепь.

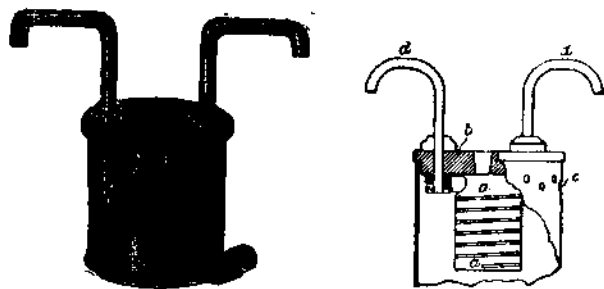


Рис. 1.

Вторичные эталоны, к которым предъявляются требования постоянства представляемой ими величины во времени, простоты конструкции, удобства в обращении и переноски с места на место и т. п., изготавливаются в виде так называемых нормальных одиночных сопротивлений (рис. 1). Они

представляют собою металлический цилиндр *A* (рис. 2) с намотанной на него бифилярно обмоткой *B* из хорошо изолированной проволоки, концы которой припаяны к массивным металлическим электродам в виде изогнутых стержней или пластинок *C*.

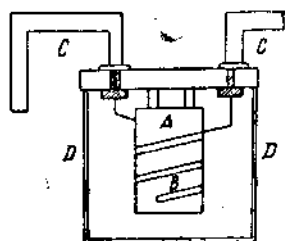


Рис. 2.

Электроды закрепляются на верхней абонитовой крышке эталона, к которой снизу прикрепляется цилиндр с обмоткой. Сама же крышка прикрепляется к наружному металлическому цилиндру *D*. При точных измерениях эталон погружается в особую ванну с керосином или маслом, перемешиваемым особой мешалкой.

Надлежащая изоляция металла обмотки эталона от металлического цилиндра, на котором она навита, достигается двойной шелковой оплеткой провода, оборачиванием цилиндра шелковой лентой, заливкой поверх шеллаком и, наконец, расплавлением последнего в воздушной ванне при температуре до 140°C для стабилизации свойств металла. После остывания расплавленного шеллака он становится очень твердой массой и притом не только изоляционной, но в то же время и предохраняющей металл обмотки от химических воздействий (окисление).

Для компактности подобного прибора и точности представляемой им величины сопротивления к материалу, идущему на изготовление обмотки, предъявляются следующие требования: а) наибольшее возможное удельное сопротивление; б) наименьшие возможные температурный коэффициент и термоэлектродвижущая сила при соприкосновении его с другими металлами (медью) и в) устойчивость металла провода против окисления его поверхности.

Большинству этих условий лучше всего удовлетворяет марганцин—сплав меди, марганца, никеля и следов железа, обладающий удельным сопротивлением порядка 43—53 микроом на сантиметр при 20°C , температурным коэффициентом около 0,00003 и термоэлектродвижущей силой при контакте с медью—порядка $1,5\text{ }\mu\text{V}$ на 1°C .

Другой сплав тех же металлов, но в ином процентном соотношении, называемый константаном, обладает еще меньшим температурным коэффициентом, но термоэлектродвижущая сила при контакте его с медью достигает $38\text{ }\mu\text{V}$ на 1°C .

Поэтому он применяется реже манганина, несмотря даже на то, что последний больше подвержен окислению.

Нормальные сопротивления строятся на пределы от 0,0001 до 100.000 Ω . Эталоны на 0,01—0,001 Ω изготавливаются из платина, а на 0,0001 Ω имеет вид массивного кольца из манганина.

Максимальная допустимая нагрузка вторичных эталонов током, при которой нагрев практически еще не сказывается на постоянстве их сопротивления, приводится ниже:

Сопротивление в омах 0,1 1 10 100 1000 10000

Максимальный ток 3,0 1,0 0,3 0,1 0,03 0,01.

Для понижения собственной распределенной емкости катушек, что является весьма важным, если эталоном предполагается пользоваться в цепях переменного тока повышенной и тем более высокой частоты — проволока для катушек берется не круглого, а плоского сечения и наматывается на тонкие слоудные пластинки. Точность нормальных сопротивлений достигает 0,01%.

Значительно бóльшим распространением в качестве вторичных эталонов сопротивления пользуются так называемые „магазины сопротивлений“. Они состоят из набора отдельных точно выбранных по сопротивлению катушек *a, a*, соединяемых в нужном количестве последо-

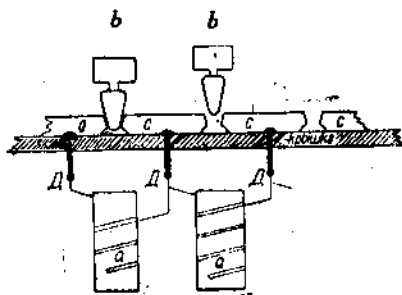


Рис. 3.

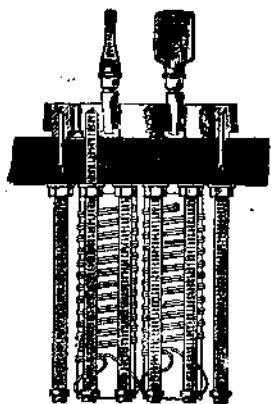


Рис. 4.

вательно друг с другом (рис. 3—6). Для этого надо нарушить соприкосновение медных штепселей *b* с медными же пластинками (ламелями *с, с*), к которым через посредство медных штырей *D, D* припаяны концы соседних катушек *a, a* магазина. Сопротивления отдельных катушек (секций) подобного магазина

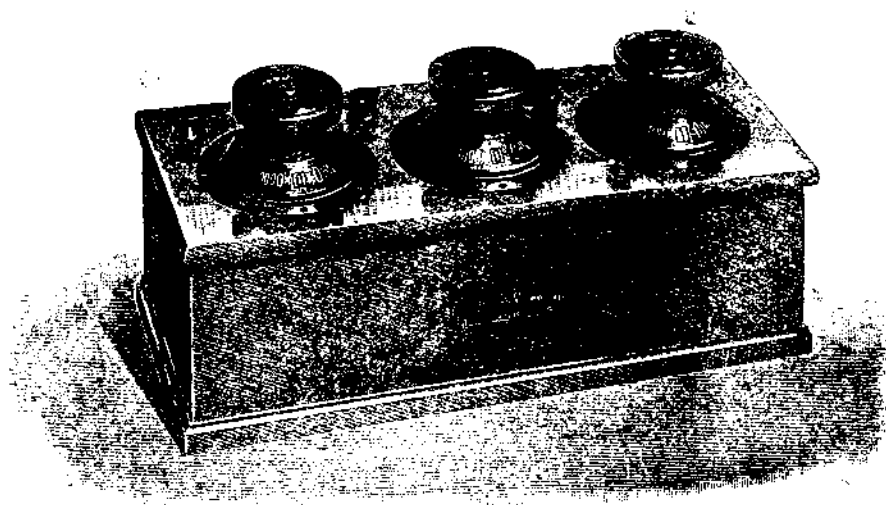


Рис. 5.

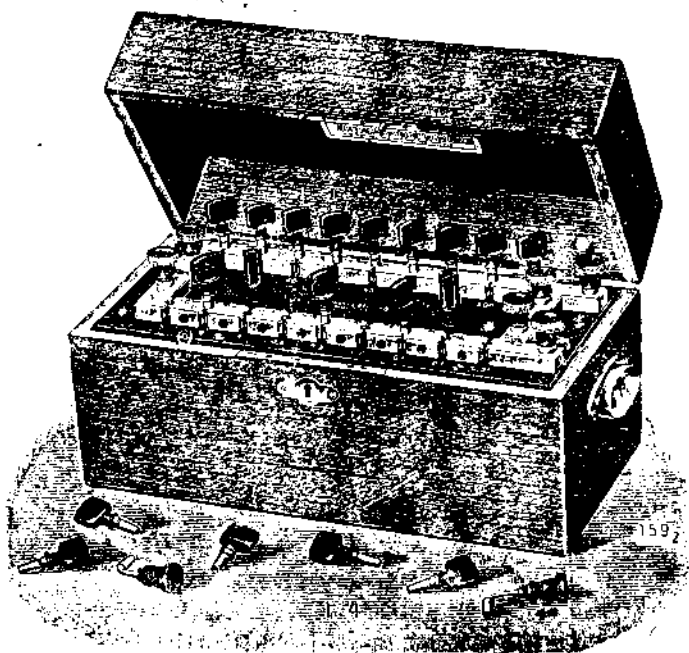


Рис. 6.

выбираются разной величины с таким расчетом, чтобы, вынув то или иное количество штепселей, можно было ввести в цепь нужное сопротивление.

Обычно применяется один из следующих наборов:

- а) 0,1; 0,2; 0,2; 0,5; 1; 2; 2; 5; 10; 20; 20; 50; и т. д. ом или
б) 0,1; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1; 2; 5; 10; 10; 20; 50; и т. д. ом.

Ламели магазина укрепляются на верхней эбонитовой крышке ящика, внутри которого монтируется набор катушек. Недостатком этого типа магазинов является то, что для набора при его посредстве различных по величине суммарных сопротивлений всегда приходится вынуть или вставить различное по количеству число штепселей, т. е. в цепи магазина всегда будет различное по величине суммарное переходное сопротивление, образуемое контактом ламелей со вставленными между ними штепселями. Эти переходные сопротивления не постоянны по величине, по-



Рис. 7.



Рис. 8.

скольку они зависят от степени соприкосновения штепселя с поверхностью ламелей и от чистоты соприкасающихся поверхностей.

Поэтому более совершенной системой магазинов являются декадные магазины, в которых набор того или

иного суммарного сопротивления всегда осуществляется одним и тем же количеством штепселей. Внешний вид и схема декадного магазина представлены на рис. 7—8, где b , b , b — сплошные медные ламели, укрепленные на верхней эбонитовой крышке магазина; 1, 2 и т. д. до 9; 10, 20 и т. д. до 90; 100, 200 и т. д. одиночные ламели по 9 штук в каждом ряду с ответвлениями от них к одинаковым в каждом

ряду (декаде) сопротивлениям c , c , например, по 1 ому каждое; d , d по десять ом каждое и т. д.

Набор того или иного суммарного сопротивления на подобном магазине всегда осуществляется одинаковым числом штепселей, равным числу его декад (рядов), что обеспечивает значительно большее постоянство суммарного переходного в нем сопротивления.

Кроме штепсельных магазинов, часто применяются рычажные (или, как иногда их называют, курбельные) магазины, в которых взамен ламелей и штепселей имеется ряд медных контактов a , a (рис. 9) со скользящим по ним рычагом b . Эти магазины обычно декадные, т. е. в каждом ряду введено 9 одинаковых по величине сопротивлений (смотри также рис. 5 и 7), например: первая декада—9 сопротивлений по 0,1 ома, каждое, вторая—9 по 1 ому; третья—9 по 10 ом и т. д. В работе декадные магазины удобнее обыкновенных еще и потому, что величина введенного на

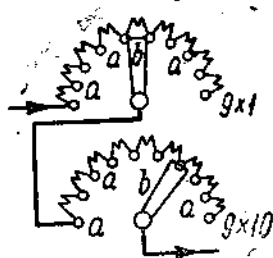


Рис. 9.

них суммарного сопротивления прочитывается непосредственно по положению штепселей или рычагов, не требуя никаких подсчетов, необходимых при работе с обыкновенными магазинами.

Наконец, на рис. 10 представлена схема одной декады подобного же магазина, в котором любое сопротивление—например, в пределах от 1 до 10 ом, может быть набрано также помощью одного только штепселя, причем число катушек в декаде 5 вместо 9, из коих четыре сопротивления по одному ому, а пятое в 5 ом.

Подобная схема дает экономию числа катушек в декаде, большую гарантию точного подбора сопротивлений декады и уменьшает габаритные размеры магазина. Если магазином предстоит пользоваться для измерений в цепях переменного тока повышенной, а тем более высокой частоты, то, дабы величина сопротивления, им представляемого, не изменялась с изменением частоты тока, его собственная емкость и коэффициент самоиндукции катушек должны быть ничтожно малыми.

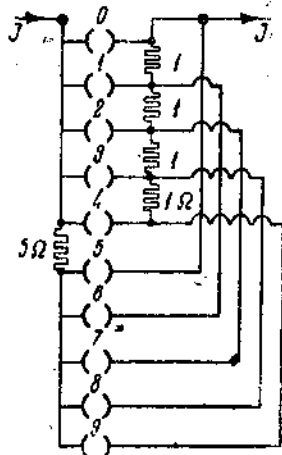


Рис. 10.

Снижение коэффициента самоиндукции катушек достигается применением бифилярной намотки (рис. 11), для чего проводник складывается петлей и в таком виде наматывается на цилиндрический каркас. При этих условиях токи, протекающие по двум соседним проводникам, всегда имеют встречное направление.

Однако бифилярная обмотка, особенно в катушках большого сопротивления, т. е. состоящая из значительного числа витков, обладает заметной собственной распределенной емкостью. В результате того, что между соседними проводниками, главным образом, между началом и концом обмотки, имеется относительно большая разность потенциалов. Снизить это емкостное явление значительно труднее, чем и объясняется довольно большое количество специальных конструкций катушек, предложенных с этой целью.

На рис. 12-а показана схема обмотки, предложенной Шапероном и усовершенствованной Вертгеймом. Она по существу представляет собою секционированную бифилярную обмотку.

Подбирая число секций S , S и количество витков в каждой, можно в значительной степени снизить емкостные явления как за счет сравнительно малой разности потенциалов между начальным и конечным проводами каждой секции, так и вследствие последовательного соединения емкостей, присущих отдельным секциям подобной обмотки. Для снижения температурных влияний на величину сопротивления обмоток их навивают на металлические трубчатые каркасы, обеспечивая тем самым хороший отвод тепла. Не плохие результаты дает также простая (унифилярная) обмотка на тонких, обычно самонесущих пластинках, представленная на рис. 12-б.

Здесь снижение самоиндукции обуславливается малой площадью сечения витков обмотки, а также малой емкостью — ничтожной разностью потенциалов между соседними витками обмотки. На рис. 12-в представлена обмотка Эйртона: она образована двумя параллельными проводниками.

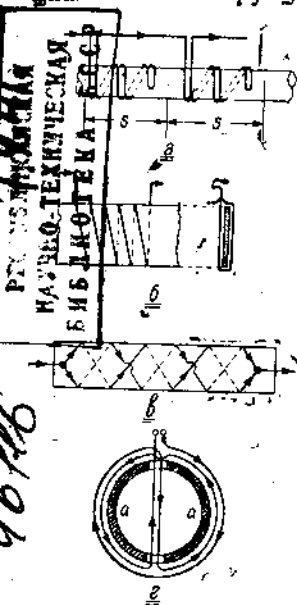


Рис. 12.

наматываемыми в противоположных направлениях на тонкой пластинке из изоляционного материала. В электрическом отношении этот тип обмотки очень хорош, но изготовление его затруднительно и требует много провода. Рис. 12-г поясняет идею устройства однослойной обмотки Кертиса: изолированный проводник навивается на фарфоровый цилиндр a — a , причем витки его пропускаются через прорезы на боковой поверхности цилиндра. Изготовление этой обмотки затруднительно, по качеству же она одна из лучших.

Наконец, в самое последнее время разрабатывается следующая конструкция: изолированный проводник a (рис. 13) впе-

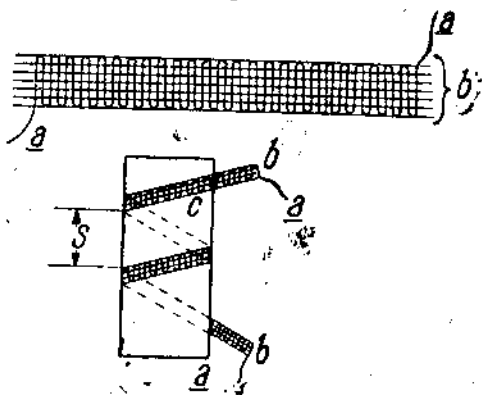


Рис. 13.

тается на ткацком станке в основу ленты b из хлопчатобумажных ниток, а сама лента наматывается на тонкую пластинку из фибры или другого изолирующего материала.

Подобная конструкция позволяет сбалансировать остаточные емкость и самоиндукцию намотки путем подбора шага S последней для довольно широких диапазонов изменения частоты тока.

Вместе с этим, подобная намотка довольно компактна и не сложна в изготовлении. В заключение необходимо еще раз подчеркнуть, что постоянство сопротивлений вторичных эталонов и в том числе описанных магазинов в сильной степени зависит от условий их работы. Перегрев обмоток током легко приводит магазин в негодность. Поэтому как правило, работая с магазинами, не следует пропускать через них ток свыше 0,1 А для секций в 100 Ω , свыше 0,03 А для секций по 1000 Ω и не более 0,01 А для катушек сопротивлением в 10.000 Ω и выше.

Рекомендуется не нагружать катушки магазинов свыше 0,5 W на каждую.

Примечание. Еще и до настоящего времени во многих лабораториях можно встретить эталоны сопротивлений, которыми пользовались до введения международных эталонов. К ним относятся:

а) Эталон Сименса (1860 года) — сопротивление, равновеликое сопротивлению столбика ртути длиной 100 см при поперечном сечении в 1 кв. мм и при температуре 0°C .

б) Легальный ом (1884 г.) — сопротивление, равновеликое сопротивлению ртутного столбика длиной в 106 см при поперечном сечении в 1 кв. мм и температуре 0°C .

в) Единица сопротивления, предложенная Британской Ассоциацией (В. А. В.), — сопротивление провода из отожженной красной меди сечением в 1 кв. мм и длиной около 50 м.

Числовые соотношения между этими единицами и международным омом даны в следующей таблице:

Эталон	Междунар. ом	Сименс	Легальн. ом	В. А. В.
1 Междунар. ом . .	1	1,063	1,0028	1,01356
1 Сименса	0,9407	1		
1 Легальн. ом . . .	0,9972		1	
1 В. А. В.	0,9866			1

2. Эталоны электродвижущей силы. Эталонном э.д.с. точно в один вольт мы до сих пор еще не располагаем и пользуемся взамен этого так называемыми нормальными элементами

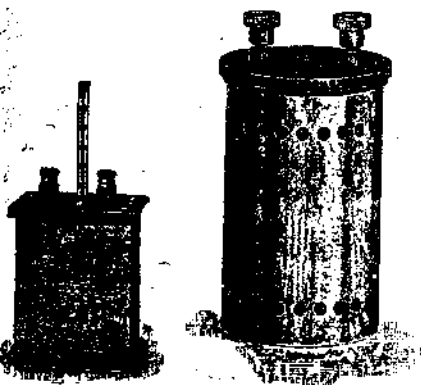


Рис. 14.

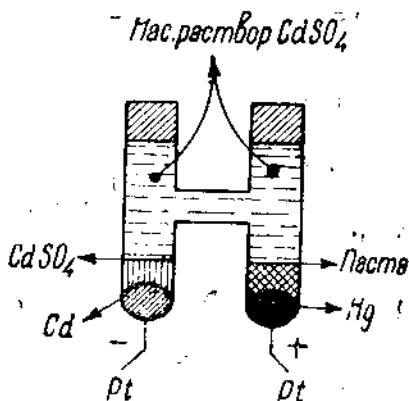


Рис. 15.

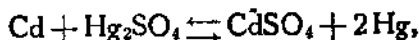
с э.д.с., отличной от одного вольта, но точно известной. Последнее достигается подбором составных частей элемента из строго определенных по химическому составу веществ, точной их дозировкой и строго однообразной конструкцией. От нормального элемента требуется наибольшее возможное постоянство его э.д.с., отсутствие в нем побочных химических реакций, точно известная зависимость его э.д.с. от температуры, ничтожно малая поляризация и наибольшее возможное постоянство его внутреннего сопротивления во времени.

Всем этим условиям в наилучшей мере удовлетворяет нормальный элемент Вестона, внутренний и наружный вид которого представлены на рис. 14—15. Способ изготовления элементов данного типа настолько точно разработан, что, будучи изготовлены в различных странах, они отличаются по своей э.д.с. не более чем на 0,00001 вольта.

Элемент этот состоит из H-образной стеклянной трубки, в дно которой впаяны платиновые электроды Pt. Отрицательным электродом элемента служит амальгама кадмия (Cd), поверх которой располагается слой кристаллов сернокислого кадмия CdSO_4 , служащих для поддержания постоянства концентрации раствора сернокислого же кадмия, заполняющего оба сосуда и стеклянный между ними патрубок. Положительным электродом служит ртуть Hg, над которой помещается паста из порошкообразной сернокислой закиси ртути, кристаллического сернокислого кадмия, небольшого количества ртути и насыщенного раствора сернокислого кадмия. Деполяризатором в элементе служит сернокислая закись ртути Hg_2SO_4 . Элемент этот имеет следующую схему:



При прохождении через него тока разложение проходит по формуле



т. е. никакой новой фазы в нем не образуется.

Э.д.с. элемента Вестона при 20°C равна $E = 1,0183 \text{ V}$; учет изменения ее в зависимости от температуры рекомендуется подсчитывать по формуле Вольфа

$$E_t = E_{20} - 406 \cdot 10^{-7} (t - 20^\circ) - 95 \cdot 10^{-8} (t - 20^\circ)^2 + 1 \cdot 10^{-9} (t - 20^\circ)^3.$$

Внутреннее сопротивление порядка 500—1000 Ω и весьма постоянно, если соблюдать правила пользования нормальными элементами, приводимые ниже.

В лабораториях часто можно встретить еще нормальный элемент Кларка, отличающийся от вышеописанного тем, что в нем кадмий заменен цинком. Его э.д.с. при 15°C равна 1,4324 V, но она сильно зависит от температуры. Кроме того внутреннее сопротивление этого элемента не отличается таким постоянством, как у элемента Вестона.

Фирма Вестон строит элементы, подобные описанному выше международному эталону Вестона с тем лишь отличием,

что в них раствор CdSO_4 готовится насыщенным при температуре 4°C ; благодаря этому температурный коэффициент элемента уменьшается. Однако, в противовес указанному преимуществу он обладает по сравнению с международным элементом менее устойчивой э.д.с. и меньшим внутренним сопротивлением.

Выборка нормальных элементов осуществляется помощью эталона ома и серебряного вольтметра.

При пользовании нормальными элементами необходимо, в целях сохранения постоянства их э.д.с., строго руководствоваться следующими правилами:

а) От этих элементов нельзя брать ток свыше $0,00005 \text{ A}$ или, что то же, их нельзя замыкать на сопротивление меньшее 200000Ω .

б) Их нельзя замыкать на длительный промежуток времени.

в) Их не рекомендуется взбалтывать и переворачивать.

г) При точных измерениях их следует помещать в ванну с вазелиновым маслом для поддержания постоянства температуры.

3. Эталон силы тока воспроизводится помощью серебряного вольтметра с электролитом в виде водного раствора азотнокислого серебра определенной концентрации. По времени и весовому количеству выделившегося при электролизе чистого серебра подсчитывается среднее значение силы тока.

4. Эталоны само- и взаимной индукции изготавливаются обычно в виде плоских катушек из изолированной тонкой проволоки, намотанной унифицированно на каркас из фарфора или мрамора. Для того, чтобы уменьшить зависимость сопротивления подобной катушки от частоты тока, проволоку для ее обмотки берут в виде жгутика (литцендрат), свитого из большого количества весьма тонких изолированных проводников, и в таком виде уже наматывают на остов катушки (рис. 16). Затем катушка погружается в расплавленный парафин на несколько часов, после чего высушивается. В эталонах взаимной индукции наматываются две независимые обмотки обычно с таким расчетом числа витков в каждой и ее размеров, чтобы коэффициент самоиндукции обеих обмоток был равен коэффициенту их взаимной индукции.

Для токов повышенной и высокой частоты катушкам необходимо придавать особую конструкцию и форму, дабы снизить величину собственной емкости обмоток. Изготавливаются



Рис. 16.

подобные катушки на коэффициент самоиндукции от 0,0001 и до 1 Н. Приводим данные этих эталонов:

L	0,0001	0,001	0,01	0,1	1,0 Н
Сопротивление	0,3	0,8	4,5	20	200 Ω
Сила тока (максим.)	2,0	1,0	0,6	0,5	0,2 А

Кроме постоянных эталонов само- и взаимной индукции применяются часто так называемые вариометры самоиндукции (рис. 17). Они состоят из

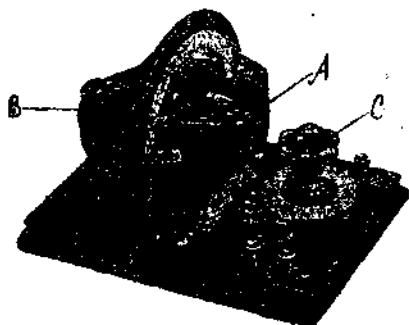


Рис. 17.

неподвижной катушки A , внутри которой может быть поворачиваема на тот или иной угол подвижная катушка b ; последняя снабжена указателем, отмечающим ее положение на лимбе неподвижной катушки. Подобная система позволяет плавно и в довольно широких пределах изменять L или M системы в зависимости от способа соединения обмоток и их взаимного расположения.

5. Эталоны емкостей обычно изготавливаются в виде конденсаторов с диэлектриком из слюды, как материала, обладающего большой диэлектрической постоянной и высокой диэлектрической крепостью наряду с весьма малыми потерями в диэлектрике.

Еще лучшими диэлектриками в смысле ничтожно-малых потерь (ничтожно малой удельной проводимости), были бы воздух, а также некоторые газы и масла. Однако, их диэлектрическая постоянная, а также крепость невелики, почему конденсатор с подобным диэлектриком был бы слишком громоздким. Последнее невыгодно еще в том отношении, что емкость подобного эталона по отношению к земле была бы велика, а это недопустимо в большинстве случаев измерительной практики.

Другие сорта твердых диэлектриков, как-то эбонит, стекло и даже парафинированная бумага непригодны для изготовления эталонов емкости, ибо в них не только наблюдаются большие потери энергии, но, существует еще зависимость их диэлектрической постоянной от частоты переменного тока.

Изготавливаются конденсаторы так: на тонкую пластинку диэлектрика a (рис. 18) кладется обкладка b в виде пластинки

меньшей площади из свинцового, оловянного или алюминиевого листа с выступом D . Поверх накладывается второй слой диэлектрика, далее вновь металлическая обкладка с выступом, обращенным уже в обратную сторону и т. д., сколько потребуется для получения заданной емкости. Затем все верхние выступы соединяют, образуя один зажим конденсатора, другой же зажим его получается в результате соединения всех нижних выступов. Собранный таким способом конденсатор высушивается, пресуется до получения требуемой емкости, погружается в ванну с расплавленным парафином и затем, после остывания парафина, закупоривается в ящичке с верхней доской из хорошего изолирующего материала, на которой укрепляются зажимы для включения конденсатора в цепь. Подобного рода конденсаторы различной емкости по несколько штук собираются

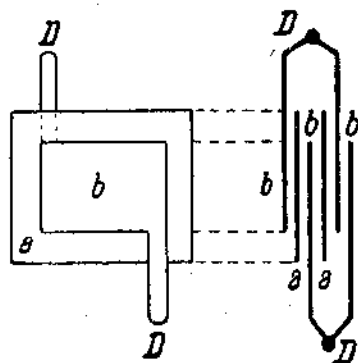


Рис. 18.

в одном ящике, образуя так называемый магазин емкостей, схема которого представлена на рис. 19. На верхней доске магазина укреплен ряд коротких и одна длинная ламель с отверстиями для штепселей, вставляя которые, мы можем взять на магазине той или иной величины суммарную емкость.

На рисунках 20 и 21 представлен общий вид подобных штепсельных магазинов, а на рисунке 22 магазин емкостей с рычажным переключателем взамен штепселей.

Схема магазина емкостей, представленная на рис. 23, позволяет простым переставлением штепселей из

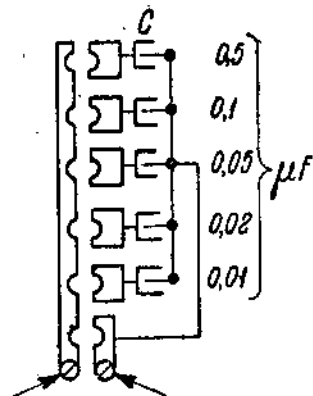


Рис. 19.

одних отверстий между ламелями в другие соединять отдельные конденсаторы в параллель и последовательно, т. е. получать большое число комбинаций для суммарной емкости всего магазина.

Если, например, вставить штепселя, как показано на рисунке, то емкость магазина в отношении внешней его цепи образуется конденсаторами C_1 и C_2 в последовательном соединении, а параллельно к ним обоим окажется включенным конденсатор C_3 , т. е. общая емкость магазина определится, как

$$\frac{C_1 + C_2}{2} + C_3.$$

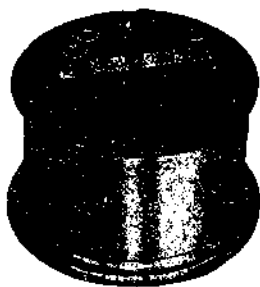


Рис. 20.

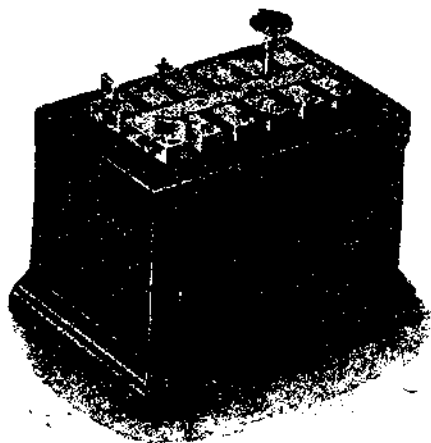


Рис. 21.

Кроме эталонных конденсаторов, одиночных и магазинов, посредством которых можно изменять емкость скачками, изготовляются еще конденсаторы переменной, плавно меняю-



Рис. 22.

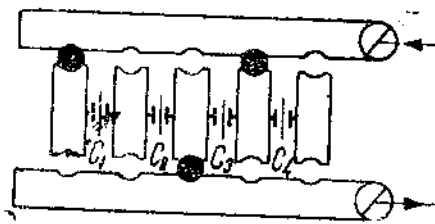


Рис. 23.

щейся емкости с диэлектриком в виде воздуха или высоко-сортного вазелинового масла. В них имеется одна система обкладок в виде ряда неподвижно закрепленных плоских металлических полудисков. В промежутках между ними может вращаться вторая система полудисков, скрепленных на общей оси, снабженной рукояткой.

В зависимости от того, насколько подвижные диски введены в промежутки между неподвижными, емкость такого конденсатора различна, и ее изменение можно производить плавно, руководствуясь положением указателя (скрепленного с подвижной системой) на шкале подобного прибора. На рис. 24 представлен общий вид подобного конденсатора.

6. Эталон магнитного потока.

Принцип действия прибора этого рода основан на возникновении в.д.с. индукции при пересечении некоей катушкой, с определенным числом витков и определенных размеров, магнитного потока, образованного током известной силы, протекающим по виткам неподвижной, также эталонированной катушки без сердечника. По величине силы тока, размерам и числу витков катушек легко подсчитать величину того магнитного потока, который изменится в контуре подвижной катушки при быстром ее повороте в пределах этого поля. Применяются подобные эталоны преимущественно для градуировки баллистических гальванометров на магнитный поток.



Рис. 24.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ I.

1. Почему в практике мы взамен абсолютных единиц пользуемся практическими, и в каких числовых соотношениях они между собою находятся?

2. Перечислите основные практические единицы.

3. Что такое эталон?

4. Дайте определение международных ампера, ома и вольт.

5. Почему при определении международного ома взамен длины ртутного столба взята масса ртути?

6. От чего зависит возможность перехода от международных единиц к абсолютным?

7. Что такое нормальное сопротивление?

8. Почему для изготовления нормальных сопротивлений предпочитают пользоваться манганином, а не константаном?

9. Какими преимуществами обладают декадные магазинные сопротивления по сравнению с обыкновенными?

10. Какие меры применяются для снижения самоиндукции и распределенной емкости катушек у магазинных сопротивлений?

11. Перечислите правила пользования магазинными сопротивлениями.

12. Перечислите требования, предъявляемые к эталонам в.д.с.

13. Что служит деполяризатором в нормальных элементах?

14. Перечислите правила пользования нормальными элементами.

15. Каким способом снимается собственная емкость обмотки эталонной самоиндукции и уменьшается зависимость коэффициента их самоиндукции от частоты тока?

16. Что такое вариометр само- или взаимной индукции?

17. Какие требования предъявляются к диэлектрикам эталонов емкости?

18. Поясните принцип устройства плавно изменяющихся эталонов емкости.

19. Что такое магазин емкости?

20. Поясните принцип устройства эталонов магнитного потока.

ПРИЛОЖЕНИЕ К ГЛАВЕ 1.

Литцендрат — провод из большого числа весьма тонких проводничков, покрытых эмалью или изоляционным лаком и сплетенных в виде жгута. Провод такой конструкции почти не изменяет своего сопротивления при изменении частоты тока (ма о проявляется скин-эффект).

Приводим данные эталонов самоиндукции по нормам Германского Физ. Технич. Института.

L в генри	Число проводов литцен- драта	Сечение отдель- ных про- волоков в мм^2	Число витков	Диам. внут- рен. в см	Диам. на- ружн. в см	Сопро- тивл. в Ω	Емкость в $\mu\text{ф}$ F
0,1	25	0,1	1088	3,3	6,6	36	42
0,01	108	0,07	350	3,1	6,2	5,1	41
0,001	108	0,07	137	2,1	4,2	1,2	27
0,0001	100	0,1	51	1,5	3	0,17	24

Таблица взята из книги проф. М. А. Шателен: „Руководство к лабор. занятиям“.

В следующей таблице приводятся данные некоторых диэлектриков.

Материал	Толщина в мм	Диэлектр. крепость в kV на см	Диэлектр. постоянная
Воздух	1,0	43,6	1.00058
Парафинир. бумага	0,1	400—600	2—2,5
Слюда	0,1	1150	6—9
Эбонит	1,0	500	2—3
Стекло	1,0	285	5—7
Масло		60—100	2—5

Вспомогательная аппаратура.

§ 3. Источники электрической энергии, реостаты, переключатели, коммутаторы и ключи.

1. Источники тока. При измерениях на постоянном токе в качестве источника рекомендуется пользоваться током от аккумуляторной батареи или одиночных аккумуляторов соответствующей емкости. Это гарантирует постоянство рабочего напряжения и снижает ошибки наблюдений, а, следовательно, и ошибки измерения. При этом необходимо помнить, что внутреннее сопротивление этого рода источников ничтожно мало, почему, до их включения в измерительную схему, необходимо по данным цепи подсчитать величину того балластного сопротивления, которое необходимо ввести в цепь для установления в ней силы тока допустимой величины. Использование осветительной или технической сети для питания измерительных схем в большинстве случаев не обеспечивает постоянства напряжения, почему при ответственных измерениях пользование названными источниками тока не рекомендуется.

Для питания измерительных схем переменным током следует предпочесть такие источники, которые обеспечивают синусоидальную форму кривой тока. Этому условию в большей или меньшей мере удовлетворяют электромагнитный и микрофонный зуммера, а также описываемая далее динамо повышенной частоты. Еще лучшие результаты получаются при пользовании зуммером, который позволяет регулировать частоту даваемого им тока, что представляется важным при исследованиях зависимости данной величины от частоты тока. Существуют также ламповые и машинные генераторы значительных мощностей, применяемые по преимуществу в специальных областях электрических измерений.

Электромагнитный зуммер для малых мощностей дает почти синусоидальный ток порядка 800—900 периодов в секунду. Схема его представлена на рис. 25, где A — электромагнитный прерыватель, присоединенный своей обмоткой параллельно части B первичной обмотки трансформатора T ; C — вторичная обмотка трансформатора, подключаемая к измерительной схеме. Прерыватель зуммера представляет собою небольшую металлическую пластинку a с закраинами, к которым

припаяна платиновая проволока h , касающаяся платинированного конца регулировочного винта b . Пластика закреплена на двух параллельно натянутых проволочках c, c , под которыми помещается электромагнит A . Первичная обмотка трансформатора питается от источника постоянного тока напряжением 6 вольт, или 24 вольта, но в этом последнем случае в ее цепь вводится балластное сопротивление R .

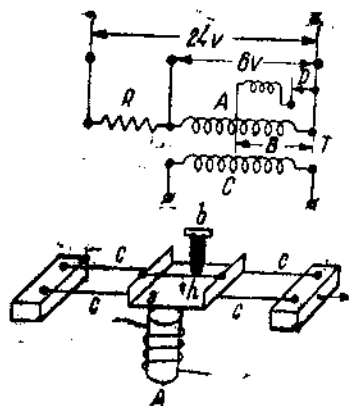


Рис. 25.

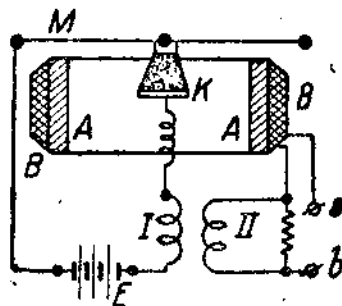


Рис. 26.

Микрофонный зуммер (рис. 26) состоит из круглой металлической мембраны M , к центру которой прикреплен микрофон K , в виде мешочка с угольными зернами. Микрофон окружается стальным кольцом A с навитой на нем намагничивающей обмоткой B в последовательном ее соединении со вторичной обмоткой II трансформатора, подключаемой к измерительной схеме. Первичная обмотка I трансформатора, соединенная последовательно с микрофоном и мембраной, питается от батареи E из 2—3 аккумуляторов. Если приблизить мембрану к краям стального кольца, то сопротивление микрофона уменьшится, ток от батареи возрастет и индуктирует во вторичной обмотке трансформатора э.д.с. Если эта обмотка замкнута на измерительную схему, то в ней появляется индуктированный ток, усиливающий намагничение стального кольца. Благодаря этому мембрана еще скорее притягивается к кольцу, и когда ток от батареи установится по силе, то вторичная э.д.с. станет равной нулю, притяжение мембраны ослабнет, и она отойдет от кольца. Это повлечет за собою увеличение сопротивления микрофона, изменение силы тока в первичной цепи трансформатора и, как результат, возникновение во вторичной его цепи индуктированного тока и т. д.

Форма кривой вторичного тока этого прибора сильно зависит от правильного подбора напряжения батарей и от величины сопротивления измерительной схемы (последнее не должно быть очень малым).

Ламповые зуммера и генераторы применяются по преимуществу в технике специальных измерений и потому здесь не рассматриваются.

Принцип действия динамо повышенной частоты поясняется рис. 27, где A — железное зубчатое колесо, вращаемое с помощью электродвигателя перед полюсами электромагнита $M-M$. На полюсах навиты две обмотки возбуждения $a-a$, питаемые постоянным током. При вращении колеса, вследствие изменения магнитного сопротивления в междужелезном пространстве этой динамо, изменяется и магнитный поток электромагнита. Благодаря этому в обмотке b индуцируется переменная э.д.с., частота которой зависит от скорости вращения колеса. Подобные динамо строятся фирмой Сименс трех типов: на частоты от 450 до 1800 периодов в секунду, от 900 до 3600 и, наконец, от 750 до 5000 периодов. Общий вид подобной динамо представлен на рис. 28.

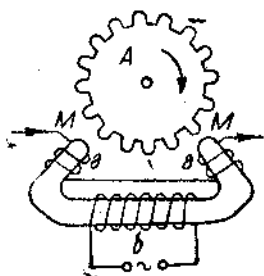


Рис. 27.

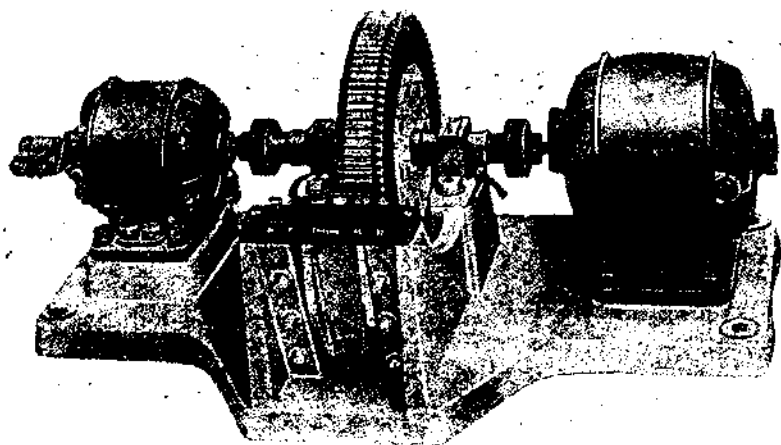


Рис. 28.

2. Реостаты. В измерительных схемах реостаты применяются для регулировки силы тока или же в качестве потенциометра, т. е. реостата, подключаемого полностью к зажимам источника тока с тем, чтобы от некоторой его части можно было подвести к измерительной схеме то или иное по величине напряжение (рис. 29). В зависимости от величины регулируемой силы тока и от того, необходимо ли эту регулировку осуществлять плавно или через определенные интервалы, — реостаты делятся на плавно меняющиеся по сопротивлению и секционные, т. е. меняющиеся скачками.

К первым относятся: реохорды, агометры и реостаты типа Рустрат. Реохорд представляет собою тонкую калиброван-

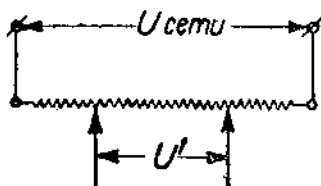


Рис. 29.

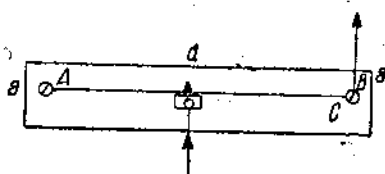


Рис. 30.

ную проволочку AB (рис. 30), закрепленную в натянутом состоянии между двумя металлическими стойками a, a , вделанными в деревянную рейку C . Вдоль проволоки может передвигаться подвижной металлический контакт d , утяжеленный для обеспечения хорошего соединения с проволокой. В зави-

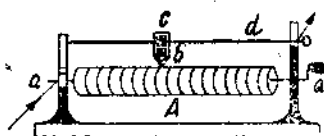


Рис. 31.

симости от положения этого контакта, в измерительную цепь вводится больший или меньший отрезок проволоки. Реохорды строятся на незначительную силу тока; для токов же порядка от $\frac{1}{2}$ до 10 А служат агометры (рис. 31). Последние представляют собою цилиндр A из изоляционного материала, по наружной

поверхности которого сделана винтообразная нарезка с натянутой в ней голой проволокой. При поворотах цилиндра вокруг оси $a-a$ по поверхности проволоки перемещается металлический контактный ролик b с движком c , скользящим вдоль по металлическому стержню d , вводя таким образом в цепь тока ту или иную часть проволоки.

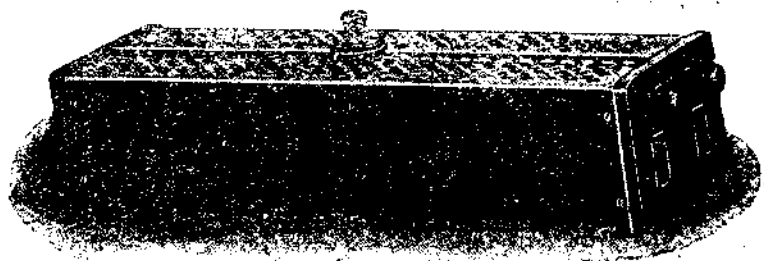


Рис. 32.

Более распространенным типом реостатов с почти плавно меняющимся сопротивлением являются реостаты системы Рус-трат, изображенные на рис. 32—34. Они устроены подобно агометрам, но изменение сопротивления в них достигается не вращением цилиндра с намотанной на нем голой проволокой, а передвижением пружинного контактного движка вдоль по направляющей металлической штанге. Схемы включения подобного реостата в цепь представлены на рис. 35,

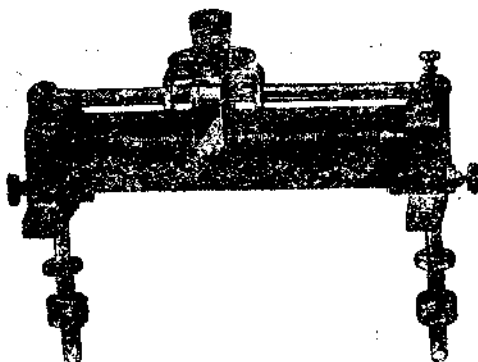


Рис. 33.

где *a* — включение реостата как простого регулировочного сопротивления, *b* — включение по схеме шунта и *e* — включение по схеме потенциометра (делителя напряжения).

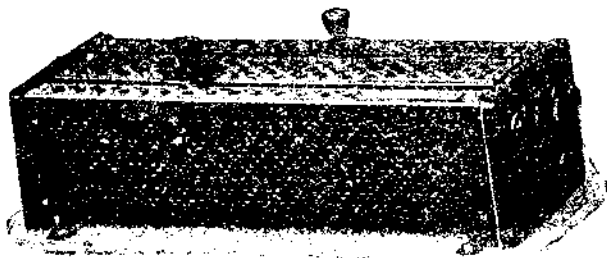


Рис. 34.

Буквой E обозначен источник тока, буквами b —с проволока реостата, d —движок, P —приемник и A —амперметр. Каждой из этих схем присуща своя область применения, так например, схемой a выгодно пользоваться тогда, когда сопротивление реостата примерно в 5 раз больше суммарного сопротивления приемника и источника тока; в этом случае возможны наиболее широкие пределы регулировки силы тока в цепи приемника.

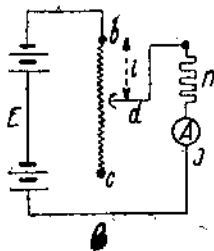


Рис. 35-а.

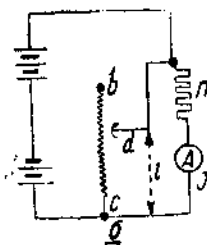


Рис. 35-б.

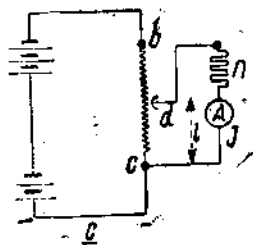


Рис. 35-с.

Схема b выгодна, когда сопротивление реостата немногим больше меньшего из сопротивлений (приемника или источника), но она опасна в смысле возможности почти накоротко замкнуть источник.

Схема c применима для слабых токов; если сопротивление приемника значительно больше сопротивления самого реостата то передвигая движок от c к b , мы будем плавно увеличивать напряжение, подводимое к приемнику (пропорционально отношению длин проволоки реостата от точки c до движка).

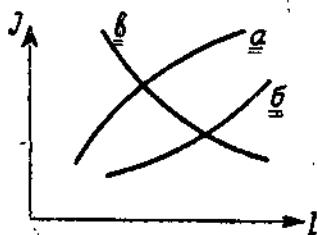


Рис. 36.

На диаграмме рис. 35 представлены зависимости силы тока в цепи приемника P от положения движка d , т. е. от длины l той части проволоки реостата, которая отмечена на схемах рис. 35.

Вопросы. 1) Почему в схеме c сопротивление реостата должно быть мало сравнительно с сопротивлением приемника?

2) Что случится в схеме c , если резко уменьшить сопротивление приемника?

Из приведенных схем наибольшим распространением пользуются схемы a и c ; первая для относительно больших сил тока, а вторая при слабых токах.

Реостаты Рустрата строятся одиночные и двойные; последние состоят из двух одиночных реостатов, смонтированных вместе, с выведенными наружу пятью зажимами: одним от общего движка и 4 от проволок обоих реостатов. Возможные схемы включения подобного реостата представлены на рис. 37.

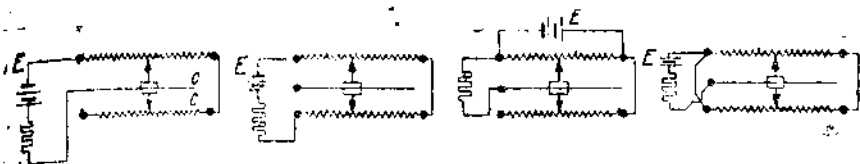


Рис. 37.

Иногда двойные реостаты делаются из двух спаренных реостатов с проволоками различного сечения; более толстая из них служит для грубой, а тонкая для более плавной регулировки. Эти последние реостаты снабжаются двумя отдельными движками.

Реостаты Рустрата строятся на весьма различные по величине сопротивления, от долей ома и до 50000 Ω , и на силы тока от долей до 10—12 ампер. Соответственно этому на каждом таком реостате отмечается его сопротивление (полное) и та максимальная сила тока, больше которой пропускать через реостат нельзя во избежание его перегрева и перегорания. Проволока в таких реостатах берется из нихрома, материала, обладающего значительным удельным сопротивлением (порядка 5—6 Ω) и весьма прочного.

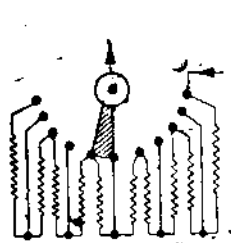


Рис. 38.

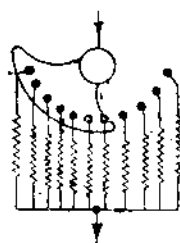


Рис. 39.

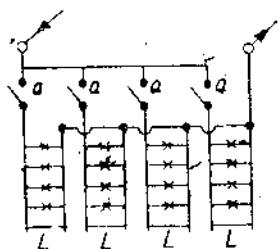


Рис. 40.

К числу реостатов с сопротивлением, меняющимся не плавно, а скачками, относятся реостаты секционные и ламповые. Первые состоят из ряда проволочных спиралей, включаемых последовательно, параллельно или смешанно в измерительную

цепь. Переключение сопротивлений в них осуществляется помощью подвижного рычага подобно тому, как это изображено на рис. 38 для реостата с последовательным и на рис. 39—с параллельным соединением секций. Эти реостаты строятся обычно на силы тока порядка до 20—50 А. (см. рис. 41).

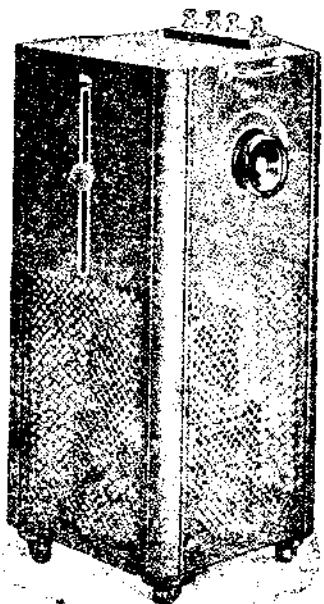


Рис. 41.

Ламповые реостаты весьма распространены в лабораторной практике потому, что они практически безиндукционны, а это весьма важно при измерениях в цепях переменного тока. Схема подобного реостата представлена на рис. 40, где L —по преимуществу угольные лампы накаливания, соединяемые всегда параллельно между собою в каждом ряду; ряды ламп, в свою очередь, соединяются параллельно помощью рубильников или выключателей α . Подобная схема позволяет изменять сопротивление реостата в довольно широких пределах,—начиная с сопротивления, соответствующего одной лампе, и последовательно

уменьшая его в зависимости от числа ламп, включаемых в параллель. Последнее достигается не только замыканием рубильников α , т. е. единовременным введением в цепь целой

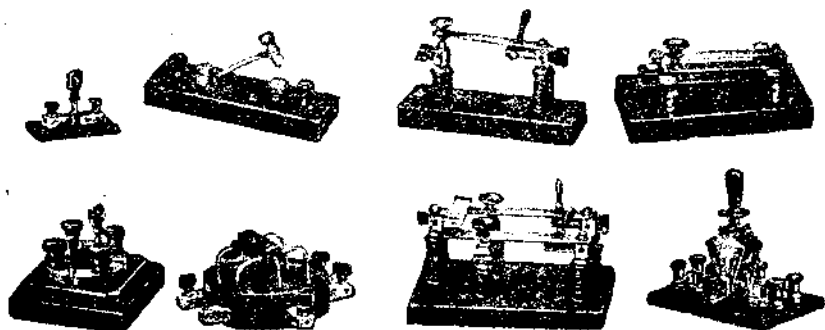


Рис. 42.

группы ламп, но также и включением одиночных ламп (звончением их в патрон).

3. Переключатели и ключи представляют собою чисто вспомогательную аппаратуру, имеющую целью быстро и удобно замыкать или размыкать цепь тока, а также коммутировать направление тока в цепи. На рис. 42 представлен их общий вид, а на рис. 43 и 44—общий вид и схема коммутатора направления тока, называемого

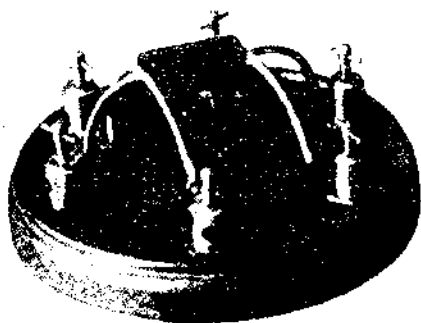


Рис. 43.

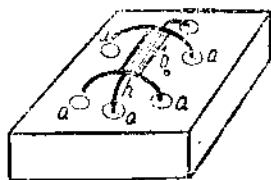
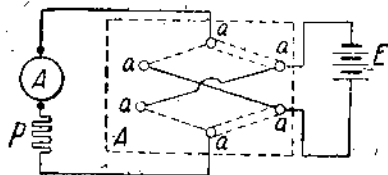


Рис. 44.

в лабораторном обиходе „паучок“. Он состоит из пластинки изолирующего материала с шестью лунками *a*, в которые налита ртуть.

Сверху вставляется паучок, образованный рукояткой *b* из изоляционного материала, к которой с торцов прикреплено по металлической вилке *h* с трех зубьях. Если паучок удерживать в вертикальном положении, то крайние зубья вилок, как более короткие, не будут касаться ртути в лунках, и цепь будет разомкнута. Если же наклонить паучок в ту или другую сторону, то соответствующие зубья вилок погрузятся в ртуть, и цепь будет замкнута. Если крайние лунки соединить накрест металлическими пластинками (не касающимися друг друга), то, наклоня паучок из одного крайнего

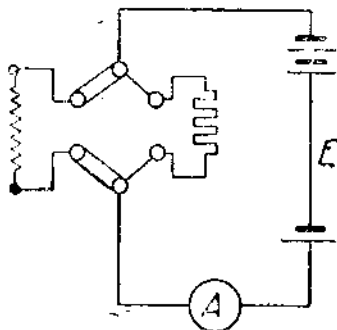


Рис. 45.

положения в другое, мы, как это явствует из схемы, будем изменять направление тока в цепи потребителя Р. Если же соединительные пластинки вынуть, то подобный коммутатор, будучи включен по схеме рис. 45, позволит поочередно вводить в цепь источника то один, то другой из приемников тока, например, измеряемое или эталонное сопротивление.

ГЛАВА III.

Системы технических электроизмерительных приборов.

§ 4. Общие замечания об электроизмерительных приборах и классификация их по принципу действия.

В настоящей главе мы рассмотрим только основные электроизмерительные приборы, т. е. приборы, предназначенные для измерения силы тока и напряжения. Что же касается приборов для измерения электрической мощности и работы, сопротивлений, частоты тока, количества электричества и т. д., а также измерительных устройств, представляющих собою комбинацию нескольких приборов со вспомогательной аппаратурой, смонтированных вместе и предназначенных для более сложных измерений и испытаний, то мы их рассмотрим во втором и третьем отделах курса попутно с изучением методики электрических измерений.

Кроме того, в настоящем курсе не будут рассматриваться приборы для абсолютных измерений, т. е. таких, при которых величина, подлежащая определению, находится не путем непосредственного сравнения ее с другой величиной того же рода (эталон), а вычисляется по предварительно найденным или измеренным величинам иного рода, связанным с нею определенными числовыми соотношениями. Таковы, например, измерение потенциала проводника по измеренной силе притяжения друг к другу заряженных пластин (квадрантный электрометр Томсона), измерение коэффициента самоиндукции катушки по ее геометрическим размерам и числу витков, измерение силы тока при помощи тангенс-гальванометра или вольтметра и т. д.

В электроизмерительной технике применяются почти исключительно не абсолютные, а вторичные приборы, градуированные непосредственно в измеряемых ими единицах

(амперах, вольтах, ваттах и т. д.) Они наиболее удобны в обращении, не требуют вычислений и непосредственно отмечают измеряемую величину.

Действие этих приборов основано на том или ином из известных нам проявлений электрического тока: магнитном, электродинамометрическом, тепловом, индукционном и т. д. Измеряемая ими величина, по преимуществу сила тока и значительно реже разность потенциалов, вызывает некоторое механическое усилие, под влиянием которого подвижная система прибора стремится переместиться (обычно вращательно и реже поступательно) и передвигает связанный с нею указатель (стрелку) вдоль по шкале прибора, на которой нанесены деления.

Перемещение подвижной системы прибора сопровождается некоторым противодействием со стороны ее конструктивных элементов (трение оси в подшипниках, упругое противодействие специальных пружинок и т. п.). Когда момент вращения, под влиянием которого подвижная система выходит из положения покоя, уравнивается с моментом противодействующим, то наступит равновесие, и указатель, скрепленный с подвижной системой прибора, остановится против некоторого деления шкалы, позволяя тем самым произвести отсчет измеряемой величины.

В зависимости от системы приборов, их подвижная часть может быть образована: катушкой, обтекаемой током; железным сердечником в виде пластинки или стержня, намагничиваемых током; металлической пластинкой, заряжаемой статическим электричеством; тонкой металлической нитью, прогреваемой током; легким алюминиевым колоколообразным цилиндром, который, находясь в зоне вращающегося магнитного поля, вовлекается последним в движение, и т. д.

В зависимости от того, на каком из известных нам проявлений электрического тока основано действие данного прибора, различаются следующие системы приборов:

а) Магнитоэлектрическая: в них измеряемый ток заставляют протекать по виткам подвижной катушки, помещенной в междуполюсном пространстве постоянного магнита. В результате воздействия поля магнита на проводник с током, катушка отклоняется из положения покоя, и по величине этого отклонения можно судить о силе тока.

б) Электродинамическая: взамен постоянного магнита имеется неподвижная катушка, обтекаемая током. Подвижная катушка в результате взаимодействия токов поворачивается и тем самым отмечает величину измеряемого тока.

в) Электромагнитная (а также вибрационная), основанная на явлении намагничивания подвижной железной пластинки током, протекающим по виткам неподвижной катушки.

г) Тепловая, основанная на удлинении тонкой, нагреваемой током металлической нити.

д) Термоэлектрическая, основанная на термоэлектрическом явлении.

е) Индукционная, в которой создается вращающееся или бегущее магнитное поле, вызывающие перемещение подвижной системы прибора.

ж) Электростатическая, основанная на силах взаимодействия статически заряженных неподвижных и подвижных пластинок, и наконец,

з) Тип приборов с подвижной магнитной частью, находящейся в поле, образованном электрическим током, и отклоняющейся в результате взаимодействия полей тока и подвижных магнитов.

Каждой из перечисленных систем присущи свои свойства, достоинства и недостатки, а, следовательно, и своя область применения. На этом мы остановимся в дальнейшем, теперь же отметим все то, что является общим для большинства приборов как в конструктивном отношении, так и в смысле их характеристики.

§ 5. Общие требования к приборам и общие детали их устройства.

К техническим электроизмерительным приборам практикой предъявляется следующий ряд требований:

а) Прибор должен допускать непосредственный отсчет измеряемой им величины в практических единицах.

б) Передвижение подвижной части прибора должно происходить аperiодически, а не колебательно.

в) В конструктивном отношении прибор должен быть прост, надежен и удобен в обращении, постояен в смысле точности его показаний и, по возможности, независим от воздействия внешних факторов, как то: внешних магнитных и электростатических полей, температурных влияний и т. п.

г) Прибор, по возможности, должен иметь равномерную шкалу.

К числу общих деталей устройства приборов относятся: способ укрепления подвижной системы прибора, способ образования в нем момента, противодействующего вращению,

шкалы приборов, системы указателей, и типы успокоительных приспособлений для подвижной части приборов.

Как было уже отмечено выше, у каждого измерительного прибора имеется подвижная часть, которая под действием измеряемого электрического явления (обычно силы тока) перемещается. Если бы это перемещение не встречало абсолютно никакого противодействия, то таким прибором невозможно было бы производить измерения, так как предельный угол поворота или предел перемещения его подвижной части был бы всегда одинаков, независимо от силы измеряемого подобным прибором явления.

Таким образом, в каждом приборе должна существовать какая-то противодействующая сила и притом не зависящая от измеряемого прибором явления. Тогда, в момент равновесия отклоняющей и противодействующей сил подвижная часть прибора, отклонившись, займет определенное положение покоя в соответствии с величиною измеряемого явления.

Известное противодействие повороту подвижной части оказывает ее ось, упирающаяся в подпятники своими цапфами (см. рис. 46). Ось делается обычно из тонкой стальной проволоки диаметром 0,3—3 мм с цапфами, скошенными на конце с углом растворения около 60° . Однако, противодействие, оказываемое подвижной части ее осью, сознательно снижают до возможного минимума, так как оно

не может быть сделано пропорциональным углу поворота системы прибора. В этих видах подпятник делается из твердых сортов камня (агат, рубин, сапфир и даже алмаз), а у приборов более простых и де-

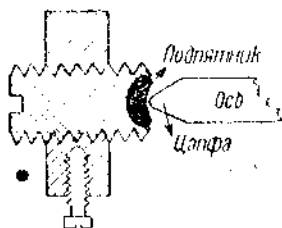


Рис. 46.

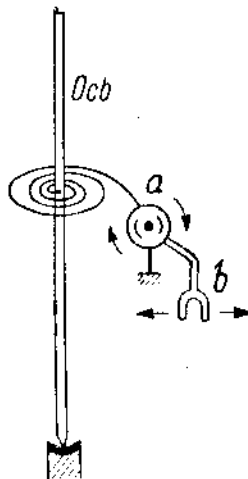


Рис. 47.

шевых из твердой стали или из фосфористой бронзы.

Для образования же противодействующего момента применяются следующие способы:

а) Упругие свойства спиральных пружинок, один конец коих прикрепляется к оси подвижной части, а другой к особому держателю в виде небольшого диска а (рис. 47)

с поводком b , передвигая который, можно усиливать или ослаблять степень закручивания пружины и тем самым регулировать в известных пределах величину противодействующей силы.

Пружинки делаются из фосфористой бронзы, нейзильбера или серебра с примесью кремния и так изготавливаются, чтобы при их закручивании и раскручивании (в небольших, конечно, пределах) оказываемое ими противодействие было пропорционально углу поворота подвижной системы прибора, причем пропорциональность эта не должна нарушаться при колебаниях температуры.

б) Сила тяжести противовеса A (рис. 48), скрепленного с подвижной системой прибора F ; при пропускании измеряемого тока по обмотке катушки C железная пластинка F втягивается внутрь ее, причем противовес A жестко с нею скрепленный, отклоняется вверх и влево, оказывая тем самым противодействие, увеличивающееся по мере перемещения пластинки. Такого рода устройство применяется в приборах наиболее дешевых и не рассчитываемых на особую точность показаний.

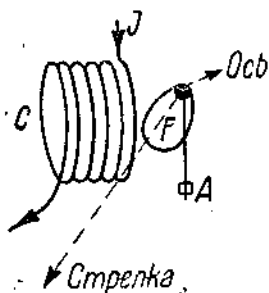


Рис. 48.

в) Электродинамическое взаимодействие между двумя катушками прибора—подвижной и неподвижной, обтекаемыми током.

Шкалы приборов изготавливаются обычно в виде латунной или цинковой пластинок, наружная поверхность которых оклеивается бумагой с нанесенными на ней делениями. Указатель (стрелка) делается из тонкостенной алюминиевой трубки, концу которой придают одну из форм, представленных на рис. 49. Два последних типа (с и d) применяются для точных (прецизионных) приборов, шкала которых снабжается зеркальцем, расположенным под делениями, с той целью, чтобы при отсчете показаний прибора избегнуть ошибки по причине параллакса. Для этого, в момент отсчета, надо так расположить глаз, чтобы лезвие или нить стрелки закрывали свое изображение в зеркальце (см. также рис. 62).

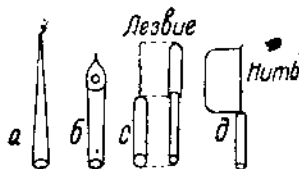


Рис. 49.

Технические электронизмерительные приборы для быстроты и удобства отсчета показаний должны быть аperiодичны. т. е. подвижная часть их под воздействием вращающего момента должна, не совершая колебаний, быстро отклониться на угол, соответствующий измеряемой величине. Однако, подобный характер поворота подвижной системы приборов несвойствен некоторым их системам; подвижная часть их, прежде чем занять положение покоя, совершает повторный ряд колебаний со все уменьшающейся амплитудой, пока не остановится в отклоненном положении.

Это задерживает отсчет, а при периодических и хотя бы даже незначительных изменениях измеряемой прибором величины делает точный отсчет невозможным. Для устранения

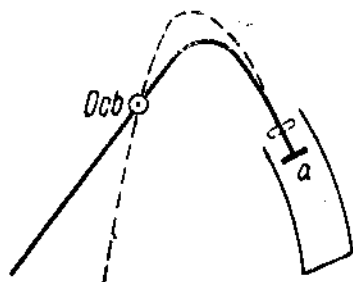


Рис. 50.

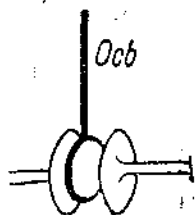


Рис. 51.

этого подвижные части приборов связывают с особыми приспособлениями, называемыми „успокоителями“ или „демпферами“, которые, не оказывая значительного противодействующего момента повороту подвижной системы прибора, делают его аperiодичным.

Успокоители строятся следующих систем:

а) Воздушные: подвижная часть прибора снабжается легким поршнем α , движущимся при ее поворотах в камере и сжимающим или разрезающим находящийся там воздух (рис. 50).

Иногда поршень заменяется легкой слюдяной или металлической пластинкой, скрепленной с осью подвижной системы и поворачивающейся между двумя расположенными по бокам ее неподвижными пластинками (рис. 51).

Более совершенным воздушным успокоителем является представленный на рис. 52 так называемый коробчатый

успокоитель. Он состоит из легкого алюминиевого крылышка b , скрепленного с продолжением стрелки a прибора. При поворотах стрелки крылышко перемещается внутри металлической коробки A , успокаивая тем самым колебания подвижной системы прибора.

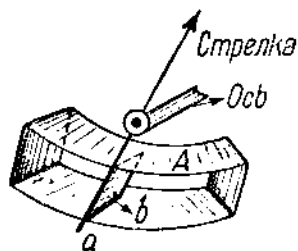


Рис. 52.

упомянутого магнитного поля подвижная система прибора демпфируется. На рис. 53 представлен очень распространенный тип подобного успокоителя:

$N-S$ — постоянный магнит; A — алюминиевый диск, скрепленный с обратным концом стрелки прибора.

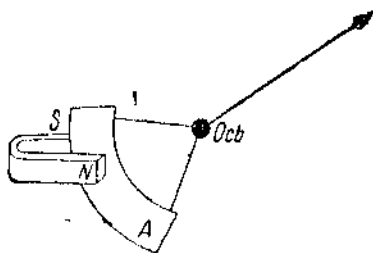


Рис. 53.

в) Масляные или жидкостные успокоители, которые отличаются от воздушных тем, что в них сжимающейся или разрежающейся средой являются легкие сорта масла, глицерин или жидкость. Применяются они, главным образом, для приборов регистрирующих, в которых нарочно создается большой вращающий момент.

г) Электромагнитные успокоители, представляющие собою несколько замкнутых накоротко или на небольшое сопротивление витков проволоки, навитых на подвижную часть прибора. При перемещении последней в магнитном поле прибора, в этих витках индуцируется ток, порождающий свое поле, которое взаимодействует с полем прибора и демпфирует подвижную систему.

Переносные приборы снабжаются особым приспособлением для затормаживания их подвижной системы во время переноски или пересылки (аретир).

По нормам СССР на каждом измерительном приборе должны быть сделаны фабричные пометки, указывающие систему

прибора (соответственные обозначения будут указаны при рассмотрении систем); род тока, для которого предназначен прибор; способ установки его во время измерения; испытательное напряжение, которым испытывалась изоляция частей прибора и его класс. Эти условные обозначения здесь приводятся.

Род тока	Способ установки	Изоляция
— постоянный	↑ вертикальный	 2 kV
~ переменный	↗ наклонный 60 под углом 60°	Изоляция испытана напряжением в 2000 V
≈ постоянный и переменный	← горизонтальный	

§ 6. Общие свойства приборов.

Электроизмерительной практикой к приборам предъявляется ряд требований, нормирующих их свойства и область применения. К числу общих свойств, характеризующих приборы любой системы, относятся:

а) Точность показаний прибора, т. е. степень приближения его показаний к истинному значению измеряемой им величины, или присущая данному прибору погрешность показаний, определяемая как разность между отсчетом ее данным прибором и истинным значением измеряемой величины. Величину этой погрешности, согласно нормам на электроизмерительные приборы, принято выражать в процентах от номинального показания прибора, т. е. от той максимальной силы тока, напряжения и т. д., на которую данный прибор построен.

В СССР, равно как и в других странах, узаконены нормы погрешности для электроизмерительных приборов, согласно которым они делятся на три класса.

К первому классу относятся наиболее точные (прецизионные) приборы, разделяющиеся в свою очередь на два подкласса: приборы лабораторные (образцовые) и приборы контрольные.

Ко второму классу относятся технические приборы, устанавливаемые по преимуществу на распределительных досках ответственного назначения.

К третьему классу относятся приборы, не предназначенные для ответственных измерений и устанавливаемые на досках второстепенного значения.

В соответствии с этим подразделением, нормами СССР предусматриваются наибольшие допустимые погрешности показаний приборов всех трех классов, приводимые в нижеследующей таблице (основные погрешности).

Приборы	I класс		II класс	III класс
	Лабораторные	Контрольные	Технические	
Вольтметры магнитоэлектр. системы	$\pm 0,2$	$\pm 0,3$	$\pm 1,0$	$\pm 2,0$
Вольтметры других систем	$\pm 0,3$	$\pm 0,5$	$\pm 2,0$	$\pm 4,0$
Амперметры магнитоэлектр. систем	$\pm 0,2$	$\pm 0,3$	$\pm 1,0$	$\pm 2,0$
Амперметры других систем	$\pm 0,4$	$\pm 0,6$	$\pm 2,0$	$\pm 4,0$
Ваттметры	$\pm 0,3$	$\pm 0,5$	$\pm 2,0$	—

По нормам Союза Германских Электриков, несколько более строгим, нежели установленные в СССР, приборы делятся на четыре класса, обозначаемые буквами: *E*, *F*, *G* и *H*. Первые два класса (*E* и *F*) соответствуют принятому у нас подразделению на приборы лабораторные и контрольные, остальные являются техническими приборами.

Погрешность показаний прибора считается положительной, если разность между показанием прибора и истинным значением измеряемой им величины положительна; в противном случае, величина погрешности отрицательна. Например, прибор показал 3,75 А, действительное же значение силы тока было 4 А, тогда погрешность равна — 0,25 А.

Подводя итоги измерения и желая ввести в полученный результат ошибки, обуславливаемые погрешностью применявшегося при измерении прибора, эту погрешность надо исчислять в процентах от действительного показания прибора, а не по данным вышеприведенной таблицы. Так, например, работая с прибором магнитоэлектрической системы, для которого допустимая погрешность $\pm 0,2\%$ (при полном отклонении его стрелки), мы для половинного угла поворота ее должны счи-

тат погрешность равной $\pm 0,4\%$, а для поворота на $1/8$ шкалы — равной уже $\pm 1\%$.

Сама погрешность показаний прибора зависит от двух основных факторов: механической конструкции его и электрической системы.

Погрешности от несовершенства механической конструкции (по преимуществу от трения при поворотах подвижной системы) обычно не зависят от величины показания прибора, почему их следовало бы относить к наибольшему показанию. Погрешности же электрической природы обычно растут по мере увеличения показаний прибора, почему их следует относить к данному показанию. Из приведенной таблицы видно, что к приборам магнитоэлектрической системы нормами предъявляются наиболее жесткие требования. Из прочих систем приборов повышенные требования предъявляются к приборам электродинамическим, менее строгие — к тепловым и электромагнитным.

б) Чувствительность и коэффициент качества приборов. В дальнейшем, при изучении приборов различных систем мы увидим, что, в зависимости от рода явлений, на которых основана работа того или иного прибора, деления их шкал могут быть равномерными или неравномерными. Понятие „чувствительность“ прибора принято относить к делениям равномерной шкалы, и за меру чувствительности прибора принимают величину отклонения подвижной системы, выраженную в делениях равномерной шкалы и отвечающую изменению измеряемой прибором величины на единицу, например, для амперметра чувствительность составляет: $S_i = \frac{d\alpha}{dI}$.

Таким образом, чувствительность амперметра есть первая производная от угла поворота его подвижной части, выраженного в делениях равномерной шкалы, по силе тока. Чувствительность вольтметра, соответственно, будет $S = \frac{d\alpha}{dU}$.

Для приборов магнитоэлектрической системы зависимость между силою измеряемого ими тока I и углом α отклонения подвижной части выражается такой формулой: $I = C\alpha$, где C — постоянный коэффициент. Отсюда явствует, что шкала приборов этой системы равномерна, чувствительность в любой точке шкалы одинакова, а график чувствительности представляет прямую линию, параллельную оси абсцисс (рис. 54), если по оси ординат отложены значения чувствительности в градусах на единицу силы тока.

У приборов других систем зависимость между отклонением подвижной части и измеряемой ими величиной имеет более сложный характер, например, квадратический (приборы тепловые и электродинамические), тригонометрический (приборы с подвижной магнитной системой) и т. д. Для них графики чувствительности выражаются кривыми, подобно изображенным на рис. 55. Здесь кривая *а* (тепловые приборы) указывает, что чувствительность прибора возрастает к концу шкалы, а кривая *б* (электродинамометры), имеющая наибольшие деления посредине шкалы, показывает, что чувствительность прибора максимальна в средних частях шкалы.

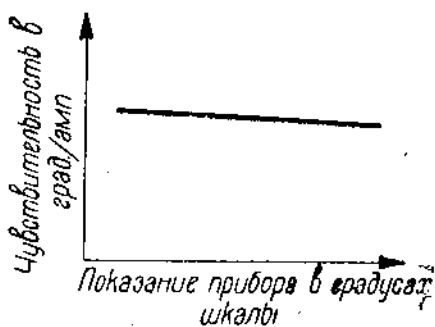


Рис. 54.

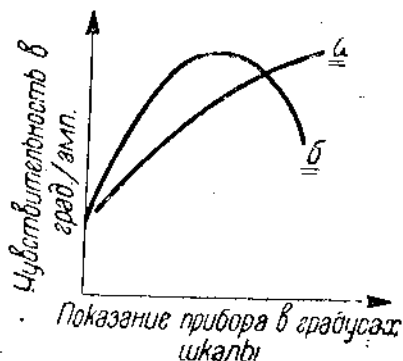


Рис. 55.

Отсюда следует, что у приборов с неравномерной шкалой чувствительность в различных точках ее различна, почему при пользовании подобными приборами следует выбирать их на такие пределы измерения, чтобы они работали в условиях максимальной чувствительности. Наряду с этим необходимо считаться еще с одним фактором, а именно, с величиной относительной ошибки самого отсчета показаний прибора, которая, очевидно, тем меньше, чем больше угол отклонения подвижной системы. Это надо учитывать при пользовании приборами с неравномерной шкалой, выбирая их на такие пределы измерения, чтобы работать в условиях максимальной чувствительности и одновременно с этим при возможно малом значении относительной ошибки отсчета.

Сказанное подтверждается еще и тем, что погрешность показаний прибора тем больше, чем меньше отклонения его стрелки. Поэтому при ответственных измерениях следует пользоваться только последними двумя третями шкалы.

Что касается абсолютных значений чувствительности технических приборов, то ее максимальный предел зависит от их системы и класса и достигает у прецизионных приборов магнитоэлектрической системы значений одного деления шкалы на 1 микроампер. У приборов высокой чувствительности (гальванометров) 1 градус отклонения их подвижной системы достигается при силах тока от 10^{-7} до 10^{-14} А. Зависит это от величины того вращающего момента, который создается в приборе измеряемым им явлением, а также от противодействующего момента, способа демпфирования, веса подвижной системы и конструкции ее подвеса.

Известный немецкий конструктор электроизмерительных приборов, Кейнат, предложил характеризовать приборы с качественной стороны их „коэффициентом качества K “, принимая его равным отношению

$$K = \frac{10 \times (\text{вращающ. момент в г-см при угле поворота на } 90^\circ)}{(\text{вес подвижной системы})^{1,5}}$$

У существующих приборов величина вращающего момента колеблется в зависимости от системы и чувствительности в пределах от 0,1 до 1 г-см, снижаясь у приборов высокой чувствительности до 0,001 г-см и достигая 20 г-см у приборов регистрирующих (имеющих добавочное приспособление для непрерывной записи измеряемой величины).

Коэффициент качества характеризует прибор с точки зрения надежности установки его подвижной системы на отсчет показания в соответствии с величиною измеряемого этим прибором явления. Однако из двух приборов с одинаковым значением этого коэффициента все же лучше тот, у которого меньше вес подвижной системы. Этим и объясняется, что в выражении для K вес берут в степени 1,5 (иногда 1,38) дабы оттенить значение веса.

По данным Кейната технические электроизмерительные приборы различных систем, при современном состоянии техники их изготовления, характеризуются нижеследующими примерно данными (см. табл. на стр. 48).

в) Собственное потребление энергии приборами. Для действия приборов всех систем, за исключением электростатической, необходимо расходовать электрическую энергию. При измерениях малых величин собственное потребление энергии прибором может оказаться величиною того же порядка, что и измеряемая им величина, и тогда во избежание ошибок необходимо учесть расходуемую в приборе энергию.

Приборы	Вес подвижн. сист. 1	Вращающ. момент в 1-см	Ковфиц. качества K	Примечание
Тепловые	0,4	0,04	1,57	Сопоставьте данные для первой и последней систем
Электромагнитные .	1,5	0,20	1,09	
Магнитоэлектрические	2,0	0,30	1,06	
Электродинамические	5,0	0,50	0,45	
Индукционные . . .	12,0	2,50	0,60	

Поэтому малый собственный расход энергии прибором является достоинством. Как будет выяснено ниже, он зависит от принципа действия, т. е. от системы прибора. Последнее подтверждается данными нижеследующей таблицы, где приведены средние значения собственного потребления энергии приборами различных систем.

Расход энергии в ваттах.

Системы прибор.	Магнитоэл.	Электродин.	Тепловая	Эл. магн.	Индукц.
Амперметры на 5—10 А . .	0,5	5—15	3—8	3—5	1—2
Вольтметры на 120—250 V .	1—2	5—15	5—12	1,5—3	1—2

г) Влияние внешних факторов. К числу общих свойств, характеризующих достоинство и область применения приборов, относится также степень воздействия частоты тока, внешних магнитных полей, колебаний температуры, кратковременных перегрузок и электростатических воздействий на точность их показаний. Влияние всех этих факторов удобнее рассмотреть попутно с изучением принципа действия и основных конструктивных особенностей приборов различных систем. Здесь же мы отметим только, что помимо приведенных выше норм для величины допустимой погрешности приборов различных систем, обуславливаемой погрешностями механического и электрического характера (так называемой основ-

ной погрешности прибора), необходимо еще считаться с погрешностями, вызываемыми влиянием внешних факторов. По нормам, принятым в СССР, эти дополнительные погрешности (погрешности влияния, как их называют немцы), могут увеличивать погрешности основные на число процентов, указанное в нижеследующих таблицах (см. „Пособие к лабораторным работам“ профессора М. А. Шателена).

а) Изменения частоты тока.

		При изменении частоты в % от номинала	Увеличение погрешности в % от соответств. показыва-ния прибора
Для прибора	I класса .	20%	0,3%
"	II " . . .	5%	1,2%
"	III " . . .	5%	2,5%

б) Влияние температуры.

Увеличение погрешности в % от соответствующ. показания при изменении температуры на $\pm 10^\circ \text{C}$			
	I класса	II класса	III класса
Для амперметров . . .	0,5%	2%	3%
" вольтметров . . .	0,3%	2%	3%
" ваттметров	0,3%	2%	—

Внешнее поле напряженностью в 5 эрстедов не должно вызывать изменения показаний приборов всех классов свыше 3% от предела измерений приборов при полном отклонении их стрелки. Наконец, подвижная система приборов должна быть так уравновешена, чтобы при отклонении шкалы прибора на 5° от нормального ее положения изменение показаний не превосходило 0,2% от длины шкалы прибора I класса, 1% — для II класса и 2% — для приборов III класса.

§ 7. Приборы магнитоэлектрической системы типа Денре.

Условное обозначение



1. Принцип действия. В междуполюсном пространстве постоянного и неподвижно закрепленного магнита $N-S$ (рис. 56) на оси a (в приборах высокой чувствительности — на подвесе из тонкой металлической нити) укреплен легкий алюминиевый каркас b , с навитой на нем обмоткой f из тонкого медного или алюминиевого проводничка, покрытого

изоляция. Каркас с обмоткой является подвижной системой прибора, и за ними укрепилось наименование „гальванометрической рамки“ или, просто „рамки“ прибора. Последняя об-

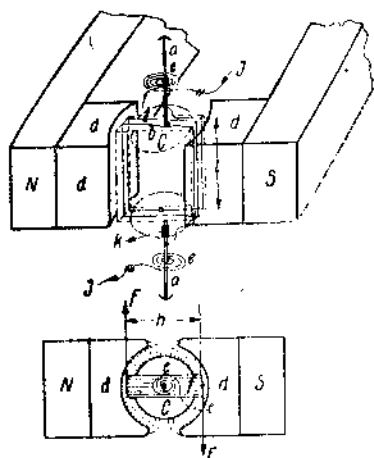


Рис. 56.

ъемлет неподвижно закрепленный цилиндр C из мягкой литой стали, а сама может свободно поворачиваться на оси в между-железном пространстве, образованном цилиндром и полюсными наставками $d-d'$ постоянного магнита. К оси подвижной системы прикреплены одним своим концом две спиральные пружинки $e-e'$, вторые, свободные концы коих закрепляются на неподвижных частях прибора. Один конец обмотки гальванометрической рамки подводится к оси подвижной системы, и таким способом металлически соединяется с пружинкой e ; другой конец обмотки также со-

единяется через ось со второй пружинкой, но только сама ось в точке k изолирована от каркаса b .

Если пропустить, через посредство пружинек e , e' измеряемый ток I по обмотке рамки, то на каждый вертикально-расположенный проводник обмотки, имеющий длину l , будет, согласно закону Био и Савара, действовать сила равная

$$F = \int_0^l H \cdot I \cdot \sin(H \wedge dl) dl = H \cdot I \cdot l, \text{ где } H \wedge dl \text{ — угол, об-}$$

разуемый направлением силовых линий поля постоянного магнита и вертикально расположенным проводником обмотки, равный, в нашем случае 90° ; dl —элемент проводника обмотки, и H —напряженность поля постоянного магнита.

Обмотка рамки состоит из нескольких (N) витков проволоки, почему суммарная сила, действующая на каждую вертикально расположенную сторону рамки, выразится через

$$F = \int_0^l N \cdot H \cdot I \cdot \sin(H \wedge dl) dl = N \cdot H \cdot I \cdot l.$$

Момент пары сил, отклоняющих рамку из положения покоя, будет $M_{от} = F \cdot h = N H I l h$, где h —ширина рамки,

или $M_{от} = N H I S$, где $S = h l$ — площади рамки. Столь простое выражение для вращающего момента получается в том только случае, если плоскость рамки при ее поворотах совпадает с направлением силовых линий поля постоянного магнита. Для этого в междуполюсном пространстве магнита и размещается цилиндр C , а полюсным надставкам придается такая форма выреза, чтобы силовые линии располагались радиально к поверхности цилиндра. Кроме того наличие цилиндра (железного сердечника) в междуполюсном пространстве магнита уменьшает магнитное сопротивление, что приводит к увеличению вращающего момента.

Момент сил, противодействующих отклонению рамки, создается спиральными пружинками e , которые изготавливаются так, чтобы момент D их кручения был пропорционален углу α закручивания или, в разбираемом нами случае, — углу поворота рамки, т. е. чтобы момент сил, противодействующих повороту, был равен $M_{пр} = D\alpha$.

Когда подвижная система, отклонившись на угол α , остановится, т. е. когда отклоняющий и противодействующий моменты уравниваются, то $M_{от} = M_{пр}$ и, следовательно, $N \cdot H \cdot S \cdot I = D\alpha$. В этом выражении произведение $N \cdot H \cdot S$ есть магнитный поток, сцепляющийся с обмоткой гальванометрической рамки прибора. Величина и постоянство его, вернее, постоянство его составляющей H , т. е. напряженности поля магнита, представляется весьма существенным с точки зрения точности и постоянства показаний прибора.

Обозначив NHS через G , получим окончательно $G \cdot I = D\alpha$. Отсюда $I = \frac{D}{G}\alpha$ или, сводя обе постоянные в одну C_d , имеем $I = C_d \alpha$ где C_d — так называемая динамическая постоянная прибора $= \frac{D}{NHS}$, выражающая численно ту силу тока, которую необходимо пропустить по обмоткам рамки, дабы подвижная часть прибора отклонилась на угол $\alpha = 1$; ее часто называют „константой“ прибора.

Из выражения $I = C_d \alpha$, связывающего силу тока, измеряемого прибором этой системы, с углом отклонения его подвижной рамки, явствует, что шкала его должна иметь равномерные деления и что чувствительность его в любом месте шкалы одна и та же.

Определяя из этого выражения постоянную $C_a = \frac{1}{a} \frac{I}{\alpha}$ и сопоставляя ее с понятием о чувствительности $S_i = \frac{1}{I}$, мы видим, что они обратны друг другу.

2. Общее представление о конструкции приборов магнитоэлектрической системы дают рисунки 57 и 58. На этих рисунках представлен внутренний вид прибора, где видны следующие отдельные составные части: *A*—рамка; затем пружинка, стрелка (указатель); *C*—цилиндр; *B*—поводок

для установки стрелки на нулевое деление шкалы; пластинка, к которой прикреплен (шарнирно) поводок; *N-S*—полюсные наконечники.

Некоторыми фирмами строятся приборы этой системы с круглой (в виде кольца) рамкой, сердечником в виде шара и соответственно (по шаровой поверхности) вырезанными полюсными наконечниками. Кольцеобразные катушки имеют то преимущество, что при таком же,

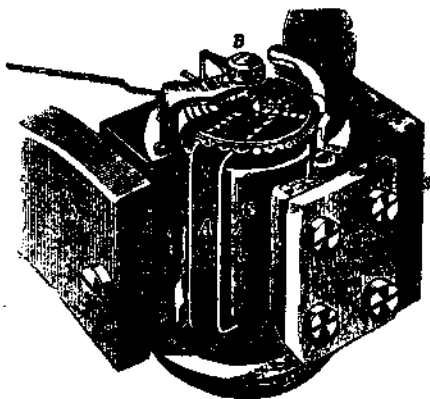


Рис. 57.

числе ампервитков их омическое сопротивление, а следовательно, и собственное потребление энергии меньше.

На рис. 59—61 представлены: внешний вид вольтметра фирмы Вестон на 2 предела измеряемых им напряжений, дощковой тип амперметра фирмы Сименс и Гальске; милливольт-амперметр той же фирмы на 7 пределов измерения (рис. 61-а) и комбинированный вольтамперметр с набором шунтов (рис. 61-б). Рис. 62 дает общий вид шкалы прибора.

Постоянный магнит изготавливается из высокосортной кобальтовой, вольфрамовой или хромовой стали и предварительно выдерживается или искусственно стареется с тем, чтобы его магнитные свойства (*H*) сохранялись постоянными как можно дольше. Полюсные наконечники и цилиндр изготавливаются из мягкой литой стали. Воздушный зазор между полюсными наконечниками и цилиндром делается сколь возможно малым, что обеспечивает малое рассеяние силовых линий и способствует их направлению по радиусам к поверхности цилиндра.

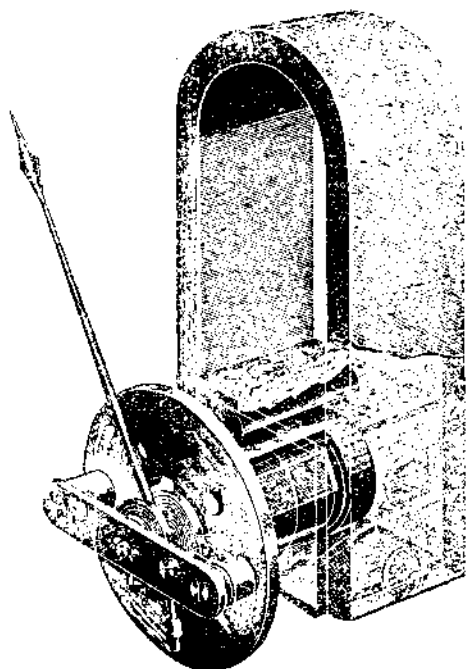


Рис. 58.

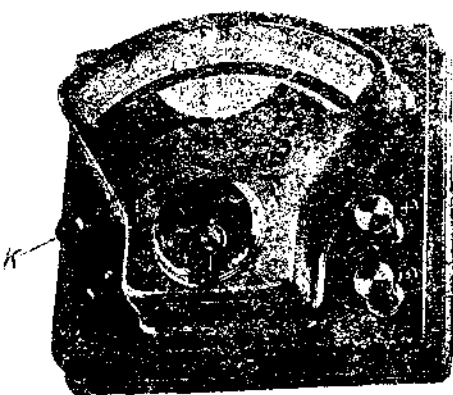


Рис. 59.

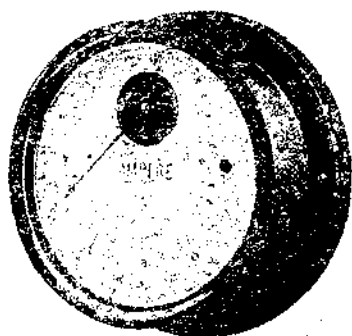


Рис. 60.



Рис. 61.

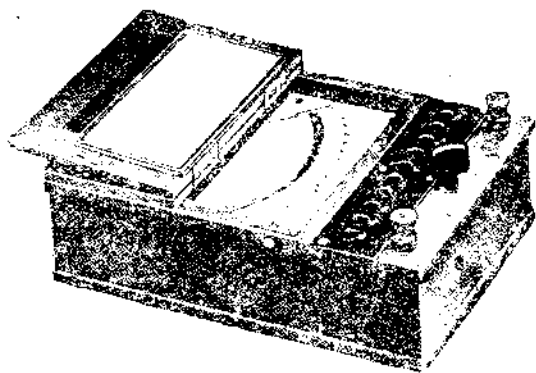


Рис. 61-а. Милливольметр фирмы Сименс и Гальске.

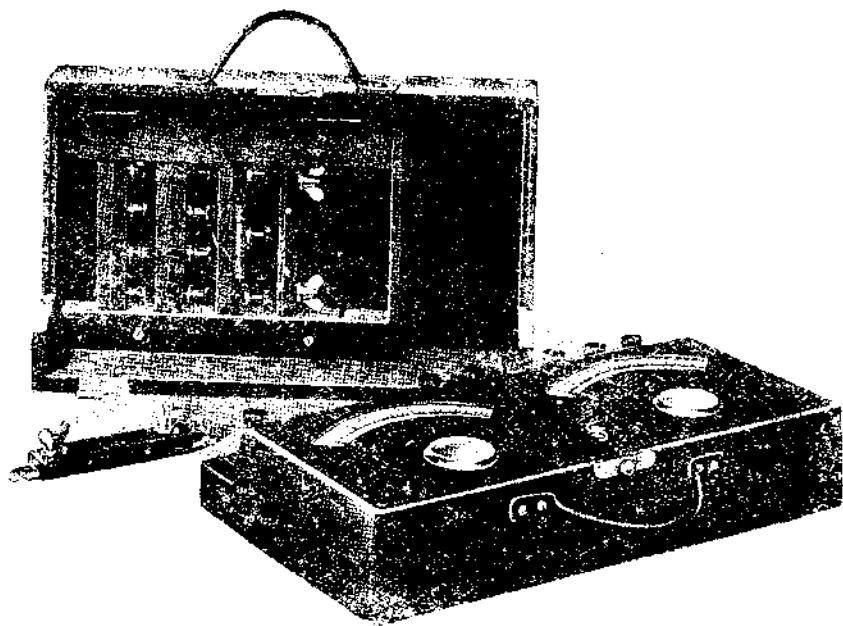


Рис. 61-б. Комбинированный вольтамперметр.

Пружинки изготавливаются из немагнитного материала (обычно бронзы); обмотка рамки — из медного или алюминиевого проводника, преимущественно с шелковой изоляцией; каркас рамки — из алюминия. Каркас выполняет двоякую роль: во-первых, служит основой для обмотки и, во-вторых, является успокоителем колебаний подвижной системы за счет токов Фуко, индуктируемых в нем при поворотах рамки. Ось рамки чаще делается не сплошной, а в виде двух опорных осей, прикрепленных к каркасу сверху и снизу. Эта система удобнее в том отношении, что рамка может при переноске и толчках несколько пружинить; чем обеспечивается меньшая чувствительность прибора к сотрясениям.

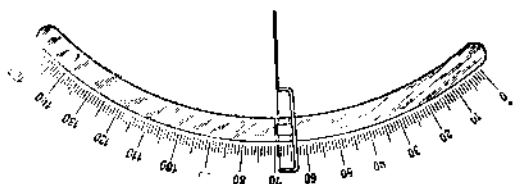
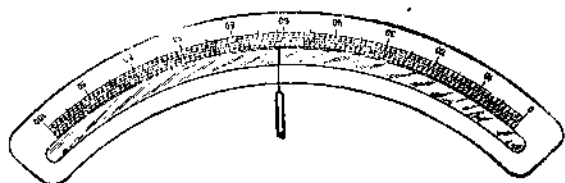


Рис. 62.

В прецизионных (особо точных) приборах, с целью как можно более снизить трение осей подвижной системы в подпятниках, ось располагают вертикально, а подвижную часть прибора, при его сборке, уравнивают так, чтобы ее центр тяжести приходился на ось. Приборы эти требуют во время работы установки в горизонтальном положении.

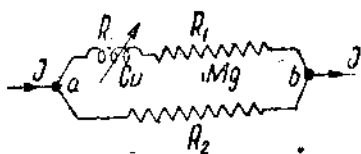


Рис. 63.

Дабы сопротивление прибора не изменялось при колебаниях нагрузки (величины измеряемого прибором тока), он монтируется по особой схеме, представленной на рис. 63, идея работы которой сводится к следующему. Здесь R — сопротивление обмотки рамки из материала, обладающего значи-

тельным температурным коэффициентом (медь, алюминий); R_1 — добавочное сопротивление из тонкой манганиновой проволоки, монтируемое внутри прибора неподвижно и по своему

сопротивлению раз в 20—25 превышающее сопротивление обмотки рамки.

Поскольку манганин обладает ничтожно малым температурным коэффициентом, относительное изменение общего сопротивления $R + R_1$ от нагрева их током практически равно нулю, тем более, что, по мере нагрева прибора, момент кручения спиральных пружинок убывает, чем отчасти компенсируется уменьшение вращающего момента, вызванное возрастанием сопротивления обмотки прибора. Чтобы сопротивление прибора при этом осталось равным сопротивлению обмотки рамки, параллельно к точкам $a—b$ приключается сопротивление R_2 также из манганина. Его величина подбирается с таким расчетом, чтобы равнодействующее сопротивление между точками a и b стало равным по величине сопротивлению обмотки рамки. Подобное устройство носит наименование схемы температурной компенсации. Для приборов с более сложной внутренней схемой соединений температурная компенсация осуществляется на несколько иных началах (см. стр. 64, описание 10-омного прибора фирмы Сименс).

Обмотка рамки приборов этой системы, в видах облегчения ее веса (см. „качество“ приборов), делается из весьма тонкого проводника (у амперметров диаметром 0,1—0,15 мм, а у вольтметров — 0,05—0,05 мм), почему этими приборами непосредственно можно измерять токи порядка не свыше 150 мА (например, одноомный миллиамперметр).

В принципе между амперметром и вольтметром разницы нет: оба эти прибора по существу являются измерителями силы тока. Однако техникой измерения к амперметрам предъявляется требование иметь сколь возможно малое сопротивление, а к вольтметру, наоборот, сколь возможно большое. Максимальное падение напряжения в амперметре при полном отклонении его подвижной системы обычно не превышает 45—60 мВ, в то время как сопротивление вольтметров стараются сделать сколь возможно большим (до 1000 Ω на 1 вольт его показаний). Изготовить обмотку самой рамки со столь большим сопротивлением нерационально, ибо она будет тяжела. Поэтому обмотку рамки вольтметров делают из относительно небольшого числа витков, а остальное необходимое сопротивление изготавливается в виде сопротивления, монтируемого в приборе неподвижно, или вне прибора, в виде отдельного магазина.

3. Погрешности. Источниками погрешностей приборов магнитоэлектрической системы могут быть: возможное непостоян-

ство во времени напряженности поля их магнита; непостоянство силы трения цапф оси в подпятниках; непостоянство коэффициента кручения спиральных пружинок и непостоянство сопротивления обмотки рамки. Однако, при тщательном изготовлении все эти погрешности могут быть сведены к столь незначительной величине, что приборы этой системы по праву считаются наиболее точными.

Погрешность показаний прибора I класса этой системы может быть снижена до 0,07% от максимального отклонения стрелки (например, у прибора со шкалой на 150 делений погрешность не превышает 0,1 деления).

4. Свойства и область применения. 1. Постоянная лабораторных приборов этой системы (переносных типов) может быть доведена до 10^{-6} ампера на одно деление шкалы.

2. Собственное потребление ими электрической энергии очень мало — 1—2 W у вольтметров на 150—250 V, а у амперметров на 5—10 A оно не превышает обычно 0,5 W.

3. Шкала прибора равномерна, а сам прибор полярен, т. е. для правильного отклонения его подвижной системы необходимо пропускать через него измеряемый ток в строго определенном направлении.

4. На показания прибора посторонние магнитные поля оказывают незначительное влияние, потому что сам прибор имеет довольно сильный постоянный магнит (H — порядка 1000—2000 эрстедов).

5. Приборы эти аperiodичны.

6. При наличии схемы температурной компенсации они мало подвержены температурным влияниям.

7. К недостаткам этих приборов надо отнести: пригодность их только для измерений в цепях постоянного тока, ибо при пропускании через обмотку переменного тока рамка прибора стремится поворачиваться соответственно его направлению (два раза в течение одного периода), что при нормальной технической частоте тока неосуществимо, так как рамка обладает инерцией. Кроме того приборы эти не выдерживают перегрузки током, так как ни обмотка рамки, ни спиральные пружинки (в видах облегчения веса подвижной системы) на большую перегрузку не рассчитываются и, наконец, приборы эти довольно дороги.

В приложении 1 приводятся данные, характеризующие некоторые типы приборов этой системы.

5. Расширение пределов измерения осуществляется у амперметров магнито-электрической системы шунтированием, а

у вольтметров — включением их последовательно с добавочными сопротивлениями. Шунт, как известно, представляет собою точно выверенное сопротивление $r_{\text{ш}}$ (рис. 64), вводимое

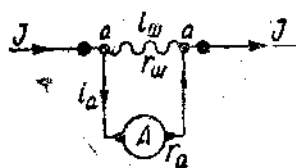


Рис. 64.

последовательно в цепь измеряемого тока I . Параллельно сопротивлению шунта (а не наоборот) присоединяется своими зажимами амперметр A . Если при этом достигнуть того, чтобы между сопротивлениями шунта $r_{\text{ш}}$ и амперметра r_a сохранялось известное

и постоянное соотношение, то по показаниям амперметра всегда можно определить и силу тока I в главной цепи. Допустим, что нам необходимо расширить пределы измерения силы тока при посредстве имеющегося амперметра в n раз, т. е. мы хотим, чтобы всякое показание нашего амперметра, увеличенное в n раз, давало нам значение силы тока в главной цепи, т. е. чтобы $i \cdot n = I$.

Этому условию должно отвечать постоянное и совершенно определенное соотношение между $r_{\text{ш}}$ и r_a . Для нахождения этого соотношения исходим из законов ветвления токов в параллельных ветвях, образованных сопротивлениями амперметра и шунта, а именно:

$$\frac{i_a}{i_{\text{ш}}} = \frac{r_{\text{ш}}}{r_a}, \text{ или } \frac{i_a}{i_{\text{ш}} + i_a} = \frac{r_{\text{ш}}}{r_a + r_{\text{ш}}} \text{ или } i_a = I \cdot \frac{r_{\text{ш}}}{r_a + r_{\text{ш}}}$$

Так как мы условились чтобы $i \cdot n = I$, то $\frac{I}{n} = I \cdot \frac{r_{\text{ш}}}{r_a + r_{\text{ш}}}$, откуда искомое соотношение определится как

$$r_{\text{ш}} = \frac{r_a}{n - 1} \dots \dots \dots (1)$$

Число n , подбираемое обычно равным 10, 100 и т. д. и показывающее, во сколько раз мы хотим расширить пределы измерения данным амперметром, называется „шунтовым коэффициентом“ или „множителем“. Оно связано с сопротивлениями r_a и $r_{\text{ш}}$ равенством

$$n = \left(1 + \frac{r_a}{r_{\text{ш}}} \right), \text{ причем отношение } \frac{r_a}{r_{\text{ш}}} \text{ обычно подбирают рав-}$$

ным 9, 99, 999 и т. д.; и при этих условиях показание амперметра, умноженное соответственно на 10, 100 или на 1000, дает силу тока I в цепи.

Изготавливаются шунты из манганина, материала обладающего большим удельным сопротивлением при ничтожно малом температурном коэффициенте. Они монтируются внутри прибора или же прилагаются к нему отдельно. Рассчитываются они обычно на падение в них напряжения не свыше 100 мВ. Шунты фирмы Сименс — 45 мВ, фирмы Вестон 50 и Гартман 60 мВ в соответствии с установленными падениями напряжений в существующих типах амперметров. Шунты снабжаются двумя парами зажимов: наружная — для подключения

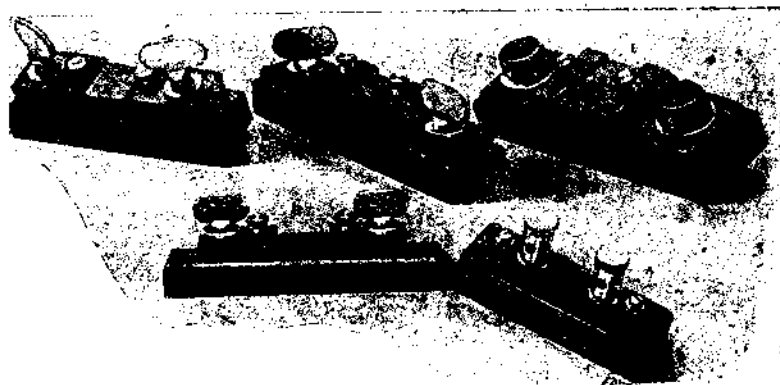


Рис. 65. Шунты.

его в цепь, а внутренняя — для присоединения к нему проводников от амперметра. Этим до предела снижается влияние переходных сопротивлений в местах соединения шунта с цепью тока на постоянство весьма малого сопротивления самого шунта. Для лучшего охлаждения манганиновой ленте шунта придают возможно большую поверхность охлаждения. Строятся шунты или в виде одиночных сопротивлений (для досковых приборов) или же в виде комбинированного сопротивления для нескольких пределов измерения. Шунтам придают продолговатую форму (рис. 65), на верхней их части отмечается или предельная сила тока в цепи, могущая быть измеренной амперметром в соединении с данным шунтом, или же цена 1° шкалы амперметра, например: $1^\circ = 0,01 \text{ A}$; $1^\circ = 0,1 \text{ A}$.

Задача 1. Подсчитайте: а) сопротивление шунтов, б) шунтовые множители в) пометки на шунтах для миллиамперметра магнитоэлектрической системы, имеющего шкалу в 150 делений и обладающего сопротивлением в 1 ом, если этим прибором желают измерять силы токов до 1,5; 15; 150 и 1500 ампер.

Ответ: а) 1/9; 1/99; 1/999 и 1/999 ома
 б) 10 · 100 · 1000 и 10000
 в) 0,01; 0,1; 1,0; и 10 См. приложение 1.

Задача 2. Имеется амперметр с сопротивлением 0,02 ома, рассчитанный для измерения силы тока до 35 ампер. Вычислить шунтовой множитель и сопротивление шунта, при посредстве которого можно было бы измерять силы токов до 175 А.

Ответ: 5 и 0,005 ома — см. приложение II.

Задача 3. К амперметру необходим шунт сопротивлением 0,001 ома, а мы имеем шунт 1/999 ома. Спрашивается, каким сопротивлением надо шунтировать наш шунт, чтобы он был пригоден для амперметра?

Ответ: $X = 1 \Omega$.

Задача 4. Требуется проверить амперметр на 100 А помощью зеркального гальванометра, имеющего постоянную $C = 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ А}$ и обладающего сопротивлением в 300 Ω .

Рассчитайте, каким шунтом надо снабдить гальванометр, чтобы осуществить проверку амперметра если максимальное допустимое отклонение гальванометра не должно превышать 100 делений по его шкале?

Ответ: $0,46 \cdot 10^{-3} \Omega$.

Необходимо также отметить, что включение шунта изменяет силу тока в главной цепи, ибо вместо сопротивления одного лишь прибора мы вводим равнодействующее сопротивление

$$\frac{r_a \cdot r_{ш}}{r_a + r_{ш}},$$

Если по условиям опыта требуется, чтобы сопротивление главной цепи и сила тока в ней после введения шунта остались без изменения, то в нее необходимо включить некое добавочное сопротивление $r_{доб} = \frac{n-1}{n} r_a$ (см. прилож. III).

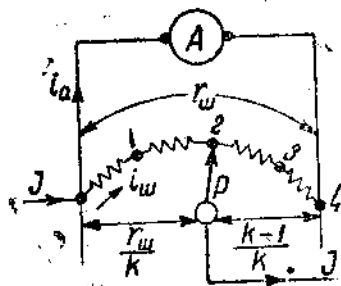


Рис. 66.

На рис. 66 представлена весьма удобная схема шунта, позволяющая легко менять величину шунтового коэффициента, не меняя в то же время общего сопротивления шунта. Это важно при шунтировании гальванометров, ибо характер колебаний подвижной системы некоторых из них зависит от сопротивления той цепи, на которую они замкнуты во время работы. Здесь прибор всегда включен на полное сопротивление $r_{ш}$ шунта, главная же цепь приключается посредством рукоятки переключателя P , передвигаемой по контактам 1, 2, 3 и т. д. к тому или иному числу

секций сопротивления шунта, чем и достигается изменение постоянной прибора в его соединении с шунтом.

Если шунт состоит из k секций, сопротивления которых подобраны по величине как $r_m; \frac{1}{10}r_m; \frac{1}{100}r_m$ и т. д., то для положения рукоятки переключателя, как на схеме, будем иметь:

$$\begin{aligned} \frac{I}{i_a} &= \frac{r_a + r_m}{r_m} \text{ или } I = i_a \frac{r_a + r_m}{r_m} = i_a \frac{r_a + \left(\frac{k-1}{k}\right)r_m + \frac{r_m}{k}}{\frac{r_m}{k}} = \\ &= i_a \left(\frac{r_a + r_m}{r_m} \right) k. \end{aligned}$$

В последнем выражении множитель в скобках есть величина постоянная; следовательно, константа прибора с шунтом зависит только от k , т. е. от того, на какой из контактов 1, 2, 3 поставлена рукоятка переключателя. Подобные шунты иногда называются универсальными, так как они применимы к любому прибору, если только сделать предварительно пересчет величины $\frac{r_a + r_m}{r_m}$. Против контактов 1, 2 и т. д. подобного шунта обычно

помечаются значения чувствительности прибора, например, 1/1; 1/10; 1/100 и т. д. Числа эти показывают, что при постановке рукоятки Р, например, на контакт, обозначенный цифрой 1/100, ток в главной цепи в 100 раз больше того, который проходил бы через прибор при том же угле отклонения его подвижной системы, но в отсутствии шунта.

В некоторых частных случаях измерительной практики от шунта требуется, чтобы при различных значениях его шунтового коэффициента, как сопротивление цепи самого прибора, так и той внешней цепи, на которую включен зашунтированный прибор, оставались неизменными. Схема шунта, удовлетворяющего этим условиям, изображена на рис. 67. Из нее видно, что при установленном в гнездо 1 штепсель гальванометр G работает, как не зашунтированный (чувствительность 1/1). Если штепсель переставить в гнездо 2, то в цепь тока, взамен гальванометра будет введено сопротивление, равное $(0,9 + 0,09 + 0,009 + 0,001) r_g = r_g \dots$ (см. приложение IV).

Вставляя штепсель в гнезда 3—3, 4—4 или 5—5, мы будем менять константу прибора в 10, 100 и 1000 раз, не меняя в то же время общего сопротивления между точками А и В, оказывающегося равным сопротивлению гальванометра.

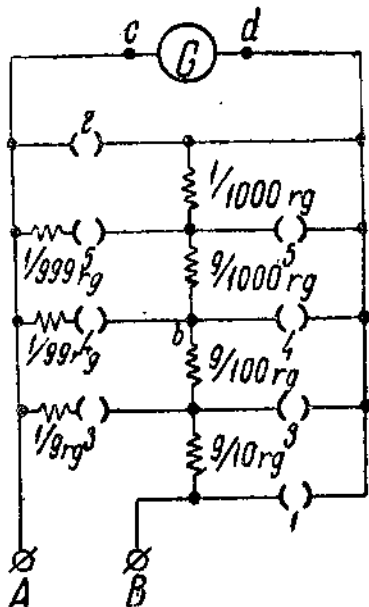


Рис. 67.

Подобные шунты строятся, очевидно, для определенного по сопротивлению гальванометра, но это не исключает возможности пользования ими и для шунтирования гальванометров с иным сопротивлением; при этом необходимо только сделать сопротивление между точками c и d равным сопротивлению того гальванометра, для которого изготовлен шунт, и, кроме того, пересчитать шунтовые коэффициенты для всех степеней чувствительности шунта.

Пример — для желающих; смотри приложение V.

Добавочные сопротивления представляют собою точно выверенное сопротивление $r_{доб}$ (рис. 68), соединяемое последовательно с вольтметром V , пределы измерения которого хотят расширить. Вольтметр в соединении с добавочным к нему сопротивлением подключается в параллель к тем точкам a и b цепи, напряжение между которыми необходимо измерить.

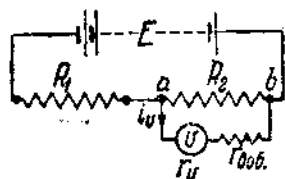


Рис. 68.

Если при этом вольтметр построен для измерения напряжений в m раз меньших, нежели возможное напряжение между точками a и b , то подсчет величины требуемого для этой цели добавочного сопротивления базируется на следующем. По условию мы желаем, чтобы показание U вольтметра, умноженное на некое целое число m (обычно 10, 100 и т. д.) определяло собою величину напряжения U_{ab} между точками a и b цепи, т. е.

чтобы $U \cdot m = U_{ab}$ или что то же, $i_v \cdot r_v \cdot m = i_v (r_v + r_{доб})$.

Отсюда искомое соотношение между сопротивлением r_v вольтметра и тем добавочным сопротивлением $r_{доб}$, которое обеспечивало бы выполнение этого условия, будет:

$$r_{доб} = r_v (m - 1) \dots \dots \dots (2)$$

Число m , показывающее, во сколько раз мы хотим при помощи добавочного сопротивления расширить пределы измерения нашим вольтметром, называется „переводным множителем“. Он равен $\left(1 + \frac{r_{доб}}{r_v}\right)$ и обычно подбирается по величине как $(1 + 9)$; $(1 + 99)$ и т. д., при каковых условиях для определения величины искомого напряжения надо показание вольтметра увеличивать соответственно в 10, 100 и т. д. раз.

Добавочные сопротивления в виде бифилярно намотанных круглых катушек, или катушек, навитых на плоские пластинки из изоляционного материала, монтируются внутри прибора или

же прилагаются к нему отдельно. В последнем случае им придается форма, подобная изображенным на рис. 69. В качестве материала для обмотки применяется манганиновый тонкий проводник с изоляцией. Добавочное сопротивление часто секционируют на ряд ступеней, соответственно различным пределам измерения. От обмотки добавочных сопротивлений должен быть обеспечен хороший отвод тепла и незначительный нагрев током.

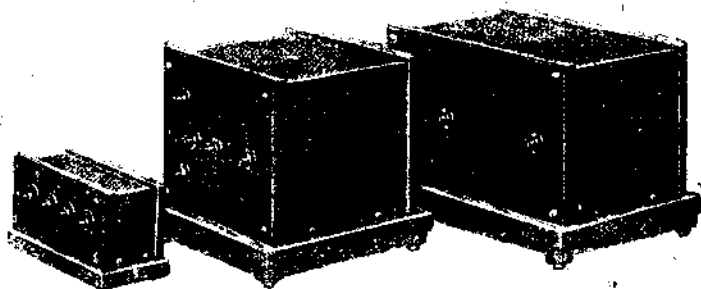


Рис. 69. Добавочные сопротивления.

Задача 1. Вольтметром на 10 вольт с сопротивлением в 100 ом необходимо измерять напряжения до 200 вольт. Определить: переводный множитель и величину добавочного сопротивления.

Ответ: $m = 20$; $r_{доб} = 1900$ ом.

Задача 2. На добавочном секционированном сопротивлении, предназначенном для вольтметра, рассчитанного на непосредственное измерение напряжений до 0,15 вольта, имеется 4 зажима, против которых поставлены следующие обозначения:

$$1^0 = 0,01; 1^0 = 0,1 \text{ и } 1^0 = 1.$$

Шкала вольтметра имеет 150 делений; сопротивление вольтметра $= 1$ ому. Начертите схему соединения секций добавочного сопротивления и определите величины сопротивлений отдельных его секций.

Ответ: $9 + 90 + 900$ ом.

Вольтамперметры. Некоторые типы приборов магнитоэлектрической системы (по преимуществу контрольные) строятся с таким расчетом, чтобы один и тот же прибор мог служить как амперметром, так и вольтметром. Приборы эти (вольтамперметры) имеют одну подвижную систему, обмотка которой по желанию может быть соединена с шунтами (в параллель) или с добавочными сопротивлениями (последовательно), так что прибор может быть использован для измерения сил токов и напряжений в широких пределах.

В качестве примера подобного прибора опишем вкратце 10-омный прибор формы Сименс (рис. 70), отличающийся

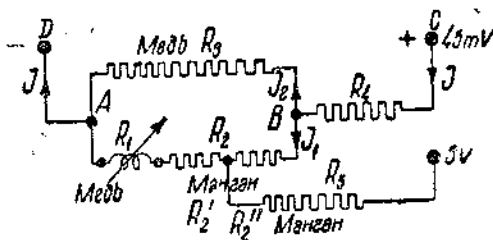


Рис. 70.

ничтожно малым собственным потреблением электрической энергии. Падение напряжения в нем, необходимое для полного (на 150 делений шкалы) отклонения стрелки, составляет всего 45 mV. В таком виде прибором можно измерить напряжения, начиная от $45:150 = 0,3$ mV

и до 45 mV, а силы токов от 0,03 mA и до 4,5 mA. В этом случае прибор вводится в измерительную схему помощью зажимов 45 mV и —.

Температурная компенсация осуществляется в этом приборе благодаря тому, что температурный коэффициент у сопротивления R_3 , сделанного из медного проводника, значительно выше, чем у цепи, образованной медной обмоткой подвижной рамки R_1 прибора в последовательном соединении с добавочным сопротивлением R_2 из манганинового проводника. Если бы при этом точки A и B были приключены к постоянному напряжению, то общий ток I , поступающий в прибор извне, уменьшился бы вследствие нагрева обмоток R_1 и R_3 и связанного с этим увеличения их сопротивления. При этом уменьшение его составляющей I_1 , протекающей по обмотке рамки R_1 , было бы значительно меньше, нежели уменьшение тока I_2 в ветви с сопротивлением R_3 . Чтобы сделать это уменьшение силы тока I_1 ничтожно малым, необходимо соответственно повысить напряжение между точками A и B. Последнее и достигается надлежаще подобранным сопротивлением R_4 из манганина с ничтожно малым температурным коэффициентом. При постоянстве общего, приложенного к зажимам C — D прибора напряжения, соотношение падений напряжений на участках AB и CB подобраны так, чтобы уменьшение силы тока I_1 в обмотке подвижной части прибора (R_1) компенсировалось бы соответственным повышением напряжения между точками A и B. Если сопротивление R_4 подсчитано при этом так, чтобы частичное напряжение U_{AB} при повышении температуры возрастало в той же мере, в какой возрастает сопротивление $R_1 + R_3$, то сила тока I_1 в обмотке подвижной рамки прибора практически останется неизменной. Общий ток I , или общее сопротивление прибора в этом случае изменяется всего лишь на 0,15% при колебаниях температуры на 1°C и при полном напряжении на зажимах прибора в 45 mV.

Для расширения пределов измерения к прибору прилагается комбинированный шунт на 7 пределов измерения (1,5; 3; 7,5; 15; 30; 75 и 150 A), схема которого показана на рис. 71.

Для измерения сил токов до 1,5 A ставят рычаг P шунта на правую ламель, причем прибор оказывается подключенным

в параллель ко всем последовательно соединенным секциям ($a-b$ и т. д.) шунта. В этом случае постоянная прибора с шунтом равна $0,01 \text{ А}$. Для измерения сил токов до 3 А рычаг P передвигают на ламель, обозначенную цифрой 3, причем секция f шунта переходит в последовательное соединение с обмоткой прибора, образуя добавочное к нему сопротивление, а остальные секции их шунтируют. При этом необходимо, чтобы падение напряжения в секциях $a-z$ было больше 45 мВ точно на величину падения напряжения в секции f , перешедшей в последовательное соединение с прибором. Для измерения сил тока до $7,5 \text{ А}$ в последовательное соединение с прибором переходят секции f и z , а остальные образуют шунты. При этом падение напряжения в этих последних должно быть больше 45 мВ на величину падения напряжения в последовательно соединенных сопротивлениях секций f и z , и т. д.

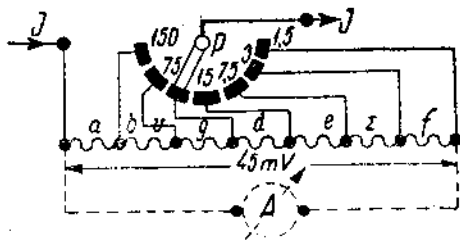


Рис. 71.

Для использования того же прибора в качестве вольтметра, при измерении напряжений выше 45 мВ , служит специальный зажим, обозначенный пометкой 3 В . В этом случае сопротивление прибора подогнано равным в точности 1000Ω (сопротивление R_5 на рис. 70) и для полного отклонения стрелки через прибор должен протекать ток, равный $3/1000 = 3 \text{ мА}$. Для дальнейшего (свыше 3 вольт) расширения пределов измерения к прибору прилагается добавочное секционированное сопротивление на пределы измерения до 1500 вольт из расчета по 1000Ω на каждые последующие 3 вольта.

Чтобы показания прибора в качестве вольтметра также были независимыми от колебаний температуры, сопротивление R_2 (рис. 70) подразделено на две такие части, чтобы имело место равенство $R_1 + R'_2 = R_3 + R''_2$. В этом случае температурный коэффициент всей внутренней схемы прибора определяется отношением сопротивления медных обмоток к сопротивлению манганиновых и поэтому может быть посредством достаточно большого сопротивления R_5 снижен настолько, что даже на пределе измерения до 3 вольт им можно пренебречь.

§ 8. Приборы электродинамической системы.

Приборы этой системы строятся двух типов: электро-
динамометры с магнитной цепью без железа—усл. обозн. 

и с магнитной цепью, содержащей железо, или ферродинамометры—условное обозначение 

1. Принцип действия. Внутри неподвижно закрепленной катушки *A* (рис. 72) из нескольких витков изолированной проволоки на оси *a* может вращаться подвижная гальванометрическая рамка *B*. Ось подвижной рамки своими цапфами покоится в подшипниках *c, c* и снабжена пружинками *e—e*, как и в приборах магнитоэлектрической системы.

Если пропускать по виткам обмотки катушки и рамки токи I_1 и I_2 , то в результате электродинамического взаимодействия подвижная рамка будет стремиться так повернуться, чтобы плоскость ее витков стала параллельной плоскости витков неподвижной катушки, а их магнитные поля совпадали по направлению.

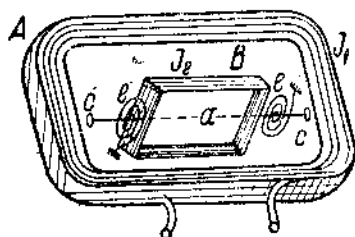


Рис. 72.

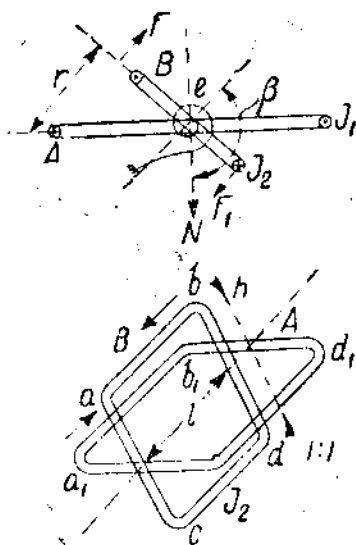


Рис. 73.

Действительно, если направление токов в обмотках таково, как это представлено на рис. 73, то напряженность H поля, образованного током I_1 , протекающим по проводам стороны $a'b'$ неподвижной катушки, в том месте, где в данный момент находятся проводники стороны ab подвижной рамки, т. е. на расстоянии r , равна $H = 0,2 \frac{I_1}{r} \cdot n_1$, где n_1 — число витков неподвижной катушки.

Сила взаимодействия тока I_2 , протекающего по проводникам стороны ab подвижной катушки, с этим полем равна

$F = H \cdot I_2 \cdot l \cdot n_2$, где l и n_2 — ширина и число витков этой катушки. Сопоставляя выражения для H и F , имеем

$$F = 0,2 \cdot \frac{n_1 n_2 I_1 I_2 l}{r}.$$

Такова же сила взаимодействия между проводниками сторон cd и $c'd'$ обеих катушек, и, следовательно, вращающий момент, под влиянием которого подвижная система выйдет из положения покоя, представленного на рис. 73, и отклонится на некий угол α , определится как

$$M_{\text{вп}} = 2 F \frac{h}{2} = F H = \frac{0,2 \cdot n_1 \cdot n_2 \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot l \cdot h}{r},$$

где h — высота катушки B .

Моментом, противодействующим повороту рамки B , является, как и в приборах магнитоэлектрической системы, сопротивление закручиванию спиральных пружинок e , момент коих равен $D\alpha$, где D — коэффициент их кручения.

При равновесии моментов отклоняющего и противодействующего имеем

$$\frac{0,2 \cdot n_1 \cdot n_2 \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot l \cdot h}{r} = D\alpha$$

или

$$\alpha = \frac{0,2 \cdot n_1 \cdot n_2 \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot l \cdot h}{r D} \dots \dots \dots (a)$$

В этом выражении переменной является только расстояние между взаимодействующими сторонами катушек, т. е. r . Оно изменяется при изменении угла поворота рамки, а это в свою очередь оказывает влияние на величину силы F . Фактически зависимость между углом отклонения рамки и силами токов выражается еще более сложной формулой, в которой должен быть учтен угол β между направлениями потоков обеих катушек в исходном их положении, а также те силы взаимодействия, которые наблюдаются между сторонами $a'c'$ и ac (соответственно $b'd'$ и bd).

Поэтому приближенное выражение для момента отклоняющих сил

$$M_{\text{вп}} = C_1 \cdot n_1 \cdot n_2 \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \sin(\beta - \alpha)$$

или

$$M_{\text{вп}} = C_2 \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \sin(\beta - \alpha),$$

где C_2 — постоянный коэффициент, зависящий от числа витков, формы, размеров и взаимного расположения катушек.

Если по виткам обеих катушек пропустить один и тот же по силе ток $I = I_1 = I_2$, то предыдущее выражение примет вид

$$M_{12} = C_2 \cdot I^2 \sin (\beta - \alpha).$$

Для момента же равновесия будем иметь

$$C_2 \cdot I^2 \sin (\beta - \alpha) = D \alpha$$

или окончательно

$$I^2 = \frac{D}{C_2 \cdot \sin (\beta - \alpha)} \cdot \alpha \dots \dots \dots (6)$$

Выражение это показывает, что зависимость между силой измеряемого подобным прибором тока и углом отклонения его подвижной системы имеет квадратичный характер и, кроме того, зависит от величины $\sin (\beta - \alpha)$, почему шкала такого прибора должна иметь неравномерные деления. В начале шкалы деления обычно получаются мелкими, а более крупные деления располагаются в середине или в конце ее, в зависимости от формы и взаимного расположения катушек. Чувствительность приборов этой системы не одинакова в различных частях шкалы: она больше там, где крупнее деления.

Путем чисто конструктивных ухищрений, о чем будет сказано ниже, удастся сконструировать приборы этой системы так, что зависимость между измеряемым ими током и углом отклонения может быть с очень большим приближением выражена уравнением $I^2 = C \alpha$ или

$$I = C' \sqrt{\alpha}, \dots \dots \dots (в)$$

где C и C' — постоянные прибора.

Этим выражением обычно и пользуются, желая охарактеризовать основное свойство приборов этой системы, а именно, квадратичный характер зависимости между I и α .

Если по обмоткам неподвижной и подвижной катушек проходят различные по величине токи I_n и I_n , то выражение (в) примет вид

$$I_n I_n = C \alpha \dots \dots \dots (г)$$

Из последнего выражения вытекает следующее весьма важное обстоятельство. Если неподвижную катушку электродинамометра включить в цепь последовательно, а подвижную — параллельно, как это представлено на рис. 74, то по первой будет проходить главный ток I_n цепи, а по второй ток I_n , пропорциональный напряжению U цепи. Отклонение подвиж-

ной системы прибора в этом случае будет, очевидно, пропорционально мощности, расходуемой в цепи. Действительно, если умножить обе части уравнения (г) на число r , выражающее в омах сопротивление цепи подвижной обмотки подобного прибора, то мы получим $I_a I_n \cdot r = C \cdot r \cdot \alpha$ или, что то же,

$$I_a U = C \alpha \quad (д)$$

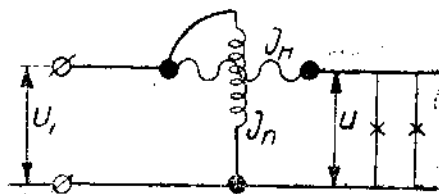


Рис. 74.

Это позволяет разметить шкалу электродинамометра в единицах мощности, т. е. в ваттах, и пользоваться им в качестве прибора, именуемого ваттметром.

Приборы этой системы, в отличие от магнитоэлектрических, одинаково применимы как для постоянного, так и для переменного тока. Действительно, при пропускании переменного тока по обмоткам катушек, его изменение по направлению происходит одновременно в обеих катушках, и следовательно, направление действия электродинамических сил должно оставаться неизменным. Отличие лишь в том, что момент, отклоняющий рамку, в каждое мгновение определяется мгновенными значениями квадрата силы переменного тока. Что же касается величины отклонения рамки, то, благодаря значительной инерции, присущей рамке, эта величина будет зависеть от среднего значения квадрата силы тока. Но так как действующая сила тока равна корню квадратному из его средней квадратичной величины, то величина отклонения, очевидно, пропорциональна квадрату действующей силы тока.

Действительно, обозначив через i — мгновенное, а через I действующее значения силы переменного тока, имеем

$$\alpha = C \frac{1}{T} \int_0^T i^2 \cdot dt \quad \text{или} \quad \alpha = C \frac{1}{nT} \int_0^{nT} i^2 \cdot dt,$$

где n — число периодов, а T — время периода.

$$\text{Но } I = \sqrt{\frac{1}{nT} \int_0^{nT} i^2 \cdot dt}, \text{ следовательно,}$$

$$\sqrt{\alpha} = C_1 I \quad \text{или} \quad I = C \sqrt{\alpha},$$

т. е. и при переменном токе получается та же зависимость, которая была нами принята в первом приближении для случая работы приборов этой системы в цепях тока постоянного.

Система электродинамометров с магнитной цепью, содержащей железо (ферродинамические приборы), отличается от описанной выше тем, что их неподвижная катушка, состоящая из двух обмоток *A* (рис. 75), закрепляется на сердечнике *F* из мягкого легированного железа, а подвижная катушка свободно объемлет железный неподвижно закрепленный цилиндр *B*.

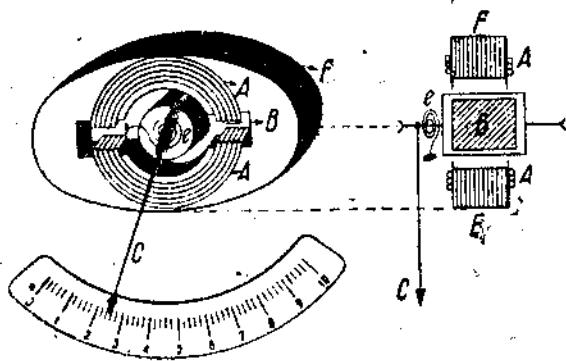


Рис. 75.

Благодаря наличию внутри катушек железного сердечника и цилиндра, вращающий момент этих приборов, при тех же размерах и той же силе тока, может быть увеличен в 15—20 раз по сравнению с электродинамометрами без железа. Это, в свою очередь, позволяет придать подвижной катушке более солидную конструкцию, т. е. вес и прочность, и кроме того делает ферродинамометры менее чувствительными к воздействию внешних магнитных полей на их показания. Однако, точность у них меньше, чем у электродинамометров без железа, особенно при измерениях в тех цепях переменного тока, где не постоянна частота. Объясняется это тем, что поскольку в них магнитные потоки, образованные токами в катушках, замыкаются не через воздух, а через железо, то необходимо считаться здесь с явлениями, которые сопровождают процесс перемagnetизации металла, т. е. с гистерезисом, остаточным намагничением и с потерями энергии на перемagnetизацию железа.

Наконец, некоторые фирмы строят еще один тип электродинамометров—так называемый астатический. Это—элек-

тродинамометры без железа, но во избежание влияния посторонних полей на их показания им придана особая форма. Их неподвижная и подвижная катушки состоят каждая (см. рис. 76) из двух обмоток, причем вторая изготовлена в виде плоской, изогнутой дважды под прямым углом обмотки. Одна из них S_1 располагается внутри, а другая S_2 снаружи неподвижных обмоток на общей оси $a-a$.

Система подвижных обмоток при условии, если они соединены последовательно и в таком виде включены в цепь измеряемого тока, не испытывает никаких направляющих воздействий со стороны постороннего магнитного поля. Магнитное же поле неподвижных катушек, взаимодействуя с током, протекающим по обмотке S_1 , порождает вращающий момент, под влиянием которого вся подвижная система подобного прибора поворачивается.

Астатические электродинамометры строятся по преимуществу для лабораторных целей и, главным образом, как ваттметры.

2. Общее представление о конструкции электродинамометров. На рис. 77 представлен общий вид электродинамометра доскового типа, где видны неподвижные катушки воздушный демпфер, пружинки и приспособление для

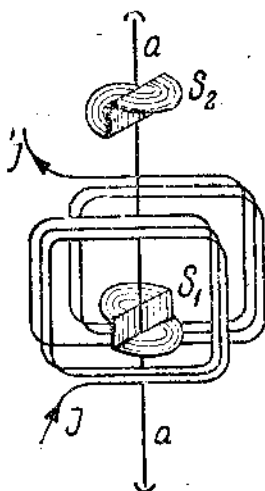


Рис. 76.

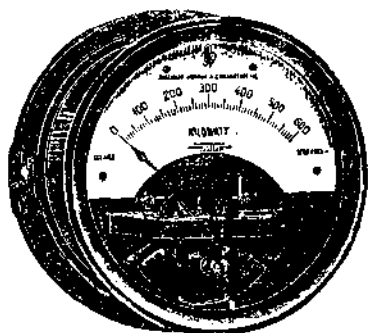


Рис. 77.

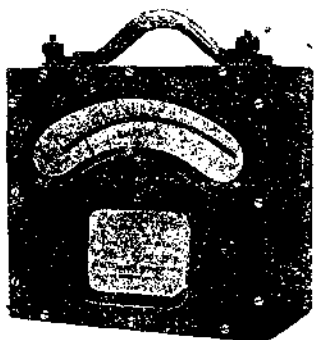


Рис. 78.

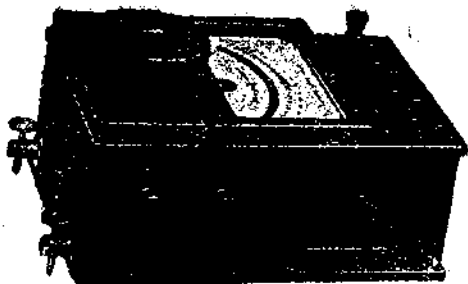


Рис. 79.

их закручивания или раскручивания с целью установки стрелки прибора на нуль шкалы.

На рис. 78 изображен общий вид лабораторного прибора этой системы. На рис. 79 показан общий вид точного миллиамперметра конструкции Бругера (см. дальше). Рис. 80

дает представление об аstaticком электродинамометре.

Подвижная катушка в видах облегчения ее веса изготавливается не на каркасе, а наматывается на деревянной болванке; ее витки склеиваются, она просушивается и затем, будучи осторожно снята с болванки, монтируется на оси прибора.

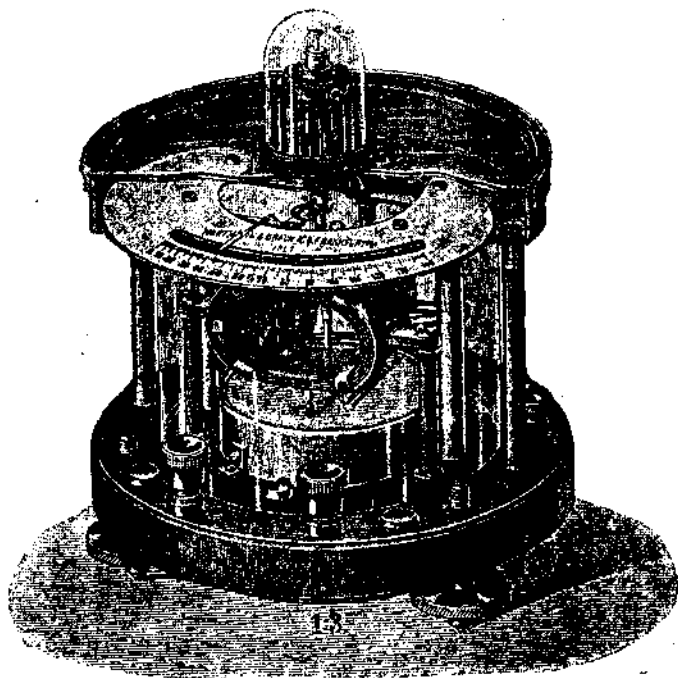


Рис. 80.

Металлический, даже весьма легкий, каркас недопустим, ибо в нем при поворотах рамки индуктировался бы ток, порождалось бы магнитное поле, которое, взаимодействуя с полем катушек, нарушило бы зависимость между углом отклонения и силой тока.

Момент, вращающий подвижную систему электродинамометра без железа, весьма мал, а поэтому ось подвижной системы его предпочтительно располагать вертикально. Дабы поле неподвижной катушки в том месте, где в нем вращается подвижная система, было как можно более равномерным, катушку часто разделяют на две отдельных секции, соединенные последовательно (рис. 81), находящиеся одна от другой на некотором расстоянии a . С той же целью диаметр секций делают в 5—8 раз больше их ширины.

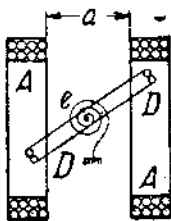


Рис. 81.

На рис. 82 схематически представлен вид прибора лабораторного типа фирмы Сименс. Неподвижная катушка A прибора состоит из двух одинаковых, последовательно соединен-

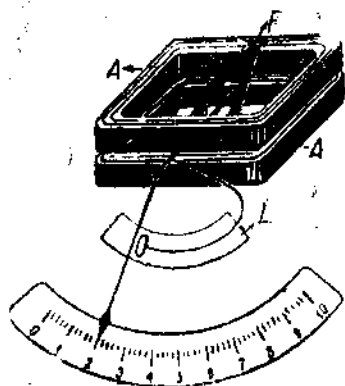


Рис. 82.

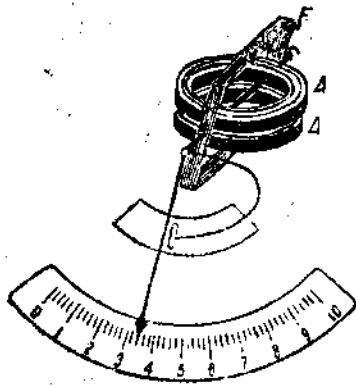


Рис. 83.

ных секций, внутри которых на оси укреплена подвижная катушка F . Соотношение размеров катушек подобрано так, чтобы подвижная система при максимальном допустимом угле поворота не выходила из пределов равномерной части магнитного потока неподвижных катушек. Этим достигается

равномерность делений шкалы прибора. Ток в обмотку подвижной катушки подводится через спиральные пружинки (на рисунке не показаны), служащие одновременно для образования противодействующего момента. Для предохранения прибора от влияния посторонних магнитных полей на его показания, например полей, образованных током в соседних проводах, прибор монтируют в ящике, снабженном экраном. Чтобы предохранить прибор от электростатических влияний, все металлические части прибора, не несущие тока, соединяют металлически для приведения их к одинаковому потенциалу.

На рис. 83 представлен другой тип электродинамометра с неподвижной катушкой, расположенной внутри подвижной. Эта система расположения катушек позволяет несколько снизить собственное потребление энергии прибором и уменьшить его габаритные размеры.

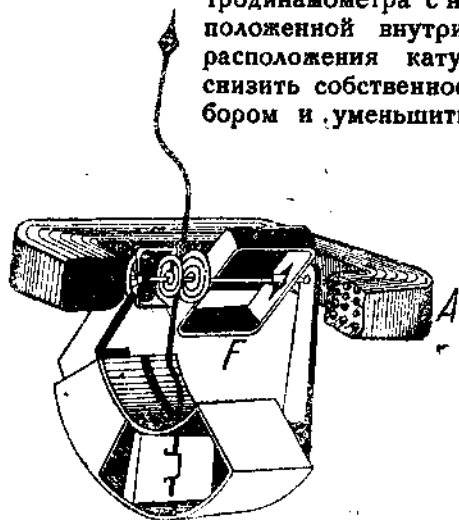


Рис. 84.

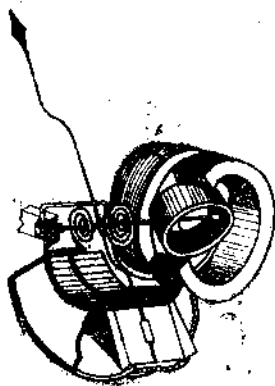


Рис. 85.

Приборы этой системы не аperiodичны по принципу их действия и поэтому снабжаются успокоителями, преимущественно, воздушными. Применение в них магнитных успокоителей недопустимо, так как магнитное поле успокоителя, достаточно большое по сравнению с полями катушек самого прибора, легко может исказить его градуировку.

На рис. 84 и 85 представлено два типа электродинамометров фирмы Гартман и Браун с коробчатыми успокоителями.

Для того, чтобы эти приборы имели как можно более равномерную шкалу, конструктора прибегают к различным

способам. Наилучшие результаты дают конструкции фирм Гартман-Браун и Сименс-Гальске.

В приборах первой фирмы (тип Бругера) неподвижная катушка имеет вид плоской обмотки a (рис. 86), согнутой под некоторым углом γ . Подвижная катушка o , также плоская, укреплена на оси $l-l$, образуя как бы створку на шарнире. В положении покоя обе катушки располагаются своими поверхностями параллельно друг другу (пунктир рис. 86). При пропускании же по обмоткам обеих катушек тока I в указанном на схеме направлении, подвижная катушка отталкивается от правой части неподвижной катушки и в то же время притягивается ее левой частью.

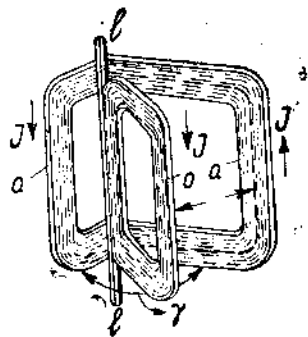


Рис. 86.

Практически оказывается возможным, путем подбора размеров, числа витков и, главное, величины угла раствора γ у неподвижной катушки достигнуть того, что при повороте катушки o , несмотря на изменение расстояния r между нею и катушкой a сила отталкивания не уменьшается. Это равносильно тому, как если бы в исходном уравнении a (стр. 67), связывающем угол отклонения со значениями сил токов, изменение расстояния r между взаимодействующими проводниками катушек не вызывало изменения силы отталкивания. Благодаря подобной конструкции шкала этих приборов почти равномерна, если не считать ее начальных, несколько сжатых делений.

По данному типу фирма строит наиболее точные и чувствительные электродинамометры для измерений в цепях переменного тока. Они строятся на пределы от миллиампер

и милливольт до 5—10 А и до 240 В (рис. 79).

Фирмой Сименс в основу конструкции электродинамометров с почти равномерной шкалой положен принцип, аналогичный примененному в приборах магнитоэлектрической систе-

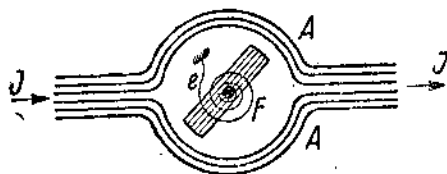


Рис. 87.

мы, снабжаемых железным цилиндром в междуполусном пространстве постоянного магнита. Здесь радиально направленное

поле неподвижной катушки A (рис. 87) создается благодаря особой форме этой катушки. Последняя образуется двумя параллельными пучками проводов, изогнутых по полуокружности. Благодаря этому, плоскости контуров круговых силовых линий во внутренней полости неподвижной катушки расположены радиально, и с ними всегда совмещается плоскость неподвижной катушки при различных углах ее поворота.

3. Схемы включения электродинамометров в цепь и способы расширения их пределов измерения. а) Амперметры. Способ соединения обмоток подвижной и неподвижной катушек электродинамических амперметров видоизменяется в зависимости от величины силы тока. Если последняя не выше 1 А, то неподвижная A и подвижная F обмотки включаются как на рис. 88, т. е. последовательно. В приборах доскового типа подобная схема иногда применяется и при силах тока до 5 А.

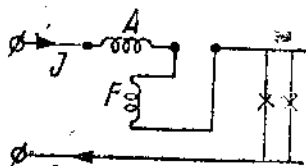


Рис. 88.

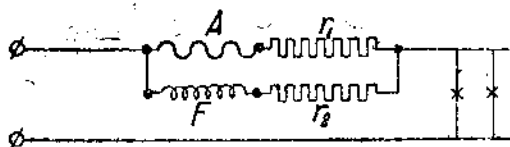


Рис. 89.

Этот способ соединения удобен ввиду его простоты и потому, что показания подобных приборов практически независимы от температуры и частоты тока до 1000 пер/сек.

Токи, превышающие 5 А, через подвижную обмотку и спиральные пружинки пропускать не рекомендуется (вес и чувствительность), а поэтому для них применяется схема соединения рис. 89, где r_1 и r_2 — добавочные сопротивления из материала с ничтожно-малым температурным коэффициентом, компенсирующим влияние относительно большого температурного коэффициента присущего медным проводникам обмоток A и F .

Такая система применяется для токов до 200 А, причем неподвижная катушка прибора секционирована на 2 — 4 части, включаемые последовательно, параллельно или смешанно.

На рис. 90 представлены схемы внутренней коммутации обмоток электродинамических амперметра и вольтметра фирмы Сименс на два предела измерений тока и напряжения. На схеме a буквой C обозначены зажимы прибора; A и F —

неподвижная и подвижная катушки; r_1 и r_2 — добавочные сопротивления в цепи неподвижной, а R_1 и R_2 — в цепи подвижной катушки; A , B и D — штепсельные коммутаторы.

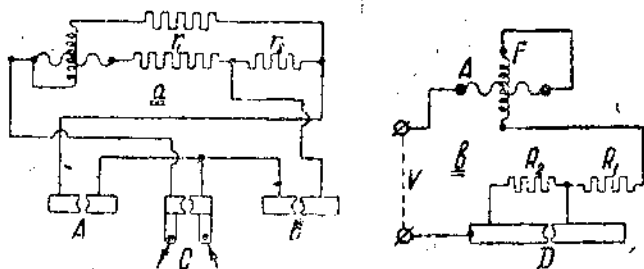


Рис. 90.

Если вставить штепсель в гнездо B амперметра, то это будет соответствовать меньшему пределу измерения силы тока, так как в последовательном соединении с неподвижной катушкой будет введено лишь добавочное сопротивление r_1 . Предел силы тока, измеряемый этим прибором, удваивается, если штепсель переставить из гнезда B в гнездо A . Подобно этому при штепселе, вставленном в гнездо D вольтметра, предел измеряемого им напряжения вдвое меньше, чем при вынутом штепселе.

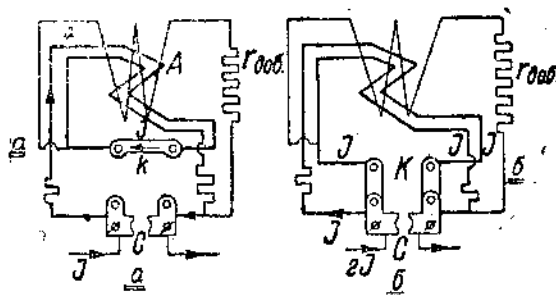


Рис. 91.

На рис. 91 a и b представлена схема коммутации амперметров фирмы Всеобщ. Комп. Электричества, имеющих секционированную неподвижную катушку A из двух совершенно одинаковых обмоток a . Последовательное или параллельное соединение секций неподвижной катушки, а следовательно, и расширение вдвое пределов измерения достигается соответствующим, как

на схемах, переключением коммутатора K . Если сила измеряемого тока еще значительнее, то весь прибор включается через шунт (в цепях постоянного тока) или через посредство так называемых измерительных трансформаторов тока (в цепях переменного тока — см. параграф 10).

Дабы показания этих приборов в цепях переменного и постоянного токов были одинаковы (это важно потому, что тогда можно градуировать электродинамометры на постоянном токе, для измерения которого мы располагаем приборами магнитоэлектрической системы, наиболее точными, как это отмечено выше), индуктивное сопротивление обмоток прибора должно быть незначительно по сравнению с их активным сопротивлением. Того же можно достигнуть таким подбором параметров цепей неподвижной и подвижной катушек, при котором их индуктивные сопротивления находились бы в том же отношении, что и активные.

Поэтому подвижная катушка на схеме рис. 89 приключается в параллель не непосредственно к неподвижной катушке, а после добавочного сопротивления r_1 , которое должно быть безиндукционным.

Примечание. Сказанным выше поясняется и то обстоятельство, что электродинамометры в цепях переменного тока не следует включать при посредстве обычных шунтов. Если работать по такой схеме, то самоиндукция катушки уменьшит силу ответвляющегося через нее тока, вызовет отставание его от напряжения и, как результат, уменьшит вращающий момент, под влиянием которого отклоняется подвижная система. Такой прибор, отградуированный на постоянном токе, будет давать показания в цепях тока переменного не только ошибочные, но еще и зависящие от частоты тока. Поэтому электродинамометрические амперметры и вольтметры, проградуированные постоянным током при частотах переменного тока, превышающих 100 пер/сек., дают уже значительную ошибку показаний.

б) Вольтметры. Для измерения напряжений электродинамометр вводится в цепь, как указано на рис. 90-в, 92—93, где приняты те же обозначения, что и на предыдущих схемах, а буквой $r_{доб}$ отмечено то добавочное сопротивление, которое необходимо ввести последовательно в цепь последовательно же соединенных обмоток прибора, дабы ток, текущий в этой цепи, не превысил допустимой для подвижной обмотки нормы.

Электродинамометр в этой схеме измерит фактически силу тока, ответвляющуюся через цепь, образованную его обмотками и добавочным сопротивлением, т. е. отметит $I = C\sqrt{P}$.

Однако, если сопротивление цепи, равное $r_A + r_F + r_{доб} = R$, постоянно и несоизмеримо больше индуктивного сопротивления

обмоток, то, умножив обе части этого уравнения на R , получим $I \cdot R = R \cdot C' \sqrt{\alpha}$ или $U = C'' \sqrt{\alpha}$.

Отсюда явствует, что шкала прибора, работающего по этой схеме, может быть размечена непосредственно в вольтах или его долях.

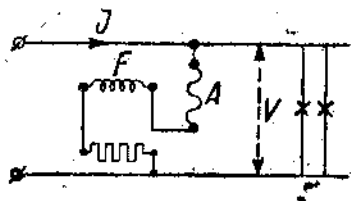


Рис. 92.

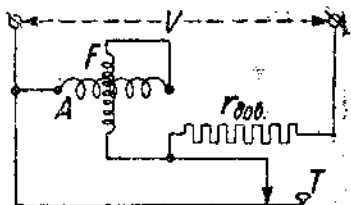


Рис. 93.

Для расширения пределов напряжения, измеряемого данным вольтметром, его снабжают добавочным безиндукционным и безъемкостным сопротивлением. Последнее монтируется внутри прибора или в отдельном ящичке.

Для снижения температурных влияний на точность показаний электродинамометров добавочные сопротивления для них делают из манганина, и при этом рассчитывают их так, чтобы сопротивление медных обмоток прибора составляло от $1/8$ до $1/10$ общего (включая добавочное) сопротивления прибора. В результате, обмотки прибора имеют ничтожно малый положительный температурный коэффициент. Последний компенсируется тем, что для спиральных пружинок прибора подбирается материал с таким же по величине, но отрицательным температурным коэффициентом. Кроме того электродинамические вольтметры переносного типа обычно снабжаются особой кнопкой T (см. рис. 93) для включения обмоток прибора только на время отсчета показаний.

4. Источниками погрешностей приборов электродинамометрической системы могут быть: самоиндукция обмоток, вызывающая отставание тока от напряжения и, как результат этого, уменьшение действующего вращающего момента в приборе; температурные изменения, влекущие за собою нагрев обмоток и спиральных пружинок, т. е. изменение сопротивления первых и коэффициента кручения вторых; возможные утечки магнитных потоков катушек (рассеяние); изменение частоты тока, что влечет за собою изменение индуктивного сопротивления обмоток; внешние магнитные поля, оказывающие значительное влияние на показания этих приборов, потому что

собственные поля электродинамометров без железа не велики, и, наконец, токи в соседних проводах (электродинамические воздействия).

Однако, рациональной конструкцией, снижением самоиндукции обмоток при относительно большом омическом их сопротивлении, применением схемы температурной компенсации и экранированием внутренних частей прибора достигают того, что приборы этой системы являются наиболее точными и чувствительными из применимых в цепях переменного тока.

Дабы парализовать самоиндукцию подвижной катушки у электродинамометров с железом, параллельно обмотке этой катушки иногда вводят конденсатор, чем достигают совпадения по фазе токов неподвижной и подвижной катушек. Благодаря наличию железа в магнитной цепи у электродинамометров этого типа возникают дополнительные источники погрешностей, как-то: изменение магнитной проницаемости магнитопровода и, как результат, непостоянство магнитной утечки (рассеяния), гистерезис в железе и отставание магнитного потока от намагничивающего тока вследствие наличия железного магнитопровода.

Применяя железные сердечники из тонкослойного высоко-сортного железа, удается все же свести почти к нулю эти дополнительные источники погрешностей, т. е. не слишком снизить точность показаний приборов с железом, выигрывая одновременно на том, что у них чувствительность больше, а воздействие внешних полей на их показания меньше, чем у электродинамометров без железа.

Точность показаний первоклассных приборов этой системы ниже, чем у магнитоэлектрических, но все-таки она довольно велика: порядка 0,3—0,5% от наибольшего показания прибора.

5. Свойства и область применения. 1) Постоянная лабораторных приборов доходит до миллиампера на деление шкалы.

2) Приборы эти пригодны как для постоянного, так и для переменного тока, причем они могут быть градуируемы на постоянном токе.

3) Градуировка приборов этой системы остается постоянной во времени (при бережном, конечно, обращении с ними).

4) К недостаткам их необходимо отнести: относительно большую зависимость их показаний от влияния внешних магнитных полей, почему при измерениях ими в цепях постоянного тока, а также при градуировке на этом токе, следует брать отсчет дважды, меняя направление тока, и из полученных отсчетов вычислять среднее; значительное собственное

потребление энергии электродинамометрами без железа, достигающее у амперметров на 5—10 А и вольтметров на 150—250 В величины 5—15 ватт (у электродинамометров с железом собственное потребление энергии очень снижается—до 3 и менее ватт); их слабую перегрузочную способность; значительно меньшее сопротивление этих вольтметров сравнительно с вольтметрами магнитоэлектрической системы (порядка всего 30—40 Ω на вольт шкалы) и, наконец, довольно значительную стоимость. Помимо этого, электродинамометры с конденсатором не пригодны для измерений в цепях постоянного тока.

§ 9. Приборы электромагнитной системы.

Условное обозначение



Эта система приборов до последнего времени являлась наиболее распространенной во всех тех случаях, где не требовалось особой точности измерений и где вопрос о прочности и стоимости устанавливаемого прибора являлся решающим, так как эти приборы значительно дешевле других, просты по конструкции и прочны. Однако, в последние годы достигнуты столь большие успехи в конструировании приборов этой системы при сравнительно небольшом повышении цены на них, что они начинают конкурировать с приборами II и даже I классов электродинамической системы.

1. **Принцип действия** приборов этой системы основан на намагничении железного сердечника того или иного вида, составляющего подвижную систему прибора и находящегося в сфере влияния магнитного поля, образуемого измеряемым током. Последний пропускается по обмотке неподвижной катушки прибора. В результате намагничения железный сердечник перемещается—втягивается внутрь намагничивающей катушки, или если он был и до того внутри последней, то изменяет свое положение так, чтобы расположиться в более густой части потока.

Принцип действия приборов этой системы лучше всего поясняется электромагнитным прибором, впервые предложенным Кольраушем (ныне уже не применяемым). Если через обмотку неподвижно укрепленной катушки А (рис. 94) пропускать измеряемый ток I , то последний создаст магнитное поле, под влиянием которого подвешенный над катушкой железный сердечник F намагничивается и втягивается внутрь катушки, преодолевая упругое сопротивление пружины C . Указатель D , соединенный с сердечником, при этом перемещается

вдоль шкалы прибора и по величине этого перемещения можно, при постоянстве коэффициента растяжения пружины, судить о силе тока.

Сила, с которой втягивается подвижная система подобного прибора, вообще говоря, пропорциональна силе измеряемого прибором тока I , а также напряженности H поля, им порождаемого. Противодействующая сила пропорциональна моменту сопротивления D спиральной пружины (или силе тяжести противовеса) и углу поворота α подвижной системы. Так как неподвижная катушка не содержит сердечника, способного к намагничению, то H пропорциональна силе измеряемого прибором тока, и тогда, в самом первом приближении можно положить, что

$$C_1 \cdot I \cdot H = C_2 \cdot D \cdot \alpha$$

или

$$C_3 I^2 = C_2 D \alpha,$$

откуда

$$I^2 = C \alpha$$

или

$$I = C' \sqrt{\alpha}$$

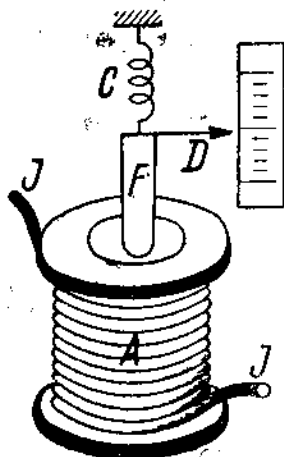


Рис. 94.

Однако, благодаря тому что подвижная система во время действия прибора намагничивается, в предыдущее исходное и весьма приближенное выражение необходимо ввести значение коэффициента магнитной проницаемости, что, как известно, не может быть представлено аналитически.

Кроме того угол отклонения подвижной системы является также функцией коэффициента самоиндукции неподвижной катушки, ибо этот последний зависит от индукции в железных частях прибора, перемещающихся во внутренней полости катушки. Если бы самоиндукция изменялась прямо пропорционально углу поворота подвижной системы, то вращающий момент был бы пропорционален квадрату силы тока, и тогда при постоянстве коэффициента D зависимость приняла бы указанный выше вид, т. е.

$$I = C' \sqrt{\alpha}.$$

Так как пропорциональности между коэффициентом самоиндукции катушки и углом α поворота подвижной системы в при-

боре фактически не наблюдается, то эта зависимость все же остается весьма приближенной.

Деления шкалы этих приборов, очевидно, неравномерны и, как явствует из сказанного выше, шкала их по самому принципу действия приборов не должна быть даже квадратичной. Приборы эти, очевидно, применимы как в постоянном, так и в переменном токах.

2. Общее представление о конструкции приборов электромагнитной системы. На рис. 95 представлен наиболее старый тип приборов этой системы, предложенный Гуммелем.

Во внутренней полости неподвижно укрепленной катушки *A*, по обмотке *C* которой проходит измеряемый прибором ток, на оси, расположенной эксцентрично, укреплена небольшая пластинка *F* из мягкого железа. При пропускании по обмотке катушки тока создается магнитное поле, пластинка намагничивается и перемещается к внутренней поверхности катушки, где, как известно, поле более плотно, нежели вдоль оси катушки. Противо-

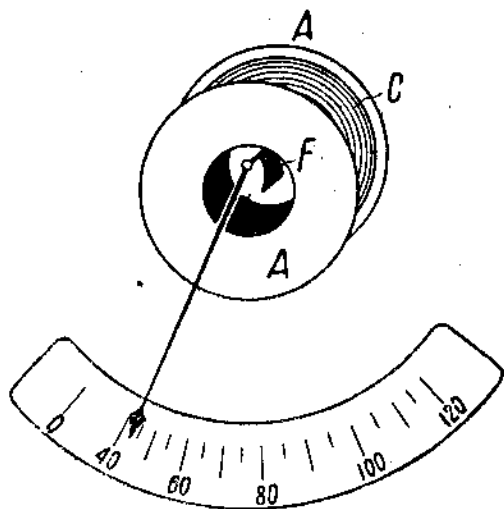


Рис. 95.

действующий момент порождается тяжестью самой пластинки, противовесом или спиральной пружинкой, связанными с осью (на рисунке не показаны).

На рис. 96 представлен современный тип приборов этой же системы. Их действие основано на следующем: магнитное поле, порождаемое током текущим по обмотке *C*, одновременно намагничивает как подвижную, скрепленную с осью *a—a* прибора железную пластинку *F*, так и вторую пластинку *E*, укрепленную неподвижно внутри катушки. При этом создаются силы отталкивания, под влиянием которых подвижная пластинка удаляется от неподвижной, вращая ось прибора и скрепленную с нею стрелку. Успокоитель — воздушный, коробчатого

типа. Противодействующий момент создается спиральной пружиной e ; уравновешение подвижной системы достигается помощью противовесов $f-f$, скрепленных с осью прибора.

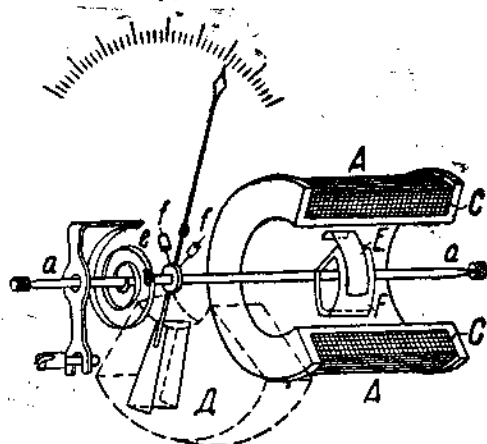


Рис. 96.

Рис. 97 изображает тип прибора с плоской катушкой, внутри которой, при пропускании по ее обмотке тока, втягивается железный сердечник в виде пластинки B , скрепленной с осью прибора. Успокоитель — воздушный, поршневой. Противодействующий момент создается спиральной пружиной e .

Разновидностью последнего типа является

прибор, изображенный на рис. 98. В нем имеется дополнительное приспособление в виде железной пластинки F , вдвигая или, наоборот, выдвигая которую из внутренней полости прибора, мы тем самым можем изменять чувствительность прибора.

Наконец, на рис. 99 представлен недавно сконструированный инж. Скирль астатический прибор, состоящий из двух катушек, обмотки коих соединены последовательно, но так, чтобы магнитные поля их были направлены в противоположные стороны. Если такой прибор

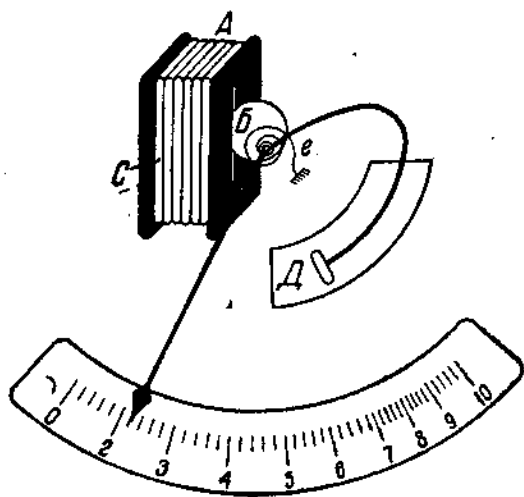


Рис. 97.

подвергается воздействию постороннего поля, то оно в зависимости от своего направления усиливает поле одной из обеих катушек настолько же, насколько ослабляет поле другой. Результирующий вращающий момент, под влиянием которого спаренная подвижная система перемещается, очевидно, уже не зависит от постороннего поля, т. е. прибор астатичен.

На рис. 100 представлен переносный прибор (вольтметр) на 3 предела измерений, из числа типов наиболее совершенной конструкции, в которых, благодаря рациональному подбору формы и размеров частей, а также применению для подвижной системы

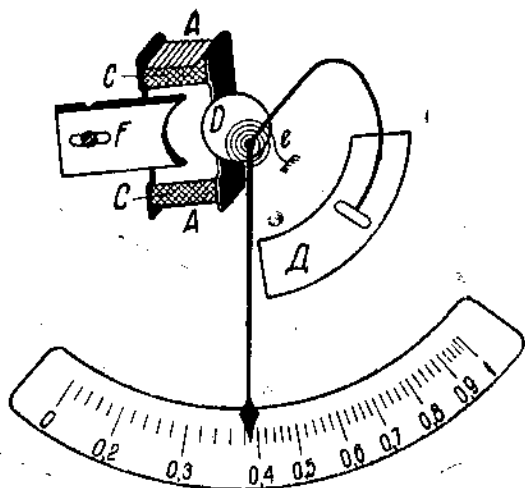


Рис. 98.

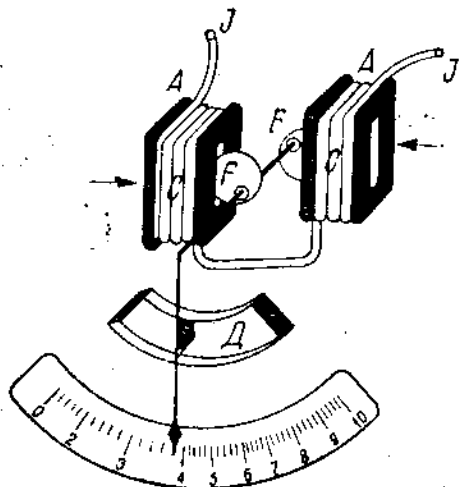


Рис. 99.

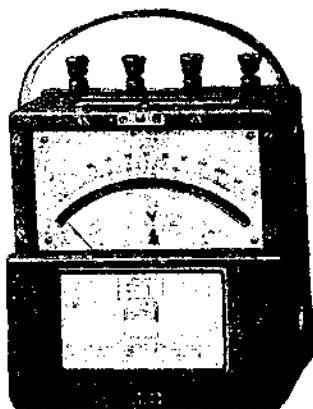


Рис. 100.

высокосортового железа, удалось достигнуть относительно большой точности показаний (около 0,5%) и довольно равномерной шкалы.

На рис. 101 и 102 представлен досковой тип приборов этой системы, менее точных; на последнем рисунке видны: стрелка, неподвижная катушка, ось, неподвижная и подвижная железные пластинки, успокоитель воздушный, спиральные пружинки. Там же видны: подпятник оси и винтик для установки стрелки прибора на нулевое деление шкалы. Точность прибора этого типа порядка 1,5—2% и более. В на-

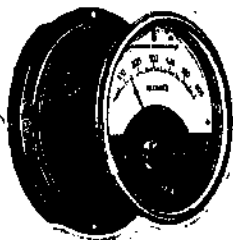


Рис. 101.

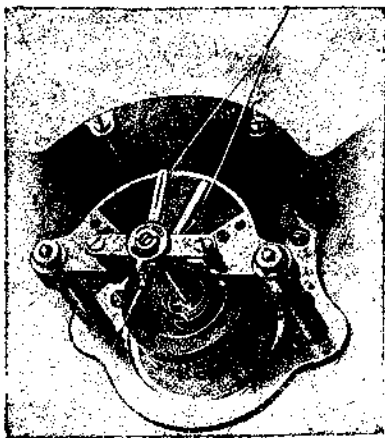


Рис. 102.

чае шкалы эти приборы обыкновенно имеют весьма небольшую чувствительность (очень мелкие деления), почему отсчету по ним следует верить, начиная с 15—20% шкалы. Аперiodичность прибора достигается применением воздушных (поршневых) успокоителей.

3. Схемы включения электромагнитных приборов в цепь и способы расширения их пределов измерения (секционирование обмоток и измерительные трансформаторы). До недавнего сравнительно времени амперметры этой системы изготовлялись непосредственно для измерений силы тока до 1000 и даже до 3000 А. Обмотка их неподвижной катушки для сил токов до 20 А делалась из медного проводника, а для более сильных токов из толстой медной ленты. В амперметрах на большие силы токов обмотка катушки представляла толстое медное разрезное кольцо. Подобная система весьма подвержена

действию посторонних магнитных полей, почему она выходит из употребления.

Шунтирование амперметров этой системы также встречает затруднения, ибо для снижения ошибок показаний подобных приборов за счет нагрева их обмоток током необходимо применять схему температурной компенсации т. е. вводить добавочное сопротивление из манганина. При больших силах измеряемого прибором тока эта схема повлечет за собой настолько большое возрастание электрической энергии, потребляемой самим прибором, что шунт окажется практически мало пригодным. Обмотка вольтметров этой системы делается из тонкой медной проволоки сопротивлением порядка 25 — 30% от необходимого общего сопротивления вольтметра. Все остальное

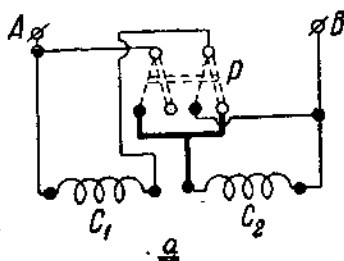


Рис. 103-а.

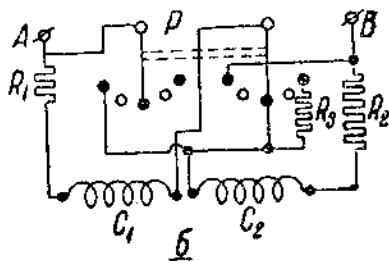


Рис. 103-б.

его сопротивление выполняется из манганиновой проволоки в виде катушек, лучше плоских, монтируемых на задней доске прибора.

Секционирование обмотки. Переносные приборы этой системы могут быть построены на два и большее число пределов измерения. В первом случае применяется последовательное или параллельное соединение двух секций C_1 и C_2 обмотки прибора посредством переключателя P , как это представлено на схемах амперметра a и вольтметра $б$ (рис. 103). Здесь буквами A и B обозначены зажимы прибора, R_1 , R_2 и R_3 добавочные сопротивления вольтметра. Наличие переключателя ограничивает максимальный предел измерения 40 амперами. Достоинством этой системы является возможность перевода прибора с одного на другой предел измерения без разрыва цепи.

Для больших сил токов и большого числа пределов измерения прибегают: у амперметров — к подразделению обмотки неподвижной катушки на несколько секций из проводников

различного сечения, а у вольтметров — к секционированию добавочного сопротивления, как это представлено на схемах а и б рис. 104.

Здесь А общий зажим, а остальные зажимы соответствуют различным пределам измерения.

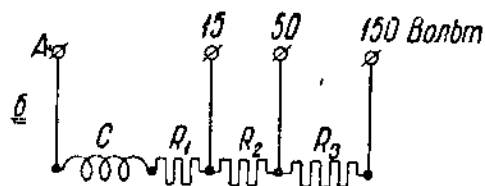
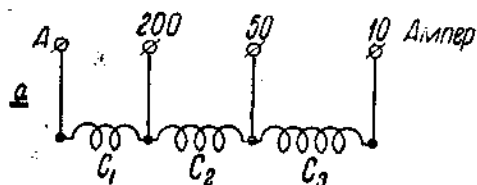


Рис. 104.

Для расширения пределов измерения электромагнитных приборов при переменном токе, и особенно в высоковольтных цепях, весьма широко применяется включение их совместно с измерительными трансформаторами тока и напряжения.

Измерительные трансформаторы представляют собою (рис. 105) замкнутую магнитную цепь из тонкого листового железа А (так называемое „керно“), на которую навиваются две обмотки из изолированного проводника (на рисунке обмотки показаны отдельно, в действительности они наматываются одна поверх другой). Как известно, во вторичной обмотке II подобного прибора, в случае подключения его первичной обмотки I к переменному напряжению U_1 , индуцируется вторичная э. д. с. U_2 , связанная с первой следующим соотношением:

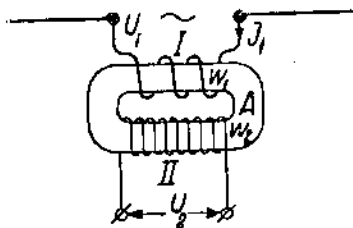


Рис. 105.

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{W_1}{W_2} = u \dots \dots \dots (a)$$

Здесь W_1 и W_2 — числа витков первичной и вторичной обмоток, а u — коэффициент трансформации.

Так как коэффициент полезного действия у хорошо-сконструированного трансформатора достигает 99,5 — 99,8%, то можно в первом приближении положить, что мощность, подводимая в первичную обмотку трансформатора, приблизительно равна мощности в его вторичной обмотке, если последняя замкнута на некоторый приемник.

Таким образом, $I_1 \cdot U_1 = I_2 \cdot U_2$, а сопоставляя это с выражением для коэффициента трансформации, имеем

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{W_2}{W_1} = u' \dots \dots \dots (6)$$

Отсюда следует, что напряжения в обмотках трансформатора прямо пропорциональны числам витков, а силы токов обратно пропорциональны им. Это позволяет применить амперметр, рассчитанный на малую силу тока, для измерения больших сил токов, а также применять низковольтный вольтметр для измерений высоких напряжений.

Для этого необходимо амперметр подключить ко вторичной (с большим числом витков) обмотке измерительного трансформатора тока (рис. 106), а первичную (с малым числом витков) обмотку его ввести последовательно в цепь измеряемого тока. I_1 . Если при этом коэффициент u' трансформации подобного прибора сохранит постоянное значение при различных нагрузках, то сняв показание I_2 с амперметра и увеличив его в u' раз, мы тем самым, определяем величину силы тока в цепи, ибо из выражения (6) имеем

$$I_1 = I_2 \cdot u' \dots \dots \dots (в)$$

Если одну из обмоток измерительного трансформатора (с большим числом витков) включить в параллель к тем точкам цепи, между которыми желают измерить разность потенциалов U_1 , а к зажимам другой его обмотки (с малым числом витков) присоединить вольтметр, то сняв показание U_2

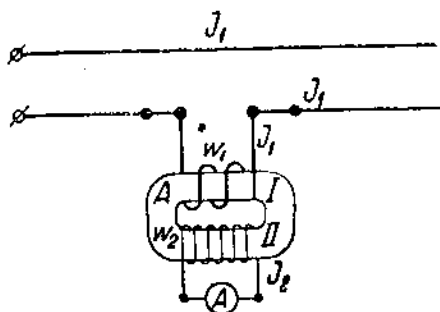


Рис. 106.

с вольтметра, нетрудно подсчитать и величину искомого напряжения равную

$$U_1 = U_2 \cdot u \dots \dots \dots (r)$$

Основным назначением измерительных трансформаторов является работа в высоковольтных цепях, ибо они позволяют производить в них измерения при помощи низковольтного вольтметра или амперметра, рассчитанного на небольшую силу тока. Обычно, их вторичные обмотки рассчитываются для приключения к ним амперметров со шкалой до 5 (максимум 10) ампер, а вольтметров — на 130 вольт. Это, однако, не исключает возможности пользоваться измерительными трансформаторами тока для измерения больших сил токов также и при

низких напряжениях, не прибегая к секционированию обмоток амперметра.

Измерительные трансформаторы тока удобны еще и том отношении, что в случае короткого замыкания на линии амперметры, включенные в нее непосредственно, сгорят, в то время как первичная обмотка трансформатора не повредится. Точность измерений с помощью измерительных трансформаторов

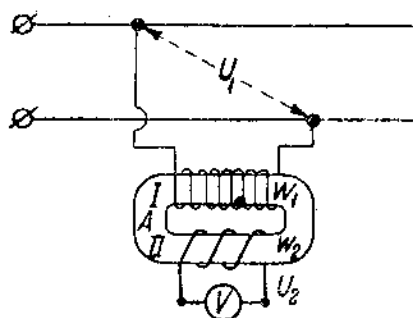


Рис. 107.

достигает 0,5—1% и даже выше. Это осуществимо только при наличии прямой пропорциональности между первичной и вторичной силами тока и при сдвиге между ними по фазе весьма близком к 180° . Несоблюдение последнего условия, т. е. наличие в трансформаторе угловой погрешности (см. приложение VI), превышающей 60 минут, при точных измерениях уже не допустимо, и особенно, когда такими трансформаторами пользуются в соединении с ваттметрами. Для удовлетворения этим требованиям магнитную цепь у трансформаторов тока делают из высокосортного тонко-слоистого железа, хорошо замкнутой, и рассчитывают их для работы при малых индукциях (порядка до 800 гауссов). Этим достигается понижение рассеяния и потерь в железе и как результат, уменьшение угловой погрешности трансформатора и увеличение постоянства его коэффициента трансформации. Однако, с изменением величины и характера

его нагрузки, как угловая погрешность, так и коэффициент трансформации, не остаются постоянными, почему к точным измерительным трансформаторам обычно прилагаются поправочные кривые, подобные изображенным на рис. 108. Для получения истинного значения измеряемой силы тока надо показание прибора помножить на поправочный коэффициент соответственно нагрузке. Верхней кривой ($\cos \varphi = 1$) надо пользоваться при измерениях силы тока, так как в амперметрах удается достигнуть совпадения по фазе между током и напряжением; остальные кривые служат при измерениях мощности.

Так как измерительные трансформаторы тока рассчитываются, исходя из работы их вторичной обмотки, на весьма малое сопротивление амперметра, то вторичная обмотка трансформатора должна быть замкнута на амперметр или же коротко. Если же до введения его первичной обмотки в цепь ее оставить разомкнутой, то во-первых, на ее зажимах возникнет высокое напряжение, не безопасное иногда для обслуживающего персонала, а во-вторых, в результате отсутствия вторичных, противодействующих ампервитков весь первичный ток будет намагничивающим, что может привести к

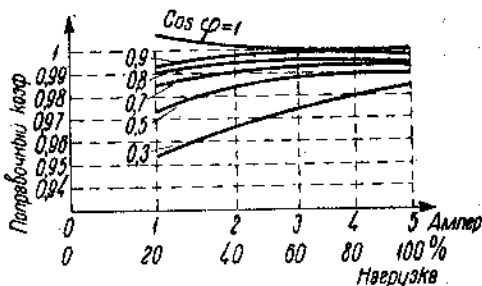


Рис. 108.

чрезмерному повышению индукции в сердечнике трансформатора, его недопустимому нагреву, а также возникновению в нем остаточного намагничивания. Погрешности при работе с подобным трансформатором, конечно, возрастут.

Влияние частоты и формы кривой измеряемого тока почти не сказывается на постоянстве коэффициента трансформации и угловой погрешности измерительных трансформаторов. Длительную перегрузку до 20% они выдерживают без повреждений. Общий вид трансформаторов тока см. на рис. 109.

Строятся трансформаторы тока на силы токов в первичной цепи от 5 до 10 000 ампер. Первичная обмотка точных (лабораторных) трансформаторов часто секционирована на 2, 4 и более частей, что дает возможность пользоваться одним и тем же трансформатором в различных диапазонах измеряемых сил

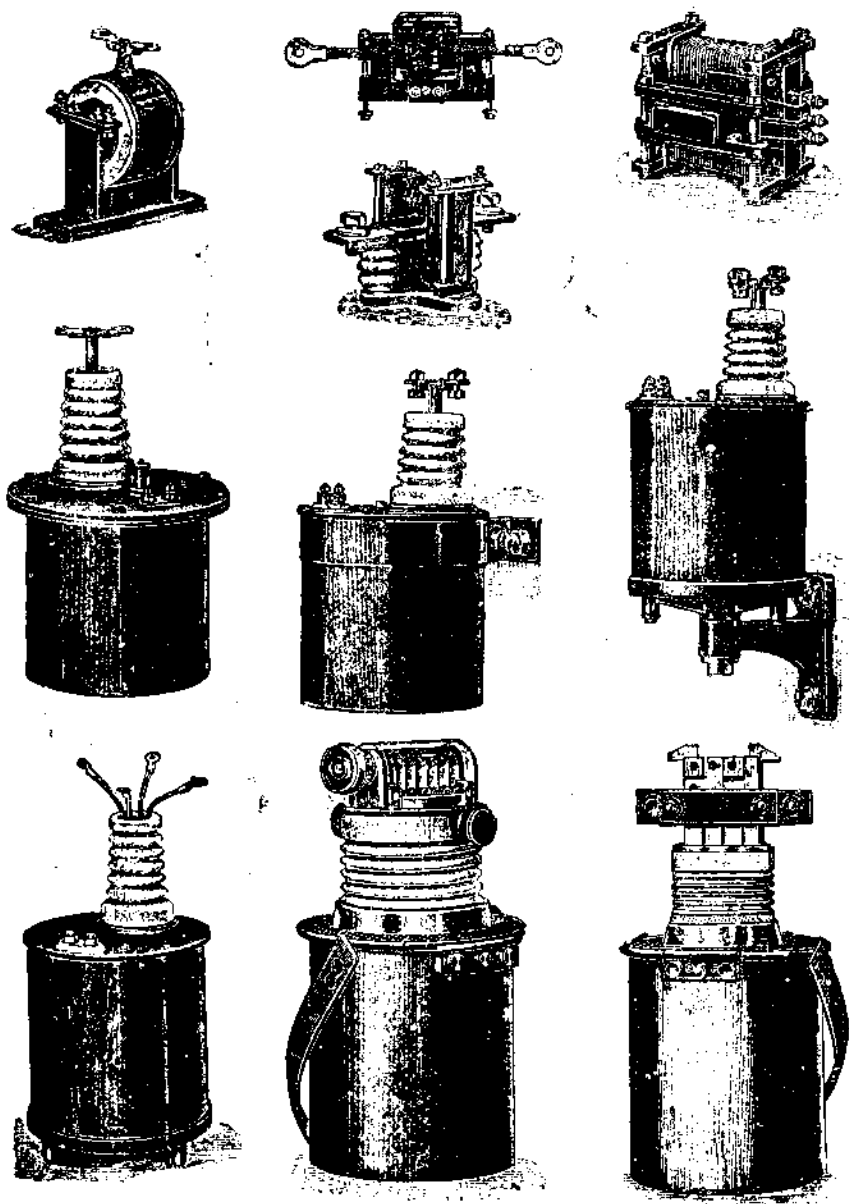
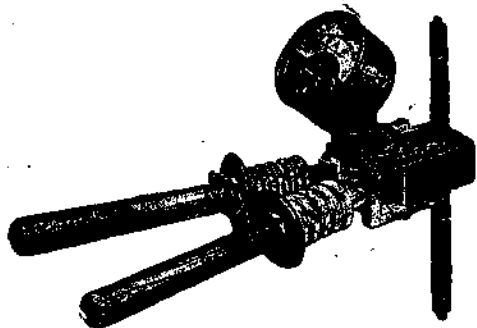


Рис. 109. Измерительные трансформаторы тока.

токов. Для приближенного суждения о силе тока в электрических сетях и шинах распределительных устройств строятся особые измерительные трансформаторы тока, первичная цепь коих изготовляется в виде клещей, охватывающих провод или шину (рис. 110). Вторичная их цепь, в виде катушки, объемлет клещи у их корня и соединяется с амперметром; последний иногда монтируется также на клещах. Если ручки клещей хорошо изолированы, то подобным прибором можно производить измерения и в сетях высокого напряжения.

Измерительные трансформаторы напряжения применяются в цепях переменного тока для измерения напряжений свыше 500 вольт взамен добавочных сопротивлений, которыми пользуются при измерении напряжений ниже 500—600 вольт. В отличие от трансформаторов тока эти трансформаторы можно включать в цепь при разомкнутой вторичной цепи, и, наоборот, последнюю не рекомендуется замыкать накоротко. Объясняется это тем, что первичная обмотка трансформатора напряжения подключается к практически постоянному напряжению, так что результирующий магнитный поток в них почти не изменяется. Магнит-



* Рис. 110. Клещи Дитце.

ную индукцию для них, в противоположность трансформаторам тока, берут большую (порядка 10 000 силовых линий). Погрешности трансформаторов напряжения обычно удается свести к столь небольшой величине, что при технических измерениях не представляется необходимым вводить поправки на величину их коэффициента трансформации. Для первичных напряжений до 12 000 вольт измерительные трансформаторы напряжения строятся с подразделенной (секционированной) обмоткой. Для больших напряжений строятся особые, так называемые каскадные трансформаторы. На рис. 111 представлен общий вид трансформаторов напряжения.

Вопрос. Как изменится постоянная амперметра, подключенного к цепи через измерительный трансформатор с коэффициентом трансформации равным 50?

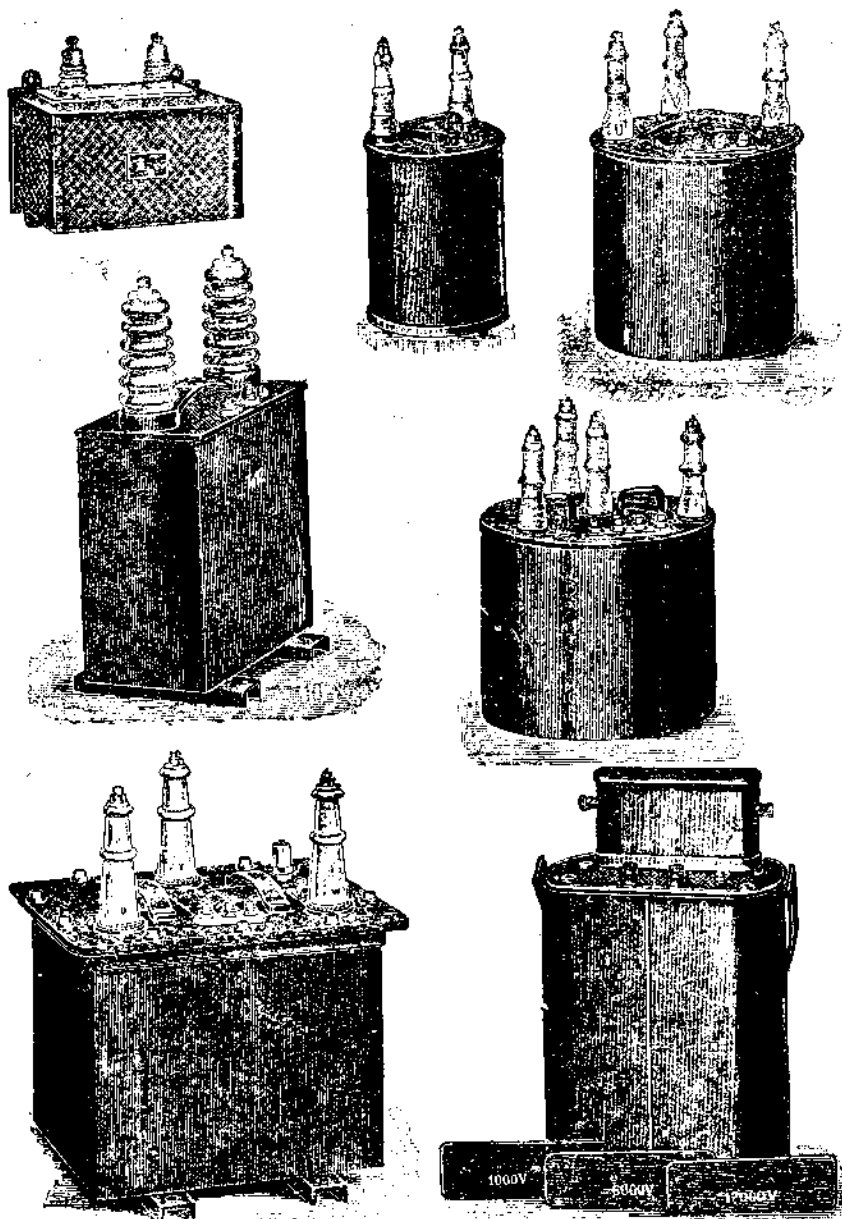


Рис. 111. Измерительные трансформаторы напряжения.

4. Источниками погрешности приборов электромагнитной системы являются: гистерезис, т. е. неодинаковая степень намагничивания подвижной системы прибора при возрастающей и убывающей силах измеряемого им тока. Погрешность от этой причины сказывается как на постоянном, так и на переменном токах.

Но в последнем случае возникают еще добавочные причины ошибок, а именно: потери на токи Фуко в железе подвижной системы и в железных частях самого прибора, как результат их периодического перемагничивания, а также самоиндукция обмотки прибора. Вследствие этих явлений увеличивается полное сопротивление прибора, и уменьшается степень намагничивания подвижной системы. Поэтому показание прибора на переменном токе должно быть меньше, чем на постоянном токе той же силы.

Однако, применением высокосортных сортов мягкого железа для подвижной системы прибора, подбором формы и по возможности малых размеров его неподвижной катушки удастся свести погрешность от указанных причин к долям процента.

Влияние внешних магнитных полей на показания приборов этой системы велико, так как собственное магнитное поле обмотки прибора незначительно.

Некоторую помощь оказывает экранирование прибора, для чего его заключают в железный корпус.

Для уменьшения погрешности показаний этих приборов от температурных влияний (в том числе и от нагрева обмотки прибора протекающим по ней током) применяется схема температурной компенсации, причем у амперметров температурные коэффициенты шунта и обмотки с добавочным к ней сопротивлением должны быть по возможности близки по величине друг к другу.

Наконец, погрешность показаний у вольтметров этой системы наблюдается также при изменениях частоты и формы кривой тока вследствие связанного с этим изменения полного сопротивления прибора. Для уменьшения погрешности от этой причины следует увеличивать активное сопротивление обмоток, снижая в то же время ее самоиндукцию, и градуировать приборы током той частоты, при которой они будут в дальнейшем работать.

5. Свойства и область применения. 1. Приборы электромагнитной системы пригодны как для постоянного, так и для переменного токов, причем в последнем случае они дают более точные показания.

2. Приборы эти по принципу их действия не аperiodичны.
3. Градуировать их можно постоянным током, для чего необходимо только соответственно каждому значению силы тока менять его направление и из двух полученных отчетов брать среднее.

4. Приборы эти выдерживают сравнительно большую перегрузку.

5. Приборы этой системы просты в конструктивном отношении и поэтому дешевы.

6. Собственное потребление ими электрической энергии не особенно велико: у амперметров на 5—30 А оно составляет от 3 до 6 ватт, а у вольтметров порядка от 0,01 до 0,1 ватта на 1 вольт шкалы.

К недостаткам этих приборов относятся: большая зависимость их показаний от посторонних магнитных полей; неравномерная шкала и весьма малая чувствительность в начале шкалы; небольшое сопротивление вольтметров (порядка 15—20 ом на 1 вольт шкалы) и, наконец, относительно небольшая точность показаний, хотя в последние годы некоторыми фирмами в конструировании приборов этой системы достигнуты столь большие успехи, что ими уже выпускаются лабораторные приборы этой системы, начинающие конкурировать с электродинамическими приборами (у образцовых приборов погрешность снижена до 0,5 и даже до 0,3% наибольшего их показания). Данные о приборах электромагнитной системы см. в прил. 1.

§ 10. Приборы тепловой системы.

Условное обозначение



1. Принцип действия приборов этой системы основан на нагреве измеряемым током (или его определенной частью) тонкой металлической нити, закрепленной в точках *A*—*B* (рис. 112), удлиняющейся вследствие нагрева и провисающей, как показано пунктиром *ACB*. К середине нагреваемой нити, в точке *D*, прикреплен один конец тонкой металлической проволоки (так называемого мостика), другой конец которой закреплен в точке *F*. От середины мостика отходит тонкая шелковая нить *a*—*f*, перекинутая через легкий блочек *h*, скрепленный со стрелкой (указателем) *d* прибора. Свободный конец шелковой оттяжной нити прикреплен к свободному концу упругой стальной пружинки *b*, заделанной другим концом неподвижно (точка *K*).

Под влиянием пропускаемого по нити AB тока в ней за время t выделится согласно закона Джоуля количество энергии в виде тепла, равное $Q = 0,24 I^2 \cdot r \cdot t$ калорий, где r — сопротивление нити.

Тепло это частично рассеивается вследствие теплопередачи к остальным частям прибора, а также в окружающую среду, благодаря излучению и конвекции, частично же идет на нагрев нити.

Если нагреваемая нить прибора имеет ничтожное сечение по сравнению с длиной, то теплопередачей можно пренебречь и положить, что все рассеяние тепла происходит только путем излучения его с поверхности нити и конвекции. Это, как известно из курса физики, можно выразить (при не очень большом нагреве нити) следующим уравнением: $Q = K \cdot S (T_0 - T) t$ калорий, где K — коэффициент теплоотдачи; S — боковая поверхность нити; T_0 и T — температура окружающей нить среды и температура нагрева нити.

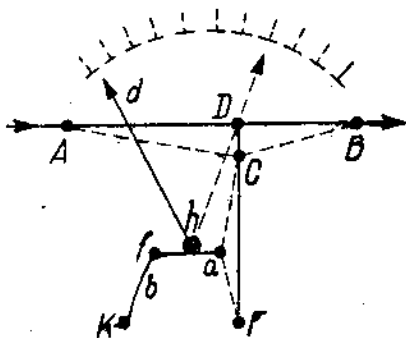


Рис. 112.

Для момента теплового равновесия, т. е. когда количество выделяемого в нити тепла уравнивается с рассеиваемым теплом, мы будем иметь

$$0,24 \cdot I^2 \cdot r \cdot t = K \cdot S (T_0 - T) t, \text{ или } 0,24 \cdot I^2 \cdot r \cdot t = K S \Delta T \cdot t,$$

где ΔT — превышение температуры нити над температурой окружающей ее среды.

Отсюда, превышение температуры нити над температурой окружающей среды

$$\Delta T = \frac{0,24 r}{K \cdot S} I^2 \dots \dots \dots (a)$$

С другой стороны, удлинение нити пропорционально также разности ΔT температур, ибо температура T_0 среды, окружающей нить, есть в то же время начальная температура самой нити.

Удлинение нити вследствие ее нагрева на ΔT градусов выше ее первоначальной температуры определяется, как известно,

уравнением $\Delta l = \alpha \cdot l_0 \cdot \Delta T$, где α — линейный коэффициент расширения материала нити, а l_0 — ее первоначальная длина. Составляя это уравнение с выражением (а), имеем

$$\Delta l = \alpha \cdot l_0 \cdot \Delta T = \alpha \cdot l_0 \frac{0,24 r}{K \cdot S} I^2$$

$$\text{или } \Delta l = C \cdot I^2,$$

откуда следует, что удлинение нити пропорционально квадрату силы протекающего через нее тока.

Необходимо отметить, что этот вывод является приближенным, поскольку знаменатель уравнения (а) не есть величина постоянная, ибо как K , так и S возрастают с повышением температуры.

Использовать удлинение нити для непосредственного отсчета силы протекающего через нее тока, конечно, не представляется возможным, поскольку это удлинение во избежание остаточных деформаций нити нельзя доводить до больших значений. Другими словами, стрела провеса DC нити на рис. 112 должна быть ничтожно малой во избежание ее остаточного удлинения. Для преобразования ничтожно малого линейного удлинения нити во вращательное, и притом достаточно большое передвижение стрелки (указателя) прибора, существует много конструкций. Одна из них, наиболее распространенная, представлена на приведенном выше рисунке.

Она сводится к тому, что нагреваемую нить закрепляют в ее крайних точках A и B неподвижно, середину ее оттягивают вниз (мостик) и наблюдают перемещение этой средней точки, в момент нагрева нити, посредством оттяжной шелковой нити, перекинутой через блок h .

Подобное устройство позволяет преобразовать ничтожное (порядка 0,1—0,2 мм) удлинение нагреваемой нити в довольно значительное (порядка 5—7 мм) перемещение шелковинки, а следовательно, и поворот стрелки d прибора.

2. Общие детали конструкции приборов тепловой системы. На рисунке 113 представлен внешний вид теплового прибора и его шкалы. Здесь видны оттяжная металлическая нить (мостик); шелковая поперечная нить, перекинутая через блок и оттягиваемая пружинкой; постоянный магнит, в междуполюсном пространстве которого при поворотах стрелки перемещается легкий алюминиевый диск (магнитный успокоитель прибора).

Нагреваемые током нити в этих приборах изготовляются из тонкой (диаметром от 0,03 до 0,06 мм) платиново-иридиевой (фирма Гартман) или платиново-серебряной (фирма Сименс) проволоки, что ограничивает максимальную силу тока, могущую быть пропущенной непосредственно по нити, пределами 0,1—0,2 и во всяком случае не выше 0,5 ампера.

Для измерения токов большей силы приборы эти снабжаются шунтами, если их предположено использовать для измерений в цепях тока постоянного или переменного технической частоты. Амперметры этой системы на силу тока до 5 А, чаще

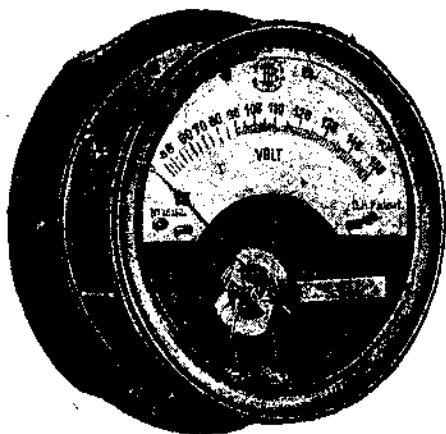


Рис. 113.

снабжаются не шунтом, а особой системой подвода к нити измеряемого тока, представленной на рис. 114. Здесь измеряемый ток, например, в 5 А, прежде чем быть подведенным

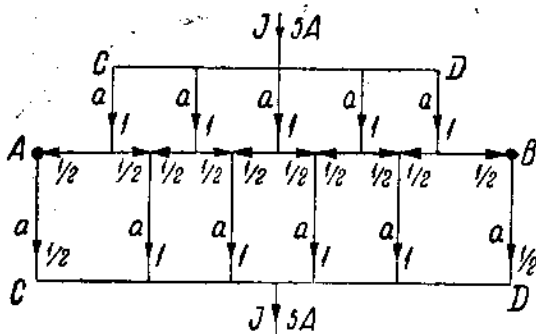


Рис. 114.

к нагреваемой нити $A-B$, пропускается через ряд тонких, весьма гибких, серебряных ленточек a , a , a , металлических соединяющихся как с нитью, так и со сборными шинками $C-D$.

Соответствующим подбором сопротивления ленточек достигают того, что общий ток разветв-

ляется, и через каждый участок нагреваемой нити протекает только $\frac{1}{2n}$ его часть, где n —число серебряных ленточек со стороны ввода тока.

Так как действие приборов этой системы основано на удлинении нити вследствие ее нагрева, то они весьма подвержены температурным воздействиям, почему их указатель (стрелка) часто смещается с нулевого деления шкалы при изменениях окружающей прибор температуры. Для установки стрелки на нуль один из зажимов, к которым прикреплена нить, делается

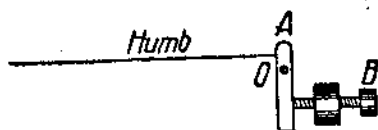


Рис. 115.

подвижным в виде рычага *А* на рис. 115, могущего вращаться вокруг оси *О*. Ввинчивая или вывинчивая микрометрический винт *В*, можно усилить или ослабить натяжение нити и тем самым привести стрелку

прибора на нулевое деление шкалы. Кроме того, основная доска прибора, на которой монтируются зажимы нагреваемой нити, изготавливается из материала с температурным коэффициентом расширения по возможности таким же, как у самой нити.

Для измерений в цепях токов высокой частоты, где применение обычных шунтов не обеспечивает (вследствие явления скин-эффекта) постоянства соотношения сопротивлений нити и шунта, применяется особая система шунтирования этих приборов, изображенная на рис. 116.

Здесь измеряемый ток *I* подводится и разветвляется по системе тонких металлических нитей, соединенных параллельно, размещенных на подобие беличьего колеса (баранный шунт). К середине одной из этих нитей закрепляется мостик прибора, связанный со стрелкой. Делая нити

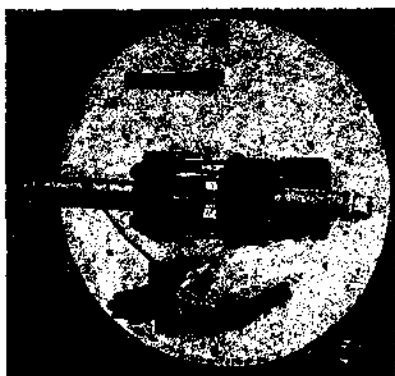


Рис. 116.

плоскими и достаточно тонкими, можно значительно снизить явление скин-эффекта и тем самым сделать прибор пригодным для измерений в цепях токов высокой частоты.

Так как приборы этой системы не выдерживают перегрузки нити током, то обычно они снабжаются предохранителями по типу телефонных или же второй предохранительной нитью. Последняя монтируется в самом приборе, а именно,

так (рис. 117), что при нагреве основной нити $A \rightarrow B$ прибора и некотором, все же еще допустимом, ее удлинении предохранительная нить AC ее шунтирует, отводя через себя часть тока.

Для этого один конец нагреваемой нити прикрепляется к верхнему концу рычага D , могущего вращаться вокруг точки O и оттягиваемого влево пружиной f . Если нить излишне удлинится, то рычаг D повернется нижним концом

влево до соприкосновения его прилива b с контактом a , к которому прикреплен второй конец предохранительной нити AC .

Благодаря этому нагреваемая нить будет зашунтирована и предохранена от перегорания.

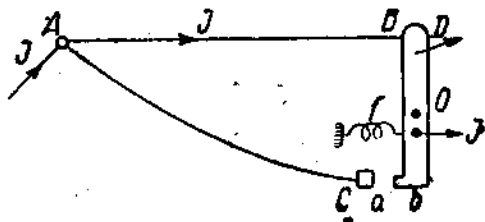


Рис. 117.

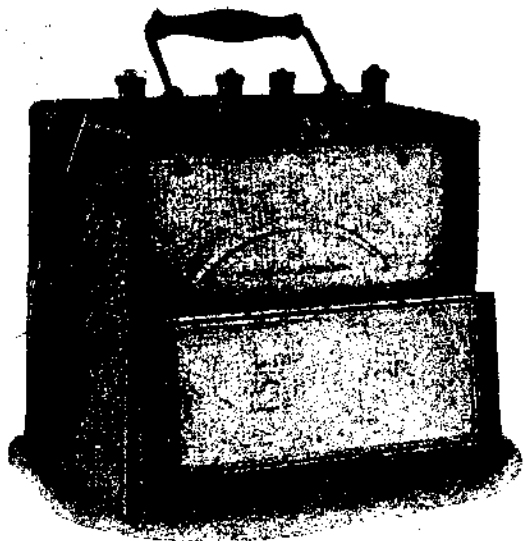


Рис. 118.

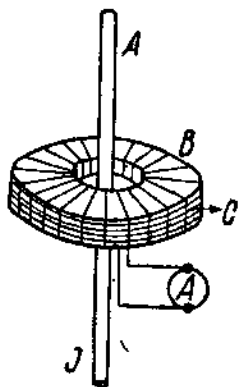


Рис. 119.

На рис. 118 показан общий вид переносного вольтметра этой системы на несколько пределов измерения.

В последние годы для измерения токов высокой частоты при силе их свыше 20 А пользуются приборами с трансформаторами

тока особой конструкции; их первичная цепь обычно представляет собою стержень A (рис. 119), а вторичная — обмотку B , намотанную в один слой и равномерно на сердечнике C , собранном из весьма тонких железных колец без стыков или из немагнитного материала.

Основными достоинствами этого типа трансформаторов являются: ничтожно малые — емкость, самоиндукция и сопротивление их первичной цепи, почему включение их в цепь не вызывает в ней практически никаких изменений. Внешний вид подобных трансформаторов представлен на рисунке 120.

Необходимо отметить, что коэффициент трансформации у подобных трансформаторов зависит от частоты тока, особенно при небольших ее значениях. Поэтому тепловым прибором в соединении с подобным трансформатором, отградуированным для высоких частот, уже нельзя пользоваться даже при звуковых частотах, не говоря уже о технической частоте.

Точность измерений тепловыми приборами в соединении с подобными трансформаторами — порядка 2%. Вольтметры этой системы для расширения пределов измерения снабжаются добавочными сопротивлениями.

Последние для измерений в цепях переменного тока должны быть безиндукционными и беземкостными. Это обычно осуществляется так, как представлено на рис. 12-б.

3. Свойства и область применения. Шкала тепловых приборов вследствие искажений, обуславливаемых передаточной системой (мостиком), а также способом подвода и распределения тока в нити, редко бывает даже квадратичной. В начале шкалы деления обычно очень мелкие, а поэтому точность показаний в этой области весьма не велика.

Неустойчивость положения стрелки этих приборов на нуле шкалы; присущее им явление тепловой инерции, т. е. необходимость выждать, пока указатель прибора, отклоняясь, окончательно установится; значительная зависимость их показаний от температуры; относительно большое собственное потребление ими электрической энергии (порядка 3—5 ватт в амперметрах и до 0,25 ватта на вольт шкалы у вольтметров) и, на-

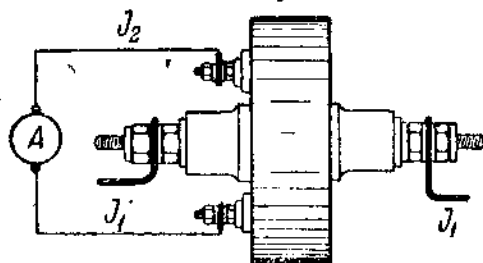


Рис. 120.

конец, изменение градуировки в результате даже незначительных перегрузок их током, ограничивают область применения указанных приборов в тех случаях, когда погрешность измерений не должна превышать $1\frac{1}{2}$ —2%.

К достоинствам этих приборов надо отнести: возможность их градуировки на постоянном токе для измерений ими токов переменных и независимость их показаний от посторонних магнитных полей, от формы кривой тока, а также от его частоты в довольно широких пределах ее изменения.

§ 11. Понятие о термоприборах.

Условное обозначение 

1. Принцип действия. Термоприбор представляет собою совокупность чувствительного прибора, обычно магнитоэлектрической системы, с термопарой (рис. 121). При пропускании измеряемого нами тока I через место спая в верхней, на рисунке замкнутой цепи, образованной обмоткою гальванометрической рамки A двумя разнородными проводниками и точкой O их спая, возникает термоток i , под влиянием которого рамка прибора поворачивается на тот или иной угол, отмечаемый указателем (стрелкой) или по методу зеркального отсчета отклонений.

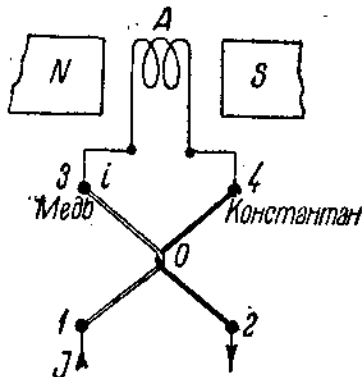


Рис. 121.

Термоток i , постоянный по направлению, пропорционален той термоэлектродвижущей силе, которая возникает в точке спая. Последняя же пропорциональна разности температур между точкой спая и концами 1 и 2 проволок термоэлемента (при небольших значениях этой разности). Таким образом, термоток i пропорционален разности температур, которая в свою очередь пропорциональна теплу, доставляемому к точке спая измеряемым током I . Так как это тепло пропорционально $I^2 r$, то разность температур пропорциональна I^2 и одновременно с этим $i = f(I^2)$.

Из последнего выражения явствует, что подобная система применима для измерений как постоянного, так и переменного

токов, и что термоприбор можно градуировать, т. е. определить опытным путем зависимость между углом отклонения подвижной системы прибора и силой тока I как на переменном, так и на постоянном токах. Последнее является существенным преимуществом подобной системы, ибо для измерений постоянных токов мы располагаем более чувствительными и точными измерительными приборами, нежели для измерений токов переменных.

При этом, однако, надо помнить следующее: термоток i возникает и поддерживается термоэлектродвижущей силой, которая в свою очередь есть результат двух явлений: джоулева тепла и эффекта Пельтье. Первое порождает э.д.с., независимую по знаку от направления тока I и порождающую в цепи гальванометрической рамки прибора термоток i_1 , пропорциональный квадрату измеряемого нами тока, т. е. пропорциональный AI^2 , где A — коэффициент пропорциональности. Вследствие же эффекта Пельтье возникает также термоток i_2 , пропорциональный первой степени измеряемого нами тока, т. е. BI и поэтому, зависящий от направления этого последнего.

Отсюда следствие: при градуировке термоприборов на постоянном токе надо для каждого значения измеряемого нами тока менять его направление и из двух отклонений подвижной системы прибора брать среднее. Действительно, если при одном направлении тока I термоток в цепи прибора был равен $i' = i_1 + i_2 = AI^2 + BI = C\alpha_1$, где C — постоянная прибора, то при обратном направлении тока I термоток в цепи прибора будет иметь уже иное значение, например: $i'' = i_1 - i_2 = AI^2 - BI = C\alpha_2$.

Из этих выражений получаем

$$I^2 = C \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} = C \cdot \alpha \quad \text{или} \quad I = C' \sqrt{\alpha} \dots \dots (a)$$

т. е., показания прибора постоянного тока пропорциональны квадрату действующего значения измеряемого переменного тока.

Если градуировка осуществляется на переменном токе то, очевидно, мы непосредственно получаем зависимость $I^2 = C\alpha$. Приборы этой системы за последнее время приобретают все большее распространение по преимуществу в цепях высокой частоты, ибо они могут быть градуируемы на постоянном токе и могут служить в дальнейшем для измерений в цепях переменных токов; не обладают самоиндукцией и емкостью, что

делает их показания независимыми от колебаний частоты тока в больших диапазонах ее возможных изменений.

2. Конструкция и схемы включения. Эти приборы обычно содержат в одном общем ящике прибор магнитоэлектрической системы и термоэлемент. Последний часто монтируется в стеклянном, вакуированном баллончике, чем достигаются меньшая зависимость показаний подобного прибора от изменений температуры, повышение чувствительности и снижение присущего ему явления тепловой инерции.

Для изготовления термопар обычно спаивают или сваривают электрически железо и константан, дающие термоэлектродвижущую силу порядка $50-53 \mu V$ на $1^\circ C$. Кроме того применяют висмут с сурьмой, в месте спая коих возникает термо-э.д.с. порядка $100 \mu V$ на $1^\circ C$, или медь-константан — $40 \mu V$. Наилучшие результаты дает термопара из золото-палладия и платино-иридия.

Беккерель показал, что термоэлектродвижущая сила термопары не изменяется, если применить конструкцию вроде представленной на рис. 122-а, где I и II весьма тонкие проволоочки, например, из железа и константана, образующие собственно термопару, а III — проволочка из другого материала, например, платино-иридия, служащая для пропускания по ней измеряемого тока. За счет выделяющегося в ней тепла место спая термопары нагревается, почему ее и называют подогревателем.

При конструировании термоприборов высокой чувствительности основным затруднением являются те противоречивые требования, которые необходимо предъявлять к составным частям этого прибора, а именно, к термопаре и к гальванометру.

Дабы этот прибор, будучи включен в цепь тока высокой частоты, не вносил в режим ее заметных изменений, необходимо, чтобы размеры термоэлемента, а также собственное потребление энергии термоприбором в целом были ничтожно малыми. Но повышение чувствительности термоэлемента связано с увеличением энергии, им потребляемой, а следовательно, и с выделением относительно большого количества тепла, для отвода коего необходимо снабдить термопару массивными металлическими колодками. Повышение же чувствительности гальванометра возможно, по преимуществу, путем увеличения мощности его магнитной системы, т. е. размеров последней, а следовательно, и всего гальванометра. Лучшим решением задачи является соединение чувствительного термоэлемента

с гальванометром сколь возможно малого габарита, но вполне устойчивым механически.

Весьма важным представляется вопрос о том, возможна ли замена перегоревшей термопары подобного прибора другою,

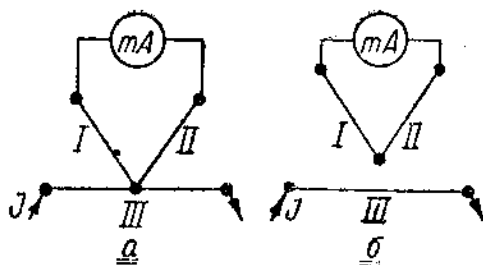


Рис. 122-а.

без новой градуировки прибора. На современном этапе изготовления термоприборов как зарубежных фирм, так и нашего завода Светлана, взаимозаменяемость термопар без градуировки прибора заново пока неосуществима.

Для измерения термоприборами токов силы

большой, чем 10—15mA, прибегают к одному из следующих способов: сам термов элемент делается из более толстых проводочков; место спая удаляют от подогревателя, как это представлено на рис. 122-а/б, шунтируют термопару и, наконец, включают несколько термопар по схеме неуравновешенного мостика Витстона (см. рис. 122-в — внешний вид термоприбора завода Электроприбор с наружными термопарами).

Первый способ ограничивает область использования их в цепях высокой частоты (скин-эффект); второй способ (косвенный подогрев), хотя и представляет большие преимущества с точки зрения электрической изоляции цепей прибора и нагревателя, но сильно снижает чувствительность. Для восстановления последней прибегают к последовательному соединению нескольких термопар, как это представлено на рис. 123.

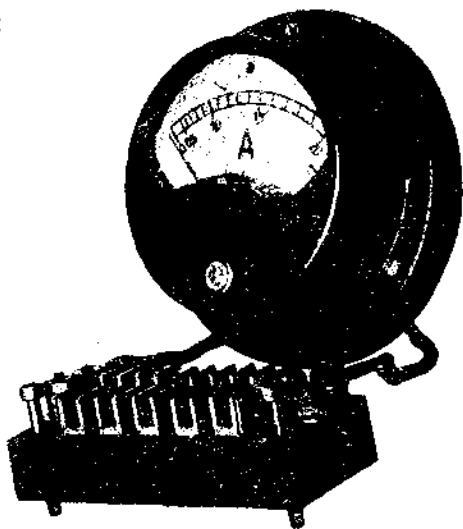


Рис. 122-в. Термоприбор с вынесенной термопарой завода Электроприбор.

Подобные приборы с 10 последовательно соединенными термопарами для измерения сил токов до 1А строит фирма Кембридж. Она же строит термоприборы на несколько пределов измерения (10; 50; 100мА и 0,5; 1 и 3А), из коих каждый обслуживается самостоятельной термопарой; шкала для всех пределов—одна. Фирма Вестон строит термоприборы с термопарой в воздухе на силы токов до 750А.

3. Свойства. К недостаткам термоприборов надо отнести: малый срок службы термопар; зависимость их показаний от изменения внешней температуры, что требует довольно сложной схемы температурной компенсации; зависимость их показаний при малых токах от влияния света; малый коэффициент полезного действия и неравномерность шкалы.

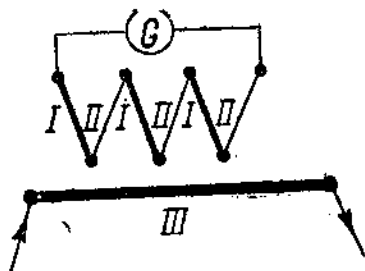


Рис. 123.

§ 12. Приборы индукционной системы.

Условное обозначение



1. Принцип действия. Индукционные приборы по принципу их действия разделяются на два типа: приборы с вращающимся магнитным полем (тип, предложенный Феррарисом) и приборы с электромагнитным экраном (тип, предложенный Бенишке). Приборы обоих этих типов применимы только для измерений в цепях переменного тока.

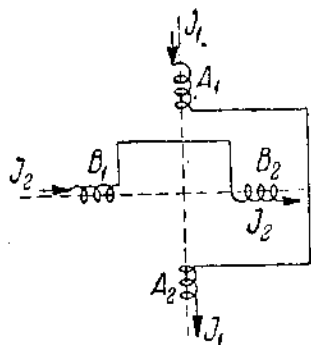


Рис. 124.

а) Тип Феррариса. Если через обмотки двух пар (рис. 124) неподвижно и перпендикулярно друг другу закрепленных катушек A_1 — A_2 и B_1 — B_2 пропускать переменные токи I_1 и I_2 одинаковой частоты и сдвинутые по фазе на угол близкий к 90° , то в междуполус-

ном пространстве этих катушек образуется результирующее магнитное поле, вращающееся с постоянной угловой скоростью, равной частоте токов.

Действительно, каждый из токов создает в междуполюсном пространстве соответствующей пары катушек пульсирующее магнитное поле. Поля эти сдвинуты между собою по фазе на четверть периода (диаграмма рис. 125), а их оси направлены в пространстве под углом в 90° . Если проследить направление результирующего поля для различных моментов (t_1, t_2, t_3), как это изображено на векторных диаграммах того же чертежа, то не трудно уяснить себе, что вектор результирующего поля ($\Phi_{рез}$) изменяет свое пространственное положение соот-

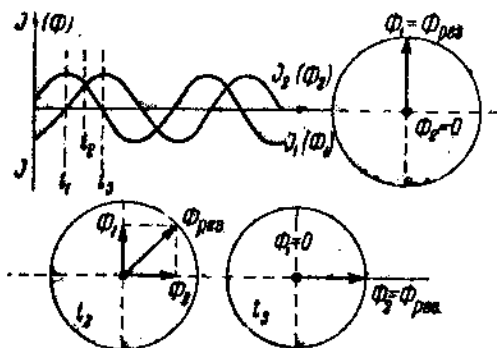


Рис. 125.

ветственно различным моментам времени, т. е. вращается с угловой скоростью, зависящей от частоты токов I_1 и I_2 . Если токи эти одинаковы по амплитуде, то результирующий поток остается постоянным во времени и равным амплитуде любого из составляющих потоков (Φ_1 или Φ_2).

Действительно, если мгновенное значение потока $\Phi_{1t} = \Phi_{1\max} \sin \omega t$, а потока $\Phi_{2t} = \Phi_{2\max} \sin (\omega t - 90^\circ) = \Phi_{2\max} \cos \omega t$, то при равенстве $\Phi_{1\max} = \Phi_{2\max}$ мгновенное значение результирующего потока

$$\begin{aligned} \Phi_{рез} &= \sqrt{\Phi_{1t}^2 + \Phi_{2t}^2} = \sqrt{\Phi_{1\max}^2 \sin^2 \omega t + \Phi_{2\max}^2 \cos^2 \omega t} = \\ &= \Phi_{1\max} \sqrt{\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t} = \Phi_{1\max} \end{aligned}$$

Пространственное положение этого результирующего потока для любого момента времени найдется, очевидно, из отношения $\Phi_{1t} : \Phi_{2t}$, т. е. определяется выражением

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Phi_{1t} \sin \omega t}{\Phi_{2t} \cos \omega t} = \operatorname{tg} \omega t \quad (\text{см. диаграмму рис. 126}).$$

Отсюда следует, что $\alpha = \omega t$, или что угол поворота результирующего потока в междуполюсном пространстве катушек пропорционален времени, в течение которого каждый из образующих его потоков претерпевает полный (законченный) цикл своих изменений (период).

Если в междуполюсном пространстве катушек на оси помещен полый алюминиевый цилиндр (D на рис. 127), могущий вращаться вокруг этой оси, то при пересечении его тела вращающимся потоком в нем индуктируются токи. В результате их взаимодействия с вращающимся полем цилиндр также будет вращаться вслед за полем.

Вращающийся момент, под влиянием которого цилиндр вращается, пропорционален, вообще говоря, силам токов I_1 и I_2 и силе токов, индуктируемых в теле цилиндра. Последние же пропорциональны породившей их силе вращающегося поля и скорости его вращения или, что то же, частоте f токов I_1 и I_2 .

Таким образом, $M_{вр} = C f I_1 I_2$, что при равенстве $I_1 = I_2 = I$ дает $M_{вр} = C f I^2$, где C — постоянный коэффициент, учитывающий размеры прибора, сопротивление цилиндра индуктируемым в нем токам и наличие прямой пропорциональности между токами I_1 и I_2 и создаваемыми ими потоками Φ_1 и Φ_2 .

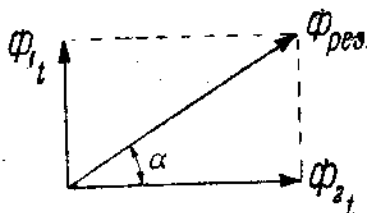


Рис. 126.

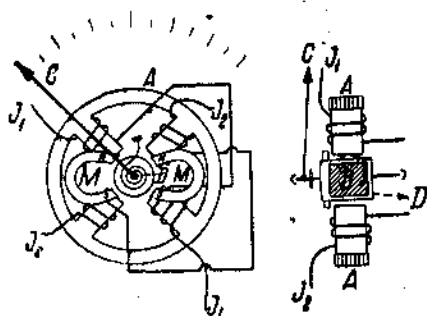


Рис. 127.

Противодействующий момент, необходимый для того, чтобы цилиндр не вращался вокруг оси, а только поворачивался на угол, соответствующий силе тока, создается спиральными пружинками, как и в ранее описанных системах приборов. Если коэффициент кручения пружинки есть D , то противодействующий момент равен $M_{пр} = D\alpha$, где α — угол поворота цилиндра и скрепленной с ним стрелки.

При равновесии будем иметь $M_{вр} = M_{пр}$, или $C \cdot f \cdot I^2 = D\alpha$, откуда $I = C' \sqrt{\alpha}$, если частота f тока постоянна и равна той, при которой данный прибор был отградуирован.

Таким образом, по принципу действия этих приборов между углом поворота цилиндра и силой тока, протекающего по обмоткам катушек, имеет место квадратическая зависимость. Последнее справедливо, однако, лишь при соблюдении

следующих условий: прямой пропорциональности между токами в катушках и порождаемыми ими полями; постоянстве сопротивления тела цилиндра индуцируемым в нем токам; отсутствии рассеяния потоков и самоиндукции путей токов, индуцируемых в цилиндре.

Однако, для получения возможно большего вращающего момента катушки прибора надеваются на листовой железный сердечник такого вида, как это представлено на рис. 127 (буква А). Полый алюминиевый цилиндр в свою очередь свободно объемлет железный цилиндр В. Этим значительно уменьшается магнитное сопротивление магнитопровода прибора, но одновременно с этим и нарушается в известной мере прямая пропорциональность между токами и потоками, ими порождаемыми. Успокоителем служат два подковообразных магнита ММ.

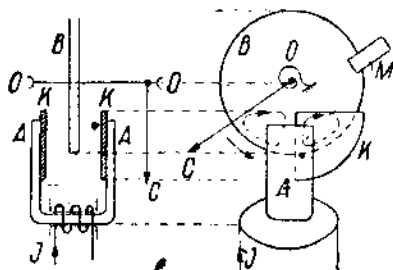


Рис. 128.

б) Тип Бенишке. Действие индукционных приборов с магнитным экраном основано на следующем. Если в междуполюсном пространстве электромагнита А на рис. 128 поместить медный или алюминиевый диск В, могущий вращаться на оси О—О, и по обмотке

электромагнита пропускать переменный ток, то та часть диска, которая находится в междуполюсном пространстве электромагнита, пронизывается пульсирующим магнитным потоком, который индуцирует в диске токи. Если внутренняя поверхность полюсных наконечников наполовину перекрыта медными пластинками к, к (экраны), то и в этих последних также индуцируются токи (круговые, как это показано пунктиром на диске и на экране).

Направления этих круговых токов в каждый данный момент одинаковы, но так как один из них протекает в неподвижном экране, а другой в могущем вращаться диске, и притом так, что оси этих круговых токов (а, следовательно, и образованных ими потоков) смещены относительно друг друга то в результате их взаимодействия диск поворачивается, как указано на чертеже стрелкой. Поворот диска вызывает перемещение стрелки С, скрепленной с осью диска. Противодействующий момент создается спиральной пружинкой, как и в приборах других систем. Вращающий момент при ненасыщенном

магнитопроводе прибора пропорционален произведению сил токов, наведенных в диске и экране, а эти последние пропорциональны току в обмотке электромагнита. Таким образом, вращающий момент a , следовательно, и угол поворота диска по принципу действия этих приборов должны быть пропорциональны квадрату силы тока, т. е. $I^2 = C a$, и, следовательно, шкала этих приборов должна быть квадратичной. Показания этих приборов, очевидно, зависят также от частоты тока, почему их надо градуировать током той частоты, при которой данному прибору предстоит работать. В качестве демпфера (успокоителя) служит постоянный магнит M .

2. Основные детали конструкции индукционных приборов типа Феррарис поясняются рисунком 129. Здесь приняты следующие обозначения: a — железный остов прибора из тонких железных колец с выступами для размещения на них катушек b и c ; d — же-

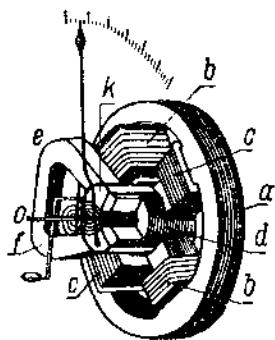


Рис. 129.

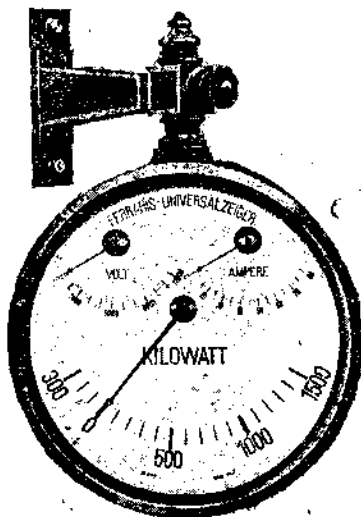


Рис. 130. Внешний вид индукционного прибора.

лезный цилиндр в междуполюсном пространстве катушек, через отверстие которого проходит ось, поддерживающая алюминиевой цилиндр k ; e — постоянные магниты, служащие в качестве демпфера (успокоителя) подвижной системы прибора, и наконец — спиральные пружинки, порождающие противодействующий момент. Общий вид см. на рис. 130.

Для образования вращающегося магнитного поля обмотки всех четырех катушек в этих приборах, обычно, питаются от

одного и того же источника переменного тока. Необходимый же сдвиг по фазе и при том по возможности близкий к 90° , создают искусственно, соединяя в параллель обмотки вертикально и горизонтально расположенных катушек и вводя в цепь одной из пары большое индуктивное сопротивление ωL , а в цепь другой пары активное сопротивление R (схема рис. 131) или же применяя особую схему (Гергеса).

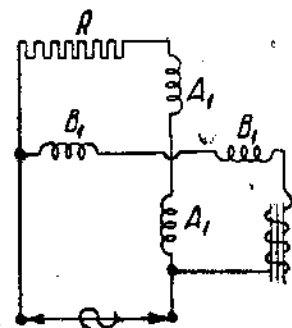


Рис. 131.

Обмотки обеих пар полюсов прибора обычно рассчитываются так, чтобы при протекании по ним тока число ампервитков было в них одинаковым.

Для получения надлежащей апериодичности приборы Феррариса снабжаются магнитными успокоителями, для чего над железным остовом прибора укрепляется два постоянных магнита, обращенные своими полюсами к алюминиевому цилиндру. При поворотах

последнего в нем индуцируются токи, взаимодействие которых с полем магнитов демпфирует подвижную систему.

На рис. 132—133 представлены схемы включения амперметров и вольтметров типа Феррариса, сами же приборы от-

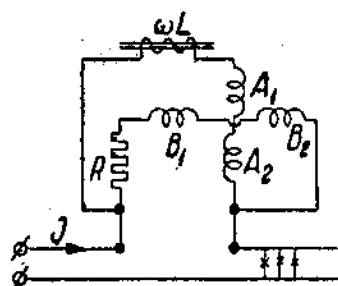


Рис. 132.

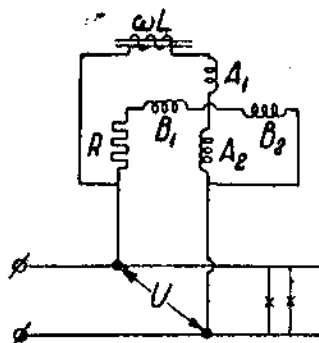


Рис. 133.

личаются один от другого только сечением провода и числом витков у обмоток их катушек.

Строятся эти приборы для непосредственного включения в цепь — амперметры до 300 ампер, вольтметры — до 500 вольт.

Для больших предел измерения они включаются через посредство измерительных трансформаторов тока и напряжения.

Фирмой Вестингауз строятся индукционные приборы, несколько отличные от приборов типа Бенишке. В них (рис. 134) смещение круговых токов, индуцируемых в подвижном диске A прибора, достигается не экранированием части полюсных наконечников электромагнита B , а тем, что в полюсном наконечнике делается прорезь, и на один из полученных при этом выступов накладывается замкнутая на себя обмотка из медного проводника (a).

При пропускании по обмотке D электромагнита измеряемого переменного тока как в короткозамкнутой обмотке a , так и в диске A индуцируются токи, взаимодействие коих вызывает вращение диска в направлении, указанном на чертеже стрелкой. Противодействующий момент создается спиральной пружиной d , а демпфирование постоянным магнитом M .

Вследствие большого индуктивного сопротивления обмотки электромагнита, вольтметры с экраном или короткозамкнутой обмоткой на пределы измерения до 250 вольт не требуют добавочных сопротивлений. Для больших напряжений последовательно с обмоткой электромагнита вводится дроссельная катушка. Амперметры этих типов строятся для непосредственных измерений до 400—500 А, а вольтметры—до 600 вольт. Дальнейшее расширение пределов измерения достигается включением их через посредство измерительных трансформаторов тока и напряжения.

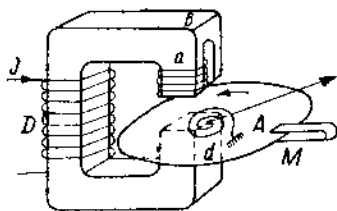


Рис. 134.

Описанные приборы не сложны в конструктивном отношении и прочны. Шкала их может обнимать до 320° в то время, как, например, у магнитоэлектрических приборов она не может быть сделана шире $75-80^\circ$. Применяя добавочные приспособления, а также придавая соответствующую форму деталям приборов этой системы, можно сделать их шкалу приближающейся по виду к равномерной. Пределы частоты тока, на которую могут быть построены эти приборы, не менее 20 и не более 100.

3. Свойства и область применения индукционных приборов. Приборы эти применимы только для измерений в цепях переменного тока и при той лишь частоте, для которой они

градуировались. Включение их в цепь постоянного тока приводит или к перегоранию обмоток, или же к чрезмерному насыщению магнитопровода.

Источниками погрешностей приборов этой системы являются: изменение их показаний вследствие температурных влияний, изменяющих сопротивление подвижного диска, а, следовательно, и силу индуктируемых в нем токов при одной и той же величине потока. Для устранения этого намагничивающую обмотку шунтируют безиндукционным сопротивлением из проводника такого сечения, чтобы ее сопротивление росло при повышении температуры в той же мере, как и сопротивление диска (цилиндра).

Изменение частоты тока крайне чувствительно отзывается на точности показаний приборов этой системы. Объясняется это тем, что от частоты тока зависит сила индуктируемых в диске или цилиндре токов и скорость вращения поля, а, следовательно, и вращающий момент. Особенно это наблюдается у амперметров, где изменение частоты в пределах от 40 до 60 периодов в секунду может повлечь ошибку показаний до 10%. Применением особых компенсационных обмоток эта зависимость у лучших приборов может быть снижена до 1—2%.

Для уменьшения ошибок из-за токов Фуко, индуктируемых в железных частях прибора, последние изготавливаются из тонкого (0,4 мм) листового железа.

Для уменьшения гистерезиса в железных частях прибора применяется высокосортное железо.

Для предохранения подвижной системы приборов от влияния потоков рассеяния (утечки), способного вызывать изменение вращающего момента, прибор заключают в железный футляр. Форма кривой тока, если он не содержит составляющей постоянного тока, оказывает на показания этих приборов незначительное влияние.

Собственное потребление энергии у индукционных приборов невелико: в приборах Феррариса 2—4 ватта, а в приборах с экраном 1—2 ватта.

Погрешность показаний 1—2%. Приборы эти прочны, надежны в работе и допускают перегрузку.

Благодаря большому вращающему моменту, приборы этой системы особенно пригодны для измерений в сетях с переменной нагрузкой, ибо их подвижная система быстро устанавливается в положении равновесия, а также в качестве регистрирующих приборов,

§ 13. Приборы электростатической системы.

Условное обозначение



1. Принцип действия приборов электростатической системы основывается на тех силах взаимодействия, которые возникают между двумя проводниками, заряженными до различного потенциала. Идея устройства подобного прибора поясняется схемой рис. 135, где $a-a$ —система неподвижных металлических пластин, а $b-b$ —система пластин подвижных, закрепленных на оси $h-h$, с которой скреплена стрелка c и один конец спиральной пружинки e . Если сообщить системам пластинок различные потенциалы, то между ними создается силовое поле, под влиянием которого подвижная система пластинок стремится повернуться по направлению стрелок и войти в промежуток между пластинками неподвижными.

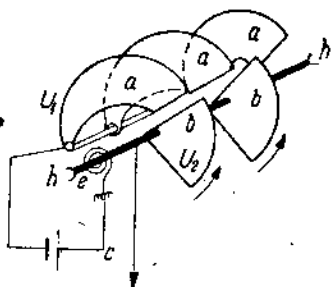


Рис. 135.

Вращающий момент, действующий на подвижную систему, в самом общем виде, выражается уравнением

$$M_{\text{вр}} = nU^2 \frac{dC}{d\alpha},$$

где n —число подвижных пластин; U —напряжение между системами пластин; C —емкость одной пары взаимодействующих пластин и α —угол поворота подвижной системы. Если противодействующий момент, оказываемый подвесом подвижной системы или упомянутой выше пружинкой, будет $M_{\text{пр}} = D\alpha$, то для момента равновесия получим

$$\alpha = \frac{n}{D} \cdot U^2 \cdot \frac{dC}{d\alpha},$$

где $\frac{dC}{d\alpha}$ —изменение собственной емкости подобного прибора в зависимости от угла поворота системы его подвижных пластин. Если бы производная $\frac{dC}{d\alpha}$ была величиной постоянной, то мы имели бы $\alpha = C \cdot U^2$, т. е. шкала прибора была бы

квадратичной. Обычно это трудно достижимо, и поэтому приборы электростатической системы имеют шкалу неравномерную. Некоторые фирмы (Гартман), придавая пластинкам особое очертание, достигают на значительном протяжении шкалы почти равномерных делений.

2. Основные детали конструкции электростатических приборов. На рис. 136—137 изображены так называемые многокамерные электростатические вольтметры фирмы Гартман, а на рис. 138 схема их внутреннего устройства. Здесь

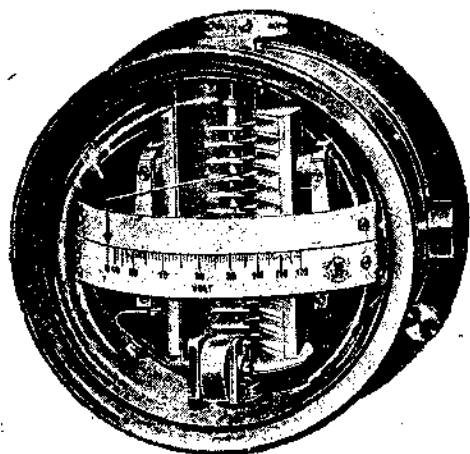


Рис. 136. Многокамерный вольтметр электростатической системы — досковой тип.

буквой *a* обозначена система горизонтально расположенных неподвижных пластин, а буквою *b* — система пластин подвижных на подвесе в виде тонкой металлической нити или на оси.

Подобные приборы строятся на напряжения в пределах от 5—10 и до 1500 вольт. Меньший предел обусловлен сравнительно малой чувствительностью этой системы приборов, а для больших напряжений конструкция приборов видоизменяется, как это

представлено на рис. 139 и 140. Здесь буквой *a* обозначена система неподвижная, образуемая двумя параллельно и неподвижно закрепленными пластинками, между которыми на двух тонких серебряных ленточках подвешена подвижная пластинка *b*, связанная тягой *d* с осью прибора, к которой прикреплена стрелка. Тяга *d* проходит через отверстие в одной из неподвижных пластин и скрепляется с проволочкой *e* — *e*, поддерживаемой двумя стойками, скрепленными с осью прибора.

В качестве успокоителей обычно применяются постоянные магниты. Диэлектриком конденсатора, образуемого системой пластин подобных приборов, служат воздух и, реже, масла, а для больших напряжений (до 250 kV) также воздух, но сжатый под давлением от 5 до 10 кг на см².

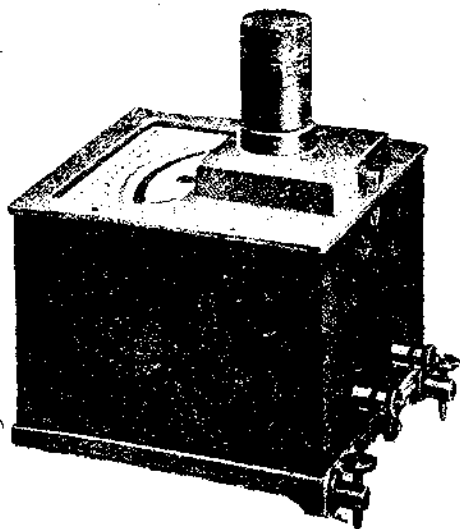


Рис. 137. Многокамерный вольтметр электростатической системы—переносный тип.

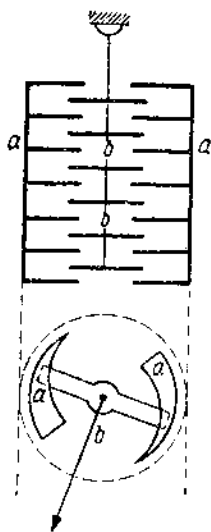


Рис. 138.

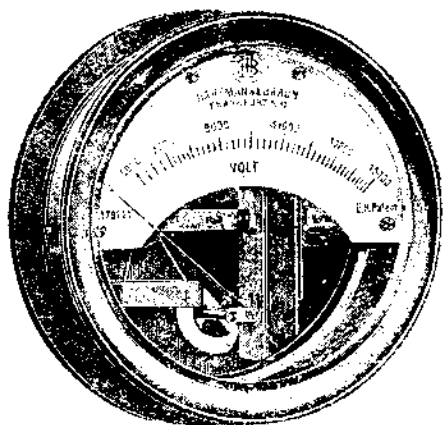


Рис. 139. Электростатический вольтметр—досковой тип.

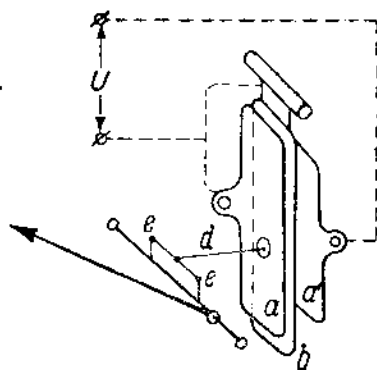


Рис. 140.

3. Свойства и область применения. Приборы электростатической системы, благодаря их весьма незначительной собственной емкости и отсутствию замкнутых токопроводящих частей, практически не потребляют электрической энергии для своей работы. Будучи включены в цепь тока постоянного, эти приборы берут на себя малый и кратковременный ток заряда, а в цепи переменного тока — постоянно протекающий, но ничтожно малый по силе ток.

Приборы эти, очевидно, применимы для измерений как при постоянном, так и при переменном токе, не требуя отдельных градуировок. Показания их не зависят от влияния посторонних магнитных полей, от частоты и формы волны напряжения, а также и от изменений температуры. Зато они очень чувствительны к воздействию посторонних электрических полей.

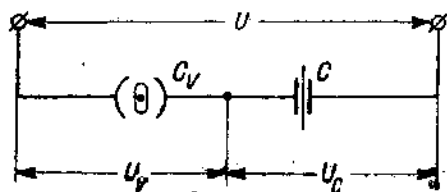


Рис. 141.

Погрешность показаний лучших образцов этих приборов, однако, не ниже $1 - 1\frac{1}{2}\%$; они нежны по конструкции и у большинства типов имеют неравномерную шкалу с весьма сжатыми делениями у ее начала.

Для расширения пределов измерения электростатические вольтметры снабжаются в цепях переменного тока конденсаторами, а при постоянном токе их включают через делитель напряжения.

Схема включения для первого случая представлена на рис. 141, где U — измеряемое напряжение; U_V и C_V — напряжение на зажимах вольтметра и его собственная емкость; U_C и C — напряжение на зажимах конденсатора, подключенного последовательно с вольтметром, и его емкость. Так как при последовательном соединении двух емкостей в цепи переменного тока напряжения на их зажимах обратно пропорциональны их емкостям, т. е.

$$\frac{U_V}{U_C} = \frac{C}{C_V}, \quad \text{то откуда} \quad U = U_V \frac{C_V + C}{C},$$

т. е. измеряемое напряжение равно напряжению, измеренному вольтметром, если это последнее увеличить в отношении

$$\frac{C_C + C}{C}.$$

Этому способу расширения пределов измерения присущ, однако, большой недостаток: изменения частоты, температуры и влажности воздуха сильно сказываются на точности показаний вольтметра в последовательном соединении с конденсатором.

Кроме того, емкость самого вольтметра не остается постоянной при различных углах поворота его подвижной системы. Этим и объясняется то, что погрешность показаний вольтметра с конденсатором повышается и редко может быть снижена ниже 3—4%.

В цепях постоянного тока электростатические вольтметры для расширения пределов показаний включаются как на схеме рис. 142, где R — секционированный реостат; к некоторой части секций последнего приключается вольтметр, показание которого U_v меньше измеряемого напряжения U во столько раз, во сколько раз общее сопротивление R делителя больше сопротивлений его секций r , соединенных с зажимами вольтметра.

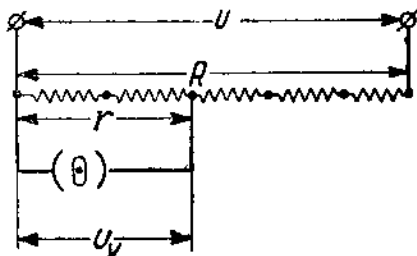


Рис. 142.

Вольтметр с конденсатором непригоден для измерений в цепях постоянного тока, ибо в этом случае общее напряжение цепи распределится между вольтметром и конденсатором не в обратном отношении к их емкостям, а пропорционально сопротивлениям их изоляции.

§ 14. Понятие о катодных вольтметрах.

В последние годы в обиход электрических измерений при токах высокой частоты вошли так называемые катодные вольтметры, действие которых основано на выпрямительных свойствах трехэлектродной лампы (катодной). Их преимуществами по сравнению с вольтметрами других систем, и даже с электростатическими, являются ничтожно малая собственная емкость, отсутствие самоиндукции при практически нулевом собственном потреблении энергии и возможность построить их для измерений малых напряжений (от десятых долей вольт).

Из большого числа схем подобных приборов мы остановимся только на идее одной из них, представленной на рис. 143,

где a — b зажимы, к которым подводится измеряемое напряжение; K — конденсатор и большое безиндукционное сопротивление; A — анод, C — сетка и H — нить катодной лампы; G — чувствительный прибор магнитоэлектрической системы; E_n и E_a — батареи: накала нити и анодная.

Под влиянием переменного, измеряемого нами напряжения, сетка лампы через конденсатор K получает переменное напряжение. Характер изменения его во времени не соответствует изменениям напряжения U_x , так как часть электронов, излучаемых нитью H лампы, осаждающаяся на сетке C во время

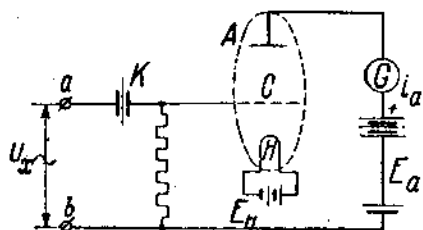


Рис. 143.

положительных полупериодов колебания напряжения, не успевает уйти с нее через сопротивление. В результате сетка приобретает некий добавочный отрицательный потенциал, зависящий от измеряемого прибором напряжения. В случае такого подбора емкости конденсатора и сопротивления, при котором

детектирование происходит на нижнем сгибе анодной характеристики, это вызывает соответственное увеличение силы анодного тока i_a в цепи гальванометра G , что и отражается на величине угла поворота его подвижной системы.

§ 15. Понятие о детекторных приборах.

Изыскание способов измерения переменных токов тональных частот давно уже наталкивало мысль конструкторов измерительных приборов на использование детектирующих (вентильных) свойств, присущих некоторым металлам при их контакте, а также некоторым образованиям кристаллической структуры. Как те, так и другие оказывают, как известно, неодинаковое сопротивление электрическому току, в зависимости от направления последнего. При постоянстве детектирующих свойств подобный вентиль, будучи включен в цепь измеряемого тока в соединении с прибором магнитоэлектрической системы, позволяет измерять силу переменного тока.

Однако, задача эта долго не получала разрешения ввиду непостоянства детектирующих свойств у вентилях, известных по радиотехнической, например, практике. Обнаруженные несколько лет тому назад детектирующие свойства закиси

меди в контакте с медью (так называемых купроксидов) и постоянство этих свойств привело к разработке особых приборов, называемых купроксидными.

Медно-закисный детектор представляет собою медную проволочку или пластинку *a* (рис. 144), покрытую слоем закиси меди *b*. Верхний слой с последней раскисляется для

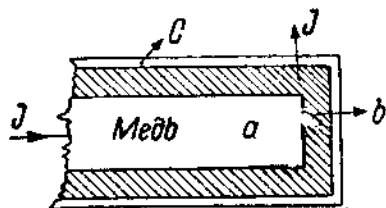


Рис. 144.

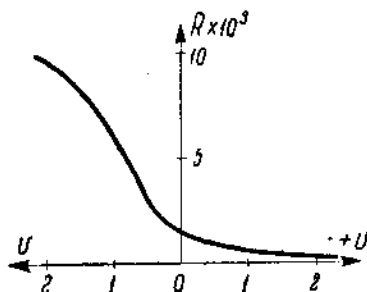


Рис. 145.

обеспечения хорошего контакта с проводом цепи. Снаружи подобный элемент заливается изоляционной массой и может быть смонтирован, как это делает ЦЛПС¹⁾ внутри осветительного штупселя.

Характеристика сопротивления подобного детектора при воздействии на него переменной по знаку разности потенциалов

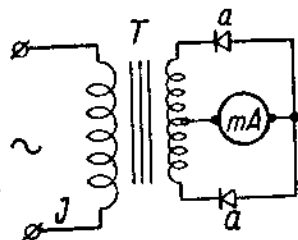


Рис. 146.

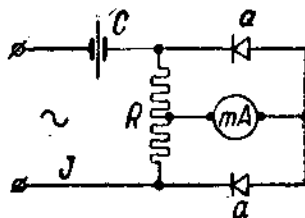


Рис. 147.

имеет вид, подобный представленному на рис. 145. Из большого числа возможных схем включения подобного детектора и прибора мы приведем две, наиболее совершенные. Первая (рис. 146) с трансформатором *T*, предохраняющим цепь переменного тока от проникновения в нее выпрямленного тока из цепи, содержащей два детектора (*a* и *a*), и миллиамперметр *mA* магнитоэлектрической системы. На рис. 147 показана

¹⁾ Центральная лаборатория проводной связи Объединения ВЭСО.

схема с делителем напряжения R и так называемым разделительным конденсатором C , уединяющим цепь переменного тока от проникания в нее выпрямленного постоянного тока.

В обеих схемах включено по два детектора с той целью, чтобы использовать (выпрямить) обе полуволны переменного тока за каждый период его изменения. Этим достигается то, что в случае несимметричной кривой измеряемого переменного тока прибор даст среднее значение из показаний за каждый полупериод. Разделительный конденсатор или трансформатор необходимы для устранения влияния сопротивления источника переменного тока на показания прибора.

На всех этих чертежах показаны лишь идейные схемы включения; фактически они должны быть значительно услож-

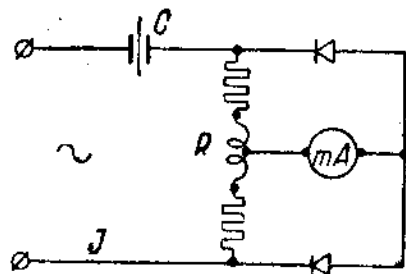


Рис. 148.

нены, дабы снизить погрешности показаний прибора из-за температурных и частотных влияний.

• Исследования показывают, что подобный детектор обладает заметным отрицательным температурным коэффициентом; для компенсации его влияния в схему вводят сопротивление из медного проводника, обладающего, как известно, положитель-

ным температурным коэффициентом. Относительно заметная, и притом растущая по мере снижения частоты измеряемого тока, емкость купроксидных детекторов делает показания приборов зависимыми от частоты тока. Для компенсации частотных влияний, обуславливаемых емкостью детекторов, в схему вводят надлежаще подобранную самоиндукцию, наматывая ее хотя бы из того же проводника, при помощи которого добиваются температурной компенсации. На рис. 148 показана схема прибора, изготовляемого ЦАПС. Здесь R — сопротивление из медной проволоки, обладающее самоиндукцией и выполняющее одновременно роль делителя напряжения и элементов для температурной и частотной компенсаций. В подобном приборе достигается точность показаний до 2—3% при изменении температуры от 0 до 40°C и частоты от 50 до 5000 периодов.

Приборам этой системы присущи следующие свойства: большая чувствительность (5—10 мА на всю шкалу); доста-

точно равномерные деления шкалы; постоянство градуировки и относительно большая перегрузочная способность. Недостатками их являются увеличение сопротивления и понижение чувствительности, обусловленные дополнительными элементами схемы, при помощи которых в них снижают температурную и частотную зависимости.

Для измерения напряжения применяются четыре купроксидных выпрямителя, включенные в плечи мостика Витстона, в одну из диагоналей которого вводится гальванометр.

§ 16. Регистрирующие или самопишущие приборы.

Регистрирующим или самопишущим называется электроизмерительный прибор, не только измеряющий ту или иную электрическую величину, но и непрерывно записывающий ее изменения во времени. Для этой цели измерительный прибор снабжается часовым механизмом, посредством которого перед его указателем непрерывно перемещается бумажная лента, на которой нанесены масштабные линии или кривые. С указателем прибора скрепляется пишущее приспособление того или иного типа, касающееся бумаги и оставляющее на ней непрерывную черту или пунктирную точечную линию.

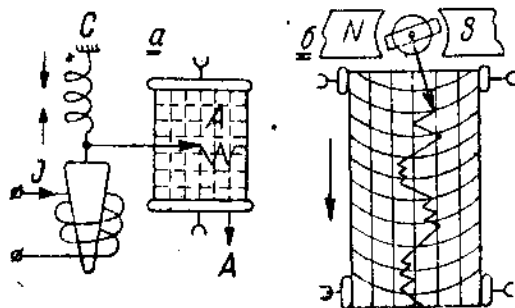


Рис. 149.

В зависимости от того, каким образом в данном приборе перемещается стрелка—прямолинейно или же по окружности, различают регистрирующие приборы с прямолинейными координатами (рис. 149-а) или с дугowymi координатами (рис. 149-б).

В первом случае часовой механизм вращает барабан А, поверхность которого покрыта масштабной бумагой, разграфленной прямолинейно. Во втором случае масштабная бумага, разлинованная по дугowym линиям, перемещается под указателем прибора прямолинейно (как показано на чертеже стрелкой). Общий вид см. рис. 150 и 161.

Часовые механизмы подобных приборов часто конструируются с таким расчетом, чтобы можно было изменять скорость перемещения масштабной бумаги. Пишущие приспособления

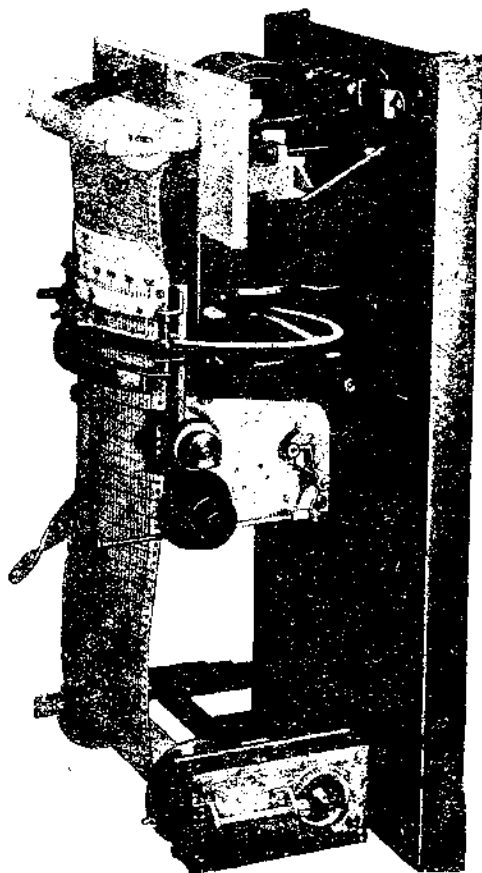


Рис. 150. Внутренний вид регистрирующего прибора.

в них выполняются в виде маленького сосуда с носиком, прикасающимся к бумаге; сосудик содержит запас плохо высыхающих чернил или же представляют собою капиллярную трубку, находящуюся в соединении с сосудом, заполненным чернилами. Поскольку в подобных приборах подвижная система испытывает дополнительный тормозящий момент вследствие трения пишущего приспособления о поверхность бумаги, их вращающий момент должен быть значительно повышен (более сильные магниты в приборах магнитоэлектрической системы или применение тех систем приборов, как, например, индукционных, у которых легко достигнуть большого вращающего момента).

У приборов с незначительным вращающим моментом запись осуще-

вляется не непрерывно, а через определенные (равновеликие) промежутки времени. У них указатель снабжен тупым штифтиком, который прижимается на мгновение к масштабной бумаге тогда, когда под воздействием особого автоматического приспособления, связанного с часовым механизмом, указатель приближается к бумаге (примерно через каждые 15—30 секунд).

Помимо этого изготавливаются еще приборы с искровой регистрацией. Идея ее устройства сводится к следующему: бумага движется в промежутке между металлической шкалой и металлической шиной, расположенными параллельно друг другу. В пространстве между ними находится указатель прибора в виде ножевидной стрелки. К шкале и шине подводится напряжение от особой индукционной катушки, отрегулированной так, чтобы между шкалой и шиной периодически проскакивала электрическая искра. Напряжение во вторичной обмотке катушки подрегулируется так, чтобы искра проскакивала и прожигала бумагу только в том месте, где в данный момент расположена стрелка прибора.

Сводка данных, характеризующих приборы различных систем,—см. таблицы в приложении к этой главе.

Контрольные вопросы к главе III.

1. Дайте определения понятиям: точность, чувствительность и качество приборов.
2. Что такое погрешность показаний прибора и как ее принято определять?
3. Какими способами в приборах создают противодействующий момент и какой из этих способов наиболее совершенен?
4. Что такое арретирование прибора?
5. Что такое параллактический способ отсчета?
6. Какие способы демпфирования подвижной системы приборов вы знаете и какой из них наиболее совершенен?
7. Перечислите все внешние факторы, могущие влиять на показания приборов.
8. В чем разница между амперметрами и вольтметрами?
9. Каким способом в магнитоэлектрических приборах достигается равномерность делений шкалы (искусственно, или же это вытекает из самого принципа действия этой системы)?
10. В чем идея схемы температурной компенсации?
11. Можно ли у электродинамических приборов применить магнитный успокоитель?
12. Какими способами у электродинамических приборов достигают более или менее равномерных делений шкалы?
13. Почему у ферродинамических приборов магнитопровод делается из листового железа?
14. Можно ли построить электромагнитный прибор с равномерной шкалой?
15. Оказывает ли влияние на точность показаний электромагнитных приборов направление тока?
16. Аperiodичны ли электромагнитные приборы по принципу их действия?
17. На каких приборах электромагнитной системы—амперметрах или вольтметрах—больше сказывается изменение частоты измеряемого ими тока?
18. Можно ли тепловыми, электродинамическими и электромагнитными приборами, отградуированными на постоянном токе, пользоваться для измерений в цепях тока переменного?

Характеристика свойств технических электронизмерительных приборов различных систем.

№ по порядку	Системы приборов	Характер зависимости погрешности от угла отклонения и от номинала для приборов:	Вид шкалы	Макс. допустимая норма погрешности показаний в %				Макс. допустим. точн. у образц. прибора, %	Собств. потребл. энергии в ваттах для аппар. на 5—10 А и на 150—250 В	Область применения по роду тока		
				I класс		II класс					III класс	
				A	B	C	D				E	F
1	Магнитоэлектрическая. Амперметры Вольтметры	$I = C\alpha$	Равно- мерн. делен.	0,2 0,2	0,3 0,3	1,0/0,6 1,0/0,6	2,0/1,2 2,0/1,2	0,07 —	Порядка 0,5 1—2	Пост.		
2	Электродинамическая. Амперметры Вольтметры	Приблиз. $I = C\sqrt{\alpha}$	Квадр.	0,4 0,3	0,6 0,5	2,0/1,0 2,0/1,0	4,0/2,0 4,0/2,0	от 0,3 до 0,5	Порядка 5—15 W	Пер. и пост.		
3	Тепловая. Амперметры Вольтметры	Приблиз. $\Delta I = C \cdot I^2$	Неравн. номерн.	— —	— —	— —	— —	1,0	3—5 W 20—30 W	Пер. и пост.		
4	Электромагнитная. Амперметры Вольтметры	Приблиз. $I = C\sqrt{\alpha}$	Неравн. номерн.	— —	— —	— —	— —	0,3 0,5	3—6 W 1,5—7 W	Пер. и пост.		
5	Индукционная. Тип Бенешке Тип Феррариса	$I = C\sqrt{\alpha}$	Квадр.	— —	— —	— —	— —	1—2	1—2 W 2—5 W	Только пер. Пост. и пер.		
6	Электростатическая. Ваттметры		Неравн.	— —	— —	— —	— —	0,5	Ничт. мало			
7			—	0,3	0,5	2,0/1,3	—/2,5	—				

Мин. достижимое значение постоянного тока у амперметров со стрелкой	Макс. сила тока, которая м. б. принята без шунта на входе прибора	Как влияют на показания следующие внешние факторы				Род электроконтакта	Какого рода ток измеряется	Наблюдаемое сопротивление на 1 вольт при шкале в ом	Способность прибора к перегрузке	Примерные данные для подсчета коэффициента качества		
		Постороннее магнитное поле	Изменение температуры	Изменение частоты тока	Постороннее магнитное поле					Вес подсистемы	Вращающ. момент	Коэфф. качества
1 μ A на делен. шкалы	до 100 mA	слабо	слабо	—	—	Токи Фуко	Пост.	до 1.000	Малая	2,0	0,3	1,06
5—10 mA	до 400 A	оч. сильн.	слабо	слабо	слаб.	Воздушн.	Пост. до 1.000 пер/сек.	до 50	Малая	5,0	0,50	0,45
5—10 mA	0,5 A	в. слабо	в. сильно	слабо до 1.000 пер/сек.	—	Магнитн.	Пост. до 1.000 пер/сек.	до 10	Малая	0,4	0,04	1,57
20—30 mA	1.000 A	сильн.	сильн.	сильно	—	Воздушн.	На соотв. токе	15—35	Больш.	1,5	0,20	1,00
500 μ A	300 A	слабо	средн.	сильно	—	Магнитн.	Пер. той же частоты	2—5	Больш.	12,0	2,5	0,60
3—5 V	15.000	—	слабо	—	в. сильно.	Магнитн.	Пост.	—	—	—	—	—

Примечание. В графах максимальной допустимой перегрузки в числителе показаны данные по нормам, принятым в Англии (наиболее типичные нормы).

ТАБЛИЦА II

Характеристические данные приборов различных систем и фирм.

Система	Фирма	Шкала ампер	Амперметры				Вольтметры				
			Сопротивление	Падение напряжения в приборе	Собственное потребление энергии	Отношение правильного момента к весу	Шкала вольт	Сопротивление	Сила тока при полном отклонении	Собственное потребление энергии	Отношение правильного момента к весу
Магнито-электрич.	Вестон	5	0,008	0,04	0,2	0,2	150	13,200	0,01135	1,72	0,29
	Надир	5	0,012	0,06	0,3	0,11	150	35,800	0,0042	0,63	0,115
Электро-динамич.	Кембридж	50	0,0033	0,15	7,5	0,0074	150	4,980	0,03	4,5	0,0072
	Гартман						120	575 нити 17,25	0,2	25	—
Тепловая	Филиппс	10	0,0427	0,427	4,27	—	—	—	—	—	—
	Гартман Сименс Вестон	40 — —	0,0028 — —	0,112 — —	4,48 — —	0,03 — —	350 100	9,23 685	0,038 0,144	13,25 14,6	0,04 0,06

19. Каким способом в индукционных приборах достигают сдвига по фазе между токами в двух системах катушек?

20. Можно ли пользоваться электростатическим прибором, отградуированным вместе с конденсатором, для измерений в цепях постоянного тока?

21. Составьте схему классификации приборов по принципу действия, области применения и назначению.

22. Постройте по основным формулам, выражающим зависимость между углом отклонения подвижной системы приборов различных систем и силой измеряемого ими тока, кривые (по оси ординат силу тока, по оси абсцисс — отклонение). По этим кривым определите, в каком месте шкалы приборы различных систем обладают максимальной чувствительностью и наибольшей точностью отсчета показаний.

23. Сделайте сводку собственного потребления энергии приборами различных систем.

24. Перечислите источники погрешности показаний приборов различных систем.

25. Каким способом в индукционных приборах типа Бенишке создается смещение индуктируемых в диске токов для получения вращающего момента.

26. При каких условиях шкала электростатических приборов могла бы быть квадратичной?

27. Почему погрешность показаний электростатических вольтметров с конденсаторами больше, чем без них?

28. Что такое „шунтовой множитель“, и какая зависимость имеется между ним и сопротивлениями шунта и амперметра?

29. Что такое „универсальный шунт“ и в чем его основное преимущество?

30. Почему шунты снабжаются двумя парами зажимов и почему надо шунты, а не амперметр, вводить непосредственно в цепь измеряемого тока?

31. Почему избегают шунтировать электродинамические, индукционные и электромагнитные приборы при измерениях в цепях переменного тока?

32. Какие способы расширения пределов измерения силы тока применяются в электродинамических приборах?

33. Как изменяется постоянная прибора, включенного в цепь через посредство измерительных трансформаторов тока и напряжения?

34. Перечислите требования, которым должны удовлетворять хорошие измерительные трансформаторы тока и напряжения.

ГЛАВА IV.

Приборы высокой чувствительности.

§ 17. Назначение, принцип действия и основы теории приборов высокой чувствительности.

1. **Назначение.** Приборами высокой чувствительности, или как их чаще называют гальванометрами, в электроизмерительной практике пользуются по преимуществу при нулевых методах измерения, т. е. когда в определенной ветви измерительной схемы мы добиваемся отсутствия тока, что и фиксируется

прибором высокой чувствительности. Отсчет угла поворота подвижной системы гальванометров при измерениях ими силы тока, напряжений или количества электричества, производится обычно при помощи светового луча, направляемого на зеркальце, скрепленное с подвижной системой. Луч, отраженный от зеркальца, дает на шкале, устанавливаемой на некотором расстоянии от прибора, световой зайчик, по величине перемещения которого вдоль шкалы легко обнаружить весьма ничтожные углы поворота подвижной системы.

Это, а также малый вес подвижной системы и ничтожно малый противодействующий момент ее подвеса позволяют довести постоянную некоторых специальных типов гальванометров до 10^{-14} А, в то время как минимальное достижимое ее значение у приборов со стрелкой не превышает $10^{-6} - 10^{-7}$ А.

Подобно приборам, рассмотренным в предыдущей главе, гальванометры строятся различных систем, из коих одни применимы только для постоянного, другие для обоих родов тока.

Из всех типов наибольшим распространением пользуются гальванометры магнитоэлектрической системы, хотя по своей чувствительности они и стоят ниже тех гальванометров, у которых подвижной системой является постоянный магнит. В цепях переменного тока пользуются гальванометрами вибрационными, а также основанными на использовании электродинамических и термоэлектрических явлений.

Наконец, в тех случаях, когда необходимо измерить кратковременный импульс тока или быстро протекающее в цепи количество электричества, применяются так называемые баллистические гальванометры, отличающиеся от обыкновенных только деталями своей конструкции, обеспечивающими наличие определенной зависимости между углом отклонения их подвижной системы и количеством быстро протекавшего через них электричества.

В дальнейшем мы вкратце остановимся на основах теории обыкновенных гальванометров и притом только магнитоэлектрической системы, во-первых, потому что они наиболее распространены в электроизмерительной практике, а, во-вторых, потому что их теория, в известной мере, может быть использована и для понимания условий работы гальванометров других систем и типов.

2. Принцип действия и основы теории гальванометров магнитоэлектрической системы. В главе III мы рассмотрели принцип действия и основы теории приборов магнитоэлектри-

ческой системы, причем установили, что для момента равновесия, т. е. тогда, когда между вращающим моментом, под влиянием которого подвижная система такого прибора отклоняется, и моментом сил, противодействующих ее отклонению имеет место следующее равенство:

$$M_{вр} = M_{пр}$$

или

$$HnS \cdot I = D\alpha_k,$$

где H — напряженность поля постоянных магнитов,
 S и n — площадь подвижной рамки и число витков ее обмотки,
 I — сила тока в обмотке рамки, нами измеряемая,
 D — коэффициент кручения подвеса рамки и
 α_k — конечный угол поворота подвижной системы прибора.
 Из этого выражения следует, что

$$I = \frac{D}{HnS} \alpha_k$$

или

$$I = \frac{D}{G} \alpha_k,$$

откуда $I = C\alpha_k$, где $C = \frac{D}{G}$ — так называемая динамическая постоянная прибора, т. е. та сила тока, при которой угол поворота рамки равен единице.

Исходя далее из определения понятия „чувствительность“ прибора, принимаемого как отношение $\frac{\alpha_k}{I} = S_i$, мы приходим к выводу, что постоянная C и чувствительность прибора суть величины обратные друг другу, ибо если

$$S_i = \frac{\alpha_k}{I} = \frac{G}{D}$$

и

$$C = \frac{I}{\alpha_k},$$

то

$$I = \frac{1}{S_i} \alpha_k = C\alpha_k.$$

Столь простая зависимость между силой тока и конечным углом отклонения подвижной системы в гальванометрах этой

системы достигается теми же способами, что и в рассмотренных выше технических приборах магнитоэлектрической системы. К ним относятся: размещение в междуполюсном пространстве постоянного магнита цилиндра из мягкого железа и придание внутренней поверхности полюсных наконечников магнита такой формы, чтобы силовые линии поля в междужелезном пространстве, где находится подвижная рамка, были направлены радиально к поверхности цилиндра.

При работе с данным гальванометром нас интересует не только его чувствительность, но также еще характер отклонения его подвижной системы и время, в течение которого последняя займет положение равновесия, отвечающее конечному углу отклонения. С этим приходится считаться потому, что подвижная система гальванометров, в видах сохранения большей чувствительности, не может быть снабжена сильным успокоительным приспособлением, а также подвесом, оказывающим большой противодействующий момент.

Время, после истечения которого подвижная система гальванометра займет положение равновесия, т. е. повернется на конечный угол отклонения, зависит от соотношения между так называемыми оперативными и конструктивными постоянными гальванометра. К первым относятся: период незатухающих колебаний T_0 , свойственный подвижной системе данного гальванометра; его критическое сопротивление (будет пояснено ниже) и чувствительность. Под конструктивными постоянными разумеются: K — момент инерции подвижной системы; $G = HnS$ — поток, сцепляющийся с контуром подвижной рамки; P — коэффициент затухания (торможения) подвижной системы и D — коэффициент кручения подвеса.

Для выяснения соотношения между всеми этими постоянными, определяющего, как сказано выше, характер и промежуток времени до конечного отклонения подвижной системы, надо, очевидно, исследовать динамику этого последнего процесса. Для этого необходимо составить, решить и исследовать уравнение движения рамки гальванометра от момента включения тока и до момента поворота ее на конечный угол отклонения.

Из механики известно, что производная по времени момента количества движения системы, вращающейся вокруг оси, равна сумме моментов действующих на нее сил.

Количество движения какой-либо точки подвижной системы равно, как известно, $m \cdot r \cdot \omega$, где m — масса, ω — угловая скорость и r — радиус.

Момент количества движения равен

$$m \cdot r \cdot \omega \cdot r = m \cdot \omega \cdot r^2 = \omega \sum mr^2 = \omega K.$$

Сила инерции равна

$$m \frac{dv}{dt},$$

но

$$\frac{dv}{dt} = r \frac{d\omega}{dt},$$

следовательно,

$$m \frac{dv}{dt} = mr \frac{d\omega}{dt}.$$

Но

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\alpha}{dt^2};$$

отсюда

$$m \frac{dv}{dt} = mr \frac{d^2\alpha}{dt^2},$$

а момент сил инерции будет равен

$$mr \frac{d^2\alpha}{dt^2} \cdot r = mr^2 \frac{d^2\alpha}{dt^2} = K \frac{d^2\alpha}{dt^2}.$$

Таким образом, $K \frac{d^2\alpha}{dt^2}$ = сумме моментов сил, действующих на подвижную систему, к каковым относятся:

а) момент сил направляющих движение рамки, равный как это было выведено раньше, $HnSI = GI$,

б) момент кручения подвеса рамки $= D\alpha$ и

в) момент сил, тормозящих движение рамки, равный $\rho \frac{d\alpha}{dt}$, где ρ — постоянная торможения (затухания).

Следовательно, уравнение движения рамки гальванометра напишется в таком виде:

$$K \frac{d^2\alpha}{dt^2} = G \cdot I - \rho \frac{d\alpha}{dt} - D\alpha$$

или

$$K \frac{d^2\alpha}{dt^2} + \rho \frac{d\alpha}{dt} + D\alpha = G \cdot I \dots \dots \dots (A)$$

Если во время движения рамки сделать ток $I=0$ (например, разомкнуть цепь гальванометра), то уравнение ее движения будет иметь вид

$$K \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + \rho \frac{d \alpha}{dt} + D \alpha = 0 \dots \dots \dots (B)$$

В тот момент, когда рамка займет положение равновесия, т. е. повернется на конечный угол отклонения α_k , уравнение (A) примет знакомый уже нам вид, а именно,

$$D \alpha_k = GI,$$

откуда

$$I = \frac{D}{G} \alpha_k \dots \dots \dots (C)$$

Более внимательное выяснение природы сил, тормозящих движение рамки $\left(\rho \frac{d \alpha}{dt}\right)$, показывает, что постоянная ρ торможения определяется, как сумма следующих слагаемых: ρ_1 — коэффициента торможения рамки вследствие трения ее о воздух, ρ_2 — коэффициента торможения вследствие возникновения в меди обмотки рамки, во время ее перемещения в магнитном поле, токов Фуко, тормозящих движение рамки и, наконец, ρ_3 — коэффициента так называемого электромагнитного торможения, как следствие того, что в обмотке рамки, во время ее движения индуцируется э.д.с. и, если обмотка рамки замкнута на некую цепь, то порождается ток, тормозящий движение рамки.

Если первые два коэффициента не поддаются изменению или регулировке в изготовленном уже гальванометре, то величина последнего коэффициента может быть весьма легко и удобно регулируема, что позволяет, как мы увидим дальше, изменять характер движения подвижной части гальванометра. При конструировании стараются по возможности уменьшить коэффициенты ρ_1 и ρ_2 , величина же коэффициента ρ_3 может быть определена путем следующих рассуждений. При повороте рамки из положения покоя на угол $d\alpha$ (рис. 151) поток, пронизывающий ее контур, изменится на величину $d\Phi = 2H \cdot l \cdot ds$, где ds — путь, на который при этом переместится каждая вертикальная сторона рамки.

Но $ds = d\alpha \cdot \frac{b}{2}$ и, следовательно, индуцируемая при этом в n витках обмотки рамки э.д.с. равна

$$E = n \frac{d\Phi}{dt} = n \frac{2Hl d\alpha b}{2 dt} = HnS \frac{d\alpha}{dt} = G \frac{d\alpha}{dt}.$$

Благодаря этой э.д.с. ток в обмотке рамки гальванометра в каждый данный момент равен

$$I' = \frac{U - G \frac{d\alpha}{dt}}{R_g + R},$$

где U — напряжение, к которому присоединены концы обмотки рамки (см. схему 152); R_g и R — сопротивление обмотки рамки и той внешней цепи, на которую она замкнута, и I' — мгновенное

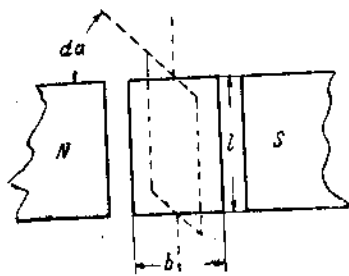


Рис. 151.

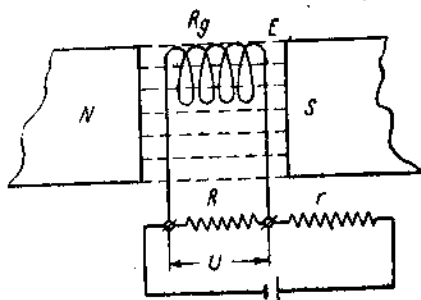


Рис. 152.

значение тока. Таким образом, вследствие возникновения индуктированной э.д.с., E сила тока в обмотке рамки будет уже не

$$I = \frac{U}{R_g + R},$$

а

$$I' = \frac{U - E}{R_g + R} = \frac{U - G \frac{d\alpha}{dt}}{R_g + R},$$

следовательно, уравнение (А) надо переписать в таком виде:

$$K \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + (\rho_1 + \rho_2) \frac{d\alpha}{dt} + D\alpha = GI',$$

или

$$K \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + (\rho_1 + \rho_2) \frac{d\alpha}{dt} + D\alpha = G \left(\frac{U - G \frac{d\alpha}{dt}}{R_g + R} \right),$$

или

$$K \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + (\rho_1 + \rho_2 + \rho_3) \frac{d\alpha}{dt} + D\alpha = GI, \dots (D)$$

где

$$\rho_3 = \frac{G^2}{R_g + R} = \frac{H^2 n^2 S^2}{R_g + R},$$

т. е. коэффициент электромагнитного торможения пропорционален квадрату напряженности поля постоянного магнита (сравни с влиянием изменения того же поля на чувствительность гальванометра).

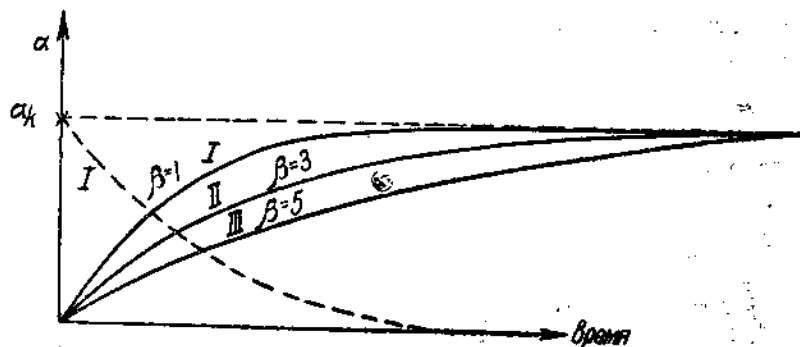


Рис. 153.

Принимая, в первом приближении, что коэффициент ρ_1 , ρ_2 и ρ_3 постоянны, и заменяя их сумму коэффициентом ρ , приводим уравнение (D) к следующему виду:

$$K \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + \rho \frac{d\alpha}{dt} + D\alpha = GI \dots (E)$$

Решение этого дифференциального уравнения (оно не приводится здесь ввиду его громоздкости) и анализ полученных результатов приводят к следующим основным выводам.

Случай I. Если между постоянными имеет место равенство $\rho^2 = 4KD$, то поворот рамки из положения покоя на конечный угол отклонения α_k совершается аperiодически, т. е. рамка поворачивается и подходит к положению равновесия (α_k) не переходя его. Этот характер движения рамки поясняется кривой I на диаграмме рис. 153, где по оси абсцисс отложено время от момента замыкания (или соответ-

ственно размыкания — пункт) цепи гальванометра, а по оси ординат — углы поворота рамки.

Это есть предельный случай аperiодического и притом наиболее ускоренного движения рамки, наиболее удобный в смысле быстроты отсчета конечного угла. Гальванометр, у которого подобрано указанное равенство постоянных, называется критически успокоенным, причем этого удобнее всего достигнуть, изменяя величину того внешнего сопротивления R , на которое замкнута обмотка гальванометрической рамки.

Действительно, если пренебречь тем торможением рамки, которое обуславливается трением ее о воздух (P_1) и тормозящим действием токов Фуко (P_2) в обмотке, т. е. положить, что $P = P_3$, то

$$P_3 = P = \frac{G^2}{R_g + R}.$$

Но так как $P^2 = 4KD$, а $P = 2\sqrt{KD}$, то для этого случая необходимо, чтобы $R_g + R = \frac{G^2}{2\sqrt{KD}}$, что легче всего осуществить, подобрав соответствующее сопротивление внешней цепи, на которую замкнута обмотка рамки (см. на схеме рис. 152 сопротивление R). При соблюдении этого условия сумму $R_g + R$ принято называть полным критическим, а R — внешним критическим сопротивлениями.

Отношение $\frac{P}{2\sqrt{KD}} = \beta$, характеризующее степень торможения (затухания) подвижной системы, принято называть степенью затухания, и она для критически успокоенного гальванометра, очевидно, равна $\beta = 1$. Увеличивая степень затухания, т. е. уменьшая сопротивление R внешней цепи гальванометра так, чтобы равенство $P^2 = 4KD$ превратилось в неравенство $P^2 > 4KD$, мы заставим поворачиваться рамку гальванометра аperiодически, но уже с меньшей скоростью, как это представлено кривыми II и III на рис. 153. В этих последних случаях гальванометр характеризуется, как переперуспокоенный.

Случай II. Если между постоянными гальванометра имеет место неравенство $P^2 < 4KD$, то движение рамки происходит периодически (колебательно), т. е. рамка, отклонившись на угол, больший конечного угла отклонения, останавливается на мгновение, начинает двигаться в обратном направлении,

вновь переходит положение равновесия, опять на мгновение останавливается и т. д., пока не остановится в положении равновесия (угол α_k на рис. 154, где сплошная кривая отображает характер движения рамки после замыкания цепи гальванометра, а пунктирная — тоже после размыкания цепи).

Этот колебательный характер движения рамки гальванометра определяется периодом T колебания, т. е. промежутком времени, в течение которого подвижная система совершает одно полное колебание, и затуханием колебаний. Последнее определяется отношением двух следующих друг за другом амплитуд, т. е. отношением

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{\alpha_3}{\alpha_4} = \frac{\alpha_5}{\alpha_6} = \Delta \dots \dots \dots (a)$$

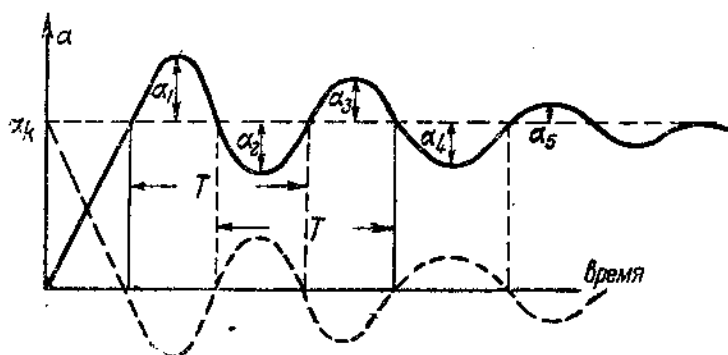


Рис. 154.

Период T колебания, в свою очередь, зависит от соотношения постоянных гальванометра и выражается как

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{D}{K} - \frac{P^2}{4K^2}}} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{4KD - P^2}{4K^2}}} \dots \dots (b)$$

Из этого выражения видно, что у готового гальванометра период колебания рамки можно изменять, воздействуя на постоянную его торможения P , ибо D и K не меняются.

Для этого надо замкнуть обмотку его рамки на такое сопротивление R , чтобы сумма $R_g + R$ была больше полного критического сопротивления данного гальванометра.

При $R \cong 0$, чего можно достигнуть, заставляя работать гальванометр при разомкнутой цепи его рамки, период колебания его подвижной системы выразится как

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{K}{D}} \dots \dots \dots (c)$$

Период T_0 принято называть периодом незатухающих колебаний (вернее было назвать периодом колебаний с наименьшим затуханием, поскольку R даже при разомкнутой цепи, т. е. при отсутствии электромагнитного торможения, все же не может быть равным нулю—трение рамки о воздух все таки имеется). Период T_0 является, как мы увидим дальше, одной из основных характеристик гальванометра.

Мерою затухания колебаний подвижной системы, а, следовательно, и мерою того промежутка времени, в течение которого рамка займет положение равновесия, повернувшись на конечный угол отклонения (быстрота отсчета показаний), является, как сказано выше, отношение двух следующих друг за другом амплитуд, называемое коэффициентом затухания

$$\Delta = \frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{\alpha_2}{\alpha_3} = \frac{\alpha_3}{\alpha_4} = \frac{\alpha_4}{\alpha_5} = \frac{\alpha_n}{\alpha_{n+1}}$$

Натуральный логарифм этого отношения, т. е.

$$\ln \Delta = \lambda = \ln \frac{\alpha_n}{\alpha_{n+1}}, \dots \dots \dots (d)$$

именуемый логарифмическим декрементом, или прямо декрементом, зависит от соотношения постоянных гальванометра, а именно,

$$\lambda = \frac{PT}{4K} \dots \dots \dots (e)$$

Таким образом, декремент затухания можно подсчитать, зная постоянные гальванометра, или, что проще, определить его опытным путем. В последнем случае приводят в колебание подвижную систему испытуемого гальванометра и отсчитывают отклонения $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ и т. д. его подвижной системы по обе стороны от положения покоя, по каковым данным и вычисляют λ (по формуле d).

Если подвижная система колеблется быстро (T мал) и отметить точно величину каждого последующего угла отклонения

не представляется возможным, то замечают первую, а затем п-ую амплитуды; тогда

$$\lambda = \ln \Delta = \frac{1}{n-1} \ln \frac{\alpha_1}{\alpha_n} \dots \dots \dots (f).$$

Действительно из пропорции для Δ имеем

$$\alpha_1 = \Delta \alpha_2 = \Delta^2 \alpha_3 = \Delta^3 \alpha_4 = \dots = \Delta^{n-1} \alpha_n,$$

или

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_n} = \Delta^{n-1},$$

откуда

$$\lambda = \ln \Delta = \frac{1}{n-1} \ln \frac{\alpha_1}{\alpha_n}.$$

Из всего изложенного видно, что характер движения рамки одного и того же гальванометра (т. е. при неизменных значениях его постоянных D и K) легко и удобно изменяется в широких пределах—от периодического с малым затуханием и до замедленного аperiodического, причем тот или иной режим движения рамки достигается, в основном, регулированием постоянной электромагнитного торможения, а последняя зависит от сопротивления той внешней цепи (R на схеме 152), на которую замкнута обмотка рамки прибора. Чем меньше R , тем медленнее движется рамка. На этом, между прочим, основан способ быстрого успокоения колебаний рамки: достаточно ее обмотку замкнуть накоротко в тот момент, когда она в процессе колебаний переходит через положение покоя, чтобы она быстро остановилась.

Какой же из режимов работы гальванометра следует выбрать при работе с ним? Казалось бы, что работа с критически успокоенным гальванометром наиболее удобна, поскольку при этом его подвижная система быстрее всего и не совершая колебаний поворачивается на конечный угол отклонения. Это ускоряет отсчет и гарантирует экспериментатора от ошибок из-за возможного непостоянства измеряемой им величины.

Однако, имеется еще второй, весьма немаловажный, критерий для выбора того или иного режима работы гальванометра—это условие максимальной его чувствительности. Если критическое успокоение и максимальная чувствительность совместимы, то, конечно, следует вести работу с критически успокоенным гальванометром. Для выяснения вопроса о том, от каких факторов зависит максимальная чувствительность гальванометра, отметим, что чувствительность по току S_i свя-

зана определенным соотношением с величиною периода незатухающих колебаний T_0 рамки и полным критическим сопротивлением $(R_g + R)$ гальванометра.

Действительно, сопоставляя ранее приведенные выражения

$$R_g + R = \frac{G^2}{2\sqrt{KD}}$$

и

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{K}{D}},$$

имеем

$$R_g + R = \frac{G^2 T_0}{4\pi K},$$

но

$$S_i = \frac{\alpha}{I} = \frac{G}{D}$$

и, следовательно,

$$S_i^2 = \frac{2(R_g + R)\sqrt{KD}}{D^2} = \frac{(R_g + R) T_0}{\pi D}.$$

Это последнее равенство не согласуется с условием для критического успокоения гальванометров магнитоэлектрической системы: для них внешнее критическое сопротивление обычно больше сопротивления обмотки гальванометра, т. е. $R > R_g$, а R_g не может быть равным нулю.

Поэтому, в каждом частном случае измерительной практики, и в зависимости от того, что для нас является более существенным — максимальная чувствительность или наиболее быстрый отсчет конечного угла отклонения, надо подобрать сопротивления цепи и гальванометра, наиболее удовлетворяющие поставленной нами задаче. При этом надо помнить, что не чрезмерно большое отступление от равенства $S_i^2 = \frac{(R_g + R) T_0}{\pi D}$

относительно мало влияет на чувствительность гальванометра, и поэтому решающим является быстрота отсчета.

Высокая чувствительность гальванометра по току необходима при измерениях малых по силе токов и весьма больших сопротивлений. В тех же случаях, когда мы измеряем малые э.д.с. и разности потенциалов, например, термо-электродвижущие силы или малые сопротивления в схеме двойного мостика

Томсона, от гальванометра требуется большая чувствительность по напряжению S_V (вольтовая), под которой разумеют число делений шкалы, на которое отклонится рамка прибора, если к зажимам ее обмотки приложена единица напряжения (обычно 1 mV). Чувствительность по напряжению

$$S_V = \frac{\alpha}{V} = \frac{\alpha}{IR_g} = \frac{\alpha}{\frac{\alpha}{S_I} R_g} = \frac{S_I}{R_g}$$

достигается, очевидно, у гальванометров, обладающих большой чувствительностью по току при малом сопротивлении их обмотки.

3. Особенности работы баллистических гальванометров. Раньше уже отмечалось, что при измерениях импульсов тока или весьма малых и быстро протекающих в цепи количеств электричества отклонение подвижной системы рассмотренных выше обыкновенных гальванометров не может служить мерою протекшему количеству электричества. В этом случае необходимо утяжелить подвижную систему гальванометра или придать ей такую форму, при которой ее момент инерции увеличился бы настолько, чтобы она приходила в движение уже после окончания импульса тока. Это, как явствует из выражения

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{K}{D}},$$

связано с увеличением периода ее колебаний, и в этом случае между первым наибольшим углом отклонения рамки и количеством кратковременно протекшего через ее обмотку электричества может быть достигнута весьма простая зависимость такого вида

$$Q = C_{\text{бал}} \alpha_{\text{max}}, \dots \dots \dots (a)$$

где $C_{\text{бал}}$ — так называемая баллистическая постоянная гальванометра, легко определяемая из опыта.

Уравнение движения рамки в этом случае напишется на основе тех же данных, что и для обыкновенного гальванометра (см. уравнение E), но только при его составлении необходимо учесть, что к моменту начала движения рамки ток в ее обмотке уже прекратится.

Если через обмотку рамки за весьма короткое время Δt прошел ток i , и притом, очевидно, не постоянный по величине,

поскольку мы имеем дело с импульсом, то количество протекшего при этом электричества равно

$$Q = \int_0^{\Delta t} i dt.$$

Момент направляющих сил, действующих при этом на рамку, равен

$$H \cdot 2 \cdot b \cdot l \cdot N \cdot i,$$

где H — напряженность поля постоянного магнита, b и l — ширина и высота рамки и N — число витков ее обмотки.

Механика учит, что для тела, вращающегося вокруг какой-либо оси, момент импульса силы равен приращению момента количества движения относительно той же оси.

Момент импульса механической силы в рассматриваемом нами случае

$$M = \int_0^{\Delta t} i [N 2 b l N] dt = Q [H 2 b l N] = Q \frac{D}{C},$$

где $D = C [H 2 b l N]$, а C известная нам по предыдущему динамическая постоянная гальванометра, равная

$$C = \frac{D}{H l b N} = \frac{D}{H S N}.$$

Но количество движения какой-либо точки подвижной системы гальванометра равно

$$mv = m \frac{b}{2} \omega,$$

где m — масса точки, $\frac{b}{2}$ — радиус ее вращения и ω — угловая скорость, одна и та же для всех точек подвижной системы.

Момент количества движения всей системы

$$\sum m v \frac{b}{2} = \sum m \omega \frac{b^2}{4} = \omega \sum m \frac{b^2}{4} = \omega K,$$

где K — момент инерции подвижной системы относительно ее оси вращения.

Следовательно, на основе приведенной теоремы механики, мы можем написать

$$Q \frac{D}{C} = \omega_0 K - \omega K,$$

где ω_0 — угловая скорость системы после воздействия на нее момента M , т. е. после прекращения импульса тока, а ω — до воздействия. Так как до воздействия $\omega = 0$, то

$$Q \frac{D}{C} = \omega_0 K$$

или

$$Q = \omega_0 C \frac{K}{D}.$$

Подвижная система гальванометра, приобретя угловую скорость ω_0 , начинает колебаться около положения равновесия, причем для любого момента времени сумма моментов сил, на нее действующих и сил инерции, равна нулю.

Силами, действующими на нее в этом случае, в отличие от сказанного при выводе уравнения движения рамки обыкновенного гальванометра (см. пункт 2 настоящего параграфа), являются только моменты сил: противодействующей $D\alpha$ и тормозящей $\rho \frac{d\alpha}{dt}$.

Таким образом, уравнение движения рамки в этом случае напишется, как

$$K \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + \rho \frac{d\alpha}{dt} = D\alpha = 0$$

(сравни с уравнением Е), или

$$\frac{d^2 \alpha}{dt^2} + \frac{\rho}{K} \frac{d\alpha}{dt} + \frac{D}{K} \alpha = 0 \dots \dots \dots (Б)$$

В зависимости от соотношения между величинами ρ , D и K изменяется и интеграл этого уравнения. Для случая, когда $\rho^2 < 4KD$, этот интеграл может быть представлен как

$$\alpha = Ae^{-at} \cdot \sin bt,$$

где A — произвольная постоянная интегрирования,

$$a = \frac{\rho}{K} \quad \text{и} \quad b = \sqrt{\frac{D}{K} - \frac{\rho^2}{4K^2}}.$$

Рамка движется в этом положении покоя в моменты времени, когда

$$bt = 0; \quad bt = \pi; \quad bt = 2\pi$$

и т. д. (см. диаграммы рис. 154—155). Период этого колебательного движения может быть определен из соотношения $bT = 2\pi$, откуда

$$T = \frac{2\pi}{b} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{D}{K} - \frac{\rho^2}{4K^2}}} \dots\dots\dots (c)$$

Если между постоянными имеет место соотношение $\rho^2 > 4KD$ или $\rho^2 = 4KD$, то по предыдущему мы будем иметь апериио-

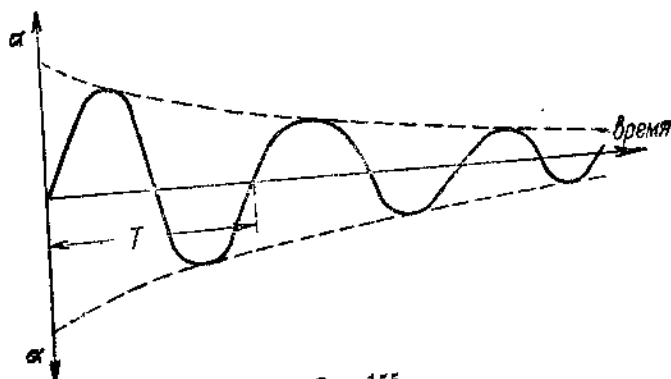


Рис. 155.

дического характера движение рамки, в первом случае пер-
успокоенное, а во втором—критически успокоенное.

Для упрощения дальнейших выводов допустим, что тор-
жения нет, т. е. $\rho = 0$. Тогда

$$a = \frac{\rho}{K} = 0,$$

и рамка совершает незатухающие колебания с периодом

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{K}{D}} \dots\dots\dots$$

Амплитуды колебания рамки равны друг другу и, следовательно, коэффициент затухания равен $\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = 1$, т. е. рамка колеблется, подчиняясь закону

$$a = Ae^{-\alpha t} \sin bt = Ae^0 \sin bt = A \sin bt \quad \dots (e)$$

Первый максимальный размах рамки происходит через четверть периода от момента начала ее колебания, т. е. через время

$$t = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{K}{D}} = \frac{T}{4},$$

и амплитуда этого первого отклонения

$$a_{\text{перв}} = A \sin \frac{bT_0}{4} = A \sin \frac{\pi}{2} = A \quad \dots (f)$$

Угловая скорость качания рамки при этом максимальна в те моменты, когда рамка проходит через положение покоя, т. е. она изменяется по закону

$$\omega = \frac{da}{dt} = bA \cos bt \quad \dots (g)$$

Начальная же ее скорость, для момента времени $t=0$, очевидно, равна

$$\omega_0 = bA = b a_{\text{перв}} \quad \dots (h)$$

Сопоставляя уравнения (f) и (h), мы видим, что начальная скорость движения рамки и ее максимальный (первый) размах пропорциональны друг другу. Но выше мы установили, что количество электричества, протекшее через гальванометр, равно

$$Q = \omega_0 C \frac{K}{D},$$

и так как

$$\frac{K}{D} = \frac{1}{b^2} = \frac{T_0^2}{4\pi^2},$$

а начальная скорость $\omega_0 = b a_{\text{перв}}$, то очевидно, что количество электричества, протекшее через гальванометр, пропорционально амплитуде первого размаха его рамки.

Таким образом, имеем окончательно

$$Q = \omega_0 C \frac{K}{D} = \alpha_{\text{перв}} \frac{T_0^2}{4\pi^2} \frac{2\pi}{T_0} C = \\ = \alpha_{\text{перв}} C \frac{T_0}{2\pi} = C_{\text{бал}} \alpha_{\text{перв}} \dots \dots \dots (A)$$

Здесь $C_{\text{бал}} = C \frac{T_0}{2\pi}$ носит наименование баллистической постоянной гальванометра; последняя, в отличие от динамической постоянной того же гальванометра C , зависит от периода, а, следовательно, и от декремента затухания колебаний рамки.

Окончательная формула, связывающая количество протекавшего через баллистический гальванометр электричества с его баллистической постоянной и первым размахом рамки, остается справедливой также и для случаев аperiодического характера ее движения, т. е. для случаев, когда гальванометр критически успокоен или переуспокоен.

Приведенный выше вывод базировался на предположении, что рамка при ее колебаниях не испытывает никаких тормозящих воздействий ($P=0$). Так как этого практически быть не может, то связь между величинами динамической и баллистической постоянных несколько сложнее, а именно, не

$$C_{\text{бал}} = \frac{T_0}{2\pi} C,$$

как это следует из выражения (A), а

$$C_{\text{бал}} = \frac{T_0}{2\pi} C \left\{ 1 + \frac{\lambda}{2} \right\},$$

где λ — логарифмический декремент затухания колебаний рамки.

Если λ_1 мало сравнительно с единицей, имеем следующую приближенную между ними зависимость

$$C_{\text{бал}} \approx \frac{T_0}{2\pi} C = \frac{T}{2\sqrt{\pi^2 + \lambda_1^2}} \cdot C,$$

где T — период затухающих колебаний рамки, а λ_1 — декремент этого затухания.

Наконец, точная зависимость между $C_{\text{бал}}$ и C выражается так

$$C_{\text{бал}} = C e^{\frac{\lambda_1}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{\pi}{\lambda_1}} \frac{T}{2\sqrt{\pi^2 + \lambda_1^2}}$$

и тогда

$$Q = \omega_0 C \frac{K}{D} = \alpha_{\text{перв}} \frac{T}{2\sqrt{\pi^2 + \lambda_1^2}} \cdot C e^{\frac{\lambda_1}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{\pi}{\lambda_1}} = C_{\text{бал}} \alpha_{\text{перв}}.$$

Отсюда видно, что $C_{\text{бал}}$ зависит от T и λ , т. е. в первую очередь от сопротивления внешней цепи гальванометра. Поэтому, при ее определении или подсчете необходимо указывать величину этого сопротивления.

При работе с баллистическими гальванометрами, и если импульс измеряемого ими количества электричества протекает быстро (когда это время значительно меньше T_0), рекомендуется работать в условиях близких к критическому успокоению гальванометра. Если же импульс замедлен во времени, как это часто имеет место при магнитных измерениях, то рекомендуется пользоваться несколько переуспокоенными гальванометрами (например, описываемым в III отделе курса флюксметром). Несоблюдение этого условия приводит к ошибкам. Так, например, если длительность импульса равна полупериоду, то ошибка достигает 5%.

Под чувствительностью баллистического гальванометра разумеют его чувствительность по количеству электричества (баллистическая чувствительность), определяемую, как величина первого отброса его рамки в делениях шкалы при протекании через рамку одного микрокулона ($1 \mu C$).

Таким образом, баллистическая чувствительность

$$S = \frac{\alpha_{\text{перв}}}{Q}.$$

Как показывает теория, она связана с конструктивными постоянными прибора при его работе в условиях, близких к критическому успокоению, и с его чувствительностью по току S_I , следующим соотношением:

$$S_{\text{бал}} = \sqrt{\frac{G^2}{KD}}$$

$$S_{\text{бал}} = \frac{\alpha_{\text{перв.}}}{Q} = \frac{2\pi}{T_{0e}} S_I \dots \dots \dots (Б)$$

Последняя зависимость для случая разряда конденсатора на нешунтированный гальванометр (затухание близко к нулю) имеет вид

$$S_{\text{бал}} = \frac{a_{\text{перв}}}{Q} = \frac{2\pi}{T_0} S_1 \dots \dots \dots (B)$$

Очевидно также, что величина чувствительности гальванометров по току, напряжению и количеству электричества при зеркальном способе отсчета отклонений рамки, должна подсчитываться при определенном и неизменном расстоянии от зеркальца гальванометра до шкалы (обычно в 1 м).

4. Основные детали конструкции гальванометров магнитоэлектрической системы поясняются рисунками 156—165, где видны: рамка; постоянный магнит; зеркальце, скрепленное с рамкой; арретир для затормаживания подвижной системы в нерабочем состоянии гальванометра или при его перевозках; чашечки, скрепленные с подвижной системой, в которые могут быть вложены грузики, утяжеляющие рамку, чем, обычно, и достигается увеличение момента инерции и превращение обыкновенного гальванометра в баллистический; подвес рамки, который чаще всего изготавливается в виде тонкой нити или ленточки из фосфористой бронзы (шириною от 0,1 до 0,08 мм и толщиной 0,01 до 0,005 мм, или диаметром порядка 0,05—0,07 мм).

На рис. 156 показан простейший тип гальванометра фирмы Карпантие (несколько устаревший). На рис. 157 и 158 — современные типы гальванометров фирмы Гартман; последний — с приспособлением (чашечками и грузиками) для применения его и в качестве баллистического.

Рамка у них имеет две обмотки, из коих одна является рабочей, а другая в то же время может служить для создания электромагнитного торможения нужной величины. Для

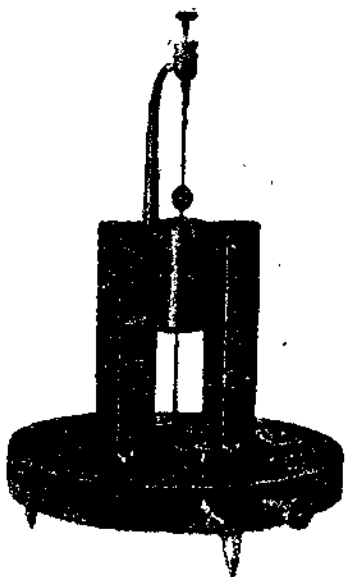


Рис. 156. Гальванометр фирмы Карпантие.

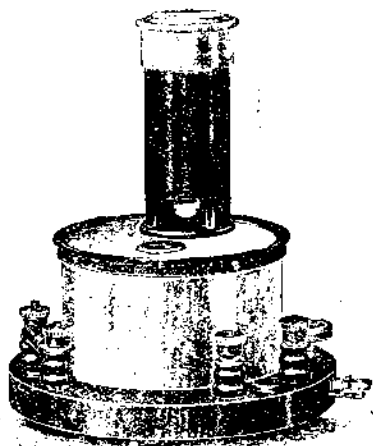


Рис. 157. Гальванометр фирмы Гартман.

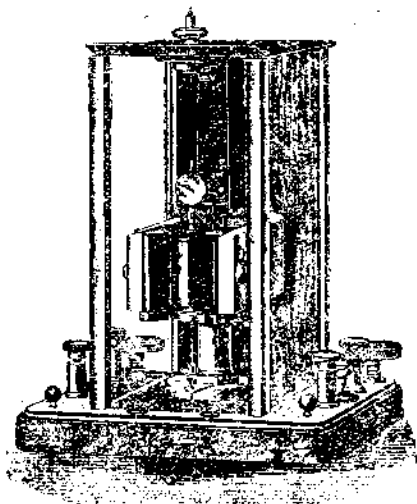


Рис. 158. Баллистический и обыкновенный гальванометр завода фирмы Гартман.

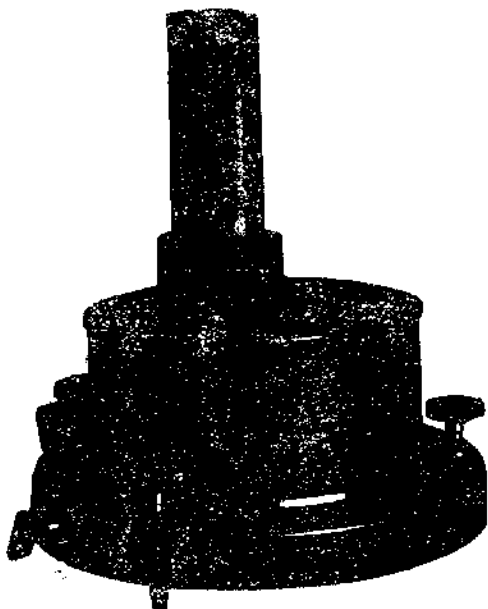


Рис. 158-а. Гальванометр завода Электро-прибор.

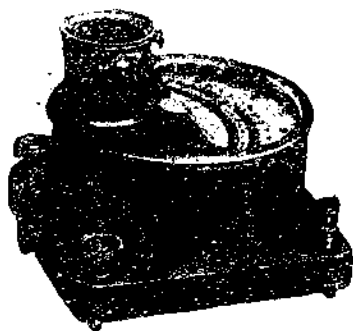


Рис. 159. Гальванометр фирмы Гартман (стрелочный).

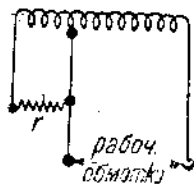


Рис. 159-а

этого она замыкается на некоторое сопротивление r (см. рис. 159-а).

На рис. 158-а—внешний вид гальванометра завода Электроприбор.

На рис. 160—161 представлены стрелочные гальванометры; их подвижная система снабжена указателем, а сам прибор—шкалой.

На рис. 163 и 164 представлены современные типы гальванометров фирмы Сименс; в них подвижная система легко вынимается и может быть быстро заменена другой подобной же системой, но с иным числом витков обмотки рамки и, следовательно, с иным сопротивлением. Баллистический гальванометр этого типа (рис. 164 и 162) подобен обыкновенному, но у него момент инерции рамки увеличен при помощи легкой штанги, скрепленной с рамкой b и снабженной грузиками δ . Кроме того, для изменения чувствительности, гальванометр имеет особое приспособление Q , именуемое магнитным шун-



Рис. 160. Стрелочный гальванометр.

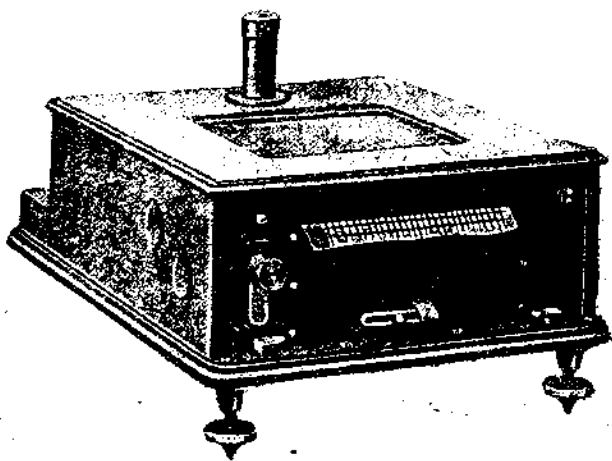


Рис. 161. Регистрирующий гальванометр.

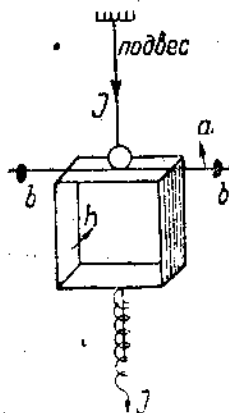


Рис. 162.

том. Оно представляет собою обойму из железа, охватывающую полюса постоянного магнита; приближая к ним или удаляя от них обойму, можно изменять число силовых линий, ответвляющихся через подобный шунт, и тем самым воздействовать на

величину напряжения поля в междуполюсном пространстве прибора, а, следовательно, и на его постоянную.

На рис. 165—166 показано расположение гальванометра, источника света и шкалы для зеркального отсчета углов поворота подвижной системы; на рис. 165—система для вертикального, а на рис. 166—для горизонтального отсчета. При вертикальном отсчете световой луч от источника направляется почти вертикально вверх, где, преломившись в специ-

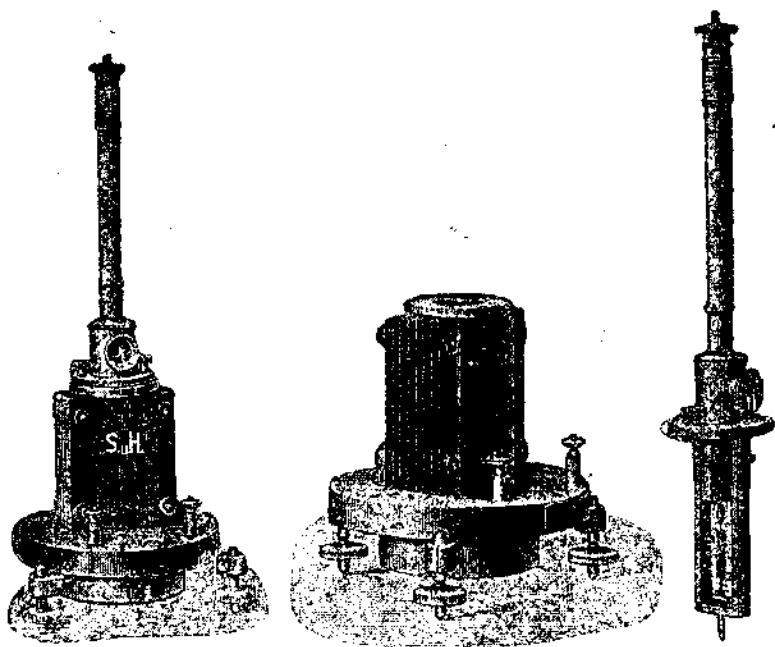


Рис. 163. Гальванометр фирмы Сименс с заменяющимися подвижными системами (обыкновенный).

альной призме, попадает на зеркальце гальванометра. Отразившись от зеркальца, луч вновь преломляется через ту же призму и, упав на зеркало, укрепленное сзади прозрачной шкалы, дает на ней световой зайчик, по передвижению которого и отсчитывается угол отклонения подвижной системы гальванометра.

При объективном способе отсчета углов отклонения подвижная система гальванометров обычно снабжается слегка вогнутым зеркальцем. При субъективном способе отсчета,

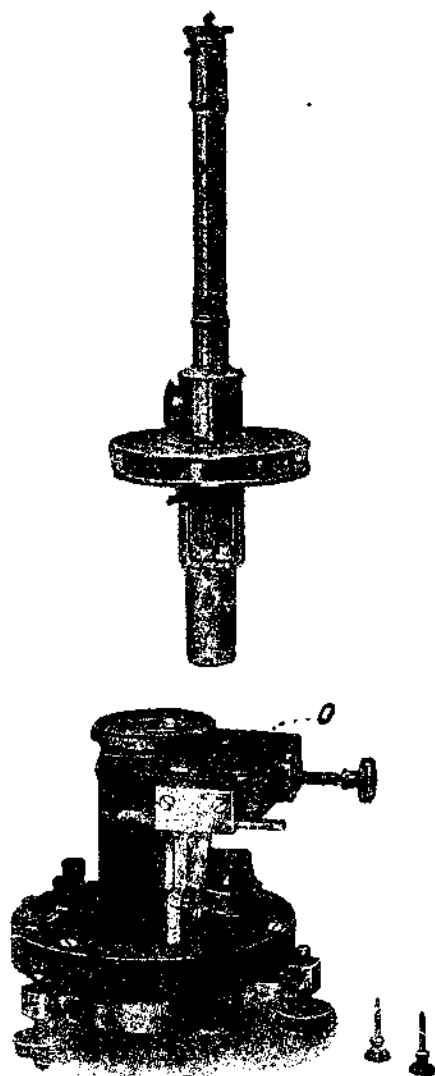


Рис. 164. Гальванометр фирмы Сименс с заменяющимися подвижными системами (баллистический).



Рис. 165. Установка гальванометра для вертикального отсчета показаний.

когда углы поворота подвижной системы наблюдаются в зрительную трубу, где отображается как бы передвижение шкалы, — на подвижной системе укрепляется плоское зеркальце.

Ввиду большой чувствительности гальванометров с зеркальным способом отсчета показаний, приборы эти требуют особых условий установки, чтобы механические сотрясения, а также воздействие внешних магнитных полей не вносили ошибок в их показания. Для предохранения от механических сотрясений гальванометр устанавливают на особом фундаменте, не связанном с фундаментом здания, или же подвешивают, как на рис. 167. Там же изображен железный пандырь, предохраняющий прибор от посторонних магнитных полей. Подобный подвес в виде массивной полки на длинных струнах имеет большой период собственных колебаний и не резонирует на сотрясения стен здания от движения людей, экипажей и т. п. Того же можно достигнуть, если на кронштейнах, вделанных в капитальную стену здания, укреп-



Рис. 166. Гальванометр с приспособлением для горизонтального отсчета показаний.



Рис. 167. Установка зеркального гальванометра на подвесе.

пить резиновые прокладки, а на них положить массивную плиту с установленным на нее гальванометром.

5. Выбор гальванометра. При выборе гальванометра для данного измерения надо руководствоваться следующими соображениями: подбирать гальванометр по требуемым условиям опыта чувствительности и такому сопротивлению его обмоток, при котором можно было бы в схеме данного опыта осуществить условия, близкие к критическому успокоению его подвижной системы. Чрезмерно большая чувствительность и недостаточное успокоение осложняют опыт (затягивают его из-за необходимости шунтировать прибор и увеличения времени на отсчет отклонения). Кроме того, сопротивление обмотки гальванометра должно быть подобрано в соответствии с методом, применяемым для измерения. Так, например, при измерениях изоляции, а также малых сил токов, в цепях большого сопротивления можно рекомендовать гальванометры типов, указанных в приводимой ниже таблице под №№ 1 и 9. Для компенсационных схем малого сопротивления подходят типы 3 и 4, а большого сопротивления—2 и 7. При измерениях малых сопротивлений в схемах мостика Витстона или двойного мостика Томсона подходят типы 3 и 4, а при больших сопротивлениях—8 и 7.

Для измерения малых э.д.с. удобно пользоваться типом 4, а для измерения емкостей и магнитных потоков, соответственно, типами 5 и 9 или 6 и 10.

В нижеприводимой таблице приводятся данные о некоторых типах гальванометров магнитоэлектрической системы фирм Сименс и Гальске и Гартман и Браун (см. табл. стр. 154).

§ 18. Понятие о гальванометрах других систем и типов

1. Гальванометры с подвижной магнитной системой (тип Томсона). Подвижная система этих гальванометров представляет собою маленький колоколообразный магнит или две системы из весьма маленьких магнитов, жестко между собою связанных (как это представлено на рис. 168) помощью кварцевого стерженька. При равенстве магнитных моментов обеих систем магнетиков, влияние на них внешних равномерных магнитных полей может быть сведено к минимуму (астатическая система).

Если подобную систему магнитов подвесить на нити в междуполосном пространстве двух пар катушек, обтекаемых током, так, чтобы поля, им создаваемые, были направлены в противоположные стороны, то, в результате взаимодействия полей магнетиков и катушек, подвижная система повернется

№ по порядку	Фирма и тип	Сопро- тивление рамки R_g	Внешнее критическое сопротивле- ние R	Период неза- тухающих колебаний T_0 /сек.	Примечание			
					При расстоянии от шкалы до зер- кала в 1 метр световой лучик перемещается по шкале на 1 мил- лиметр, если:	Сила тока в обмотке рамки равна	Напряжение, приложен- ное к зажи- мам рамки	Количество ва-ва, про- текшего в цепи рамки
	Сименс				Ампер	Вольт	Кулонов	Баллистич.
1	2.415	250	15.000	12	$8 \cdot 10^{-10}$	$120 \cdot 10^{-7}$	—	
2	2.417	75	1.000	10	$25 \cdot 10^{-10}$	$27 \cdot 10^{-7}$	—	
3	2.419	45	150	10	$80 \cdot 10^{-10}$	$15 \cdot 10^{-7}$	—	
4	2.421	10	15	15	$120 \cdot 10^{-10}$	$3 \cdot 10^{-7}$	—	
5	2.446	350	1.200	30	$8 \cdot 10^{-10}$	—	$3 \cdot 10^{-8}$	
6	2.448	75	450		$30 \cdot 10^{-10}$	—	$6 \cdot 10^{-8}$	
7	Гартман 150	50	400	10	$40 \cdot 10^{-10}$	$20 \cdot 10^{-7}$	Две обмотки. Баллистич.	
		5	0		$400 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-7}$		
8	155	700	6.000	10	$15 \cdot 10^{-10}$	$100 \cdot 10^{-7}$	Баллистич.	
		5	3		$400 \cdot 10^{-10}$	$3 \cdot 10^{-7}$		
9	159	2.200	200.000	30	$0,5 \cdot 10^{-10}$	$100 \cdot 10^{-7}$	$0,04 \cdot 10^{-8}$	
10	176	2,4	3	30	$170 \cdot 10^{-10}$	$0,9 \cdot 10^{-7}$	$13 \cdot 10^{-8}$	

на некоторый угол α , связанный с силой протекающего по обмоткам тока такого вида зависимости

$$\alpha = \frac{MG_1}{mH} I,$$

где M — магнитный момент подвижной системы; G_1 — напряженность поля в междуполюсном пространстве катушек при единичной силе тока; H — напряженность внешнего направляющего поля, которое в этих гальванометрах создается специальным постоянным магнитом, закрепляемым над прибором или сбоку, и m — результирующий магнитный момент астатической системы магнитиков. Успокоителем подвижной системы является скрепленная с нею слюдяная пластинка b , поворачивающаяся при поворотах подвижной системы между двумя неподвижными металлическими тарелочками a — a ; сближая или раздвигая последние, можно легко регулировать степень успокоения подвижной системы. Для изменения чувствительности гальванометров этой системы можно соединять параллельно или последовательно обмотки катушек, а также изменять ориентировку постоянного магнита N — S относительно магнитиков подвижной системы. На рис. 168—169 представлены оба описанных типа гальванометров, причем второй из них (не имеющий астатической подвижной системы) снабжен еще металлическим панцирем для защиты его подвижной системы от влияния посторонних магнитных полей.

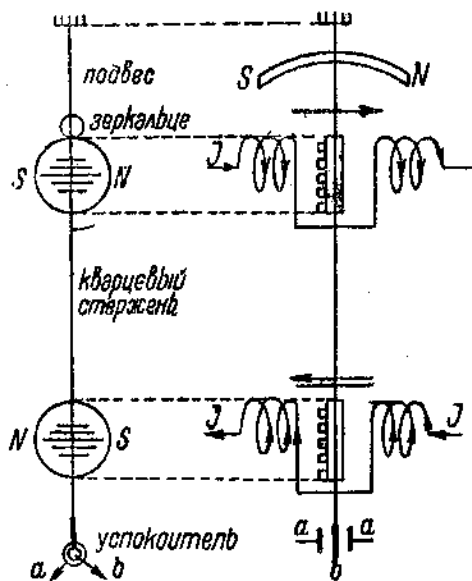


Рис. 168.

По описанному принципу различными фирмами строится много типов гальванометров. Из них мы вкратце остановимся

на гальванометре типа Брока (см. рис. 170). Его подвижная система образована двумя параллельно закрепленными стальными проволочками с—с (см. рис. 170-а), которые намагничены так, что оба конца каждой имеют одинаковую полярность. Подобная система астатична и обладает весьма незначи-

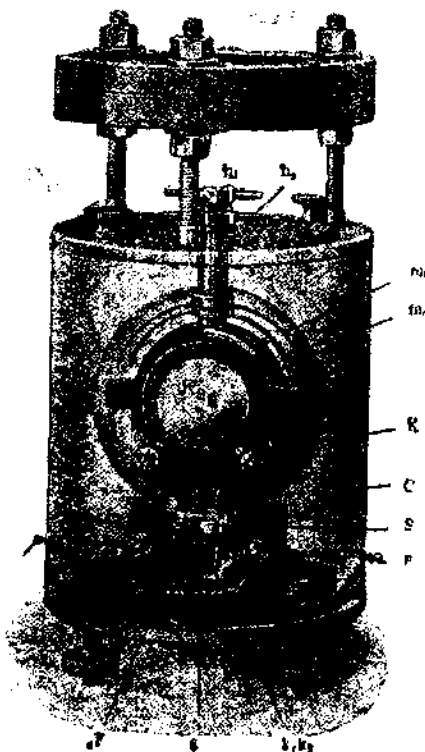


Рис. 169. Панцирный гальванометр.

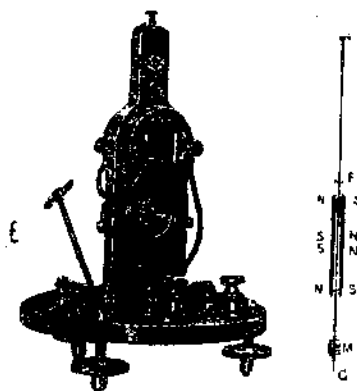


Рис. 170. Гальванометр системы Брока.

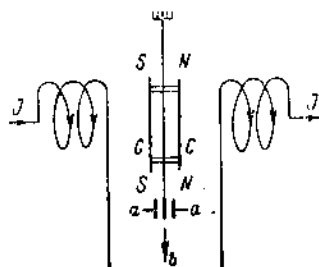


Рис. 170-а.

тельной инерцией. Подвесом служит кварцевая нить толщиной в 0,0003 мм.

Чувствительность у гальванометров с подвижной магнитной системой выше, чем у магнитоэлектрических (у отдельных типов их постоянная может быть доведена до $10^{-14} - 10^{-16}$ А).

Однако, в области технических измерений ими редко пользуются вследствие заметного влияния внешних магнитных полей и всяких механических сотрясений на их показания.

Что касается характера движения подвижной системы этих гальванометров, то все то, что было изложено по этому вопросу при рассмотрении основ теории гальванометров магнито-электрической системы, целиком приложимо и к этим гальванометрам, с тем лишь отличием, что электромагнитного торможения их подвижной системы создать нельзя.

Условием максимальной чувствительности их является равенство сопротивления их обмоток сопротивлению внешней цепи, на которую они включены. Отсчет угла поворота подвижной системы производится по зеркальному способу.

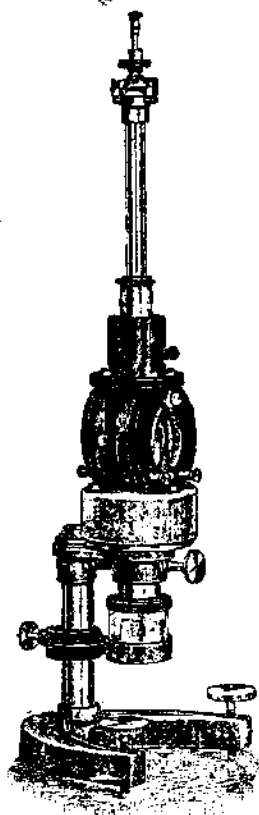


Рис. 171-а. Зеркальный электродинамометр.

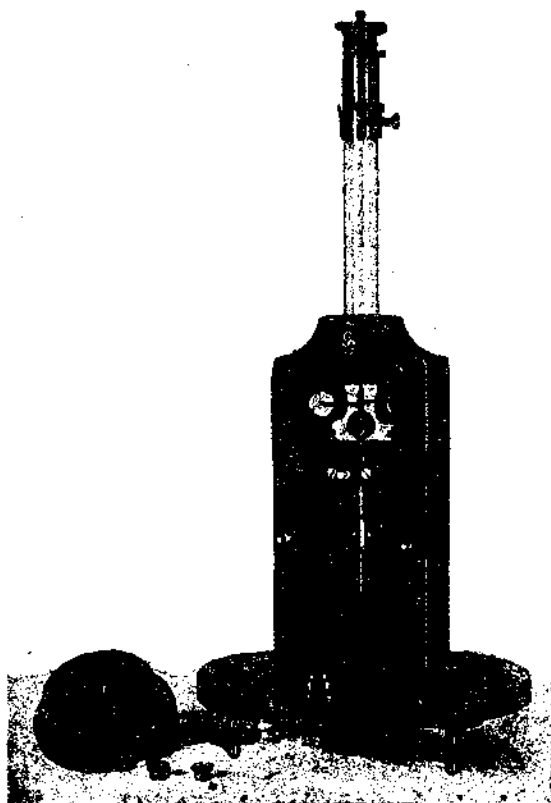


Рис. 171-б. Зеркальный электродинамометр фирмы Сименс—последняя модель.

2. Гальванометры электродинамической системы по принципу ничем не отличаются от технических приборов той же системы. Их подвижная катушка подвешивается на тонкой, длинной металлической нити, служащей одновременно и для подвода тока к обмотке. Для уменьшения влияния на их показания посторонних магнитных полей подвижная система иногда делается астатической (две катушки с противоположно навитой обмоткой, подвешенные в междуполюсном пространстве двух пар неподвижных катушек). Чувствительность их по сравнению с вышеописанными гальванометрами не велика, например, у гальванометра фирмы Сименс при силе тока в катушках 1 мА перемещение светового зайчика от зеркальца по шкале не превосходит 100 мм.

На рис. 171-а и б показан общий вид подобных электродинамометров (не астатических). Успокоителем у первого служит тонкий листок платины, скрепленный с подвижной системой и погруженный в сосуд с H_2SO_4 .

3. Термогальванометры основаны на том же принципе, что и описанные выше термоприборы, но с той лишь разницей, что, вместо электрического соединения термопары и чувствительного прибора магнитоэлектрической системы, в термогальванометрах рамкой прибора служит серебряная петля a , замкнутая на термопару b из висмута и сурьмы. Петля подвешена на кварцевой нити в междуполюсном пространстве сильного постоянного магнита $N-S$ (рис. 172), а под нею находится особый подогреватель, по которому и

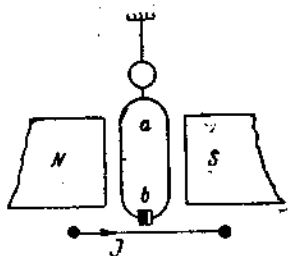


Рис. 172.

пропускается измеряемый ток I . Приборы эти применимы особенно для измерений переменных токов; их показания не зависят от частоты тока, но весьма сильно зависят от температурных влияний. Отсчет угла отклонения петли—зеркальный. Постоянная—порядка 10^{-6} А; для данного гальванометра она зависит от расстояния между нагревателем и термопарой.

4. Струнные гальванометры. В узком междуполюсном пространстве постоянного магнита или электромагнита натягивается тонкая нить из серебра, посеребренного стекла или алюминия, по которой пропускается измеряемый ток. При этом нить отклоняется из положения покоя, и это отклонение наблюдается в микроскоп.

Для изменения чувствительности этих гальванометров в них заменяют нить, а для изменения периода колебаний — изменяют ее натяжение. Постоянная подобных гальванометров порядка $10^{-10} - 10^{-12}$ А. Применимы они, главным образом, для анализа переменных режимов длительностью не менее десятых долей секунды.

5. Вибрационные гальванометры. Действие их основано на возможности подбора подвижной системы с таким собственным периодом колебания, который был бы близок к частоте измеряемого прибором тока. В этом случае подвижная система совершает максимальные колебания, что наблюдается по методу зеркального отсчета. В качестве подвижной системы применяются постоянный магнитик или небольшая пластинка (ρ на рис. 173-а), намагничиваемая от особого вспомогательного электромагнита b , питаемого постоянным током I_g , или подвижная система проводников, обтекаемых измеряемым током. Неподвижной системой в первом случае служит система из двух рабочих электромагнитов F , обмотка коих питается измеряемым переменным током I_w , а во втором случае — постоянный магнит, в междуполюсном пространстве которого подвешивается подвижная система, обычно в виде петли или узкой легкой катушки из небольшого числа витков тонкой проволоки. Для изменения собственного периода колебаний подвижной системы, в первом случае изменяют степень намагничивания железной пластинки, меняя силу постоянного тока в обмотке вспомогательного электромагнита, а во втором — изменяют свободную длину подвеса подвижной системы. Настроив подвижную систему приближенно в резонанс с частотой колебаний измеряемого тока, мы тем самым заставляем ее наиболее интенсивно колебаться, что и отобразится на шкале прибора в виде наиболее широкого светового зайчика (световой полоски, как на рис. 173-в). На рис. 173-г и 173-д показаны общий вид и установка для зеркального отсчета.

Вибрационные гальванометры применяются почти исключительно при нулевых методах измерения в цепях переменного тока частотой от 40 до 1000 колебаний в секунду. Постоянная их порядка 10^{-7} А.

6. Дифференциальные гальванометры отличаются от обыкновенных магнитоэлектрических тем, что их рамка имеет две, по возможности одинаковые, обмотки. Они применяются при измерениях сопротивлений, для чего одна обмотка подключается к эталонному, а другая к измеряемому сопротивлению, а также для сравнения сил токов в двух независимых цепях.

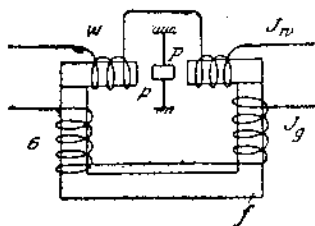


Рис. 173-а.

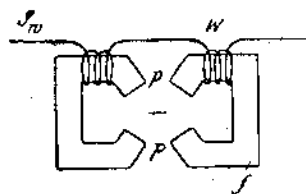


Рис. 173-б.

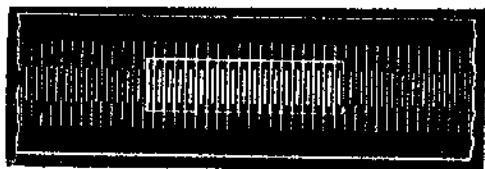


Рис. 173-в. Вид шкалы вибрационного гальванометра.

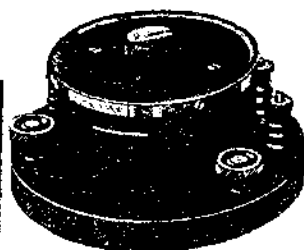


Рис. 173-г. Внешний вид вибрационного гальванометра и его подвижной системы (справа)

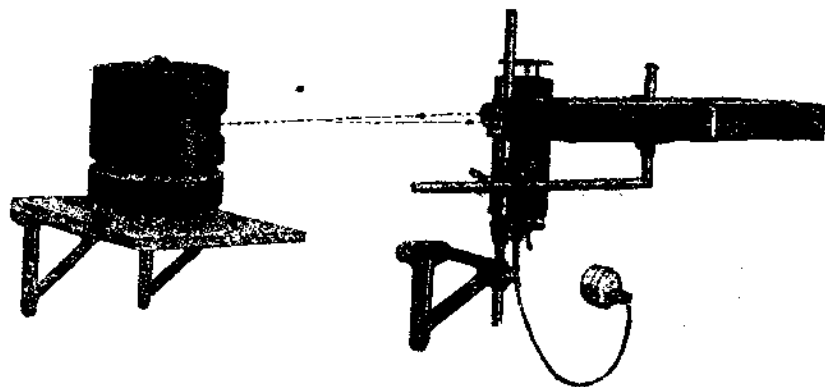


Рис. 173-д. Общий вид установки вибрационного гальванометра.

7. Электрометры, т. е. приборы высокой чувствительности электростатической системы, по принципу их действия не отличаются от принципа действия известного из курса физики квадрантного электрометра Томсона. Внутри четырех полых и неподвижно закрепленных металлических квадрантов на

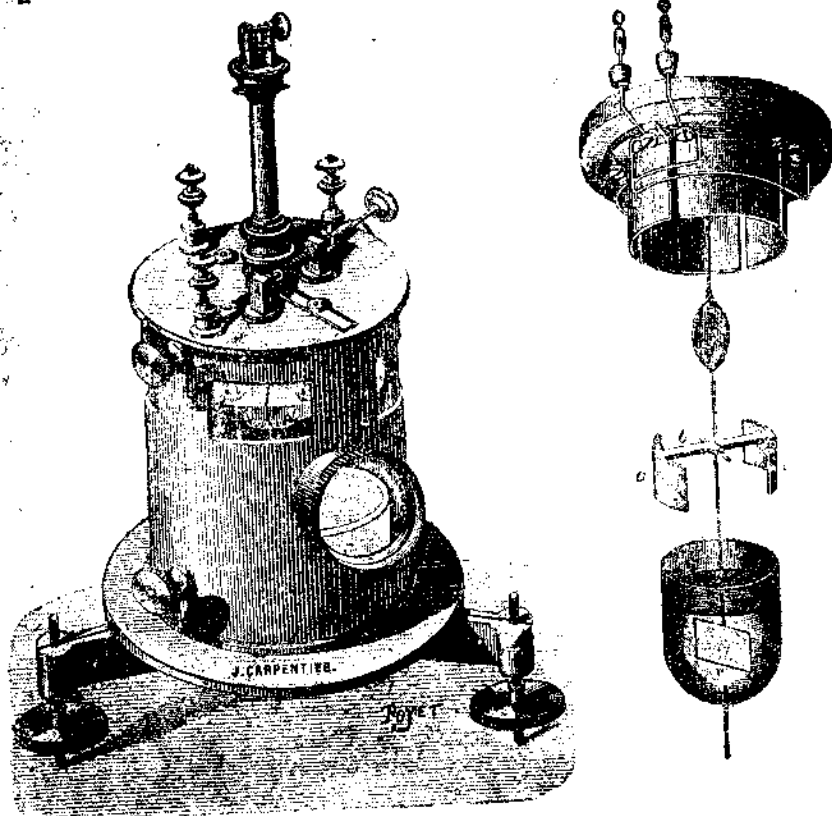


Рис. 174. Общий вид квадрантного электрометра фирмы Карпентье.

подвесе висит тонкая и легкая металлическая пластинка „бисквит“ (см. приложение). Накрест лежащие квадранты соединяются между собою, а „бисквит“ располагается симметрично по отношению к квадрантам.

Вся система закрывается стеклянным колпаком, поверх которого надевается металлическая проволоочная сетка (клетка Фарадея). Если обозначить, как на схемах рис. 174, буквами

A — A квадранты, буквою B — бисквит, а буквою D — сетку, которой закрыт прибор, и подключить подобную систему к измеряемому прибором напряжению U_x по схеме a , то между углом поворота α , отсчитываемым по зеркальному способу, и U_x имеет следующая зависимость

$$\alpha = \frac{1}{C_1} U_N \cdot U_x,$$

где $\alpha = (\alpha_1 - \alpha_2 + \alpha_3 - \alpha_4)$; α_1 , α_2 , α_3 и α_4 — углы отклонения бисквита, отвечающие четырем различным положениям переключателей P_1 и P_2 (что необходимо для устранения влияния

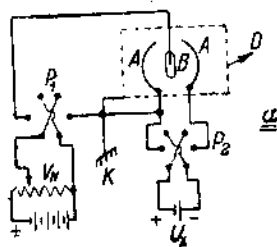


Рис. 174-а.

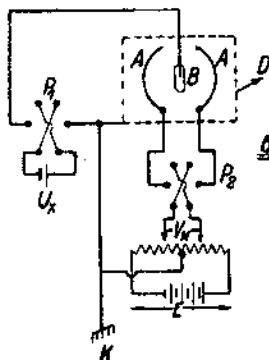


Рис. 174-б.

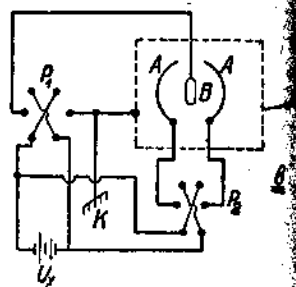


Рис. 174-в.

контактных разностей потенциалов в схеме на величину истинного угла отклонения); U_N — известное напряжение вспомогательной батареи; C_1 — постоянная прибора, определяемая в той же схеме при замене U_x нормальным элементом, и K — заземление.

Способ этот (гетеростатическое включение) применим для измерения малых напряжений (э.д.с.) в цепях постоянного тока.

При включении по схеме б (бисквитное включение)

$$\alpha = \frac{1}{C_2} U_N \cdot U_x,$$

где U_N — та часть напряжения батареи E , которая подведена к квадрантам и равна

$$U_N = \frac{2r}{R} \cdot E.$$

Здесь R — сопротивление всего реостата (потенциометра), а $2r$ — часть его, соединяемая с квадрантами прибора. Способ этот применим для измерения относительно больших напряжений. Наконец, включив по схеме в (двойное включение), имеем:

$$\alpha = \frac{U_x^2}{C_3}.$$

В этом случае нет надобности во вспомогательном источнике U_N , и можно осуществить измерение в цепях переменного тока.

При работе с электрометрами нас интересует их чувствительность к потенциалу $S_U = \frac{\alpha}{U}$ или к заряду $S_q = \frac{\alpha}{Q}$ в зависимости от того, какую из этих величин мы хотим измерить. Чувствительность электрометра зависит, помимо его конструкции (главным образом, устройства подвеса для бисквита), еще и от величины собственной емкости прибора. Большая чувствительность к потенциалу достигается снижением собственной емкости, к заряду — увеличением последней.

В практике поэтому можно встретить два основных типа электрометров: бинантный (одна пара квадрантов), чувствительность которого к потенциалу при тех же размерах и потенциале бисквита, что и у квадрантного электрометра, раза в два выше, и струнный, чувствительность которого к заряду, благодаря ничтожной собственной емкости, значительно выше, чем у бинантного. Подвижной системой (бисквитом) у этих электрометров служит, как показывает их название, струна, натянутая между двумя неподвижно закрепленными пластинками, выполняющими назначение квадрантов.

Чувствительность одного из лучших типов электрометров (Долезахека) такова, что при измеряемой разности потенциалов в 0,1 В и потенциале бисквита в 100 В отклонение светового зайчика вдоль шкалы, отстоящей от прибора на расстоянии в 1 м, достигает 250 мм.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ IV.

1. Укажите физический смысл понятия „динамическая“ постоянная гальванометра и какова связь ее с постоянными обыкновенной, баллистической, а также с понятием „чувствительность“ гальванометра по току.
2. Перечислите возможные характеры движения рамки (подвижной системы) у гальванометров до момента достижения ею равновесия (конечного угла отклонения) и укажите, от каких причин зависит тот или иной характер движения.

3. Перечислите оперативные и конструктивные постоянные гальванометра и влияние их на характер движения его подвижной системы.
4. Опишите характер движения рамки критически успокоенного, переспокоенного и недоспокоенного гальванометра.
5. Поясните природу электромагнитного способа торможения и то, какую роль оказывает на характер движения рамки его величина.
6. Что такое критическое сопротивление (полное и внешнее)?
7. Какова связь между периодом колебания и декрементом затухания с одной стороны, и постоянными гальванометра, с другой?
8. Что такое период незатухающих колебаний?
9. Какова связь между чувствительностью гальванометра по току и по напряжению—будет ли гальванометр, обладающий большой чувствительностью по току, в то же время иметь и большую чувствительность по напряжению?
10. В чем принципиальное отличие между обыкновенным и баллистическим гальванометром?
11. Что надо сделать, чтобы обыкновенный гальванометр преобразовать в баллистический, и какова в этом случае зависимость между отклонением его подвижной системы и протекавшим через его цепь количеством электричества?
12. Можно ли построить баллистический гальванометр, подвижная система которого отклонялась бы аperiodически?
13. Зависит ли чувствительность гальванометров от расстояния между зеркальцем, скрепленным с его подвижной системой, и шкалой?
14. Зависит ли баллистическая чувствительность гальванометра от успокоения (торможения)?
15. В каких случаях от гальванометра требуется высокая чувствительность по току, и в каких—по напряжению?
16. Чем достигается максимальная чувствительность гальванометра магнитоэлектрической системы, и гарантирует ли этот режим его работы критическое его успокоение? То же в отношении гальванометров с подвижной магнитной системой.
17. Перечислите системы успокоителей в гальванометрах.
18. Может ли успокоителем в гальванометре служить металлический каркас рамки.
19. Поясните принцип действия гальванометров прочих систем и укажите область их применения.
20. Чем определяется наибольшая чувствительность электрометров к потенциалу и заряду.

ГЛАВА V.

Градуировка и выверка электронизмерительных приборов.

§ 22. Градуировка и выверка технических электронизмерительных приборов.

1. Общие замечания. Градуировкой называют разметку шкалы вновь изготовленного или капитально отремонтированного прибора в единицах силы тока или напряжения, а также

определение постоянной гальванометров. Выверка или проверка преследует цель сравнить показания прибора с другим, принятым за эталон, и попутно построить для первого поправочный график. Хотя цели, преследуемые в этих двух случаях, и различны, однако, методы их выполнения одинаковы и, по большей части, сводятся или к непосредственному сравнению показаний испытуемого и точного приборов, или же к применению метода компенсации. За неимением нужных для этого приборов, градуировать амперметры можно также помощью вольтметров.

При градуировке и выверке приборов всегда необходимо пользоваться такими приборами и способами, которые соответствовали бы чувствительности градуируемого прибора. Так, например, при выверке милливольтамперметров, позволяющих снять с них отсчет с точностью до десятых долей деления шкалы, допустимая ошибка в определении градуировочных точек не должна, очевидно, превышать 0,0001 вольта. Если же градуируется вольтметр на 150 вольт, для которого максимальная точность отсчета не превышает десятых долей вольта, то нет никакого смысла требовать от эталонного прибора такой же чувствительности, как в первом случае.

Монтируя схему выверки и размещая в ней приборы, необходимо учитывать свойства этих последних в отношении того влияния, которое на их показания оказывают внешние факторы (поле земли и соседних проводов, взаимное влияние приборов и т. д.). Провода, подводящие к приборам ток, следует располагать параллельно друг другу или даже свивать их в виде жгута.

Попутно с выверкой приборов, предназначенных для измерений в цепях переменного тока, следует выяснять, влияет ли на их показания частота тока.

Число точек шкалы прибора, которое следует проверить или разметить, зависит от его класса и системы.

У приборов прецизионных следует определить 10—12 точек, а у технических 3—5; большие цифры относятся к приборам с неравномерной шкалой, а меньшие — к магнитов электрическим.

2. Способы градуировки амперметров и вольтметров.

а) Амперметры градуируются и выверяются по схеме рис. 175-а, где A и A_0 выверяемой и эталонный приборы; R — регулировочные реостаты большого и малого сопротивления, включенные параллельно, что облегчает плавное изменение силы тока; E — источник с небольшой э.д.с., но достаточной емкости и постоянства и S — S рубильники с предохранителями.

б) Вольтметры градуируются по схеме рис. 175-б, где V и V_0 — выверяемый и эталонный вольтметры; R — делитель напряжения (трехконтактный реостат Рустрата); E — источник тока с постоянной в.д.с. и S — предохранители с рубильником.

Задача. Подсчитайте, каким минимальным сопротивлением должен обладать реостат R , если он рассчитан на максимальную силу тока в 0,5 А, а вольтметры имеют по 300 ом каждый и рассчитаны на 45 вольт. Напряжение источника $U = 150$ вольт.

При градуировке амперметров, снабженных несколькими шунтами, или вольтметров с добавочным сопротивлением на

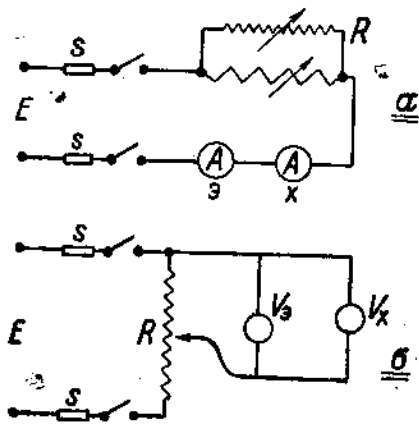


Рис. 175.

несколько пределов измерения, в большинстве случаев, достаточно ограничиться испытанием их при наименьшем пределе измерения и, кроме того, измерить сопротивления шунтов и добавочных сопротивлений. Объясняется это тем, что все шунты к данному прибору рассчитываются на то же падение напряжения в них, что и в самом приборе, а добавочные сопротивления — на ту же силу тока. Приборы переменного тока градуируются без измерительных трансформаторов, а за-

тем отдельно определяется коэффициент трансформации последних.

Опыты ведут, начиная с наименьшей силы тока и соответственно напряжения, для чего в первом случае должно быть введено все регулировочное сопротивление, а во втором движок делителя напряжения должен быть поставлен на нуль.

Регулируя силу тока или напряжение в градуировочной цепи так, чтобы стрелка испытуемого прибора устанавливалась на целых делениях его шкалы, снимают одновременно показания эталонного прибора.

По данным опыта размечают шкалу, а при выверке строят график зависимости показаний испытуемого и эталонного приборов (график 176-а). Полученные точки соединяют прямыми линиями, а не плавной кривой, как это рекомендуется делать

в тех случаях, когда желают графически представить естественно протекающие процессы. Это дает возможность в дальнейшем интерполировать между двумя опытными точками графика.

Следует также определить:

а) Абсолютные погрешности прибора в данных точках его шкалы, вычисляемые, как $f_I = I - I_s$, или $f_U = U - U_s$, и принимаемые за положительные, если $I > I_s$ и соответственно $U > U_s$. По этим данным строится для выверенного прибора кривая поправок. Последняя представляет собою геометрическое место точек, выражающих в увеличенном масштабе разности $I_s - I$ или $U_s - U$, т. е. величины, которые надо прибавить к показанию прибора, или вычесть,

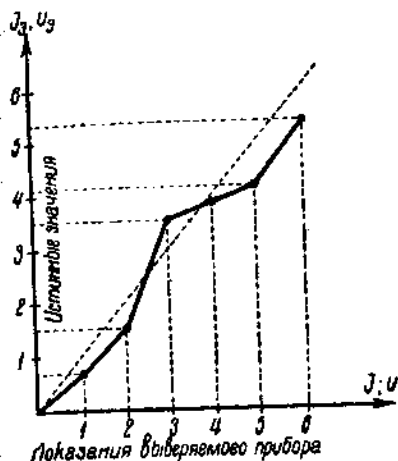


Рис. 176-а.

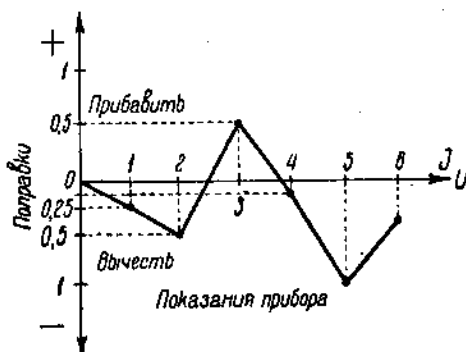


Рис. 176-б.

чтобы получить истинное значение измеренной им величины (см. рис. 176-б).

б) Точность показаний прибора, как отношение абсолютной погрешности к той номинальной силе тока I_n или напряжению U_n , на которую построен прибор, т. е.

$$g = \frac{f_I}{I_n} 100\% = \frac{I - I_s}{I_n} 100\%,$$

или

$$g = \frac{f_U}{U_n} 100\% = \frac{U - U_s}{U_n} 100\%.$$

в) Относительные погрешности показаний прибора, т. е. отношение его абсолютной погрешности к отсчету по эталонному прибору, т. е.

$$F_{\text{отн}} = \frac{f_1}{I_2} \cdot 100\% = \frac{I - I_2}{I_2}.$$

При градуировке приборов электромагнитной системы следует, дойдя до максимального их показания, продолжить опыт, постепенно уменьшая силу тока (или напряжение). Если при этом обратная кривая градуировки немного не совпадет с первоначально полученной, что указывает на насыщение сердечника прибора, то за истинную кривую градуировки следует принять новую кривую, проведенную посередине между опытными.

Градуируя прибор электродинамической системы следует, дабы исключить влияние посторонних полей на его показания, после каждого наблюдения менять направление тока и за истинное брать среднее из полученных отсчетов.

При выверке тепловых приборов надо выждать, пока стрелка прибора не остановится на отсчет окончательно (тепловая инерция).

Для выяснения того, оказывает ли нагрев приборов под током влияние на точность их показаний, следует, дойдя до максимального отсчета, оставить прибор минут на 15 под током и затем вновь проверить его.

Приборы, предназначенные для работы в цепях переменного тока, следует выверить при различных частотах.

Метод компенсации, описанный ниже, может дать наиболее точные результаты градуировки, но он несколько кропотлив, а поэтому им пользуются только в ответственных случаях.

Метод вольтметра при тщательной постановке опыта также дает хорошие результаты, но он еще более кропотлив, нежели компенсационный.

При градуировке и выверке амперметров на переменном токе удобно применить одну из схем рис. 177-а, б или в.

Схема а позволяет плавно регулировать силу тока в цепи помощью дроссельной катушки L , если ее сердечник можно вдвигать или выдвигать из нее.

Схема б удобна при выверке амперметров на большую силу тока и при наличии эталонного амперметра на ту же силу тока, что и выверяемый. Необходимо только располагать понижающим трансформатором Т.

Наконец, схема применима в том случае, когда эталонный амперметр имеет пределы измерения значительно меньшие, чем выверяемый. Эта схема, кроме понижающего трансформатора T , нуждается еще в точном измерительном трансформаторе $ИТ$.

Выверка вольтметров на переменном токе может быть осуществлена по схеме рис. 177-г, где R — реостат-потенциометр, а $ИТ$ — измерительный трансформатор напряжения. Эта схема особо применима для выверки высоковольтных вольтметров при помощи эталонного вольтметра на нормальное напряжение. В тех случаях, когда мы для выверки амперметра не располагаем эталонным амперметром, но имеем точный вольтметр и нормальное (эталонное) сопротивление, или, наоборот, когда для выверки вольтметра мы располагаем эталонным амперметром, — применимы схемы, изображенные на рис. 178-а и б. Работая по схеме а, мы подсчитываем истинное значение силы протекающего через выверяемый прибор тока по формуле

$$I_x = \frac{U_x (R_N + r_V)}{R_N \cdot r_V},$$

где r_V — сопротивление вольтметра.

Проводя опыт по схеме б, мы подсчитываем истинные значения напряжений на зажимах выверяемого вольтметра, по выражению

$$U_x = \frac{R_N \cdot r_V}{R_N + r_V} \cdot I_x.$$

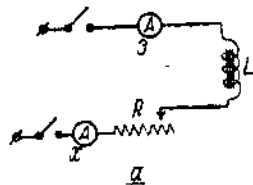


Рис. 177-а.

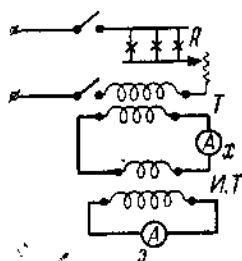


Рис. 177-в.

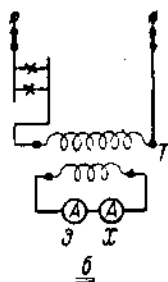


Рис. 177-б.

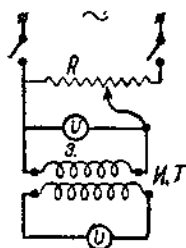


Рис. 177-г.

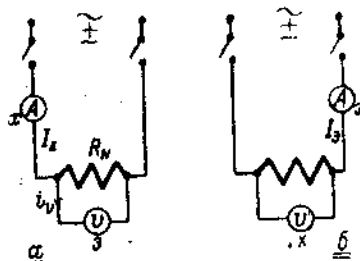
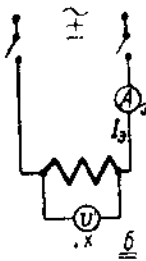


Рис. 178.



§ 23. Исследование зеркальных гальванометров.

1. Общие замечания. На практике зеркальные гальванометры обычно применяются в качестве чувствительных приборов при нулевых методах измерений, когда они служат индикаторами отсутствия тока в измерительной цепи (метод мостика, компенсационный и т. п.).

Для непосредственных измерений силы тока или напряжения они применяются при малых углах отклонения, когда можно положить, что сила протекающего через них тока связана с углом отклонения такой зависимостью: $I = C \cdot \alpha$, где C — постоянная, равная по своему числовому значению той силе тока, которая вызывает отклонение подвижной системы прибора на угол, равный дуговой единице, т. е. $57^{\circ}17'44,8''$.

Если расстояние от зеркальца гальванометра до шкалы постоянно, а углы отклонения не велики, то сила тока пропорциональна отклонениям, выраженным в делениях шкалы, т. е. $I = K \cdot n$, где K — так называемый переводный множитель гальванометра, а n — число делений шкалы, на которое переместился световой зайчик.

Переводный множитель зависит, очевидно, от удаления шкалы и

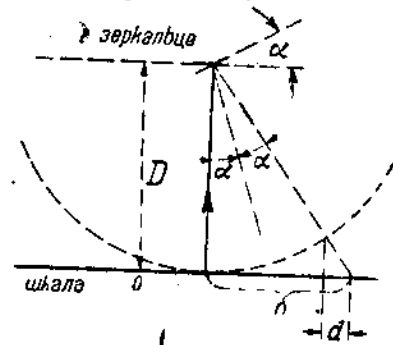


Рис. 179.

величины ее делений; он постоянен только при малых углах отклонения.

Чувствительность гальванометра, определение которой и составляет задачу его градуировки, есть величина обратная его переводному множителю. Она выражается, как величина отклонения, соответствующая току в одну миллионную долю ампера, т. е. $S = \frac{n}{I_{\mu A}}$ при определенном расстоянии от шкалы

до зеркальца, обычно равном 1000 мм.

Сопоставляя сказанное со схемой зеркального отсчета (рис. 179), мы видим, что $\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{n}{D}$. При малых углах отклонения ($2-3^{\circ}$) можно заменить тангенс углом, и тогда $\alpha = \frac{n}{2D}$, или

же вести отсчет не по величине отклонения, а непосредственно по числу n делений шкалы, т. е. положить, что $S_i = \frac{\alpha}{\gamma} \div \frac{n}{\gamma}$.

Если угол отклонения больше 3° , например $3,5^\circ$ что соответствует $\left(n = \frac{1}{8} D\right)$, то ошибка, обуславливаемая этим допущением, будет уже около $1/2^\circ$. Тогда угол α надо вычислять по формуле

$$\alpha = \arctg \frac{n}{D} = \frac{n}{2D} - \frac{1}{6} \left(\frac{n}{D}\right)^3 + \frac{1}{10} \left(\frac{n}{D}\right)^5, \dots$$

т. е. вводить поправку, для чего надо вычитать $\frac{n^3}{3D^3}$ (см. приложение VII). Если же шкала, как это иногда встречается, не прямолинейна, а изогнута по дуге радиуса D , то поправок делать нет надобности. Все эти выводы справедливы при постоянстве D .

2. Исследование гальванометра сводится к определению следующих величин, вполне характеризующих его свойства: декремента затухания его подвижной системы; собственного ему критического сопротивления (если он магнитоэлектрической системы); динамической постоянной; чувствительности по току и напряжению; баллистической постоянной, если его подвижная система снабжена приспособлением для увеличения ее момента инерции.

Определение всех этих величин удобнее всего производить в той последовательности, какая указана выше.

При выполнении всех этих опытов необходимо весьма тщательно следить за постоянством переходных сопротивлений всей цепи и собрать схему из однородных по материалу проводников, дабы избежать возникновения термоэлектродвижущих сил в местах контактов цепи. Влияние этих э.д.с. легко может совершенно исказить результаты исследования.

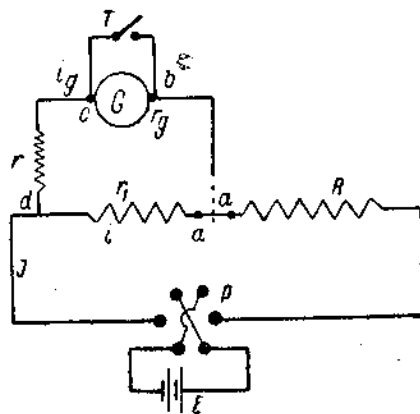


Рис. 180.

а) Определение декремента затухания и критического сопротивления производится по схеме рис. 18, где r_1 , r и R — магазины сопротивлений, из коих последний должен иметь общее сопротивление порядка 100 000 Ω ; ρ — переключатель направления тока и G — испытуемый гальванометр с приспособлением (ключом) T для быстрого успокоения колебаний подвижной системы. В качестве источника тока берут гальванический элемент или аккумулятор. Перед работой вводят на магазинах R , r_1 и r такие сопротивления, чтобы при замыкании цепи на источник получить средней величины отклонение подвижной системы гальванометра. Заметив угол отклонения, коммутируют направления тока и сравнивают вновь полученное отклонение с предыдущим. Если они одинаковы, то можно приступить к самому опыту. В противном случае надо устранить неисправность, причину которой могут быть или термоэлектродвижущие силы или неисправность подвижного веса гальванометра. Сам опыт сводится к определению декремента затухания сперва при разомкнутой цепи гальванометра, а затем при замкнутой на различные сопротивления, взятые на магазине r .

В первом случае, дав подвижной системе достаточный размах (при замыкании источника E на цепь), размыкают провод в точках a или b схемы и пропустив 1—2 колебания подвижной системы, отсчитывают друг за другом следующие углы отклонения: α_1 , α_2 , α_3 , α_4 и т. д. последовательно влево и вправо от нулевого положения.

По этим данным вычисляют коэффициент затухания, исходя из его определения, а именно

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{\alpha_2}{\alpha_3} = \frac{\alpha_3}{\alpha_4} = \dots = \Delta$$

или

$$\alpha_1 = \Delta \alpha_2 = \Delta^2 \alpha_3 = \Delta^3 \alpha_4 = \dots = \Delta^{n-1} \alpha_n,$$

откуда

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_n} = \Delta^{n-1}.$$

Логарифмический же декремент будет

$$\lambda = \ln \Delta = \frac{1}{n-1} \ln \frac{\alpha_1}{\alpha_n}.$$

Если при выверке гальванометра, предшествовавшей опыту, углы отклонения по обе стороны от положения покоя не были

одинаковыми, при обратных направлениях тока, а если они различались по величине, то искомый логарифмический декремент рекомендуется подсчитывать по формуле

$$\lambda = \frac{1}{n-1} \ln \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{\alpha_n + \alpha_{n+1}}$$

Здесь $\alpha_1 + \alpha_2$ — сумма двух последующих отклонений $\alpha_n + \alpha_{n+1}$ — то же, но только отсчитанных после прохода $(n-3)$ полуколебаний (см. приложение IX).

Беря ряд таких комбинаций, вычисляют для λ соответствующее число значений и из них берут среднее, которое и принимают за истинное.

Определив декремент при разомкнутой цепи гальванометра замыкают его цепь, вводят на магистине r сопротивление порядка 10 000 — 15 000 омов и вновь проводят опыт, но уже размыкают не провод $a-b$, а, вызвав отклонение гальванометра, размыкают переключателем P цепь источника тока и отсчитывают величины отклонений.

Затем уменьшают сопротивление r и снова повторяют опыт, до тех пор, пока число размахов подвижной системы, еще доступных наблюдению, не дойдет до двух. Тогда плавно уменьшают сопротивление r до такой его величины $r_{\text{крит}}$, при которой подвижная система перестает обнаруживать тенденцию к колебательному движению и начинает перемещаться аperiодически, и при этом наиболее ускоренно. Найденное этим способом сопротивление $r_1 + r = r_{\text{крит}}$ и будет искомым внешним критическим сопротивлением гальванометра.

По данным опыта определения декремента затухания строят кривую зависимости $\lambda = f(r_1 + r)$, которая имеет вид, представленный на графике 181:

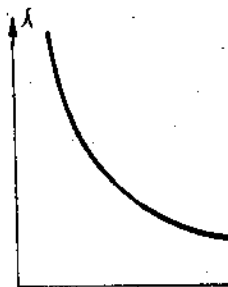


Рис. 181.

б) Определение постоянной и чувствительности гальванометра может быть выполнено по черт. 180 с тем лишь отличием, что в качестве источника необходимо взять нормальный элемент с э.д.с., равной E . Взяв на магистине r сопротивление, немного меньшее критического, и увеличивая постепенно сопротивление r_1 , достигнув наибольшего отклонения подвижной системы гальванометра, затем коммутируют направление тока в цепи и от-

величину отклонения в другую сторону от положения покоя. Из наблюдаемых отклонений, если они разнятся не больше, как на 2—3 деления шкалы, берут среднее и вычисляют силу тока через гальванометр, отвечающую этому отклонению, по следующей формуле:

$$i_g = \frac{E_N}{R + \frac{(r_g + r) \cdot r_1}{(r_g + r) + r_1}} \cdot \frac{r_1}{(r_g + r) + r_1} = \frac{E_N}{R \frac{(r_1 + r_g + r)}{r_1} + (r_g + r)}$$

(см. приложение X).

Увеличивая постепенно сопротивление R_1 , достигают все меньших углов отклонения (коммутируя каждый раз ток I по направлению) и подсчитывают отвечающие этим отклонениям силы токов i'_g ; i''_g и т. д.

Для дальнейшего подсчета динамической постоянной необходимо помнить, что ее принято определять для расстояния равного 1 м между зеркальцем гальванометра и шкалой. Если во время опыта это расстояние было не 1 м, а b см, то каждый из

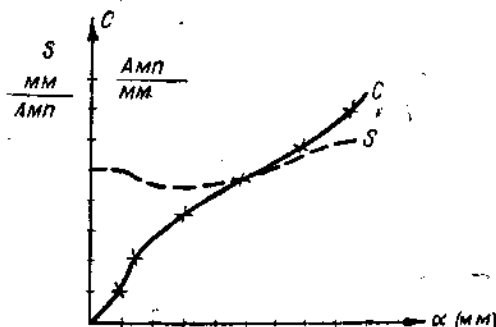


Рис. 182.

наблюдаемых углов отклонения надо умножить на $\frac{100}{b}$, т. е. привести отклонения к расстоянию в один м.

Динамическую постоянную подсчитывают из выражения $i_g = C \cdot \alpha$, откуда

$$C = \frac{i_g}{\alpha} \frac{\text{ампер}}{\text{мм}}.$$

Если значения C для всех наблюдаемых углов отклонения одинаковы или весьма близки по величине, то можно взять из них среднее; в противном случае (обычно в большинстве случаев практики) строят кривую $C = f(\alpha)$, соединяя полученные точки плавной кривой (график 182). Чувствительность гальванометра по току, определяемая как $S_i = \frac{\alpha}{i_g}$ и представляющая, как явствует из ее определения, величину обратную

динамической постоянной, вычисляется по данным кривой на рис. 182, т. е. по кривой динамической постоянной и наносится на тот же график.

Чувствительность гальванометра по напряжению, а также график ее, определяется из выражения

$$S_v = \frac{S_I}{r_g}.$$

в) Определение периода колебаний подвижной системы гальванометра осуществляется также по схеме черт. 180 и сводится к отсчету некоторого числа n полных размахов подвижной системы гальванометра и времени t (в секундах), в течение которого эти колебания совершались. Тогда

$$T = \frac{t}{n}.$$

Начинать отсчет числа колебаний и времени рекомендуется в тот момент, когда световой зайчик проходит через нулевое положение в какую-либо определенную сторону.

Опыт следует провести при разомкнутой цепи гальванометра, а также при нескольких (2—3) значениях сопротивления r , начиная от 10,000 ом и кончая значением, близким к критическому (но превышающем его). По данным опыта строится кривая зависимости $T = f(r)$.

г) Определение динамической постоянной и чувствительности гальванометров по методу милливольтамперметра видоизменяется в зависимости от того, удобнее ли нам применить имеющийся в нашем распоряжении милливольтамперметр как измеритель силы тока или как вольтметр.

В первом случае опыт определения чувствительности гальванометра ведут по схеме 183, но взамен нормального элемента следует пользоваться аккумулятором, а в цепь эталонного

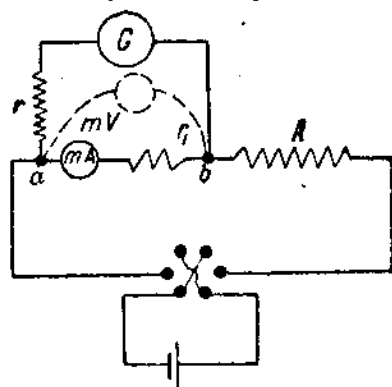


Рис. 183.

сопротивления r_1 ввести точный миллиамперметр mA . Опыт ведется в той же последовательности, какая была указана выше, но подсчет силы тока через гальванометр упрощается, так как $\frac{i_g}{i_a} = \frac{r_1 + r_a}{r_g + r}$; $i_g = \frac{r_1 + r_a}{r_g + r} i_a$, где i_a — отсчет по миллиамперметру, а r_a — сопротивление последнего. Придавая отношению $\frac{r_1 + r_a}{r_g + r}$ различные значения, путем регулировки сопротивлений r_1 и r , можно проградуировать испытуемый гальванометр.

Во втором случае, когда мы располагаем точным милливольтметром, схема видоизменяется, как показано пунктиром на рис. 183. Изменяя разность потенциалов U между точками a и b и деля ее на сумму сопротивлений $r_g + r$, подсчитывают силу тока через гальванометр. При этом способе градуировки гальванометров рекомендуется, также во избежание ошибок от влияния термоэлектродвижущих сил, делать для каждого отсчета два наблюдения, коммутируя направление тока и вычисляя среднее.

д) Определение баллистической постоянной гальванометров. Из основного выражения для зависимости между первым наибольшим углом α_m отклонения подвижной системы баллистического гальванометра и количеством протекшего через него электричества, а именно

$$Q = C_{\text{бал}} \cdot \alpha_m = C \cdot \frac{T}{2\sqrt{\pi^2 + \lambda^2}} \cdot C e^{\frac{\lambda}{\pi} \arctg \frac{\pi}{\lambda}} \alpha_m$$

непосредственно следует, что его баллистическая постоянная $C_{\text{бал}}$ может быть определена двумя способами, а именно:

а) по известному количеству электричества и наблюдаемому углу отклонения, или же

б) путем непосредственного измерения динамической постоянной C гальванометра, а также периода T и логарифмического декремента λ колебаний его подвижной системы.

Первый способ, в свою очередь, может быть осуществлен двояким путем, в зависимости от условий, в которых гальванометр будет работать при измерениях.

Если во время работы его обмотка будет составлять часть замкнутой цепи, как это имеет место, например, при магнитных измерениях, то

и определение $C_{\text{бал}}$ должно быть осуществлено при замкнутой цепи гальванометра.

В случае же измерений емкостей обмотки гальванометра к ним приключаемого, по существу, будут разомкнуты, почему и определение $C_{\text{бал}}$ в этом случае должно быть осуществлено при разомкнутой цепи гальванометра.

Баллистические постоянные одного и того же гальванометра, определенные этими двумя способами, не равны друг другу, так как условия успокоения гальванометра в этих случаях различны.

1. Определение $C_{\text{бал}}$ при замкнутой цепи осуществляется по схеме рис. 184, где A — так называемый

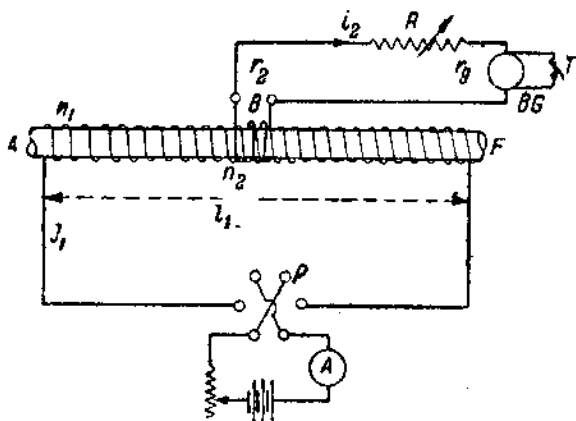


Рис. 184.

эталонный соленоид с известным числом n_1 витков обмотки, длиной l_1 и площадью сечения F см²; B — вторичная, индукционная катушка с числом витков n_2 и сопротивлением r_2 ; BG — баллистический гальванометр с сопротивлением r_g , снабженный ключом T для замыкания его накоротко с целью быстрого успокоения колебаний его подвижной системы; R — регулируемое сопротивление; P — переключатель направления тока; источник тока и A — амперметр.

Длина эталонного соленоида должна быть в 15 — 25 раз больше длины индукционной катушки, чтобы магнитный поток в среднем сечении соленоида, где его охватывает эта катушка, можно было считать равномерным.

Опыт определения $C_{\text{бал}}$ сводится к следующему: установив в цепи соленоида постоянную силу тока, например, I , быстро коммутируют его по направлению помощью переключателя P и замечают первый наибольший угол отклонения α_m подвижной системы гальванометра. Это отклонение обязано своим происхождением тому количеству электричества, которое протекло через замкнутую цепь гальванометра вследствие возникновения в катушке B индуктированной э.д.с.

Интеграл последней в вольт-секундах равен

$$e_2 \cdot t = 2\Phi \cdot n_2 \cdot 10^{-8} \text{ вольт},$$

где 2Φ — магнитный поток соленоида, пронизавший контур индукционной катушки и равный, в свою очередь, $\Phi = H \cdot F = \frac{0,4\pi \cdot n_1 \cdot I}{l_1} F$. Эта э.д.с., очевидно, поглощается в омическом сопротивлении цепи гальванометра, равном $R + r_g + r_2 = R_0$; она порождает в этой цепи некий, меняющийся по величине ток i_2 , а следовательно, и некое количество электричества, равное

$$\int_0^t i_2 \cdot dt = Q.$$

Таким образом,

$$2\Phi \cdot n_2 \cdot 10^{-8} = R_0 \cdot Q = R_0 \cdot C_{\text{бал}} \alpha_m,$$

откуда

$$C_{\text{бал}} = \frac{2\Phi \cdot n_2}{R_0 \cdot \alpha_m} \cdot 10^{-8}$$

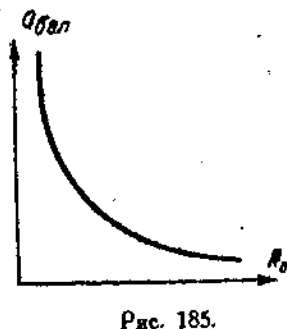


Рис. 185.

кулонов на одно деление шкалы.

Из этого уравнения видно, что $C_{\text{бал}}$ зависит от сопротивления всей цепи гальванометра: она уменьшается по мере возрастания R_0 . Поэтому рекомендуется не ограничиваться одним опытом, а выяснить зависимость $C_{\text{бал}} = f(R_0)$ и по полученным данным построить график, имеющий вид, изображенный на рис. 185.

Взамен эталонного соленоида, можно также воспользоваться эталонной самоиндукцией M . Замкнув одну из ее обмоток, например, вторичную, на гальванометр, коммутируя ток в другой ее обмотке и наблюдая первое отклонение, получим

$$M = \frac{R_0 C_{\text{бал}} \alpha_m}{2I},$$

откуда

$$C_{\text{бал}} = \frac{2M \cdot I}{R_0 \cdot \alpha_m} \dots \dots \dots (\text{см. приложение XI}).$$

2. Определение $C_{\text{бал}}$ при разомкнутой цепи выполняется по схеме 186, где C_N — эталонный конденсатор; BG — баллистический гальванометр; R — магазин сопротивлений с отвлечением от него в точках a и b ; V — вольтметр; E — источник тока и P — переключатель.

Приключив конденсатор к некоторому напряжению U_r , мы его заряжаем количеством электричества $Q = C_N \cdot U_r$. Затем разряжаем на баллистический гальванометр и отмечаем первое наибольшее отклонение α_m его подвижной системы. Если конденсатор хорош, и в нем не наблюдается остаточного заряда, то $Q = C_{\text{бал}} \cdot \alpha_m$.

Сопоставляя эти выражения, имеем

$$C_N \cdot U_r = C_{\text{бал}} \cdot \alpha_m,$$

откуда

$$C_{\text{бал}} = \frac{U_r}{\alpha_m} \cdot C_N.$$

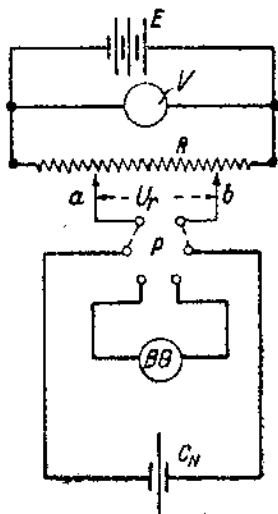


Рис. 186.

Если C_N выразить в микрофарадах, а U_r в вольтах, то $C_{\text{бал}} = \frac{U_r}{\alpha_m \cdot 10^4} C_N \dots \dots \dots$ кулонов на 1 деление шкалы.

3. Непосредственный способ определения баллистической постоянной основывается на подсчете ее величины из выражения

$$C_{\text{бал}} = C \cdot e^{\frac{\lambda_1}{\pi} \arctg \frac{\pi}{\lambda_1}} \cdot \frac{T_1}{2 \sqrt{\pi^2 + \lambda_1^2}}.$$

Для этого необходимо путем отдельных опытов определить динамическую постоянную C , декремент λ_1 , и период T_1 исследуемого гальванометра (см. выше пп. а, б и в).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ V.

1. Почему, градуируя прибор электромагнитной системы на постоянном, а затем на переменном токе, мы обычно не получаем совпадения градуировочных точек, и какая из полученных шкал шире?

2. Как надо вести градуирование приборов электродинамической системы на постоянном токе, дабы этой градуировкой можно было пользоваться при измерениях токов переменных?

3. Какой вид должна иметь кривая зависимости периода колебаний подвижной системы магнитоэлектрического гальванометра от сопротивления цепи на которую он работает?

4. Почему баллистические постоянные, определенные при замкнутой и при разомкнутой цепи гальванометра, не равны друг другу?

5. Какая разница между погрешностью и поправкой показаний прибора?

ПРИЛОЖЕНИЯ К I ОТДЕЛУ.

I.

Постоянная прибора, как показывает его название, равна $0,001 \text{ A}$. Следовательно, без шунта им можно измерять силы токов до $0,001 \times 150 = 0,15 \text{ A}$.

Если $I = 1,5$, а максимальная сила тока через прибор может быть $0,15 \text{ A}$, то $I = I_a \left(1 + \frac{r_a}{r_{ш}}\right)$ или $1,5 = 0,15 \left(1 + \frac{1}{r_{ш}}\right)$, откуда $r_{ш} = \frac{1}{9}$ ома, шунтовый множитель $\left(1 + \frac{r_a}{r_{ш}}\right) = 10$ и, наконец, пометка на шунте или как бы новая постоянная прибора (значение 1° деления его шкалы) $= 0,01$ ампера.

II.

Шунтовой множитель определяем, исходя из того, во сколько раз мы хотим расширить пределы измерения. В нашем случае в $175:35 = 5$ раз. Следовательно, $4/5$ части всего тока главной цепи должны протекать через шунт или $35 \cdot \frac{4}{5} = 35 \cdot \frac{0,02}{r_{ш}}$ или $35 \cdot \frac{4}{5} = 35 \cdot \frac{0,02}{0,005}$, откуда шунтовой множитель $= 5$, а $r_{ш} = 0,005$ ома.

III.

$$r_a = \frac{r_a \cdot r_{ш}}{r_a + r_{ш}} + r_{доб} \text{ по условию, но так как } n = \frac{r_{ш} + r_a}{r_{ш}}, \text{ то}$$

$$r_{доб} = r_a - r_a \frac{r_{ш}}{r_a + r_{ш}} = r_a - \frac{r_a}{n}, \text{ или } r_{доб} = \frac{n-1}{n} \cdot r_a.$$

IV.

Допустим например, что штепселя вставлены в гнезда 4—4 (рис. 67). Тогда между точками A и B будут включены в параллель две ветви: одна сопротивлением $\frac{1}{99} r_g$ а другая с сопротивлением r_g , и их эквивалентное сопротивление будет равно $\frac{1}{\frac{1}{99} + \frac{1}{r_g}} = \frac{r_g}{100}$. Последовательно с ним от

точки b до точки B включено сопротивление $(0,9 + 0,09) r_g = 0,99 r_g$. Следовательно, общее сопротивление между точками A и B будет $\frac{r_g}{100} + 0,99 r_g$. Такая же картина получается в том случае если штепселя включены в гнезда 3—3 или 5—5.

V.

Мы располагаем шунтом для гальванометра, обладающего сопротивлением $r_g = 100$ ом, а имеется гальванометр с сопротивлением $r'_g = 150$ ом. Требуется использовать этот шунт при штепселях, вставленных в гнезда 3—3.

Для этого (см. рис. 187) параллельно гальванометру вводим сопротивление в 200 ом, а последовательно — в 50 ом, и при этих условиях эквивалентное сопротивление между точками c и d равно

$$\frac{200 \cdot (150 + 50)}{200 + (150 + 50)} = 100.$$

Если мы пользуемся шунтом в $1/9$, то между точками A и b включены три параллельные ветви с сопротивлением в 200, 200 и $\frac{100}{9}$ ома. Отношение сил токов через гальванометр и через шунт

$$\frac{I_{ш}}{I_g} = \frac{200}{\frac{100}{9}} = 2 \cdot 9 \text{ или } I_{ш} = 2 \cdot 9 \cdot I_g.$$

Через ветвь, параллельную гальванометру и равную ему по сопротивлению, течет также ток I_g , а поэтому весь ток в главной цепи

$$I = 2I + I_{ш} = 2 \cdot I_g + 2 \cdot 9 I_g = 20 I_g,$$

где 20 — новый шунтовый множитель взамен старого, который был равен, 10, так как мы шунтировали гальванометр сопротивлением в $1/9 r_g$.

VI.

На рис. 188-а и б представлены рабочие диаграммы измерительных трансформаторов тока и напряжения, причем векторы вторичных тока и напряжения на диаграммах показаны для ясности повернутыми на 180° против их действительного положения. Угол δ на диаграммах есть угол погрешности трансформатора, обуславливаемый наличием тока холостого хода, состоящего из тока намагничивания I_m и ваттной составляющей I_w . Угол ψ есть угол сдвига по фазе между током и напряжением во вторичной цепи трансформатора, обуславливаемый характером нагрузки вторичной цепи (данными измерительного прибора). Алгебраические разности

$$I_1 - I_2 = A \text{ или } U_1 - U_2 = B$$

суть погрешности тока и напряжения трансформатора.

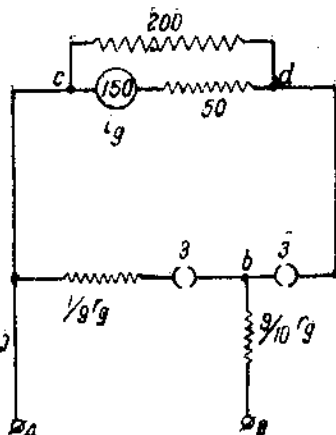


Рис. 187.

Угол погрешности зависит от магнитных свойств магнитопровода, а следовательно, и от силы тока и в существующих точных трансформаторах тока не должен превышать 120 минут при изменениях тока в пределах 10—20% его номинального значения и 80 минут при изменениях в пределах 50—100%. Погрешности тока могут при этом достигать соответственно $\pm 2\%$ и $\pm 1\%$.

У измерительных трансформаторов тока 1 класса приведенные цифры снижаются до 60 минут и $\pm 1\%$ и соответственно 40 минут и $\pm 0,5\%$. У измерительных трансформаторов напряжения углы погрешности редко превышают 20 минут. Погрешность напряжения у них практически постоянна при изменениях напряжения в пределах от 20 до 100% и при обязательном

условии присоединения к их вторичной цепи вольтметра, рассчитанного на номинальное напряжение, а не на меньшее, дабы не увеличивалась нагрузка вторичной цепи трансформатора.

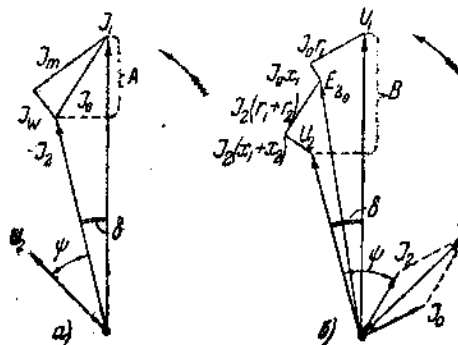


Рис. 188.

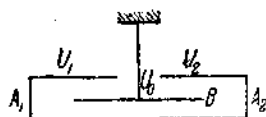


Рис. 189.

VII.

Краткая теория электрометра. Если сообщить одной паре квадрантов (рис. 189) потенциал U_1 , а второй паре U_2 , и бисквиту — потенциал U_0 , то общая электростатическая энергия подобной системы, представляющей по существу конденсатор, определится как

$$W = \frac{(U_1 - U_0)^2 \cdot K_1 + (U_2 - U_0)^2 \cdot K_2}{2},$$

где K_1 и K_2 — емкости соответствующих пар квадрантов и бисквита.

В результате бисквит отклонится из положения покоя (повернется) на некоторый, угол α под воздействием вращающего момента

$$M_{\text{вр}} = \frac{dW}{d\alpha} = \frac{1}{2} \left[(U_1 - U_0)^2 \frac{dK_1}{d\alpha} + (U_2 - U_0)^2 \frac{dK_2}{d\alpha} \right].$$

Если пренебречь влиянием узкой щели между квадрантами и положить, что при различных углах поворота бисквита он находится в одинаковом относительном положении к поверхностям квадрантов, то есть считать, что $-\frac{dK_1}{d\alpha} = +\frac{dK_2}{d\alpha} = \frac{dK}{d\alpha}$, то предыдущее выражение примет следующий вид:

$$M_{\text{вр}} = \frac{dK}{d\alpha} \cdot \frac{(U_2 - U_0)^2 - (U_1 - U_0)^2}{2},$$

здесь $K = \frac{\epsilon S}{4\pi d}$, где S — поверхность конденсатора, ϵ — диэлектрическая постоянная и d — расстояние между обкладками конденсатора, образованного квадрантами и бисквитом. Отсюда

$$\frac{dK}{d\alpha} = \frac{\epsilon}{4\pi d} \cdot \frac{dS}{d\alpha} = \frac{\epsilon}{4\pi d} \cdot \frac{S_0}{d\alpha},$$

где S_0 — есть изменение действующей поверхности конденсатора при повороте бисквита на единичный угол. Окончательно имеем

$$M_{\text{вр}} = \frac{\epsilon S_0}{4\pi d} = \frac{[(U_2 - U_0)^2 - (U_1 - U_0)^2]}{2}.$$

Противодействующий момент создается системой подвеса бисквита (металлическая тонкая нить) и определяется, как $M_{\text{пр}} = D\alpha$, где D — коэффициент кручения нити. В момент равновесия, когда $M_{\text{вр}} = M_{\text{пр}}$, имеем

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{\epsilon S_0}{4\pi d D} \frac{1}{2} [(U_2 - U_0)^2 - (U_1 - U_0)^2] = \\ &= C \frac{1}{2} [(U_2 - U_0)^2 - (U_1 - U_0)^2] = C (U_1 - U_2) [U_0 - \frac{1}{2} (U_1 + U_2)]. \end{aligned}$$

Если потенциал U_0 бисквита значительно выше потенциалов U_1 и U_2 квадрантов, то предыдущее выражение упрощается, а именно

$$\alpha = C (U_1 - U_2) U_0,$$

т. е. отклонение бисквита прямо пропорционально разности потенциалов пар квадрантов.

VIII.

Исходя из схемы 179, имеем $\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{m}{D}$, $\operatorname{tg} \alpha = \frac{m}{2D}$ или $\alpha = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{m}{D}$. Разложив функцию $f(x) = \operatorname{arctg} x$ по возрастающим степеням x , получим

$$f(x) = \operatorname{arctg} x = a + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + \dots + a_n x^n + R.$$

Положив $x = 0$, получим $a = 0$, а остальные коэффициенты определяются, как

$$f'(x) \frac{1}{1+x^2} = a_1 + 2a_2 x + 3a_3 x^2 + \dots + na_n x^{n-1} + \frac{dR}{dx}.$$

Так как

$$\frac{1}{1+x^2} = (1+x)^{-1} = 1 - x^2 + x^4 - x^6 + x^8 + \dots,$$

то

$$a_1 = 1; 2 a_2 = 0; 3 a_3 = -1; 4 a_4 = 0; 5 a_5 = +1$$

и, следовательно, $\operatorname{arctg} x = \frac{x}{1} - \frac{x^3}{3} + \frac{x^5}{5} - \frac{x^7}{7} + \dots$

Раньше мы имели $\alpha = \frac{1}{2} \arctg \frac{m}{D}$, а применяя предыдущее равенство, можем написать

$$\alpha = \frac{m}{2 \cdot D} = \frac{1}{6} \frac{m^3}{D^3} + \frac{1}{10} \cdot \frac{m^5}{D^5} + \dots$$

При небольших углах с достаточной для практики точностью можно ограничиться только двумя членами, т. е. положить, что

$$\alpha = \frac{1}{2} \left(\frac{m}{D} - \frac{1}{3} \frac{m^3}{D^3} \right) = \frac{m}{2D} \left(1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{m^2}{D^2} \right),$$

а переводя α в градусы ($57^\circ 17' 44,8''$),

$$\alpha = \frac{28,646}{D} m \left(1 - \frac{1}{3} \frac{m^2}{D^2} \right).$$

Переписав выражение в виде

$$\alpha = \frac{1}{2D} \left(m - \frac{m^3}{3D^2} \right),$$

видим, что $\frac{m^3}{3D^2}$ можно рассматривать, как поправку, которую надо ввести в полученный отсчет, чтобы получить истинное значение угла.

При массовых измерениях полезно поправку вычислять и представлять ее графически в делениях шкалы, как это представлено на графике рис. 190.

IX.

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{\alpha_1 + \alpha_3}{\alpha_2 + \alpha_3} = \Delta \quad \frac{\alpha_3}{\alpha_4} = \frac{\alpha_3}{\alpha_4} = \frac{\alpha_3 + \alpha_3}{\alpha_3 + \alpha_4} = \Delta \text{ и т. д.}$$

Отсюда

$$\alpha_1 + \alpha_2 = \Delta (\alpha_2 + \alpha_3) = \Delta^2 (\alpha_3 + \alpha_4) = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{\alpha_n + \alpha_{n+1}} = \Delta^{n-1}$$

$$\lambda = \frac{1}{n-1} \ln \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{\alpha_n + \alpha_{n+1}}.$$

Допустим, что мы во время опыта отметили ряд отклонений подвижной системы гальванометра (рис. 191). Тогда

$$\lambda^I = \frac{1}{6-1} \ln \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{\alpha_6 + \alpha_7}$$

$$\lambda^{II} = \frac{1}{7-1} \ln \frac{\alpha_3 + \alpha_3}{\alpha_7 + \alpha_8}$$

$$\lambda^{III} = \frac{1}{8-1} \ln \frac{\alpha_3 + \alpha_4}{\alpha_8 + \alpha_9}$$

т. д.

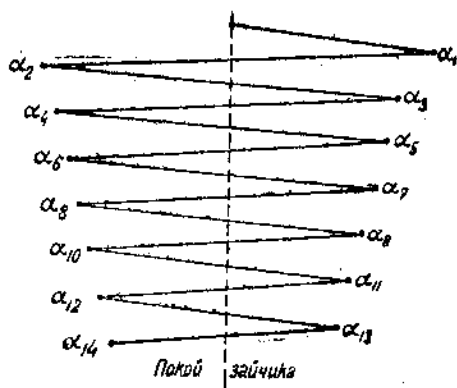


Рис. 191.

X.

Для схемы рис. 180 имеем

$$\frac{i_g}{I} = \frac{r_1}{r_g + r}; \quad \frac{i_g}{I + i_g} = \frac{r_1}{r_g + r + r_1}$$

или

$$i_g = I \frac{r_1}{r_g + r + r_1}$$

Но

$$I = \frac{E_N}{R + (r_g + r) \frac{r_1}{r_g + r + r_1}}$$

Следовательно,

$$i_g = \frac{E_N}{R + \frac{(r_g + r) r_1}{r_g + r + r_1}} \cdot \frac{r_1}{r_g + r + r_1} = \frac{E_N}{\frac{R(r_g + r + r_1)}{r_1} + (r_g + r)},$$

если пренебречь сопротивлением элемента E_N и соединительных проводов.

XI.

Обозначим по предыдущему все сопротивление цепи гальванометра, включая и сопротивление вторичной обмотки катушки взаимной индукции, через R_0 ; через e индуктированную в этой цепи в.д.с. в момент коммутации тока I в первичной цепи катушки взаимной индукции, а через Q и i_2 количество электричества и силу тока во вторичной цепи.

Тогда

$$e = M \frac{dl}{dt} = i_2 R_0$$

или

$$M \int_{+I}^{-I} dl = R_0 \int i_2 dt = R_0 Q$$

или

$$M 2 I = R_0 Q.$$

Но

$$Q = C_{\text{бал}} \cdot \alpha m,$$

следовательно,

$$M 2 I = R_0 C_{\text{бал}} \alpha m.$$

откуда

$$C_{\text{бал}} = \frac{2 M I}{R_0 \alpha m} \text{ кулонов на мм}$$

ОТДЕЛ ВТОРОЙ.

ОСНОВЫ МЕТОДИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ.

ГЛАВА VI.

Классификация методов измерения. Ошибки и вычисление результатов.

§ 21. Классификация методов измерения.

Измерить какую-либо величину—значит, представить ее в виде числа, выражающего, сколько раз в ней содержится величина того же рода, принятая нами за единицу (эталон).

Само измерение возможно осуществить двояким способом:

а) путем непосредственного сравнения измеряемой величины с эталоном (например, измерение длины с помощью метра или аршина), или

б) косвенным путем, когда измеряемая величина определяется из тех зависимостей, которые связывают ее с какими-либо другими величинами, измеряемыми непосредственно (например, определение сопротивления проводника по измеренным удельному сопротивлению, длине и площади сечения).

Непосредственные методы измерений, в свою очередь, распадаются на методы последовательного сравнения и нулевые.

В первом случае непосредственное отношение измеряемой величины к эталону заменяется отношением двух величин иного рода, легче определяемым (например, взвешивание на римских весах, где отношение весов сводится к отношению длин).

Во втором случае находят, сколько надо взять единиц того же рода, что и измеряемая, дабы их совокупное действие было равно действию, вызываемому измеряемой величиной (например, взвешивание на обыкновенных весах). Нулевые методы гораздо точнее методов последовательного срав-

нения, так как при пользовании ими устранены ошибки отсчетов и ошибки, вызываемые неправильной градуировкой приборов.

Выбор того или иного метода зависит от аппаратуры, которой располагает экспериментатор, условий работы, желаемой точности измерения и, наконец, измеряемого объекта.

Нельзя поэтому дать исчерпывающую рецептуру применения того или иного метода, и этим же объясняется большое количество способов, выработанных практикой для измерения одной и той же величины. В дальнейшем, попутно с рассмотрением небольшого числа основных методов будут, по возможности, отмечаться и те условия, при которых данный метод наиболее применим.

§ 22. Понятие об ошибках измерений и способах вычисления результатов.

Всякое измерение распадается на две части: 1) само измерение, т. е. непосредственное выполнение опыта, и 2) вычисление конечных результатов и их оценка.

Несмотря на то, что электроизмерительная техника достаточно развита, располагает необычайным богатством методов и приборов и, в смысле точности, занимает одно из первых мест среди других отраслей технических измерений,—все же она дает только приближенные результаты измерения.

С этой точки зрения вопрос сводится только к тому, на сколько процентов или их долей мы можем, в результате измерения, приблизиться к истинному значению измеряемой величины, т. е. насколько велика допущенная нами ошибка.

Ошибки или погрешности измерения по причинам их возникновения делятся на субъективные, т. е. зависящие от наблюдателя (его малоопытность, невнимательность, физические недостатки—как, например, недостатки зрения, плохой слух) и объективные, происходящие от неправильной градуировки приборов, влияния на их показания внешних факторов (например, посторонних полей), а также от тех допущений, которые были положены в основу теоретических обоснований данного метода.

С точки же зрения удобства подсчета величины ошибок принято делить их на ошибки систематические, правильно повторяющиеся и искажающие конечный результат в определенном направлении, и ошибки случайные, направление которых определить заранее не представляется

возможным (например, степень влияния внешних факторов на показания приборов).

Систематические ошибки обуславливаются личными качествами наблюдателя, недостатками приборов и, наконец, теми допущениями, которые положены в основу при выводе формул, связывающих измеряемую величину с другими величинами.

Этого рода ошибки при тщательной постановке опыта могут быть учтены и даже устранены на основе детального изучения свойств приборов, а также путем повторных опытов другими методами, приборами и экспериментаторами.

Случайные ошибки нашему контролю не поддаются, так как они не подчинены известным нам физическим законам. Они, однако, подчинены законам больших чисел (теорема Пуассона), и поэтому их учет возможен средствами теории вероятностей. Для этого продельвается ряд повторных наблюдений в одинаковых условиях, и по полученным данным подсчитывается ошибка.

1. Методика подсчета наибольшей возможной погрешности отдельного измерения базируется на следующем (учет систематических ошибок).

а) Если измеряемая величина отсчитывается непосредственно по показаниям прибора, то наибольшая возможная ошибка зависит от точности его показаний и тех систематических ошибок, которые свойственны экспериментатору. Например, при измерении силы тока амперметром, шкала которого размечена в десятых долях ампера, можно при навыке отсчитать на глаз 0,2 деления. В этом случае точность отсчета будет 0,02А, и за величину наибольшей возможной погрешности (ошибки) мы принимаем половину ее, т. е. $\pm 0,01А$.

б) Если измеряемая величина определяется по формуле, связывающей ряд других величин, нам данных или нами определяемых из опыта, то наибольшая возможная ошибка вычисляется на основании понятий об абсолютной и относительной погрешностях измерения.

Под абсолютной ошибкой Δa разумеется разность между истинным a и полученным при измерении значением a_1 измеряемой величины; т. е. $\Delta a = a - a_1$.

Относительной погрешностью называется отношение абсолютной ошибки к истинному значению измеряемой величины,

т. е. $\frac{\Delta a}{a} 100\%$.

В обоих случаях мы не знаем истинного значения α и поэтому вместо него берем приближенное, наиболее вероятное значение, исходя при этом из условий измерения (точность приборов и наблюдений) или же определяя, как указано ниже, наиболее вероятное значение (см. пункт 2).

Для практики больший интерес представляет выяснение относительной погрешности, а не абсолютной, ибо только первая и характеризует точность произведенного измерения. Действительно, пусть при измерении силы тока в двух случаях ($I_1 = 0,1$ и $I_2 = 10A$) была допущена одинаковая абсолютная ошибка в $0,01A$. Относительная же погрешность составляет в первом случае $\frac{0,01}{0,1} \cdot 100 = 10\%$, а во втором всего лишь $\frac{0,01}{10} \cdot 100 = 0,1\%$.

Подсчет величины относительной ошибки в тех случаях, когда измеряемая нами величина A зависит от нескольких других, например, $A = B^m \cdot C^n$, базируется на следующем. Прологарифмировав это равенство, а затем продифференцировав его, имеем $\log A = m \log B + n \log C$ и $\frac{dA}{A} = m \frac{dB}{B} + n \frac{dC}{C}$ или, заменяя дифференциалы dA , dB и dC весьма малыми приращениями, представляющими собою абсолютные ошибки, имеем окончательно

$$\frac{\Delta A}{A} = m \frac{\Delta B}{B} + n \frac{\Delta C}{C}.$$

Здесь члены правой части суть относительные ошибки, а их сумма дает значение наибольшей возможной ошибки.

При этом независимо от результатов дифференцирования мы все слагаемые правой части берем со знаком плюс, т. е. учитываем самый неблагоприятный результат.

Пример 1. Вычислим наибольшую возможную ошибку в определении величины удельного сопротивления проводника. Мы знаем, что $\rho = \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{R}{l}$ и применяя выведенную выше формулу, имеем

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} \leq \frac{\Delta \pi}{\pi} + \frac{2 \Delta d}{d} + \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta R}{R}.$$

Если же сопротивление R было измерено при помощи мостика Виттона и вычислено по формуле $R = R_1 \frac{l_1}{l_2}$, то

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} \leq \frac{\Delta \pi}{\pi} + \frac{2 \Delta d}{d} + \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta l_1}{l_1} + \frac{\Delta l_2}{l_2} \dots \dots \dots (A)$$

В этом выражении надо подставить взамен π , d , l , R_1 , l_1 , l_2 и т. д. величины нами измеренные или известные, а вместо $\Delta \pi$, Δd , Δl и т. д. допущенные при этом, по нашему мнению, абсолютные ошибки.

Например, если мы находим что при определении $d = 5$ мм делаем абсолютную ошибку в 0,1 мм, то взамен числа $\frac{2 \Delta d}{d}$ подставляем $\frac{2 \cdot 0,1}{5} = 0,04$ или 4% и т. д.

Выражение A , кроме того, дает непосредственный ответ и на вопрос о том, какие условия надо выполнить, чтобы наибольшая возможная погрешность $\frac{\Delta p}{p}$ измерения была не выше наперед заданной величины. Например, если она не должна превышать 5%, то I_1, I_2, d, R_1 должны быть определены с относительной ошибкой не свыше 0,2% а для π достаточно ограничиться значением 3,14.

Пример 2. $Q = 0,24 \cdot I^2 \cdot R t = \frac{1}{4,2} \cdot I^2 R t = \frac{1}{E} I^2 R t$.

Допустим, что отдельные величины, входящие в это выражение, определены нами со следующими абсолютными погрешностями:

$$E = 4,2 \pm 0,001; I = 20 \pm 0,2; R = 3 \pm 0,01; t = 40 \pm 0,5.$$

Тогда наибольшая возможная погрешность измерения будет

$$\begin{aligned} \frac{\Delta Q}{Q} &= \frac{\Delta E}{E} + \frac{2 \Delta I}{I} + \frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta t}{t} = \frac{0,001}{4,2} + \frac{2 \cdot 0,2}{20} + \frac{0,01}{3} + \frac{0,5}{40} = \\ &= \frac{1}{42} \% + 2 \% + \frac{1}{3} \% + \frac{5}{4} \% = 3,8 \%. \end{aligned}$$

Пример 3. Требуется выверить, с точностью не ниже 2% амперметр посредством медного вольтметра, причем электрохимический эквивалент меди в точности равен $\alpha = 0,020$ г; весовое количество Q выделившейся меди мы можем взвесить с абсолютной точностью до $\pm 0,0005$ г, а время t сек. измерить с точностью до 0,001. Спрашивается, сколько времени надо вести опыт при силе тока в 1А, чтобы удовлетворить поставленному условию?

Имеем

$$I = \frac{Q}{\alpha t}$$

или

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{\Delta Q}{Q} + \frac{\Delta t}{t} = 0,02.$$

Отсюда

$$\frac{\Delta Q}{Q} = 0,02 - 0,001 = 0,019,$$

или

$$Q = \frac{0,0005}{0,019} = 0,26 \text{ г.}$$

Так как ток силой в 1А в одну минуту выделяет 0,020 г меди, то опыт надо вести не менее 13—15 минут.

В число ошибок, оказывающих влияние на окончательный результат, входят также ошибки, допускаемые нами при вычислениях. Их можно, конечно, сделать сколь угодно малыми, но это целесообразно только в том случае, когда при самом измерении не допущены большие ошибки. Другими словами,

надо стремиться к тому, чтобы наибольшие ошибки вычислений не увеличивали заметным образом наибольшей возможной ошибки конечного результата. Так как эта последняя редко бывает менее десятых долей процента, то при отдельных вычислениях можно допускать ошибки порядка 0,01% от вычисляемой величины. Таким образом, нет смысла вести вычисление далее четвертой цифры определяемой величины, считая от начала.

Пример 4. Получив в результате вычисления некое число 29,8492, мы можем смело заменить его числом 29,85, причем получающаяся вследствие этого ошибка будет не больше 0,003%.

В этом отношении большую услугу, в смысле упрощения самой техники вычислений, могут оказать нижеследующие приближенные равенства, которые справедливы, если α и β не превышают каждое сотой доли единицы

$$(1 + \alpha)^2 = 1 + 2\alpha; \quad (1 - \alpha)^2 = 1 - 2\alpha; \quad (1 + \alpha)(1 + \beta) = 1 + \alpha + \beta;$$

$$\frac{1}{1 + \alpha} = 1 - \alpha; \quad \frac{1}{1 - \alpha} = 1 + \alpha; \quad \sqrt{1 + \alpha} = 1 + \frac{1}{2}\alpha; \quad \sqrt{1 - \alpha} = 1 - \frac{1}{2}\alpha;$$

$$\sin(x + \alpha) = \sin x + \alpha \cos x; \quad \sin \alpha = \alpha; \quad \cos \alpha = 1; \quad \operatorname{tg} \alpha = \alpha;$$

$$\operatorname{tg}(x + \alpha) = \operatorname{tg} x + \frac{\alpha}{\cos^2 x}.$$

2. Методика подсчета того, какое влияние на результат измерения оказывают случайные ошибки, базируется на основных положениях теории вероятностей, для чего производят измерение неоднократно при одинаковых условиях и по полученным данным вычисляют наиболее вероятную ошибку, как среднее арифметическое, т. е.

$$X_{\text{ср}} = \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_n}{n},$$

где a_1 , a_2 и т. д. — данные полученные из опыта.

При этом, поскольку нам неизвестно истинное значение измеряемой величины, абсолютные погрешности каждого измерения вычисляют как $\Delta a'_1 = a_1 - X_{\text{ср}}$, $\Delta a'_2 = a_2 - X_{\text{ср}}$ и т. д.

На основе положений теории вероятностей, точность ряда произведенных измерений условились характеризовать следующими величинами:

а) средней квадратичной погрешностью отдельного измерения, полагая ее равной

$$\Delta a = \pm \sqrt{\frac{(\Delta a'_1)^2 + (\Delta a'_2)^2 + \dots + (\Delta a'_n)^2}{n - 1}}, \dots (a)$$

β) средней квадратичной погрешностью среднего результата, полагая ее равной

$$\Delta a_{cp} = \pm \sqrt{\frac{(\Delta a'_1)^2 + (\Delta a'_2)^2 + \dots + (\Delta a'_n)^2}{n(n-1)}}, \dots (6)$$

γ) вероятной погрешностью отдельного измерения, полагая ее равной

$$\eta = \pm \frac{2}{3} \sqrt{\frac{(\Delta a'_1)^2 + (\Delta a'_2)^2 + \dots + (\Delta a'_n)^2}{n-1}} \dots (8)$$

и, наконец,

Δ) вероятной погрешностью среднего результата, полагая ее равной

$$\eta_{cp} = \pm \frac{2}{3} \sqrt{\frac{(\Delta a'_1)^2 + (\Delta a'_2)^2 + \dots + (\Delta a'_n)^2}{n(n-1)}} \dots (2)$$

Знак отдельных погрешностей при этом, очевидно, роли не играет.

Пример 5. В процессе восьмикратного промера сопротивления некоторой катушки мы получили ряд таких значений:

$$R_1 = 1,38$$

$$R_2 = 1,36$$

$$R_3 = 1,39$$

$$R_4 = 1,37$$

$$R_5 = 1,37$$

$$R_6 = 1,39$$

$$R_7 = 1,35$$

$$R_8 = 1,38$$

Отсюда наиболее вероятное значение искомого сопротивления катушки

$$R_0 = \frac{R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_8}{8} = 1,374 \Omega.$$

Абсолютные погрешности отдельных измерений:

$$\Delta R'_1 = R_1 - R_0 = +0,006 \Omega \quad \Delta R'_5 = R_5 - R_0 = -0,004 \Omega$$

$$\Delta R'_2 = R_2 - R_0 = -0,014 \Omega \quad \Delta R'_6 = R_6 - R_0 = +0,016 \Omega$$

$$\Delta R'_3 = R_3 - R_0 = +0,016 \Omega \quad \Delta R'_7 = R_7 - R_0 = -0,024 \Omega$$

$$\Delta R'_4 = R_4 - R_0 = -0,004 \Omega \quad \Delta R'_8 = R_8 - R_0 = +0,006 \Omega.$$

Средняя арифметическая погрешность:

$$\frac{+0,006 - 0,014 + 0,016 - 0,004 - 0,004 + 0,016 - 0,024 + 0,006}{8} = -0,002 \Omega.$$

Средняя квадратичная погрешность измерения:

$$\sqrt{\frac{0,006^2 + 0,014^2 + 0,016^2 + 0,004^2 + 0,004^2 + 0,016^2 + 0,024^2 + 0,006^2}{8-1}} =$$

$= \pm 0,014 \Omega$, т. е. значительно больше среднего арифметического погрешности и ближе к истинному значению.

Средняя квадратичная погрешность результата

$$\Delta R_{cp} = \pm \frac{0,014}{\sqrt{8}} = \pm \frac{0,014}{\sqrt{8}} = \pm 0,005 \Omega.$$

Таким образом, искомое сопротивление катушки равно

$$R = R_0 \pm \Delta R_{cp} = 1,374 \pm 0,005 \Omega^1$$

¹ Пример взят из книги „Основы электрометрии“, В. Д. Ермакова.

Необходимость вычисления взамен средней арифметической значения средней квадратичной погрешности поясняется этим примером и вытекает из следующего. Произведя ряд промеров какой-либо величины, мы среди отдельных ее измерений могли бы допустить частные погрешности, значительные по абсолютной величине, но различные по знаку, и поэтому могли бы в результате их суммирования получить для средней арифметической погрешности величину близкую к нулю, т. е. оценили бы результат ряда измерений превратно.

Пример 5. Допустим, что при повторном измерении длины некоторого проводника мы получили в одном случае следующие погрешности отдельных измерений: $+0,5$; $-0,3$; $+0,2$; $-0,6$; $+0,4$; а в другом $+1,5$; $+0,2$; $-0,3$; $-1,0$; $+0,3$.

Несмотря на то, что измерения в первом случае произведены точнее, мы для $x_{ср}$ получим (что не трудно подсчитать) как раз обратные результаты, т. е. придем к неправильному представлению о величине средней арифметической погрешности измерения.

Вычисляя же среднюю квадратичную погрешность по формуле (а), мы в первом случае получим $\Delta a = \pm 0,425$, а во втором $\Delta a = \pm 0,833$, что подтверждает большую точность измерений в первом случае и дает более правильную оценку среднего результата ряда измерений.

Таким образом, дабы охарактеризовать точность полученного результата при некотором числе произведенных измерений, надо

а) подсчитать наибольшую возможную (относительную) погрешность измерения, которая учитывает влияние систематических ошибок, и

б) подсчитать вероятную погрешность, которая учитывает влияние случайных ошибок.

В заключение отметим, что лучшие условия измерения будут достигнуты тогда, когда наибольшая возможная и наибольшая вероятная ошибки окажутся приблизительно равными.

Если наибольшая возможная погрешность оказалась например, равной $\pm 5\%$, а наибольшая вероятная ошибка среднего результата получилась $\pm 10\%$, то это указывает, что выбранные нами при измерении метод и приборы излишне точны, ибо внешние факторы* слишком нарушают точность измерения. При обратном соотношении погрешностей нет смысла стараться об устранении влияния внешних факторов на показания приборов, которые этого все равно не учтут.

Наконец, при вычислениях результатов необходимо по возможности избегать таких, которые основаны на вычитании, так как точность их весьма не велика.

Пример 6. В результате измерения мы пришли к выводу, что $R = 0,556 - 0,544 = 0,012$. Допустим при этом, что вычитаемое опр. делено нами, как $0,544 \pm 0,001$, т. е. с относительной ошибкой в $\frac{0,001}{0,544} \cdot 100 = 0,2\%$. Тогда относительная ошибка результата равна $\frac{0,001}{0,012} \cdot 100 \cong 10\%$.

Что касается числа измерений, которое надо сделать для того, чтобы по возможности снизить влияние случайных ошибок на конечный результат, то надо иметь в виду, что надежность результата возрастает пропорционально корню квадратному из числа повторных измерений.

§ 28. Производство наблюдений и обработка результатов.

Приступая к измерению, необходимо подобрать аппаратуру, соответствующую по своим данным с одной стороны, желаемой, а с другой, доступной точности измерения.

Для характеристики того, на какую наибольшую точность мы можем рассчитывать при измерениях, ниже приводятся данные об электроизмерительной аппаратуре.

Абсолютные значения ома, вольта и ампера известны с точностью до 0,01%.

Обыкновенные магазины сопротивлений точны . . .	до 0,5 %
Нормальные сопротивления	" 0,01 %
Мостики Витстона	" 0,2 %
Измерительные приборы	" 0,3 %.

При составлении схемы опыта, помимо правильного включения приборов, необходимо позаботиться о наглядности и простоте схемы, систематическом расположении в ней приборов, надежном их соединении и прочности контактов.

Если метод требует одновременного наблюдения показаний нескольких приборов, то для каждого из них желательно иметь отдельного наблюдателя и отсчеты производить по сигналу.

В процессе опыта следует время от времени проверять нулевое положение стрелки прибора при разомкнутой цепи. Перед ответственными измерениями следует выверять приборы.

Записывать результаты наблюдений необходимо немедленно, для чего следует заранее приготовить таблицу наблюдений. В особую графу этой таблицы нужно заносить все ненормальные обстоятельства, сопровождавшие опыт (колебания напряжения, изменение температуры, вынужденные перерывы

и т. п.), а также перечень аппаратуры с указанием систем приборов, их номеров и фирмы.

Нередко условия опыта требуют, чтобы одна величина y , зависящая от другой величины x , была измерена для некоторого совершенно определенного значения этой последней, например, x_1 , в то время, как это почему-либо неосуществимо.

Например, часто нельзя отрегулировать цепи силу тока i так, чтобы прибор дал определенное нужное нам показание α_0 . Тогда прибегают к интерполированию, т. е. определяют два отклонения α_1 и α_2 , удовлетворяющие условию $\alpha_1 > \alpha_0 > \alpha_2$, которым соответствуют силы токов i_1 и i_2 . Если эти последние мало друг от друга разнятся, то мы вправе предположить, что отклонения пропорциональны этим силам токов, и вычислять искомый ток i_0 из пропорции $\frac{i_0 - i_1}{\alpha_0 - \alpha_1} = \frac{i_2 - i_1}{\alpha_2 - \alpha_1}$, откуда $i_0 = i_1 + (\alpha_0 - \alpha_1) \frac{i_2 - i_1}{\alpha_2 - \alpha_1}$.

При исследованиях различных зависимостей одной величины от другой весьма полезно изображать полученные результаты графически и притом попутно с выполнением опыта. Это позволяет тотчас же обнаруживать ошибки и контролировать отдельные результаты, возбуждающие сомнение.

Для построения графика откладывают по оси абсцисс в определенном масштабе величины независимой переменной, а по оси ординат соответствующие им значения изучаемой величины. По полученным точкам проводят плавную кривую так, чтобы она проходила через большую часть точек или располагалась между ними.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ VI

1. В чем отличие между непосредственными и косвенными методами измерений?
2. Как мы судим о точности измерения?
3. Чем обуславливаются систематические и случайные ошибки?
4. На чем базируется методика подсчета наибольшей возможной погрешности измерения?
5. Что такое абсолютная и относительная погрешности?
6. Чем надо руководствоваться при вычислении результатов измерения (до какого знака их вести)?
7. На чем базируется методика подсчета наиболее вероятной погрешности измерения?
8. Почему взамен средней арифметической погрешности исчисляют среднюю квадратичную?
9. Каким образом охарактеризовать точность произведенного измерения?
10. Чем обуславливаются лучшие условия измерений?
11. Что такое интерполирование?

ГЛАВА VII.

Методы и приборы для измерения силы тока, напряжений, электродвижущих сил и количества электричества.

§ 24. Измерение силы тока.

Измерять силу тока можно непосредственно, т. е. при помощи амперметров, или же косвенными путями, которые базируются на соотношениях, связывающих силу тока с иными электрическими величинами: напряжением, сопротивлением и т. п.

Измерители силы тока, в зависимости от присущих им пределов измерения, разделяются на амперметры, предназначенные для измерения сил токов, превышающих 0,1 ампера; миллиамперметры, приспособленные для измерений от 0,001 до 0,1 или 0,15 ампера; микроамперметры с пределами измерений от 0,000001 до 0,00015 ампера и, наконец, гальванометры для измерения сил токов от 10^{-4} до 10^{-12} ампера.

В зависимости от рода тока и желаемой точности определения его силы пользуются приборами той или иной из разобранных в предыдущем отделе курса систем.

В цепях постоянного тока почти исключительно пользуются приборами магнитоэлектрическими, а для технических целей еще и электромагнитными. Первые в соединении с шунтами, допускают измерение сил токов до 3000—4000 ампер, вторые часто не снабжаются шунтами и строятся на определенные пределы измерения, примерно, до 1000—1500 ампер при наименьшем пределе порядка 10 мА. Приборами остальных систем в цепях постоянного тока почти не пользуются, так как стоимость их не ниже, чем магнитоэлектрических, а точность—меньше.

В цепях переменного тока для измерения токов выше 250 мА пользуются приборами всех систем, кроме магнитоэлектрической.

Токи от 25 до 250 мА измеряются тепловыми, электродинамическими и электромагнитными приборами, а меньшие силы—термоприборами.

Верхний предел непосредственных измерений для электродинамических приборов—400А, а для электромагнитных—1500А.

Для расширения пределов измерения пользуются трансформаторами тока.

§ 25. Непосредственные способы измерения силы тока.

Для непосредственного измерения силы тока измерительный прибор вводится в исследуемую цепь последовательно; чтобы при этом сопротивление цепи, а, следовательно, и сила тока, подлежащая измерению, практически не изменились, сопротивление прибора должно быть сколь возможно малым. Это же необходимо в видах сколь возможно малого собственного потребления электрической энергии измерительным прибором.

При измерениях необходимо подбирать прибор на соответствующие пределы шкалы, чтобы использовать ее в тех точках, где возможно наиболее точно снять отсчет. Кроме того, при выборе места включения прибора, необходимо сообразовываться с его системой, дабы на точность его показаний не влияли внешние факторы, как, например: поле земли, соседних проводов, железных масс и т. д. В частности

а) при пользовании магнитоэлектрическими приборами надо удалять их друг от друга на расстояние не менее 50 см, а при работе с шунтом удалять его от прибора на всю длину соединительных проводов.

б) Работая с электродинамическими приборами, необходимо помнить, что внешнее поле напряжением в 5 эрстедов, может вызвать погрешность показаний до 25%, почему рекомендуется при измерениях производить два отсчета, меняя направление тока и беря за истинный отсчет среднее из полученных. Шкала этих приборов в начале обычно очень сжата, а поэтому отсчету можно верить лишь начиная с тех делений, которые отвечают 15—20% от наибольшего показания.

в) Необходимо остерегаться нечаянного включения индукционных приборов в цепь постоянного тока, что легко приводит их в негодность.

г) Пользуясь тепловыми приборами, надо очень опасаться их перегрузки, проверять до работы положение стрелки на нуле шкалы, и если этого нет, то до установки ее на нуль надо прогреть прибор током в течение 10—15 минут. Шкала этих приборов также верна, начиная с 15—20% наибольшего показания (номинала).

д) Степень точности измерений силы тока зависит от рода тока, системы и класса приборов, а также от условий

выполнения опыта, и может колебаться в пределах от 0,2 до 6% от наибольшего показания прибора. В нижеследующей таблице приводятся исходные данные этой зависимости (см. СЭТ).

Род тока	При точности измерения в ‰ от наибольшего показания		
	0,2 — 0,3‰	0,3 — 0,5‰	1 — 4‰
применяются приборы систем:			
Постоянный	Магнитоэлектрической 1 класс, образцовые	Магнитоэлектрической 1 класс контрольные. Электромагнитной	Магнитоэлектрической 2 класс Электромагнитной Электродинамической Тепловой
Переменный ток частоты от 16 до 100 пер. сек.	Электродинамической 1 класса, образцов.	Электродинамической Электромагнитной	Электродинамической Электромагнитной Тепловой Индукционной
Пер. ток высокой частоты		Термоэлектрической Электронной	Тепловой Термоэлектрической Электронной

е) Способы расширения пределов измерения силы тока применяются в тех случаях, когда нежелательно или по практическим соображениям невозможно, чтобы весь измеряемый ток протекал через прибор. Они сводятся к шунтированию приборов или к включению их через измерительные трансформаторы тока.

При пользовании шунтированными приборами в цепях переменного тока необходимо свивать жгутом соединительные провода к шунту, дабы уменьшить площадь контура, образованного амперметром, проводами и шунтом, и тем самым уменьшить погрешности при изменениях частоты тока. Кроме того, измеритель тока надо располагать возможно дальше от шунта (сколько позволяет длина соединительных проводов) и пользоваться всегда теми соединительными проводами, при которых прибор градуировался.

выполнения опыта, и может колебаться в пределах от 0,2 до 6% от наибольшего показания прибора. В нижеследующей таблице приводятся исходные данные этой зависимости (см. СЭТ).

Род тока	При точности измерения в ‰ от наибольшего показания		
	0,2 — 0,3‰	0,3 — 0,5‰	1 — 4‰
применяются приборы систем:			
Постоянный	Магнитоэлектрической 1 класса, образцовые	Магнитоэлектрической 1 класса контрольные. Электромагнитной	Магнитоэлектрической 2 класса Электромагнитной Электродинамической Тепловой
Переменный ток частоты от 16 до 100 пер. сек.	Электродинамической 1 класса, образцов.	Электродинамической Электромагнитной	Электродинамической Электромагнитной Тепловой Индукционной
Пер. ток высокой частоты		Термоэлектрической Электронной	Тепловой Термоэлектрической Электронной

е) Способы расширения пределов измерения силы тока применяются в тех случаях, когда нежелательно или по практическим соображениям невозможно, чтобы весь измеряемый ток протекал через прибор. Они сводятся к шунтированию приборов или к включению их через измерительные трансформаторы тока.

При пользовании шунтированными приборами в цепях переменного тока необходимо свивать жгутом соединительные провода к шунту, дабы уменьшить площадь контура, образованного амперметром, проводами и шунтом, и тем самым уменьшить погрешности при изменениях частоты тока. Кроме того, измеритель тока надо располагать возможно дальше от шунта (сколько позволяет длина соединительных проводов) и пользоваться всегда теми соединительными проводами, при которых прибор градуировался.

Шунты в цепях переменного тока применяются, вообще говоря, редко, так как в этом случае трудно учесть возможное несовпадение по фазе токов, ответвляющихся через шунт и прибор, и ввести надлежащую поправку. Кроме того, приборы переменного тока отличаются большим собственным потреблением энергии; через измеритель должен протекать относительно большой ток (до 10 А), а это вызывает в соединительных проводах и контактах непостоянство сопротивления и, как результат, погрешность измерения.

Приборы электродинамической системы снабжаются для расширения пределов измерения, взамен шунтов секционированными неподвижными катушками, которые могут быть соединены между собою в различных комбинациях: последовательно, параллельно и смешанно.

§ 26. Некоторые частные случаи измерения силы тока.

1) Измерение результирующего действия суммы или разности двух токов удобно осуществить помощью гальванометров с подвижной магнитной системой (тип Томсона), имеющих две тождественные системы неподвижных катушек, расположенные одинаково относительно подвижной системы прибора. Включая катушки так, чтобы токи, по ним протекающие, создавали магнитные поля одинакового направления, легко измерить сумму токов; при встречном включении катушек измеряется разность токов. Предварительно прибор должен быть выверен, и если одна из катушек оказывает более сильное действие, то ее надо зашунтировать.

2) Измерение величины, обусловливаемой произведением двух токов, легче всего осуществить помощью приборов электродинамической системы, показания коих пропорциональны произведению сил токов, протекающих по их катушкам.

3) Отношение двух сил токов определяется помощью приборов, называемых „логометрами“ и состоящих из двух неподвижных и взаимно перпендикулярных катушек, во внутреннем пространстве которых свободно подвешена железная пластинка. При пропускании по обмоткам катушек токов i_1 и i_2 железная пластинка располагается под некоторым углом α , образованным направлением результирующего магнитного поля токов с плоскостью одной из катушек. Для этого момента имеет место зависимость $\operatorname{tg} \alpha = C \frac{i_1}{i_2}$, где C — постоянный коэффициент, зависящий от данных устройства подобного прибора.

4) Нахождение зависимости двух токов более сложного вида может быть осуществимо помощью амперметра, снабженного двумя подвижными системами (например, теплового с двумя нагревательными нитями), и притом так, что стрелки их во время действия прибора перекрещиваются. Точка их пересечения является некоторой функцией углов отклонения стрелок, а, следовательно, и соотношения сил токов. Включая, например, один из приборов на известное, а другой на измеряемое сопротивление, можно определить последнее. Этот принцип применяется в некоторых омметрах, частотомерах, а также при измерениях коэффициента мощности цепи.

5) Измерение весьма слабых токов ниже 10^{-12} А, когда обыкновенные гальванометры уже недостаточно чувствительны, осуществимо помощью электрометров или же по методу компенсации (о чем см. дальше в разделе об измерениях э.д.с.).

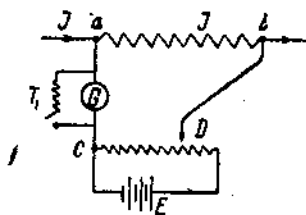


Рис. 192.

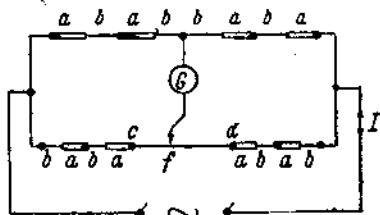


Рис. 193.

В первом случае электрометром измеряется разность потенциалов на зажимах известного сопротивления, и по этим данным вычисляется сила тока, или же наблюдается скорость смещения его подвижной системы, и сила тока определяется по формуле

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{dU}{d\alpha} \cdot \frac{d\alpha}{dt} \cdot C,$$

где U — напряжение на клеммах прибора C — его емкость, и α — угол отклонения.

Измерение переменных токов до 10^{-6} А можно производить термогальванометром Дудделя или зеркальными электродинамометрами Сименса.

6) Регистрация и измерение малых изменений силы тока может быть произведена по схеме рис. 192, где чувствительным гальванометром G можно воспользоваться, несмотря на то, что сила тока I для него недопустима. Замкнув ключ T_1

и, зашунтировав таким образом гальванометр, передвигают движок D до тех пор, пока подвижная система гальванометра не займет грубо нулевого положения. После этого ключ T_1 размыкают и достигают совершенно точно нулевого положения, которое, очевидно, возникает в момент равенства потенциалов точек $a-b$ и $C-D$. Всякое изменение силы тока в главной цепи нарушает это равенство и учитывается гальванометром.

7) Измерение слабых токов высокой частоты может быть осуществлено по схеме рис. 193, предложенной Саломонсоном. Здесь измеряемый переменный ток I протекает через две параллельные ветви, образованные одинаковым числом терморпар $a-b$. Последние, в пределах каждой параллельной ветви, включены так, чтобы возникающие в них электродвижущие силы взаимно уравнивались по отношению к цепи переменного тока и складывались по отношению к цепи чувствительного гальванометра G .

Такое устройство может быть отградуировано на постоянном токе для учета поправки за счет явления Пельтье и затем применено для измерений переменного тока.

Проволочка $c-d$ с движком f служит для уравнивания подобного мостика.

§ 27. Косвенные способы измерения силы тока.

Здесь мы отметим два наиболее употребительных: метод вольтметра и компенсационный.

а) Метод вольтметра, осуществляемый по схеме рис. 194-а, где R_N — эталонное сопротивление, например, нормаль-

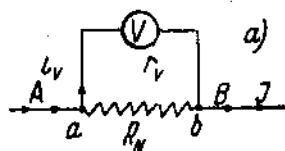


Рис. 194-а.

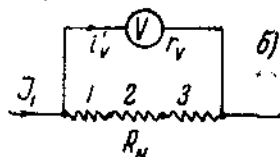


Рис. 194-б.

ное или шунт от точного прибора; V — точный милливольтметр с сопротивлением r_v ; A и B — зажимы шунта, коими он включается в цепь измеряемого тока, и $a-b$ зажимы шунта, к которым присоединяются соединительные провода от прибора. Измеряемая сила тока вычисляется по формуле

$$I = \left\{ \frac{U}{R_N} + \frac{U}{r_v} \right\} = \frac{U}{R_N} \left\{ 1 + \frac{R_N}{r_v} \right\}.$$

Сопротивление R_N берется небольшое, а вольтметр по возможности с большими чувствительностью и сопротивлением.

Если сила измеряемого тока подвержена изменениям и нам их надо учитывать, то в качестве эталонного берут сопротивление, состоящее из нескольких ступеней 1, 2, 3 и т. д., как на рис. 194 б.

В этом случае сила измеряемого тока равна

$$(I_1 - i'_v) \cdot R_N = i'_v \cdot r_v$$

или

$$I_1 = \frac{i'_v(r_v + R_N)}{R_N} = C \alpha_1 \frac{r_v + R_N}{R_N},$$

где C постоянная и α_1 — угол отклонения вольтметра (гальванометра).

Если в дальнейшем ток в цепи станет I_2 , и для получения допустимого угла α_2 отклонения вольтметра потребуется главную цепь приключить, как показано на рис. 195, т. е. ввести в нее только часть

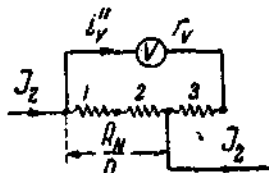


Рис. 195.

сопротивления R_N , то

$$(I_2 - i''_v) \cdot m = i''_v (r_v + R_N - m)$$

или

$$\begin{aligned} I_2 &= i''_v \frac{(r_v + R_N - m) + i''_v \cdot m}{m} = \frac{i''_v (r_v + R_N)}{m} = \\ &= C \alpha_2 \frac{r_v + R_N}{m}. \end{aligned}$$

Взяв отношение сил токов, получим

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \cdot \frac{R_N}{m}$$

или

$$I_2 = \frac{I_1}{\alpha_1} \cdot \left(\frac{R_N}{m} \right) \cdot \alpha_2.$$

Последнее выражение не содержит r_v , а поэтому подобный прием пригоден для любого вольтметра или гальванометра. Преимуществом этой схемы являются: постоянство сопротивления цепи, на которую включен гальванометр, а, сле-

довательно, и постоянство условий успокоения его подвижной системы, а также удобство отсчетов силы измеряемого тока, если подобрать соответственно как отношение $\frac{I_1}{\alpha_1}$, так и значения отдельных ступеней эталонного сопротивления.

Пример. $I_1 = 0,002$ ампера $= 200 \cdot 10^{-3}$ А для $\alpha_1 = 200$ делений. Спрашивается: какой силе тока будут соответствовать углы отклонения $\alpha_2 = 1$ делению при значениях $m = 1, 10, 100$ и 1000 ом, если ступени сопротивления обладают сопротивлениями: 1 — в 1 ом, 2 — в 9 ом, 3 — в 90 ом и 4 — 900 ом.

Ответ. При $m = 1$ углу	$\alpha_2 \approx 1$	соответствует	$I_2 = 10^{-2}$	} См. при- ложение I
$m = 10$,	$\alpha_2 \approx 1$	"	$I_2 = 10^{-3}$	
$m = 100$,	$\alpha_2 \approx 1$	"	$I_2 = 10^{-4}$	
$m = 1000$,	$\alpha_2 \approx 1$	"	$I_2 = 10^{-5}$	

6) Метод компенсации по идее сводится к уравновешиванию электродвижущей силой нормального элемента E_N того падения напряжения U , которое порождается на участке эталонного сопротивления R_N (рис. 196).

Если на эталонном сопротивлении подобрать такую его часть R'_N , чтобы чувствительный гальванометр G не давал отклонения, то мы будем иметь

$$I \cdot R'_N = E_N, \text{ или } I = \frac{E_N}{R'_N}$$

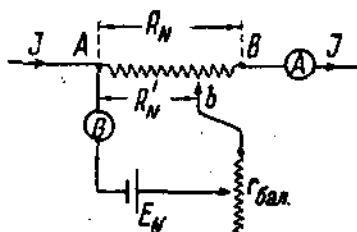


Рис. 196.

Взяв в качестве эталонного сопротивления калиброванную проволоку, получим $I = \frac{E_N}{l_{AB} \cdot r}$, где l_{AB} — длина ее между точками A и b , а r — сопротивление на единицу длины. Баластное сопротивление $r_{бал}$ необходимо для предохранения гальванометра и нормального элемента от большого разрядного тока в те моменты, пока компенсация еще не достигнута; в момент же уравновешенности оно должно быть для повышения чувствительности метода выключено из цепи нормального элемента.

Способ этот, очевидно, применим и для градуировки амперметров, для чего последние вводятся в цепь, как показано на рисунке.

Метод дает хорошие результаты при постоянстве э.д.с. того источника, который посылает в цепь измеряемый ток. (См. приложение II).

§ 28. Измерение напряжений и э.д.с.

Точное определение абсолютной величины э.д.с. источника осуществимо только тогда, когда последний не дает тока. Тогда не происходит затраты напряжения на преодоление внутреннего сопротивления источника, и следовательно, напряжение на зажимах может быть приравнено к его э.д.с.

Точное определение напряжения между двумя данными точками цепи осуществимо только тогда, когда через параллельную к этим точкам цепь (образованную измерительным прибором), не ответвляется ток. В противном случае включение вольтметра тотчас же скажется на изменении силы тока, а, следовательно, и на величине измеряемого напряжения.

Задача. В цепи, образованной источником тока с э.д.с. равной 100 вольтам, при внутреннем сопротивлении $r = 1$ ом, и двумя последовательно соединенными сопротивлениями $R_1 = 5$ ом и $R_2 = 10$ ом, требуется измерить напряжение на зажимах второго сопротивления. Имеются два вольтметра — один с сопротивлением в 100, а другой в 100000 ом. Спрашивается: какое напряжение фактически будет на зажимах сопротивления R_2 до включения вольтметров, и какие напряжения будут каждым из них измерены?

Ответ: $U_{\text{ист}} = 62,5$ В; $U' = 60,17$ В и $U'' = 62,493$ В. (См. приложение III).

В цепях переменного тока вопрос измерения напряжений еще больше осложняется из-за возможного фазного сдвига между током, протекающим через вольтметр, и измеряемым напряжением, так как обмотки вольтметров, исключая тепловых, всегда обладают некоторым коэффициентом самоиндукции. Работая, например, с электродинамическим вольтметром, для которого зависимость между током и углом отклонения выражается как $i = C\sqrt{a}$, и измеряя при его помощи некоторое напряжение, мы будем иметь

$$U = iZ = C'\sqrt{a}\sqrt{r_v^2 + 4\pi^2 f^2 L^2} = C'\sqrt{a}\sqrt{1 + \frac{4\pi^2 f^2 L^2}{r_v^2}},$$

где Z — полное сопротивление цепи вольтметра, L — его коэффициент самоиндукции, r_v — активное сопротивление его обмоток и f — частота тока.

Из этого выражения явствует, что показания вольтметра зависят от частоты тока, почему его надо градуировать током той частоты, при которой он будет работать. В последние годы некоторыми фирмами строятся точные вольтметры, для которых поправочный член в виде подкоренного выражения в уравнении отличается от единицы на величину, меньшую обыч-

ных ошибок измерения. Достигается это снижением до минимума коэффициента самоиндукции и емкости обмоток вольтметра и увеличением их активного сопротивления.

Таким образом, идеальное решение задачи измерения напряжений или э.д.с. требует применения измерительных приборов с бесконечно большим сопротивлением или же таких измерительных схем, которые гарантируют выполнение перечисленных выше условий. Практически это осуществимо помощью электростатических приборов или применения метода компенсации. Однако, малая чувствительность первых, сложность работы с электрометрами и, наконец, некоторая громоздкость работы на компенсационных схемах ограничивают их применение.

На практике поэтому чаще пользуются обычными типами приборов, т. е. такими, которые потребляют на себя электрическую энергию, причем в цепях постоянного тока почти исключительно пользуются приборами магнитоэлектрической системы, а для технических надобностей еще и электромагнитными. Пределы измерения ими напряжений весьма велики: от 10^{-12} (гальванометры) и до 500 kV (статические вольтметры с шаровыми разрядниками). Наиболее точные измерения до 0,02% можно осуществить с помощью компенсационных схем (компенсаторов) в пределах от 1 до 2000 V.

В цепях переменного тока можно применять любую из описанных в первой части курса систем измерительных приборов кроме магнитоэлектрической.

Пределы измерения: от милливольт и до сотен киловольт; измерения с точностью до 0,3% можно производить в пределах от 100 до 1000V и при частоте тока в 50—60 пер/сек. Наиболее точные результаты получаются при пользовании электродинамометрами, затем тепловыми и термоэлектрическими, электромагнитными и, наконец, индукционными приборами.

§ 29. Непосредственные способы измерения напряжений.

Для непосредственного измерения напряжений прибор присоединяется в параллель к тем точкам цепи, разность потенциалов между которыми требуется определить. Чтобы при этом сопротивление всей цепи, а с нею сила тока и измеряемое напряжение не изменились, вольтметр должен обладать сколь возможно большим сопротивлением. Того же требует и стремление снизить собственное потребление прибором электрической энергии.

Что касается правил работы с вольтметрами, то они в общем те же, что и описанные выше правила работы с амперметрами. К ним необходимо только добавить следующее.

При измерениях высоких напряжений надо обезопасить наблюдателя от прикосновения к проводам и прибору, а поэтому, если возможно, один из полюсов последнего, а также и кожух прибора, следует заземлять.

а) Степень точности измерения напряжений зависит от рода тока, системы и класса приборов, а также условий выполнения опыта, и может колебаться в пределах от 0,2 до 6% от наибольшего показания прибора (см. таб. в § 25).

б) Способы расширения пределов измерения вольтметрами сводятся к снабжению их добавочными сопротивлениями или же включению их через посредство особых измерительных трансформаторов, а также делителей напряжения. Первые и последние применяются в целях постоянного и переменного токов, а вторые — только при измерениях переменного тока.

§ 30. Косвенные способы измерения напряжений и э.д.с.

а) Метод Ома выполняется по схеме рис. 197, где E_X и E_N — источники исследуемый и эталонный (нормальный эле-

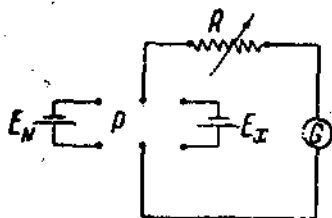


Рис. 197.

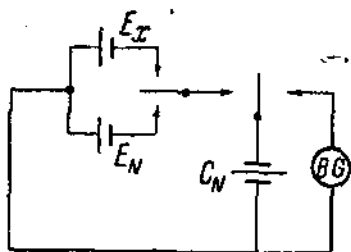


Рис. 198.

мент); P — переключатель; G — гальванометр и R — регулируемое известное сопротивление. Опыт сводится к повторному отсчету углов отклонения α_X и α_N при включении гальванометра магнитоэлектрической системы на E_X или E_N .

Тогда

$$E_X = I_X R_X \text{ и } E_N = I_N R_N,$$

откуда

$$E_X = \frac{R_X}{R_N} \cdot \frac{\alpha_X}{\alpha_N} \cdot E_N.$$

Наивыгоднейшие условия опыта достигаются при больших углах отклонения; однако, эта возможность ограничивается максимальным допустимым для нормального элемента разрядным током. Подобрав сопротивления R_X и R_N так, чтобы

$$\alpha_X \approx \alpha_N, \text{ имеем } \dots E_X = \frac{R_X}{R_N} \cdot E_N.$$

Большим преимуществом этого последнего способа является то, что он не зависит от закона изменения отклонений при изменении силы тока, т. е. возможная разница в значениях постоянной C прибора при различных углах отклонения в этом случае не окажет влияния на результаты измерения.

Точность способа при сильно поляризующихся источниках не велика, и тогда лучшие результаты дает следующий способ:

б) Метод последовательных отклонений, особенно пригодный для измерения э.д.с. сильно поляризующихся источников. Исследуемый источник с э.д.с. E_X приключается по схеме рис. 198, к эталонному конденсатору C_N , который и получает заряд $Q_X = C_N \cdot E_X$.

Затем его разряжают через баллистический гальванометр $B G$, наблюдая первое наибольшее отклонение α_X его подвижной системы.

Тогда $Q_X = C_N E_X = C_b \cdot \alpha_X$ или $C_N \cdot E_X = C_b \alpha_X$, где C_b — баллистическая постоянная гальванометра.

Проделав то же самое с нормальным элементом E_N , будем иметь

$$C_N \cdot E_N = C_b \cdot \alpha_N.$$

Из полученных равенств следует, что

$$E_X = \frac{\alpha_X}{\alpha_N} \cdot E_N.$$

Метод дает точные результаты, так как наблюдения ведутся при разомкнутой цепи источников; наибольшая точность — при достаточно больших углах отклонения, что достигается соответствующим подбором емкости конденсатора (лучше брать секционированный).

в) Метод компенсации при наличии хорошего нормального элемента и чувствительного гальванометра может дать наиболее точные (до 0,02%) результаты. В основу метода

положен принцип сравнения или уравновешения (компенсации) напряжения испытуемого источника и э.д.с. нормального элемента.

Принципиальная схема метода представлена на рис. 199, где E_X , E_N и E — испытуемый, нормальный и вспомогательный источники тока; G — гальванометр; AB — калиброванная проволока со скользящими по ней контактами N и M ; A — амперметр; R — регулировочное сопротивление и P — переключатель.

Осуществляется метод так: замкнув вспомогательную цепь и поставив переключатель P на нормальный элемент, меняют положение движка N до тех пор, пока гальванометр не перестанет давать отклонения. Когда это достигнуто, и тока в цепи источника E_N нет, то $E_N = I \cdot R_N$ = разности потенциалов точек A и N .

Конечно, это достижимо при $E > E_N$ и встречном включении источников (отмечено на схеме).

Повторив тот же опыт с испытуемым источником, получим $E_X = I \cdot R_X$ = разности потенциалов, например, между точками A и M .

Из этих двух выражений следует, что

$$\frac{E_X}{E_N} = \frac{R_X}{R_N} \text{ или } E_X = \frac{R_X}{R_N} \cdot E_N.$$

Рис. 199.

Способ этот предложен Дюбуа; он требует, очевидно, постоянства силы тока во вспомогательной цепи и положен в основу при конструировании большинства специальных аппаратов, называемых компенсаторами или потенциометрами.

Другой способ, предложенный Поггендорфом, отличается от первого тем, что при нем компенсация достигается не изменением сопротивления отрезков калиброванной проволоки, а таким регулированием силы тока во вспомогательной цепи, при котором гальванометр также не дает отклонений. Для этого случая

$$\frac{E_X}{E_N} = \frac{I_X}{I_N} \text{ и } E_X = \frac{I_X}{I_N} \cdot E_N.$$

Компенсаторы, строящиеся различными фирмами, позволяют: а) измерять в широких пределах напряжения и в.д.с., а также градуировать вольтметры;

б) измерять в широких пределах силу тока и градуировать амперметры;

в) измерять сопротивления и в особенности малые.

Теория метода показывает, что точность измерений (с точки зрения ошибок при отсчете показаний гальванометра) максимальна, когда сопротивления вспомогательной цепи, а также цепей с испытуемым и эталонным источниками малы. Однако, этим вопрос не исчерпывается, так как при малых значениях этих сопротивлений источники будут поляризоваться, что отразится на постоянстве их в.д.с., а, следовательно, и на точности измерения. Поэтому сопротивления цепей подбирают столь большими, чтобы изменение сопротивления одной из них на один ом вызывало чуть заметное показание гальванометра. К моменту же достижения компенсации и для повышения чувствительности сопротивление цепи, содержащей испытуемый или нормальный источники, снижается до минимума (выводится так называемое балластное сопротивление, включаемое последовательно с гальванометром).

При работе с сильно поляризующимися источниками нельзя долго держать их цепи замкнутыми и, кроме того, необходимо время от времени давать им „отдых“ при разомкнутой цепи.

Для предохранения испытуемого и нормального источников от разряда и возникновения поляризации, надо замыкать их цепи во время работы только после предварительного замыкания вспомогательной цепи.

Из очень большого числа встречающихся в лабораториях компенсаторов мы здесь остановимся несколько подробнее на одном, наиболее по своей схеме наглядном и легко осуществимом даже средствами лаборатории, а также вкратце опишем пять других из числа наиболее часто применяемых в СССР.

Отметим также, что для расширения пределов измерения компенсатором калиброванная проволока схемы рис. 199 должна быть заменена достаточно большим по величине и удобно регулируемым сопротивлением. Кроме того, схема прибора должна обеспечивать удобное приключение цепей испытуемого и нормального источников к точкам цепи вспомогательной и плавное изменение сопротивления между этими

точками ($A-N$ и $A-M$ на схеме) без изменения общего сопротивления вспомогательной цепи (постоянство силы тока в ней).

§ 31. Типы компенсаторов.

Изготавливаемые различными фирмами компенсационные аппараты в основном могут быть подразделены на два типа: малоомные, приспособленные для измерения э.д.с. порядка сотых долей вольта, и многоомные для непосредственного измерения э.д.с. от 1 до 1,4 вольта. Пределы измерения ими напряжений могут быть расширены до 1000—2000 вольт при помощи дополнительного приспособления, называемого редуктором (делителем)

Действие всех их основано на принципе, поясненном в предыдущем параграфе, в деталях же схемы они отличаются друг от друга, главным образом, тем, каким способом в них достигается постоянство силы тока во вспомогательной цепи, а также порядком операций при работе с ними.

При работе на компенсаторах малоомных следует в главную их цепь вводить гальванометры малого сопротивления, а при работе на многоомных — большого.

1) Компенсатор по схеме Германской палаты мер и весов, системы Фейснера, состоит из ряда декадных (но применимы и обыкновенные) магазинов сопротивления, включенных последовательно (схема рис. 200) и имеющих различные по величине подразделения, например, такие, как указано на схеме, но при том неизменном условии, чтобы два из них были парными (одинаковыми по секциям их сопротивлений). Эти парные магазины должны быть расположены в схеме так, чтобы один из них входил в главную, а другой во вспомогательную цепь (например, магазины R_4 и соответственно R_8).

а) При работе на подобном компенсаторе обычно задаются во вспомогательной цепи силой тока в 0,001 или 0,0001 ампера. Если при этом пользуются нормальным элементом, например, системы Вестона с э.д.с. равной 1,0183 вольта, то до включения его подбирают в цепи такое суммарное сопротивление $\Sigma R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6$, чтобы $\frac{E}{\Sigma R} \cong 0,001$ (или 0,0001) ампера. После этого, передвигая рукоятки P_1 и P_2 магазинов R_3 и R_6 , подбирают на них такое суммарное сопротивление r , чтобы $r \cdot 0,001 = 1,0183$ вольта; рукоятка магазина R_4 при этом должна стоять на нулевом контакте.

Когда это сделано, то компенсируют э.д.с. нормального элемента E_N , для чего, при введенном полностью (100000Ω) балластном сопротивлении r_b , переводят переключатель P , стоявший до этого на контакте 1, на контакт 2.

Если при этом гальванометр даст отклонение, что укажет на неполную компенсацию и что явится, очевидно, результатом неточной регулировки силы тока во вспомогательной цепи, то, пользуясь рукоятками P_1 , P_2 и P_3 , изменяют сопротивление r так, чтобы при некотором его значении r_N , гальва-

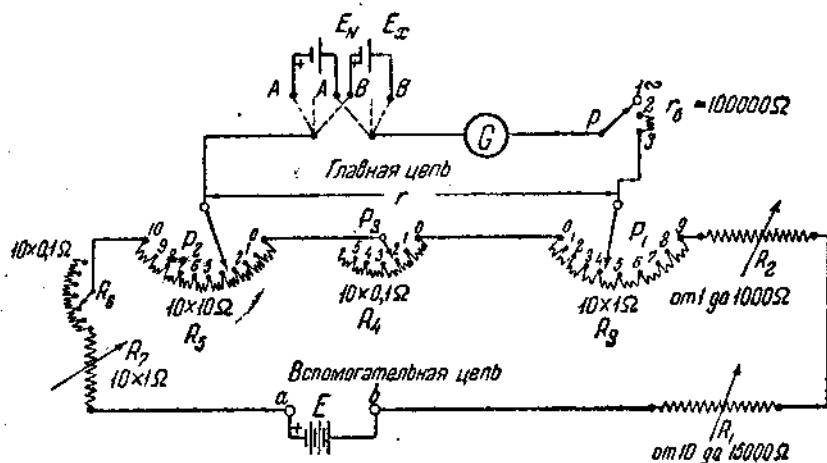


Рис. 200.

нометр перестал давать отклонение. Затем выводят балластное сопротивление при гальванометре и окончательно компенсируют нормальный элемент.

Допустим, что это достигнуто при $r = r_N$; тогда $E_N = I \cdot r_N$. Для компенсации испытуемого источника E_X его вводят, взамен нормального элемента, в главную цепь и, не меняя силы тока во вспомогательной цепи, компенсируют, т. е. подбирают такое сопротивление r_X между рычагами P_1 и P_2 , при котором гальванометр также не дает отклонения; тогда $E_X = I \cdot r_X$. Сопоставляя это с выражением для E_N , имеем

$$E_X = \frac{r_X}{r_N} E_N.$$

При этом необходимо помнить следующее: если для точного установления компенсации источника E_N потребуется передвинуть рычаг магазина R_4 и, следовательно, изменить общее сопротивление, а значит, и силу тока во вспомогательной цепи, то надлежит их восстановить помощью парного магазина R_6 (если на R_4 мы ввели какое-либо сопротивление, то его надо тотчас же вывести на магазине R_6).

Описанный способ применим для измерения э.д.с., ибо испытываемый источник в этом случае тока не дает.

б) Если желают измерять напряжения, а не электродвижущие силы, то схема несколько видоизменяется, а именно, измеряемое напряжение подключается к зажимам a и b вспомогательной цепи (взамен источника E), и в нее вво-

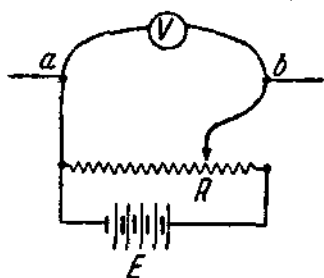


Рис. 201.

дится такое суммарное сопротивление ΣR , чтобы ток от испытываемого напряжения был приблизительно равен 0,001 или 0,0001 А. Рычаги P_1 и P_2 ставятся так, чтобы сопротивление r между ними было, приблизительно, равно $r = \frac{E_N}{0,001}$ или $\frac{E_N}{0,0001}$.

Подготовив таким образом схему, замыкают цепь гальванометра и компенсируют нормальный элемент. При этом суммарное сопротивление ΣR вспомогательной цепи должно оставаться постоянным, а для компенсации подбирают такое r_N , чтобы гальванометр не давал отклонения.

Когда это достигнуто, можем написать

$$\frac{U_x}{\Sigma R} = \frac{E_N}{r_N},$$

откуда

$$U_x = \frac{\Sigma R}{r_N} \cdot E_N.$$

в) Для градуировки вольтметров схему вспомогательной цепи видоизменяют, как показано на рис. 201, где R — ползунковый реостат большого сопротивления, с помощью которого к точкам a и b , где подключен градуируемый вольтметр V , подводится то или иное напряжение от

вспомогательного источника E . Порядок самой работы остается тот же, что и при измерении напряжений.

г) Для измерения некоторого сопротивления R_x (начиная с тысячных долей ома) его подключают (схема рис. 202), последовательно с эталонным сопротивлением R_N , отдельным источником тока E_1 , регулировочным реостатом R_0 и амперметром A , к зажимам переключателя P . Для работы удобно воспользоваться следующим приемом: между рычагами P_1 и P_2 подбирают такое сопротивление r_N , чтобы оно было равно $R_N \cdot 10^a$, где $a=2$ или 3. Оставляя его неизменным, регулируют сопротивление R_2, R_1, R_6 и R_7 , а также напряжение источника E так, чтобы скомпенсировать то падение напряжения U_N , которое возникает на зажимах эталонного сопротивления R_N при протекании через него тока I , учитываемого амперметром A . Когда это достигнуто, то $\frac{I_N}{E} = \frac{r_N}{\Sigma R} = \frac{R_N 10^a}{\Sigma R}$, где ΣR — суммарное сопротивление вспомогательной цепи.

Затем, не меняя тока I и сопротивления ΣR , компенсируют то падение напряжения U_x , которое создается на зажимах измеряемого сопротивления. Последнее достигается подбором такого сопротивления r_x между рычагами P_1 и P_2 , при котором гальванометр не дает отклонения. Тогда $\frac{U_x}{E} = \frac{r_x}{\Sigma R}$, но раньше мы имели $\frac{U_N}{E} = \frac{r_N}{\Sigma R} = \frac{R_N 10^a}{\Sigma R}$, а так как сила тока оставалась неизменной, то очевидно, что

$$\frac{U_x}{U_N} = \frac{R_x}{R_N}.$$

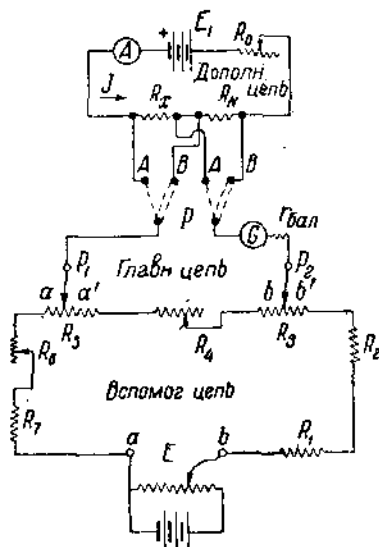


Рис. 202.

Сопоставляя эти три уравнения, получаем

$$\frac{U_X}{U_N} = \frac{r_X}{R_N 10^2} = \frac{R_X}{R_N},$$

откуда

$$R_X = \frac{r_X}{10^2}.$$

Дабы при изменении r_N на r_X не изменилось ΣR , надо все сопротивление, введенное на магазине R_4 , тотчас же вывести на магазине R_6 (или наоборот).

Метод дает возможность измерять сопротивление в зависимости от силы протекающего через него тока, что во многих случаях практики является важным.

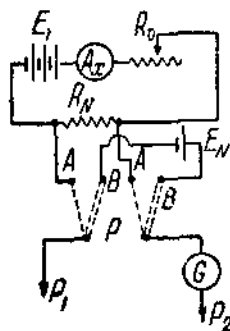


Рис. 203.

д) Для градуировки амперметров схема видоизменяется, как представлено на рис. 203, где приняты все те же обозначения, что и раньше, а буквою A_X отмечен градуируемый амперметр. Порядок работы сводится к следующему: помощью рычагов P_1 и P_2 берем на магазинах R_8 , R_4 и R_5 сопротивление $r_N = 100 E_N$ и затем, не меняя его, подбираем суммарное сопротивление ΣR во вспомогательной цепи таким, чтобы скомпенсировать нормальный элемент; при этом имеем $\frac{E_N}{r_N} = \frac{E}{\Sigma R} = \frac{1}{100}$.

Затем в цепи градуируемого амперметра и эталонного сопротивления R_N устанавливаем некоторой силы ток и, поддерживая его постоянным, компенсируем падение напряжения U_R на зажимах сопротивления. Для этого передвигаем рычаги P_1 и P_2 (не меняя ΣR); достигнув компенсации при некотором r_R , имеем:

$$\frac{U_R}{r_R} = \frac{E}{\Sigma R} = \frac{1}{100},$$

откуда

$$U_R = \frac{r_R}{100},$$

а искомая сила тока

$$I = \frac{U_R}{R_R} = \frac{r_R}{R_N 100}.$$

Изменяем силу тока и вновь повторяем опыт и т. д.

Пределы измерения напряжений и э.д.с. на компенсаторе зависят от величины суммарного сопротивления вспомогательной цепи, величины э.д.с. нормального элемента, допустимой силы тока, для магазинов, а также от величины отношения

$\frac{r_X}{r_N}$. У существующих компенсаторов они колеблются в значительных пределах.

Компенсатор системы Фейснера в исполнении фирмы Вольф построен по описанному принципу, с тем лишь отличием, что в нем постоянство ΣR при передвижении рычагов P_1 и P_2 достигается автоматически благодаря особой конструкции магазинов R_2 и R_5 . Последние представляют собой сдвоенные курбельные магазины, расположенные как на схеме рис. 204; по их контактам одновременно передвигается сдвоенная рукоятка P , и притом так, что концы ее всегда находятся на одинаковых по счету контактах парных магазинов. При подобной конструкции, передвигая рукоятку, например, против часовой стрелки, мы будем уменьшать сопротивление r главной цепи, не изменяя в то же время общего сопротивления цепи вспомогательной.

К недостаткам этого компенсатора надо отнести то, что он не позволяет во время работы быстро проверить, сохранились ли условия компенсации нормального элемента, а это крайне важно знать с точки зрения уверенности в постоянстве э.д.с. источника, питающего вспомогательную цепь. Общий вид и монтажную схему этого компенсатора см. на рис. 205.

2) Компенсатор системы Рапса, в исполнении фирмы Сименс и Гальске, дает возможность регулировать сопротивления между рычагами P_1 и P_2 , не меняя сопротивления вспомогательной цепи, на иных основаниях: в нем четыре декадных курбельных магазина I и II, а также III и IV соединены

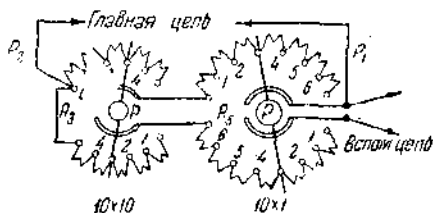


Рис. 204.

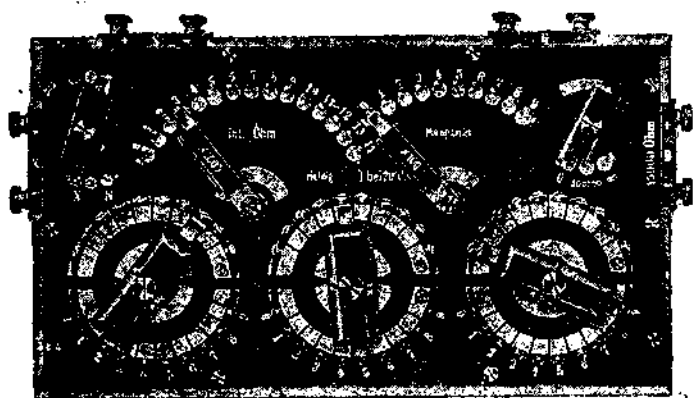
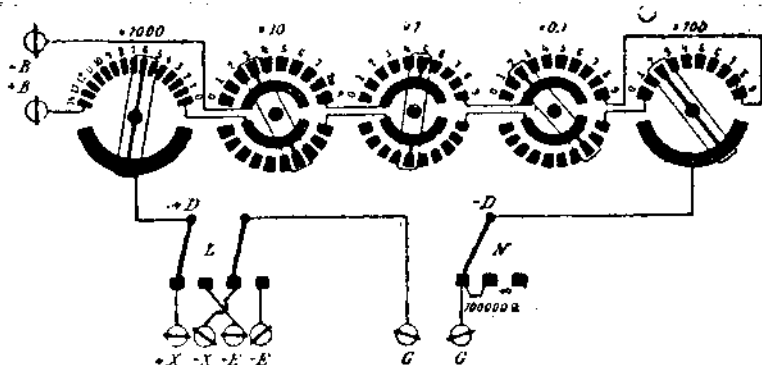


Рис. 205. Компенсатор Вольфа.

попарно, как на схеме рис. 206. Магазины I и II имеют соответственно 10 и 9 декад по 1000 Ω каждая, а магазины III и IV имеют 9 декад по 10 ом каждая.

По контактам магазинов I и III передвигаются механически спаренные, но электрически изолированные друг от друга рычаги *C* и *D* так, что при любом их положении всегда параллельно одной декаде магазина I (и соответственно III), оказываются включенными 9 декад магазина II (соответственно IV). При этом равнодействующее сопротивление *R* между рычагами *C* и *D* (для системы магазинов I и II) может быть вычислено как

$$\frac{1}{1000} + \frac{1}{9000} = \frac{1}{R},$$

откуда

$$R = \frac{1}{\frac{1}{1000} + \frac{1}{9000}} = 900 \text{ } \Omega.$$

Для магазинов III и IV равнодействующее сопротивление равно 9 Ω . Подобной конструкцией достигается следующее: если падение напряжения в каждой декаде магазина I от его нулевого контакта до того контакта, на котором в данный момент стоит рычаг D, есть U, то в декаде, заключающейся между рычагами C и D, оно будет 0,9 U, а в каждой декаде магазина II по $\frac{1}{9}$ от 0,9 U, т. е. по 0,1 U. Другими словами, хотя декады этого последнего магазина и обладают тем же

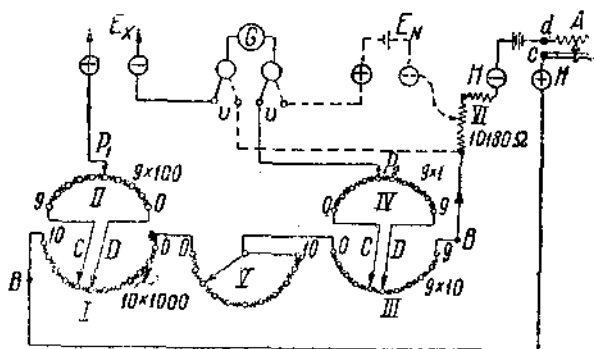


Рис. 206.

сопротивлением, что и магазина I, т. е. по 1000 Ω каждая, — он производит такое же действие, как если бы его декады обладали сопротивлением по 100 Ω каждая. Поэтому на магазине II и обозначено $9 \times 100 \text{ } \Omega$, а на магазине IV — $9 \times 1 \text{ } \Omega$, вместо фактически имеющих $9 \times 1000 \text{ } \Omega$ и $9 \times 10 \text{ } \Omega$. Удобство этой конструкции заключается в том, что при любых положениях рычагов C—D, а также P₁ и P₂, сопротивление вспомогательной цепи между точками B и B остается неизменным и равным $9 \times 1000 + 900 + 1 + 8 \times 10 + 9 = 9990 \text{ } \Omega$, в то время, как сопротивление r_x в главной цепи компенсатора может изменяться от 0,1 и до $900 + 9000 + 80 + 9 + 1 = 9990 \text{ } \Omega$. Особенностью этого компенсатора является то, что нормальный элемент E_N компенсируется на зажимах специального магазина в 10180 Ω , последовательно с которым могут быть

выведены ступени магазина VI с общим сопротивлением в 10 Ω . Последнее — на тот случай, если бы во время работы э.д.с. вспомогательной батареи немного изменилась вследствие, например, температурных условий. Тогда на этом магазине вводится такое сопротивление, которое скомпенсировало бы E_H при повороте вправо переключателя ψ (см. пункт 1р). Рассматривая принципиальную схему этого компенсатора, нетрудно уяснить себе, что он позволяет в любой момент путем лишь перевода лапок переключателя ψ вправо, про-

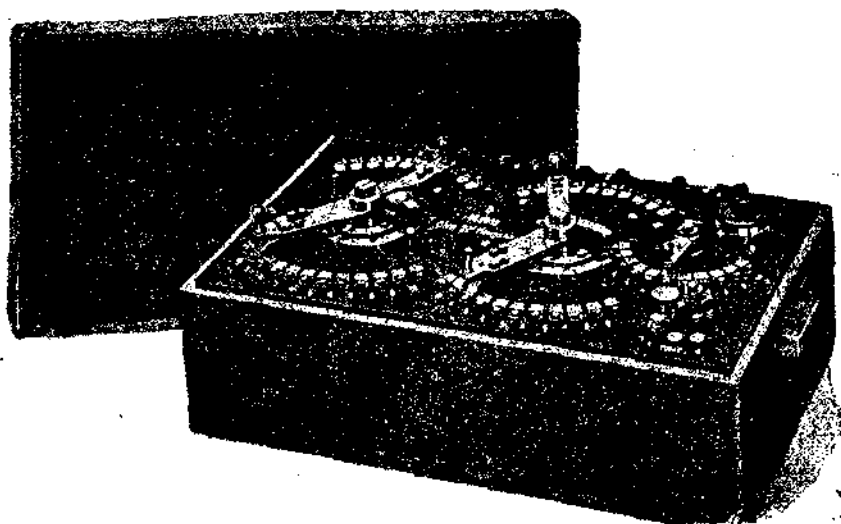


Рис. 207. Компенсатор системы Рапса фирмы Сименс.

верить наличие компенсации нормального элемента, а следовательно, и постоянства силы тока во вспомогательной цепи, и в этом его большое преимущество.

Магазин A с сопротивлением до 150 000 Ω прилагается к компенсатору отдельно, и его вводят во вспомогательную цепь при измерениях больших напряжений (дабы иметь возможность установить в ней ток силою в 0,0001 А). В новейших моделях компенсатора этот магазин заменен делителем напряжения, подключаемым к зажимам H и H (описание делителя см. пункт 3).

Компенсатор этот позволяет измерять э.д.с. от $1 \cdot 10^{-5}$ до 1,1 вольта, напряжения от 1,1 до 1100 В, а также гра-

дуировать измерительные приборы и выверять малые сопротивления (напр. шунты). Общий вид этого компенсатора см. на рис. 207.

При работе с ним надо соблюдать те же меры предосторожности, что и с компенсатором Фейснера.

3) Компенсатор системы Бругера, в исполнении фирмы Гартман и Браун, по идее отличается от компенсатора системы Фейснера, но в работе он более удобен.

Его вспомогательная цепь (схема рис. 208) образована источником E , регулировочным реостатом R , курбельным реостатом I из 10 де-

кад по $1000\ \Omega$ каждая и, далее, комбинацией сопротивлений, состоящей из декадного магазина II на 11 декад по $100\ \Omega$ каждая, параллельно двум из коих всегда включен магазин III , состоящий из 11 декад по $20\ \Omega$ каждая. В параллель к двум декадам последнего всегда включен магазин IV , состоящий из 11 декад по $4\ \Omega$ каждая и, наконец, параллельно двум декадам магазина IV всегда

включен однорычажный магазин V , имеющий 10 декад по $0,8\ \Omega$ каждая. Рычаги $C-D$ на магазинах II , III и IV двойные; они механически между собой связаны, электрически изолированы один от другого и находятся на таком постоянном расстоянии, что при любом их положении они нажимают на два контакта выше расположенного магазина, между которыми находятся две декады его сопротивления. Общее сопротивление всей группы магазинов $II-III-IV$ и V между точками M и L постоянно независимо от положения рычагов $C-D$ и всегда равно $1000\ \Omega$ (см. приложение IV).

Прибор снабжен ключами особой конструкции, при постепенном нажиме коих сперва последовательно с гальванометром вводится балластное сопротивление $r_6 = 100000\ \Omega$, а затем оно

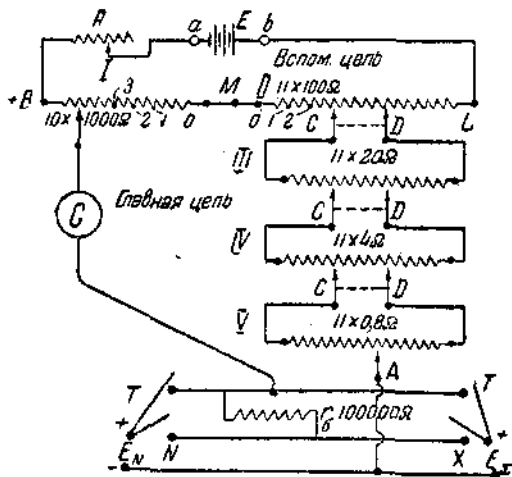


Рис. 208.

автоматически выключается. Для работы устанавливают во вспомогательной цепи ток в $0,0001 \text{ A}$ (реостатом R плюс постоянное сопротивление магазинов I и II), а затем, передвигая рычаги $C-D$, компенсируют сперва E_N , а затем искомое E_X . При этом в момент компенсации цена каждой декады магазина I равна $0,0001 \times 1000 = 0,1$ вольта, цена каждой из 9 декад магазина II (исключая, следовательно, те декады, на зажимах которых стоят рычаги $C-D$) равна $0,01$ вольта; цена каждой из 9 декад магазина III равна $0,00005 \times 20 = 0,001$ вольта; магазина IV — $0,0001$ вольта и, наконец, магазина V — $0,00001$ вольта (см. приложение V).

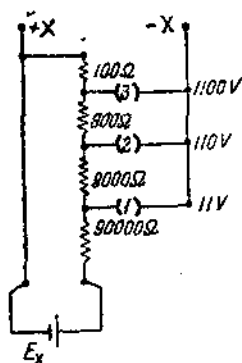


Рис. 209.

Компенсатор этот для расширения пределов измерения им напряжений свыше $1,1$ вольт снабжается делителем на общее сопротивление в $100\,000 \Omega$ (схема рис. 209), который своими зажимами $X-X$ привключается к зажимам X компенсатора.

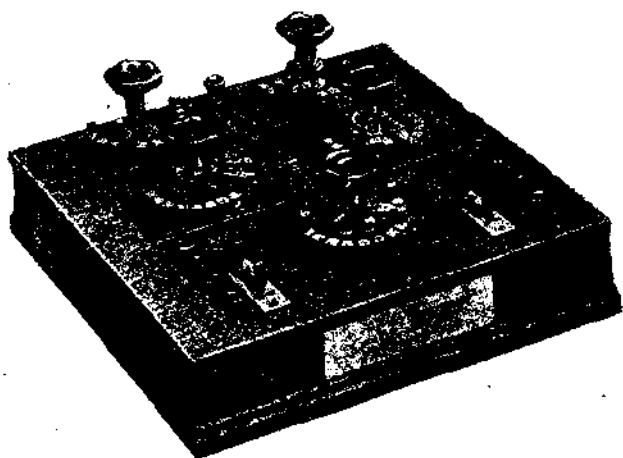


Рис. 210. Компенсатор системы Бруггера фирмы Гартман.

Свободные же зажимы делителя соединяются с исследуемым напряжением E_X . Для измерения напряжений до 11 вольт в гнездо делителя, обозначенное цифрой 1, вставляется штеп-

сель, и тогда к компенсатору подводится, как явствует из схемы делителя, $1/10$ часть всего измеряемого напряжения E_X .

Скомпенсировав E_X , надо отсчет по магазинам компенсатора увеличить в 10 раз.

При положении штепселя в гнездах 2 и 3 к компенсатору подводятся, соответственно, напряжения в $1/100$ и $1/1000$ от фактически измеряемого. Общий вид этого компенсатора см. на рис. 210.

Для измерения напряжений от 0,11 до 0,011 вольта к компенсатору прилагается особый шунт (рис. 211), присоединяемый своими зажимами $+KB$ и $-KB$ к его зажимам $+B$ и $-B$. Кроме того, ко второй паре за-

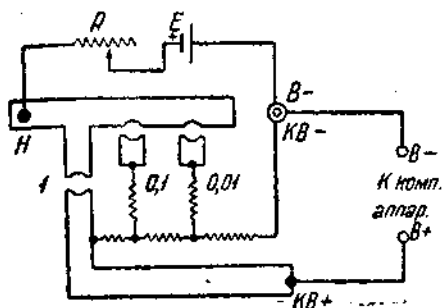


Рис. 211.

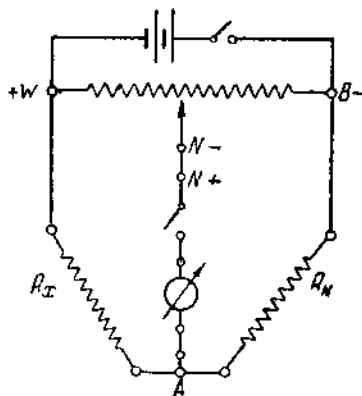


Рис. 212.

жимов шунта, обозначенных буквами H и $B-$, подключается вспомогательная батарея E с регулировочным реостатом R . Если штепсель на шунте вставлен в гнездо 1, то измерение ничем не отличается от описанного выше. Вставив штепсель в гнездо 0,1, можно измерять напряжения до 0,11 вольта. Если штепсель вставлен в гнездо 0,01, то предел измерения снижается до 0,011 вольта.

Наконец, если к зажиму $-X$ приключить измеряемое сопротивление R_X , а также один зажим добавочного магазина сопротивлений R_N , а свободные их зажимы подключить соответственно к точкам W и $-B$ компенсатора (схема рис. 212), то, присоединив батарею к зажимам $+W$ и $-B$ и замкнув накоротко зажимы $+N$ и $-N$, мы тем самым преобразуем компенсатор в мостик Витстона.

В момент равновесия мостика имеем

$$R_x = \frac{a}{1000 - a} \cdot R_N,$$

где a — число, отсчитанное по положениям рычагов на магазинах II, III, IV и V компенсатора.

4) **Компенсатор системы Франка**, являющийся прототипом компенсатора системы Паскавини, относится к числу малоомных приборов. Его принципиальная схема представлена на рис. 213; вспомогательная цепь состоит из 14 секций сопротивлений по 4 ома каждая (см. 0—14 на схеме) и калиброванной проволоки $O-B$ сопротивлением также в 4 ома. Работа на этом аппарате сводится к следующему: подсчитав, в зависимости от значения температуры, точную величину э.д.с. нормального элемента Вестона (например, 1,0179 вольта),

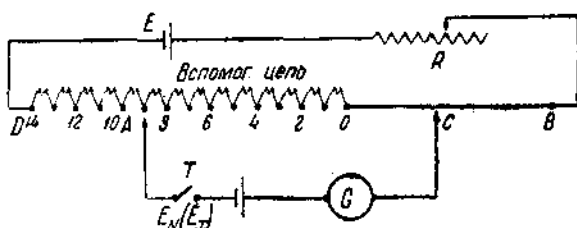


Рис. 213.

устанавливают движки A и C так, чтобы они своим положением на контактах сопротивлений и на шкале, размещенной под калиброванной проволокой, точно указывали э.д.с. элемента. Замкнув затем ключ T , регулируют сопротивление R так, чтобы гальванометр перестал давать отклонения.

Для этого момента падение напряжения на зажимах $B-D$ всего компенсатора, очевидно, равно 1,5000 вольта, а на зажимах каждой секции, — 0,1000 вольта.

Когда это достигнуто, то взамен E_N вводят измеряемую э.д.с. E_x и, отнюдь не изменяя сопротивления R (постоянство силы тока во вспомогательной цепи), передвигают ползунки A и C до тех пор, пока гальванометр вновь не укажет отсутствия тока. Положение движков A и C непосредственно укажет величину измеряемой э.д.с. E_x .

Компенсатор снабжается дополнительными приспособлениями (на рисунке не показанными), позволяющими умень-

ить пределы измерения до 0,15 и 0,015 вольта, а также балластным сопротивлением в цепи гальванометра, выключаемым по мере приближения к моменту компенсации.

5) Компенсатор системы Лидс и Нортруп отличается от описанного выше аппарата Франка существенным преимуществом. Он позволяет в любой момент проверить, сохранилась ли неизменной сила тока во вспомогательной цепи. Для этого аппарат имеет две компенсационные цепи: первая—цепь нормального элемента E_N (на схеме рис. 214 показана пунктиром), вторая—цепь измеряемой э.д.с. E_X (показана сплошными линиями).

Перед работой, в зависимости от величины э.д.с. нормального элемента, рычаг T на магазине R_1 устанавливают в та-

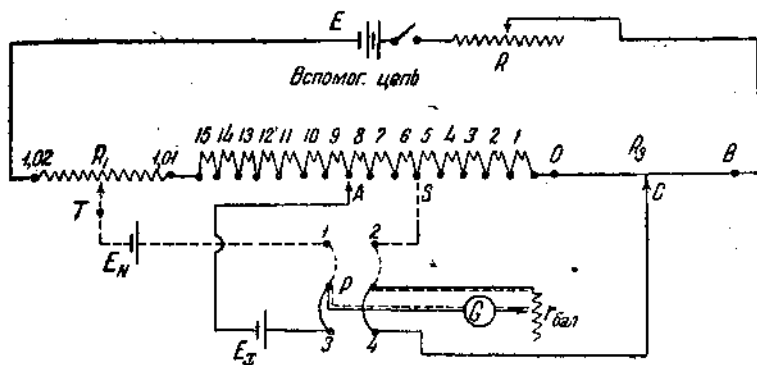


Рис. 214.

кое положение, чтобы его указатель расположился на том контакте этого реостата, против которого нанесено число, равное э.д.с. нормального элемента. В этом случае, и при условии, что сила тока во вспомогательной цепи отрегулирована сопротивлением R в точности равной 0,02 А, падение напряжения между точками S и T оказывается равным э.д.с. E_N .

Для компенсации измеряемой э.д.с. E_X , оставляют силу тока без изменения, а компенсации добиваются соответствующей установкой подвижных контактов A и C на магазине R_2 и калиброванной проволоке $O—B$. При этом величина измеряемой э.д.с. непосредственно отсчитывается по цифрам, обозначенным против контактов магазина R_2 и на шкале под калиброванной проволокой.

Подключение к вспомогательной цепи той или иной из компенсационных цепей осуществляется переключателем P , который может быть соединен с контактами 1—2 или 3—4.

Таким образом, в процессе работы всегда можно проверить, сохранилась ли постоянной сила тока во вспомогательной цепи, для чего достаточно перебросить ножи переключателя на контакты 1 и 2.

Аппарат снабжен дополнительным приспособлением (на рисунке не показанным), позволяющим достигнуть двух пределов для измеряемых э.д.с.—1,61 и 0,161 V.

б) Компенсатор Батчини по идее не отличается от компенсатора системы Франка в смысле порядка работы на нем.

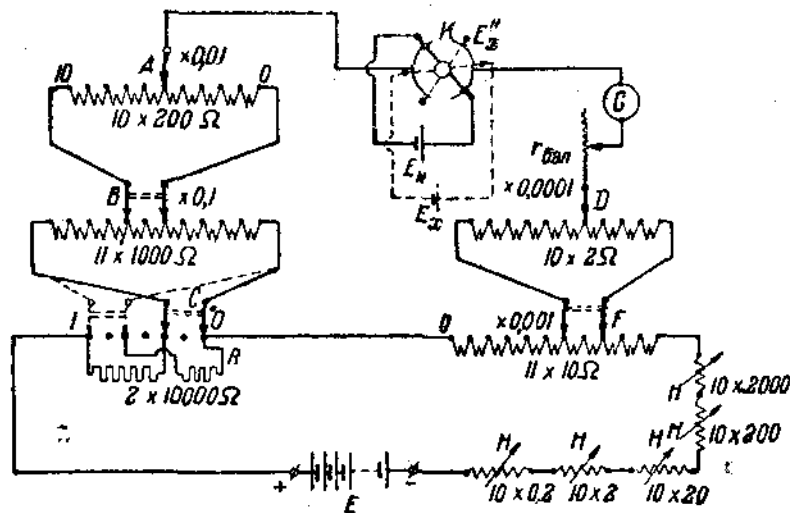


Рис. 215.

Он приспособлен для быстрого последовательного промера трех э.д.с., для чего снабжен переключателем (K на схеме рисунка 215). Сила тока в его вспомогательной цепи подбирается равной 0,0001 A; пределы измерения—до 1,9999 V.

Перед работой, в зависимости от величины э.д.с. нормального элемента, ставят указатели рычагов A , B , C , D и F на такие контакты, чтобы в сумме получилась E_N (например, 1,0181 вольт) и регулируют сопротивления H до достижения компенсации нормального элемента. Затем переключателем K вводят взамен E_N измеряемую э.д.с., оставляют сопро-

тивления H неизменными, а компенсации добиваются, изменяя положения рычагов A, B, C, D и F . Когда это достигнуто, то по положению указателей рычагов прочитывают величину измеренной э.д.с. Прибор весьма удобен в работе и отличается чрезвычайно солидной конструкцией, как и все изделия этой фирмы.

7) **Технические компенсаторы.** Помимо описанных выше точных и достаточно сложных по схеме или конструкции компенсаторов, многими фирмами строятся упрощенные типы их, сконструированные для измерений технического характера, например, для градуировки вольтметров. В этих компенсаторах, обычно, взамен отдельного источника для питания вспомогательной батареи, пользуются тем источником, напряжение которого требуется измерить. Другими словами, эти компенсаторы не приспособлены для измерения электродвижущих сил.

На схеме рис. 216 представлен технический компенсатор Кембриджской компании, включенный для выверки вольтметра V_X . В нем э.д.с. нормального элемента Вестона уравнивается специальным сопротивлением $R = 203,66 \text{ } \Omega$, и при этих условиях сила тока во вспомогательной цепи подбирается помощью декадныхмагазинов

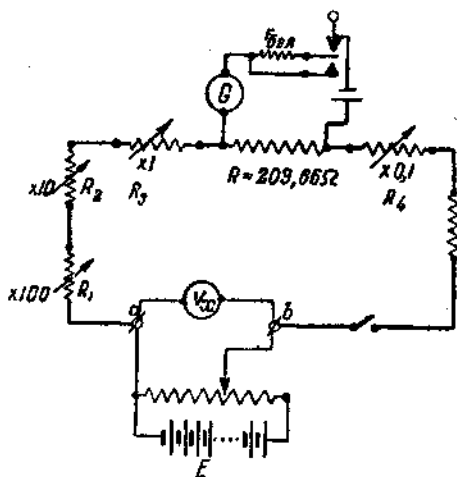


Рис. 216.

$R_1 - R_4$ равной $1,0183 : 203,66 = 0,005 \text{ A}$. В этом убеждаются по отсутствию отклонения гальванометра при выключенном полностью балластном сопротивлении $r_{\text{бал}}$ в его цепи (ключ T нажат вниз до отказа). Для этого момента нетрудно подсчитать напряжение на зажимах $a - b$ выверяемого вольтметра; оно равно произведению силы тока в $0,005 \text{ A}$ на сумму сопротивлений, введенных на магазинах $R - R_4$.

Против контактов декадныхмагазинов $R_1 - R_4$ написаны цифры, сумма коих непосредственно указывает величину напряжения между точками $a - b$, т. е. истинное напряжение на зажимах выверяемого вольтметра.

Технические компенсаторы строятся для измерения напряжений от 2 до 1000 V.

§ 32. Некоторые частные случаи измерения напряжений и э.д.с.

1) Измерение напряжений переменного тока и вне зависимости от его частоты и формы кривой может быть выполнено с помощью электрометра, одна пара квадрантов которого *В* соединяется с бисквитом *А*. В таком виде он присоединяется к измеряемой э.д.с. (схема рис. 217).

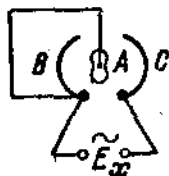


Рис. 217.

Для этого случая

$$U_B = U_C + E_X;$$

$$U_A = U_B = U_C + E_X \text{ и } U_B - U_C = E_X.$$

Зависимость между углом отклонения и величинами потенциалов частей электрометра выражается, как известно из его теории, формулой

$$\begin{aligned} \alpha &= C(U_B - U_C) \left\{ U_A - \frac{U_B + U_C}{2} \right\} = \\ &= C(U_B - U_C) \left\{ \frac{2U_B - (U_B + U_C)}{2} \right\} = \\ &= C \frac{(U_B - U_C)(U_B - U_C)}{2} = C \frac{E_X^2}{2}, \end{aligned}$$

откуда для нашего случая

$$\alpha = C^1 \cdot E_X^2.$$

2) Измерение э.д.с. поляризации E_p может быть осуществлено по схеме рис. 218, где G — гальванометр большого сопротивления r_g ; E — вспомогательная батарея с постоянной э.д.с. и притом большей, чем E_p ; E_N — нормальный элемент.

Поставив переключатель P на контакт a , отмечают угол α_a отклонения гальванометра, которое является результатом протекающего в цепи тока $i_a = \frac{E - E_p}{r_g}$. Затем ставят пере-

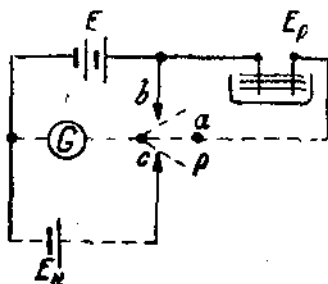


Рис. 218.

ключатель на контакт b и отмечают угол α_b отклонения, вызываемый током $i_b = \frac{E}{r_g}$. Наконец, наблюдают угол α_c отклонения при положении переключателя на контакте c , и когда $i_c = \frac{E_N}{r_g}$.

По данным этих наблюдений и при условии, что для гальванометра справедлива зависимость $I = C \cdot \alpha$, величина иско- мой э.д.с. поляризации определится как

$$E_p = E_N \frac{\alpha_b - \alpha_c}{\alpha_c} \dots \dots \text{(См. приложение (VII)).}$$

3) Измерение напряжений на зажимах источника на большом от него расстоянии требует для соединения его с прибором проводов соответствующей длины, вдоль которых при пользовании не электростатическими вольтметрами, расхо- дается некоторая часть U измеряемого напряжения U_x .

Следовательно, напряжение, учитываемое вольтметром, равно

$$U_1 = U_x - U.$$

Так как ток, протекающий через вольтметр, равен

$$i = \frac{U_x}{r_v + R} = \frac{U_x}{r_v + \frac{2L}{q}\rho},$$

где L , q и ρ — длина, сечение и удельная проводимость ма- териала проводов, а r_v — сопротивление вольтметра, то

$$U = i \cdot R = \frac{U_x}{\frac{2L}{q}\rho + r_v} \cdot \frac{2L}{q}\rho = U_x \frac{2\rho L}{2\rho L + q \cdot r_v} = C \cdot U_x$$

или

$$U_1 = U_x - U = U_x - CU_x = U_x (1 - C).$$

Другими словами, истинное напряжение на зажимах источ- ника равно измеренному вольтметром, если умножить это по- следнее на $(1 - C)$.

4) Измерение весьма малых напряжений постоянного и переменного токов может быть осуществлено при помощи устройства, схематически представленного на рис. 219.

Здесь M и K — весьма тонкие проволоочки из манганина и константана, спаянные в точках a и b . Ползунок d , передвигаемый по калиброванной проволоке $c-f$, позволяет уравновесить систему так, чтобы при протекании переменного тока по двум параллельным ветвям $c-c'$ и $f-f'$ точки a и b имели одинаковый потенциал. Постоянный ток протекает через гальванометр G .

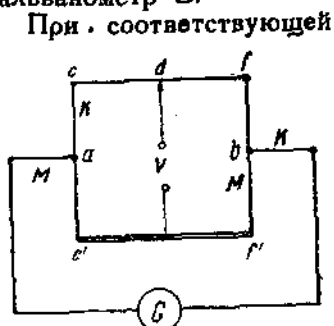


Рис. 219.

При соответствующей конструкции термопар явление Пельтье не сказывается, почему схема может быть отградуирована на постоянном токе.

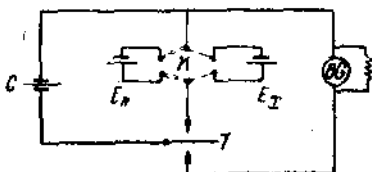


Рис. 220.

5) Измерение в.д.с. элементов и аккумуляторов по методу сравнения отклонений помощью баллистического гальванометра осуществляется по схеме 220, где C — конденсатор переменной емкости на пределы от 0,1 до 1 микрофарады; E_N и E_X — нормальный и испытуемый элементы; BG — баллистический гальванометр; T — ключ и K — коммутатор.

Поставив коммутатор на нормальный элемент, переводят на мгновение ключ T вверх, а затем вниз и наблюдают первое наибольшее отклонение α_N баллистического гальванометра. Для этого случая имеем

$$Q_N = C \cdot E_N = C_0 \cdot \alpha_N,$$

где C_0 — баллистическая постоянная гальванометра, т. е. то количество электричества, под влиянием которого подвижная система гальванометра отклоняется на одно деление шкалы.

Повторив затем опыт для исследуемого элемента, имеем

$$Q_X = C \cdot E_X = C_0 \cdot \alpha_X.$$

Из этих двух выражений имеем

$$\frac{E_N}{E_X} = \frac{\alpha_N}{\alpha_X},$$

$$E_x \Rightarrow E_N \frac{a_N}{a_x}.$$

Изменяя неоднократно емкость конденсатора C , повторяют опыт, и из полученных при этом значений для E_x берут среднее.

§ 33. Понятие об измерении напряжений и э.д.с. переменного тока по методу компенсации.

Выше уже упоминалось, что при измерениях вольтметром напряжений в цепях переменного тока показания прибора зависят от возможного фазного сдвига между протекающим через него током и напряжением на его зажимах вследствие самоиндукции его обмоток, а также потому, что на показаниях вольтметров сказываются частота и форма кривой тока. Здесь мы вкратце опишем метод компенсации в применении его к цепям переменного тока; соответствующие устройства носят наименование „комплексных компенсаторов“.

Принципиальная схема последних представлена на рис. 221, где M — эталонный вариометр взаимной индукции; R — чисто активное (безъёмкостное и безиндукционное) сопротивление и T — телефон или вибрационный гальванометр. Так как для компенсации напряжений переменного тока требуется не только равенство их по величине и совпадение по фазе, но также и по частоте, то измерительную схему должно питать током от того источника, напряжение U_x которого мы желаем скомпенсировать.

Соединив зажимы $c-d$, к которым приключено измеряемое напряжение, с зажимами $a-b$ компенсатора, регулируют сопротивление R и коэффициент взаимной индукции M до тех пор, пока звук в телефоне не прекратится, что и служит доказательством равенства напряжений U и U_x как по величине, так и по фазе. Если M , R и ток I , протекающий в цепи I компенсатора, известны, то U можно вычислить и изобразить графически; оно равно, как известно, $RI + jM\omega I$, сложением

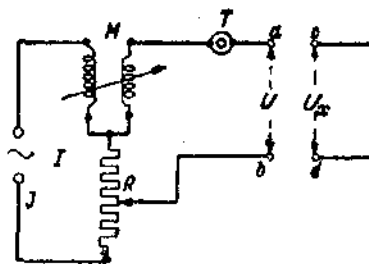


Рис. 221.

геометрически (рис. 222). Фирмой Гартман и Браун строятся специальные комплексные компенсаторы, принципиальная схема коих представлена на рис. 223.

Он состоит из двух параллельно натянутых калиброванных проволок r_1 и r_2 , соединенных между собою металлически в средних точках A_1 и A_2 . Концы их соединены с первичной S_1 и вторичной S_2 обмотками особого воздушного (без железного сердечника) трансформатора T , коэффициент M взаимной индукции которого точно известен. Параллельно проволоке r_1 и последовательно с проволокой r_2 включены чисто активные

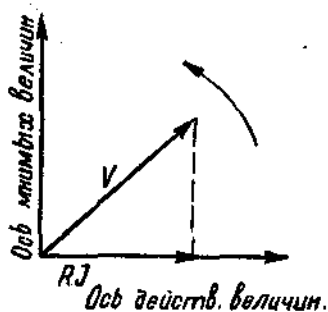


Рис. 222.

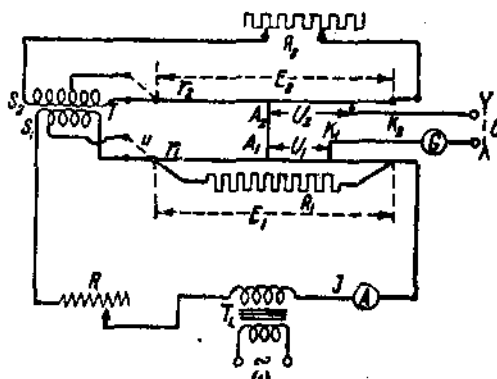


Рис. 223.

сопротивления R_1 и R_2 . Скользящие контакты K_1 и K_2 , к которым подводится измеряемое напряжение U_x , могут перемещаться по всей длине проволок.

Схема питается через особый трансформатор T_1 и регулировочное сопротивление R .

Обмотки воздушного трансформатора секционированы (переключатели (u) с той целью, чтобы можно было сдвинуть по фазе на 90° напряжения E_1 и E_2 на зажимах калиброванных проволок. Эти напряжения при силе первичного тока, равной I и известном коэффициенте взаимной индукции M трансформатора, выражаются так:

$$\bar{E}_1 = E_1 = I \cdot \frac{r_1 \cdot R_1}{r_1 + R_1};$$

$$\bar{E}_2 = E_2 = M \cdot \omega I \frac{r_2}{r_2 + R_2}.$$

Если при постоянных r_1 , r_2 и R_1 для известной угловой скорости ω подобрать сопротивление R_2 так, чтобы

$$\frac{r_1 \cdot R_1}{r_1 + R_1} = \frac{M \omega r_2}{R_2 + r_2} = K,$$

то для этого случая $E_1 = E_2$, что позволяет вычислить цену единицы длины калиброванных проволок в единицах напряжения.

Например, для одного типа компенсатора при $R_1 = 0,16 \Omega$ и $I = 0,125 \text{ мА}$, $E_1 = E_2 = 20 \text{ мВ}$.

К прибору прилагается градуировочная кривая для R_2 , пользуясь которой и приняв во внимание положение переключателя u , а также угловую скорость ω , устанавливают R_2 и компенсируют измеряемое напряжение. Для этого передвигают по проволокам r_1 и r_2 ползунки K_1 и K_2 до тех пор, пока прибор G (вибрационный гальванометр или телефон) не даст нулевого отклонения или минимума звука.

Величины составляющих U_1 и U_2 измеряемого напряжения (диаграмма рис. 224) при этом отсчитываются непосред-

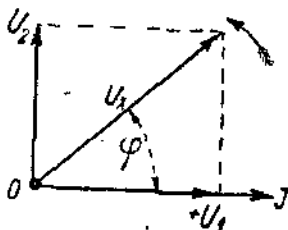


Рис. 224.

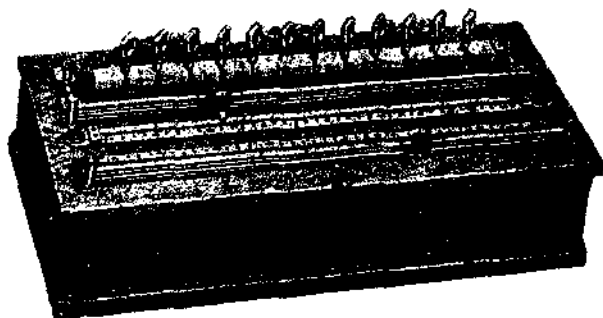


Рис. 225. Комплексный компенсатор фирмы Гартман.

ственно по шкалам, находящимся под калиброванными проволоками, и строятся графически.

Искомое напряжение равно

$$U_x = \sqrt{V_1^2 + V_2^2}, \text{ а } \operatorname{tg} \varphi = \frac{V_2}{V_1}.$$

Если включить в компенсатор гальванометр постоянного тока, то прибором можно пользоваться как обычным компенсатором; проволока r_2 тогда не работает. Общий вид этого компенсатора см. рис. 225.

§ 33. Приборы для наблюдения и записи формы кривых тока и напряжения.

В цепях переменного, а также изменяющегося по величине постоянного токов часто необходимо иметь возможность не только наблюдать характер изменения тока или напряжения по времени, но и записывать их фотографически. Потребность измерений этого рода возникает почти во всех случаях, когда мы изучаем изменяющийся электрический процесс, например, при исследованиях коммутации в электрических машинах, при изучении явлений в телеграфно-телефонных и радиоцепях, а также при изучении устанавливающихся или прекращающихся электрических процессов.

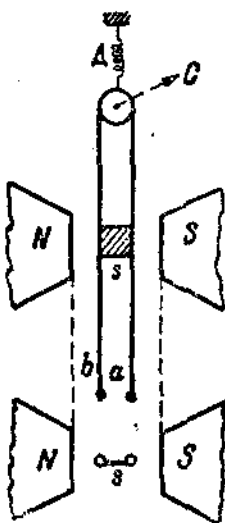


Рис. 226.

Приборы, выполняющие это назначение, носят общее наименование „осциллографов“, а записанные ими графики называются осциллограммами.

Приборы эти по принципу действия разделяются, в основном, на осциллографы с подвижной системой, обладающей заметной инерцией, и на осциллографы, подвижная система которых инерцией не обладает.

1) Принцип действия первых был впервые предложен Блонделем, который использовал для этой цели идею устройства приборов магнитоэлектрической системы, но заменил в них гальванометрическую рамку тонкой алюминиевой проволокой или бронзовой ленточкой длиной в 2—3 см.

Ленточка закрепляется своими концами в точках a и b (схемы рис. 226) неподвижно, а серединой перекинута через ролик C , оттягиваемый пружинкой D вверх. Посередине длины этой проволоочной петли, иногда называемой „шлейфом“, прикреплено маленькое зеркальце S , и вся эта подвижная система помещается в латунной трубке (на схеме не показана), в которую наливают парафиновое масло, дабы создать для подвижной

системы надлежащее успокоение. Трубка со шлейфом закрепляется неподвижно в междуполюсном пространстве сильного электромагнита $N-S$. Проволочная петля, при пропускании через нее тока, в силу электромагнитного взаимодействия между током и магнитным полем, поворачивается вокруг оси на некоторый угол. Если момент инерции петли ничтожно мал и через нее пропустить изменяющийся по величине или переменный ток, то можно достигнуть того, что колебания петли будут не только отображать в точности характер изменений тока, но и будут им пропорциональны.

Это, очевидно, возможно в том только случае, когда собственный период колебания петли шлейфа далеко не совпадает с периодом изменений тока, проходящего через нее.

В таком виде прибор годен уже не только для изучения характера изменений силы тока, но и для их измерения.

Если через застекленное отверстие в латунной трубке шлейфа направить на его зеркальце от сильного источника света пучок параллельных лучей, то, отразившись от зеркальца, они дадут на некотором экране световую точку; при изменениях угла поворота зеркальца точка эта расплывается на экране в более или менее длинную световую полоску. Чтобы развернуть на плоскость кривую, по которой изменяется сила протекающего через шлейф тока, поступают так: экран заменяют цилиндром, на который накинута фотографическая бумага, а поверх него надевают второй цилиндр с узкой прорезью вдоль его образующей. Если теперь направить световую полоску, отраженную от зеркальца прибора, вдоль прорези наружного неподвижного цилиндра и вращать с равномерной скоростью и поступательно внутренний цилиндр, то на фотографической бумаге запечатлевается развертка того процесса, под влиянием которого колебалась петля шлейфа осциллографа.

По известной скорости вращения цилиндра можно определить масштаб времени для полученной развертки, а по постоянной (или чувствительности) прибора — масштаб ординат кривой.

Для непосредственного наблюдения изучаемой кривой цилиндр заменяется многогранным зеркалом, вращая которое синхронно числу периодов исследуемого тока, мы на нем увидим кривую этого тока. Ось абсцисс этой кривой создается помощью второго отражательного зеркальца, укрепленного неподвижно на электромагните. В осциллографах этой системы, изготовляемых фирмой Сименс и Гальске (рис. 227),

вращающееся зеркало заменено экраном в виде цилиндра, наружная поверхность которого очерчена по архимедовой спирали (кривая, у которой радиус-вектор из центра к любой точке кривой, пропорционален углу его поворота из начального положения). При соблюдении синхронизма между частотой тока, протекающего через шлейф, и числом оборотов подобного экрана, на последнем обозначится неподвижная

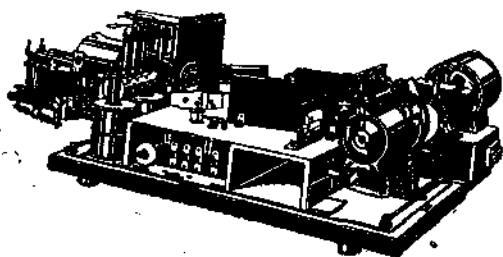


Рис. 227. Внутренний вид осциллографа фирмы Сименс.

кривая изучаемого тока. Если синхронизм соблюден недостаточно точно, то кривая перемещается вдоль поверхности экрана.

Эти осциллографы снабжаются приспособлением для фотографирования полученных кривых, электродвигателем для вра-

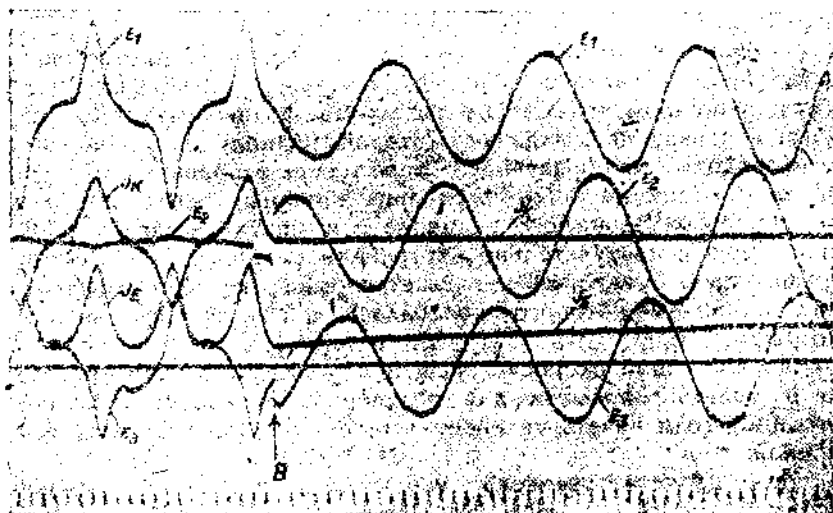


Рис. 228. Осциллограмма.

щения цилиндра и экрана, шунтами и добавочными сопротивлениями. Число шлейфов, могущих одновременно работать

в последних моделях, достигает шести. Это позволяет одновременно изучать целый ряд связанных между собою явлений, например, одновременно снимать несколько кривых тока, напряжения и т. д. (рис. 228).

В нижеследующей таблице приведены данные шлейфов, изготовляемых фирмой Сименс к осциллографу. Шлейфы эти взаимозаменяемы, что расширяет область применения этого прибора.

Типы шлейфов	Частота собственных колебаний петель в секунду	Сопротивление петель в омах	Допустимая сила тока в А	Постоянная шлейфа, т. е. сила тока, вызывающая отклонение зайчика на 1 мм
1	6000	1	0,1	$3,10^{-3}$
2	12000	1	0,1	$5,10^{-3}$
3	3000	1,1	0,1	$3,10^{-3}$
4	3000	2,5	0,02	$4,10^{-4}$
5	2000	4,5	0,004	$7,10^{-5}$
6	600	4,5	0,004	$7,10^{-5}$

На рис. 229 показан общий вид шестишлейфного прибора, а на схеме рис. 230 представлена картина хода основных лучей в осциллографе и способ включения в цепь двух одновременно работающих шлейфов. Здесь приняты следующие обозначения: L — источник света в виде дуги или точечной лампы; λ — линза; K_1 и K_2 — вспомогательные отражающие зеркала; S_1 и S_2 — зеркала шлейфов; Θ — экран; M — мотор; $r_{ш}$ шунт r_g — добавочное сопротивление.

Из данных, приведенных в таблице, видно что этот осциллограф неприменим для записи кривых тока высокой частоты, ибо петля шлейфа уже не успевала бы следовать за изменениями тока.

2) Принцип действия осциллографов с подвижной системой, не обладающей инерцией, основан на отклонении потока

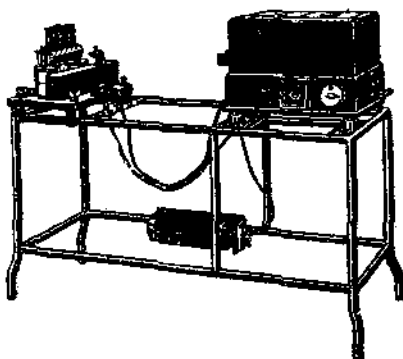


Рис. 229. Внешний вид шестишлейфного осциллографа фирмы Сименс.

электронов в магнитном и электростатическом полях, следующего точно за колебаниями этих последних, вне зависимости от частоты тока.

Осциллографы эти называются катодными; они применимы для любых частот, но недостаточно точны. Их используют, по преимуществу, при качественных исследованиях в цепях высокой частоты, и поэтому они рассматриваются подробно в специальных курсах измерений.

3) Указатели формы кривой тока дают возможность следить за формой кривой только с качественной стороны. Они просты по конструкции, удобны в эксплуатации. Действие их основано на следующем: между полюсами постоянного магнита висит катушка на подвесе, который отрегулирован так, что собственные колебания катушки могут быть настроены в ре-

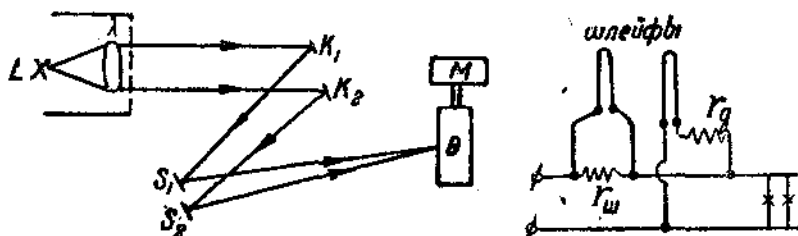


Рис. 230.

зонанс с частотой проходящего по ее обмоткам тока. Катушка снабжена зеркальцем, на которое направляется световой луч от лампы накаливания. Отраженный от зеркальца луч падает на систему зеркал, вращающихся синхронно с частотой исследуемого тока и развертывающих колебания луча в виде кривой, обрисовывающейся на матовом прозрачном экране прибора.

§ 35. Измерение количества электричества.

Методы измерения количества электричества разнятся в зависимости от величины и характера его протекания по цепи. Если, как например, в электроосветительной или технической сети, электричество протекает длительный промежуток времени в относительно больших количествах и при постоянном напряжении, то оно измеряется помощью особых приборов, называемых счетчиками и ампер-часов. В тех же случаях, когда электричество протекает в цепи весьма короткий промежуток

времени и в незначительных количествах, как, например, в момент подключения кабеля к источнику энергии, когда в течение первых долей секунды он, как некая емкость, заряжается, или же при магнитных измерениях, пользуются по преимуществу баллистическими методами измерения.

1) Счетчики ампер-часов по принципу их действия, подразделяются на счетчики с прерывистой и с непрерывной регистрацией.

К первой группе относятся так называемые электролитические счетчики, основанные на законах электролиза. Они работают подобно вольтаметрам, и учет протекшего через них количества электричества ведется по весу или по объему выделившихся веществ.

Наибольшим распространением среди значительного количества подобных систем пользуются ртутные счетчики, в которых ртуть, выделяющаяся при электролизе из раствора двойной соли иодистой ртути и поташа, накапливается в стеклянной градуированной измерительной трубке.

Когда последняя заполнена, прибор переворачивают, ртуть из трубки переливается обратно в сосуд счетчика, и последний вновь готов для работы.

Счетчики ампер-часов с непрерывной регистрацией строятся нижеследующих систем: магнито-моторные, электромагнитные, ртутные и тепловые. Из них наибольшим распространением пользуются магнито-моторные счетчики.

По принципу действия это небольшие электродвигатели постоянного тока с магнитной системой, образованной двумя подковообразными постоянными магнитами $N-S$ (схема рис. 231).

Якорь имеет вид диска A из тонких алюминиевых кружков, между которыми помещаются 3 плоских катушки, образующие его обмотку. От концов катушек вдоль вертикальной оси $a-a$ (вала) к коллектору k подведены проводники. Нагрузочный ток I в точке B разветвляется; его меньшая часть проходит через щетки b и обмотку якоря счетчика, а большая—через шунт $г$. Соотношение этих токов по силе, а следовательно,

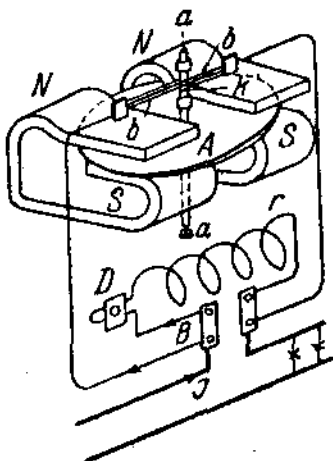


Рис. 231.

и постоянная счетчика регулируется посредством движка *D*. Ось якоря системой зубчаток связана с особым счетным механизмом, учитывающим число оборотов якоря (на схеме не показан).

При протекании тока через обмотку якоря приходит во вращательное движение, причем развиваемая им механическая мощность поглощается, в виде энергии токов Фуко, в алюминиевых дисках.

Секундное число оборотов n_s якоря счетчика при соответствующей его конструкции может быть сделано пропорциональным силе нагрузочного тока, т. е. $n_s = CI$.

Тогда количество электричества, протекшего во время $t_{\text{сек}}$, пропорционально полному числу n оборотов его якоря, т. е.

$$It = Q = \frac{1}{C} n_s t = C' \cdot n \quad . \quad . \quad (\text{См. приложение VII})$$

Простота конструкции, а следовательно, и дешевизна этих счетчиков наряду с тем, что при выключенной нагрузке ток через них не течет, и в них не расходуется энергия (в отличие от счетчиков ватт-часов), делает их наиболее употребительными. Строятся эти счетчики для постоянного тока и для нагрузки от 1,5 до 10000 А. Счетчики ампер-часов для переменного тока еще не вышли из стадии лабораторной разработки.

Выверка счетчиков ампер-часов может быть осуществлена двояким путем: можно сравнивать испытуемый счетчик с другим точным, или определять его постоянную по показаниям точных

амперметра и вольтметра, учитывая время.

В первом случае (см. схему на рис. 232) счетчики вводятся последовательно в нагрузочную цепь, в которой их и заставляют работать некоторый промежуток времени (не менее $1/2$ часа). Затем сличают показания их счетных механизмов и определяют поправку.

Во втором случае вводят в цепь испытуемый счетчик, а взамен эталонного счетчика — точный амперметр; записывают начальные показания первого и по секундомеру замыкают цепь на 15-30 минут. Во время опыта напряжение и силу тока поддерживают постоянными и отсчитывают

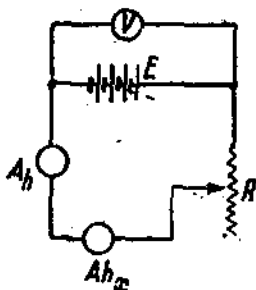


Рис. 232.

число n оборотов якоря. Разомкнув цепь, подсчитывают время t минут его работы и количество It протекшего через счетчик электричества. Тогда постоянная счетчика определится как $C = \frac{It}{60n}$ ампер-часов на один оборот его якоря.

Опыт повторяется для различных значений силы нагрузочного тока, например, для 10%, 25%, 50% и 100% от номинальной нагрузки, и из полученных постоянных берется среднее.

Полезно также провести опыт и при некоторой (5—10%) перегрузке счетчика.

2) Баллистический метод измерения небольших и кратковременно протекающих количеств электричества основывается на известном свойстве баллистического гальванометра, у которого первый и наибольший угол отклонения подвижной системы пропорционален всему протекшему через прибор количеству электричества, т. е. $Q = C_{бал} \alpha$, где $C_{бал}$ — баллистическая постоянная прибора и α — первый и наибольший угол отклонения его подвижной системы.

Зная постоянную прибора, которая определяется описанными выше способами, и отсчитав отклонение, мы непосредственно измерим и количество электричества.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ VII.

1. Почему при измерениях силы тока и напряжения в цепях постоянного тока редко пользуются приборами электродинамической системы и тепловыми?
2. Перечислите основные требования, предъявляемые к амперметрам и вольтметрам, и укажите способ их включения в цепь для измерений.
3. Перечислите те предосторожности и правила, которые необходимо соблюдать при пользовании приборами различных систем.
4. В чем идея и преимущество компенсационного метода измерения силы тока?
5. В чем трудность измерения в.д.с. и напряжений, и какие условия необходимо выполнить для точного измерения их величин?
6. Каких систем приборы применяются при измерениях напряжений и в.д.с. при постоянном и переменном токах?
7. Можно ли не расширить, а уменьшить пределы измерения данным вольтметром с помощью измерительного трансформатора?
8. Чему равна постоянная C вольтметра, включенного через измерительный трансформатор с коэффициентом трансформации, равным 5?
9. В чем идея делителя напряжения?
10. Какой из косвенных методов измерения в.д.с. наиболее применим при сильно поляризующихся элементах?
11. В чем идея и преимущество метода компенсации, и какие измерения можно производить помощью компенсаторов?

12. В чем преимущество компенсаторов системы Рапса?
13. В чем отличие при измерениях компенсаторами напряжений и в.д.с.?
14. В чем особенности измерения напряжений переменного тока по методу компенсации?
15. В чем состоит основное преимущество компенсатора системы Лиде и Нортруп?
16. Можно ли помощью технических компенсаторов измерять в.д.с.?

ПРИЛОЖЕНИЯ К ГЛАВЕ VII.

I.

$$\frac{I_1}{\alpha_1} = \frac{200 \cdot 10^{-5}}{200} = 10^{-5} \text{ А.}$$

Если m -взять равным 10, то

$$\frac{R_N}{m} = \frac{1000}{10} = 100, \text{ а } I_2 = 10^{-5} \cdot 100 \cdot \alpha_2 = 10^{-3} \alpha_2 \text{ и т. д.}$$

II.

При измерениях токов большой силы схема опыта видоизменяется, как показано на рис. 233, где AB — калиброванная проволока; $r_{ш}$ — шунт

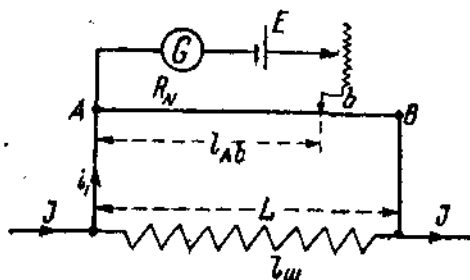


Рис. 233.

такого сопротивления, чтобы при заданной силе измеряемого тока I могло быть осуществлено неравенство $I \cdot r_{ш} > E_N$. Например, для нормального элемента с в.д.с. $E_N = 1,019$ вольт и силе тока до 200 ампер шунт должен обладать сопротивлением порядка 0,01 ома. Для момента компенсации имеем

$$(I - i_1) \cdot r_{ш} = i_1 \cdot r \cdot L$$

$$\text{и } I = \frac{i_1(rL + r_{ш})}{r_{ш}},$$

где L — длина калиброванной проволоки, а r — ее сопротивление на единицу длины.

Кроме того,

$$i_1 \cdot r \cdot l_{Ab} = E_N \text{ и } i_1 = \frac{E_N}{r l_{Ab}},$$

Из этих выражений получаем

$$I = E_N \cdot \frac{r_{ш} + L \cdot r}{l_{Ab} \cdot r \cdot r_{ш}} = \frac{E_N}{l_{Ab}} \cdot \left(\frac{1}{r} + \frac{L}{r_{ш}} \right) = C \cdot \frac{E_N}{l_{Ab}}.$$

III.

Фактическое напряжение

$$V = I \cdot R_1,$$

где

$$I = \frac{100}{R_1 + R_2 + r} = 6,25 \text{ A}$$

и, следовательно,

$$V = 6,25 \cdot 10 = 62,5 \text{ V.}$$

Измеряя это напряжение первым вольтметром, мы получим

$$V = I \frac{R_2 \cdot 100}{R_2 + 100}, \text{ где } I = \frac{100}{R_1 + r + \frac{R_2 \cdot 100}{R_2 + 100}} = 6,62 \text{ A,}$$

т. е.

$$V = 6,62 \cdot 9,09 = 60,17 \text{ V.}$$

Работая со вторым вольтметром, получим

$$V = I \frac{R_2 \cdot 100000}{R_2 + 100000}, \text{ где } I = \frac{100}{R_1 + r + \frac{R_2 \cdot 100000}{R_2 + 100000}} = 6,254 \text{ A.}$$

т. е.

$$V = 6,25 \cdot 9,999 = 62,493 \text{ V.}$$

IV.

Сопротивление между точками M и L этой комбинации магазинов можно вычислить, если представить схему в таком виде (рис. 234). Тогда равнодействующие сопротивления равны между точками f — g

$$\frac{(10 \cdot 0,8) \cdot 8}{10 \cdot 0,8 + 8} = 4 \Omega,$$

между точками c и d

$$\frac{(36 + 4) \cdot 40}{36 + 4 + 40} = 20 \Omega,$$

между точками a и L

$$\frac{(20 + 180) \cdot 200}{20 + 180 + 200} = 100 \Omega,$$

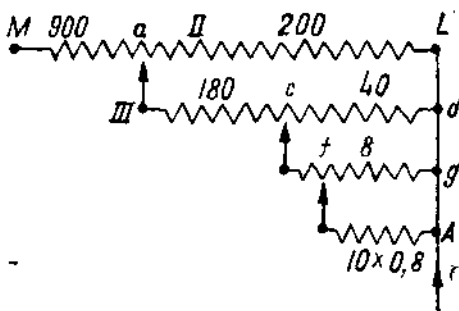


Рис. 234.

откуда сопротивление между точками M и L равно $900 + 100 = 1000 \Omega$ оно независимо от положения рычагов $C-D$ на контактах магазинов и полностью входит во вспомогательную цепь.

V.

Ток в $0,0001 \text{ A}$, подходящий к точке a разветвления схемы рис. 234, делится, очевидно, пополам, и та его часть, которая протекает по декадам магазина III, вызывает в сопротивлении каждой из них падение напряжения, равное $0,00005 \times 20 = 0,001 \text{ V}$. Ток в $0,00005 \text{ A}$, притекающий к точке с разветвления, вновь делится пополам и вызывает в каждой декаде магазина IV падение напряжения, равное $0,000025 \times 4 = 0,0001 \text{ V}$, и т. д.

VI.

$$\frac{E - E_p}{r_g} = C \alpha_a; \quad \frac{E}{r_g} = C \alpha_b$$

и

$$\frac{E_N}{r_g} = C \alpha_c.$$

Отсюда

$$E - E_p = C \alpha_a r_g; \quad E = C \alpha_b r_g;$$

и

$$E_N = C \alpha_c r_g,$$

но из последнего выражения вытекает, что

$$C \cdot r_g = \frac{E_N}{\alpha_c}.$$

Подставляя это значение в остальные уравнения, получаем

$$E = \frac{E_N}{\alpha_c} \alpha_b; \quad E - E_p = \frac{E_N}{\alpha_c} \alpha_b$$

или

$$\frac{E_N}{\alpha_c} \alpha_b - E_p = \frac{E_N}{\alpha_c} \alpha_a.$$

откуда

$$E_p = \frac{E_N}{\alpha_c} \alpha_b - \frac{E_N}{\alpha_c} \alpha_a$$

или окончательно

$$E_p = E_N \frac{\alpha_b - \alpha_a}{\alpha_c}$$

VII.

Из теории электродвигателя известно, что его вращающий момент при неизменном магнитном потоке пропорционален силе тока, т. е. $M_b = C_1 \cdot I$, а момент торможения его якоря от токов Фуко пропорционален скорости вращения, т. е. $M_T = C_2 \cdot n_S$, где C_1 и C_2 — постоянные счетчика, зависящие от его конструкции.

Когда движение якоря установилось, то $M_b = M_T$, или $C_1 \cdot I = C_2 n_S$, откуда

$$n_S = \frac{C_1}{C_2} \cdot I = C_3 \cdot I.$$

Уравнение напряжений в электродвигателе, как известно, может быть представлено в таком виде: $I \cdot R = U - E$, где R —сопротивление его якорной обмотки; U —приложенное к его зажимам напряжение и E —индуцируемая в его якорной обмотке противоэлектродвижущая сила, пропорциональная скорости вращения, т. е.

$$E = C_4 \cdot n_s.$$

Отсюда

$$I = \frac{U - E}{R} = \frac{U - C_4 n_s}{R} = \frac{U - C_4 C_3 I}{R},$$

или

$$I = \frac{U}{R + G_4 \cdot C_3} = \frac{U}{R_1},$$

а также

$$n_s = C_3 \frac{U}{R_1},$$

где U — напряжение на зажимах $B - B_1$ счётчика, равное в свою очередь

$$U = I \frac{R_1 S}{R_1 + S}.$$

Следовательно,

$$n_s = C_3 \frac{U}{R_1} = C_3 \cdot I \frac{R_1 \cdot S}{R_1 + S} \cdot \frac{1}{R_1} = C \cdot I$$

или

$$I = \frac{n_s}{C}.$$

Если за время t якорь счётчика сделает n оборотов, то

$$I \cdot t = \frac{n_s t}{C} = \frac{1}{C} \cdot n = C' \cdot n.$$

ГЛАВА VIII.

Методы и приборы для измерения сопротивлений.

§ 36. Методика измерения сопротивлений.

Методика измерения сопротивлений является наиболее широко разработанной областью электрометрии. Поэтому здесь мы сможем привести только основные и наиболее распространенные методы и дать краткое описание некоторых приборов.

Пользование тем или иным из приводимых ниже методов зависит от средств, которыми располагает экспериментатор, от величины измеряемого сопротивления и желаемой точности его определения. Кроме того, при выборе метода решающую

роль могут иногда сыграть свойства измеряемого сопротивления, как, например: большая зависимость его величины от температуры или силы тока; способность его сохранять в себе остаточный заряд (сопротивление изоляции кабеля); возникновение в нем под влиянием тока поляризационных явлений (сопротивление элементов) и, наконец, зависимость удельного сопротивления его материала от степени влажности.

В электроизмерительной практике принято разделять сопротивления, в зависимости от их величины, на 3 группы:

- а) сопротивления весьма малые, меньше 1 ома,
- б) " средние от 1 до 100 000 ом и
- в) " весьма большие, более 100 000 ом.

Это обуславливается тем, что измерение малых и больших сопротивлений требует соблюдения некоторых дополнительных условий, которые будут упомянуты в дальнейшем. и которые необходимы как гарантия более точных результатов.

Так как сопротивления средней величины встречаются в практике чаще всего, и притом методы их измерения, в некоторой своей части, являются общими также для малых и больших сопротивлений, то мы с них и начнем.

§ 37. Измерение сопротивлений средней величины.

1. Метод амперметра и вольтметра осуществляется по схеме рис. 235 (а или б), где R_x — измеряемое, а R — регулировочное сопротивления; E — источник тока; A — амперметр с сопротивлением r_a ; V — вольтметр с сопротивлением r_v и T — ключ (рубильник).

Работа по этим схемам сводится к одновременному отсчету показаний приборов и вычислению искомого сопротивления.

Приближенное значение последнего в обоих случаях определяется как

$$R'_x = \frac{U}{I}.$$

Для подсчета же его истинного значения надо, очевидно, исходить из следующих выражений:

для схемы (а)

$$R_x = \frac{U}{I - i} = \frac{U}{I} = \frac{U}{I - \frac{U}{r_v}}, \dots \dots \dots 1$$

Для схемы (б)

$$R_x = \frac{U - I' r_a}{I'} \dots \dots \dots 2$$

т. е. ввести поправки: для первого случая на силу тока i , который ответвляется через цепь вольтметра, а во втором на величину падения напряжения в обмотке амперметра.

Сравнивая выражения 1 и 2, мы видим, что подсчет сопротивления по приближенной формуле для первого случая тем более ошибочен, чем меньшим сопротивлением обладает вольтметр, или чем больше измеряемое сопротивление по сравнению с сопротивлением вольтметра.

Во втором случае ошибка тем больше, чем меньшим сопротивлением обладает измеряемый объект.

При учете поправок оба способа равноценны по результатам.

Величина ошибки в процентах, которую мы допускаем в случае пренебрежения поправкой, равна

для схемы (а)

$$\Delta r_1 = \frac{R_x - R'_x}{R_x} 100 = \frac{R'_x}{r_v} \cdot 100$$

для схемы (б)

$$\Delta r_1 = \frac{R'_x - R_x}{R_x} \cdot 100,$$

а так как

$$R_x = \frac{U - I' \cdot r_a}{I'} = \frac{U}{I'} - r_a = R'_x - r_a,$$

то

$$\Delta r_1 = \frac{R'_x - R'_x + r_a}{R'_x - r_a} \cdot 100 = \frac{r_a}{R'_x - r_a} \cdot 100.$$

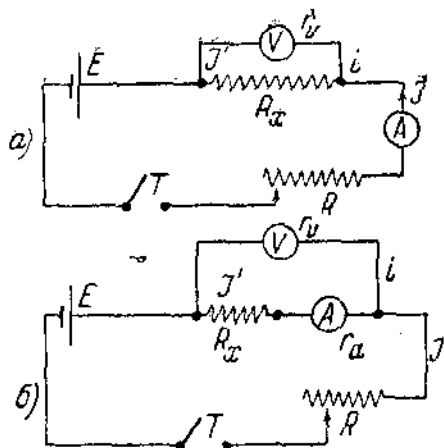


Рис. 235.

Если мы хотим выполнить измерение по схеме *a* и при том с погрешностью, не превышающей наперед заданной величины, например, 1%, а поправку вводить не собираемся, то надо озаботиться подбором вольтметра определенного сопротивления или же снабдить имеющийся у нас вольтметр соответствующим добавочным сопротивлением $r_{доб}$.

Подсчет величины сопротивления вольтметра (вместе с добавочным к нему), гарантирующей нам выполнение поставленного условия, производится следующим образом.

По условию

$$\Delta r_1 = \frac{R'_x}{r_v + r_{доб}} 100 = 1\%,$$

откуда необходимое суммарное сопротивление, гарантирующее нам ошибку не свыше 1% (без учета ошибок показаний самих приборов и ошибок наблюдателя)

$$R_{общее} = r_v + r_{доб} = 100 R'_x.$$

Точность измерений по этому способу зависит от точности приборов, точности и величины отсчетов показаний, а также от величины переходных сопротивлений в тех местах цепи, где в нее включаются измеряемое сопротивление и измерительные приборы. Чем эти переходные сопротивления больше, тем большая ошибка будет допущена.

Метод этот очень удобен, когда желательно знать величину некоторого сопротивления, находящегося под током, или выяснить зависимость его от силы тока (например, ламп накаливания, электрических машин и т. п. приемников во время работы). Если этим способом измеряется сопротивление обмоток, навитых на железные сердечники, то для предохранения вольтметра от экстра-токов необходимо цепь его снабдить ключом и размыкать ее до размыкания главной цепи.

2. Метод замещения основан на сравнении измеряемого сопротивления R_x с известным (эталонным) R_N ; в зависимости от величины измеряемого сопротивления, он осуществляется по одному из вариантов *a* или *б* схемы рис. 236. На схеме приняты те же обозначения, что и раньше, а буквой *G* обозначен гальванометр.

Метод этот применим для измерения сопротивлений порядка от 2000 до 100 000 ом; меньший предел обусловлен принципом метода, а больший — затруднительностью поды-

сказания сравнительного сопротивления большой величины и достаточно точного.

а) Измеряемое сопротивление и гальванометр включаются последовательно (схема а), и опыт сводится к отсчету показаний α_X и α_N гальванометра для двух положений переключателя P : сперва при введении в цепь измеряемого, а затем — известного сопротивления.

Тогда, пренебрегая внутренним сопротивлением источника, и при условии, что э.д.с. последнего постоянна, имеем

$$I_X (R_X + r_g) = I_N (R_N + r_g),$$

откуда

$$R_X = \frac{I_N}{I_X} (R_N + r_g) - r_g = \frac{\alpha_N}{\alpha_X} (R_N + r_g) - r_g \quad \dots (3)$$

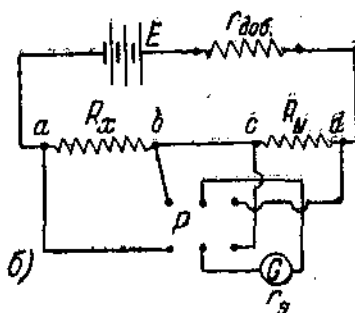
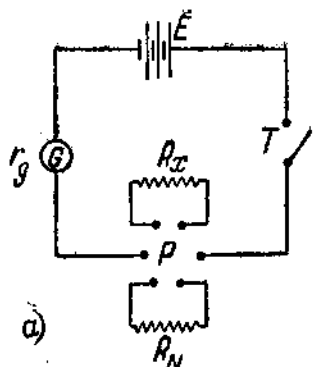


Рис. 236.

Если сравнительное сопротивление можно регулировать, то для повышения точности измерения рекомендуется подобрать его так, чтобы $\alpha_X = \alpha_N$, и тогда $R_X = R_N$.

Ошибки при определении R_X являются по преимуществу следствием неточности отсчета показаний α_X и α_N . Величина их может быть определена из величины того изменения отклонений $\alpha'_N - \alpha''_N$, которое наблюдается при изменении сравнительного сопротивления от R'_N до R''_N .

Если отклонение может быть при этом отсчитано с точностью до $\Delta\alpha$, то изменение сопротивления R_N на величину меньшую, чем $\frac{\Delta\alpha}{\alpha'_N - \alpha''_N} (R''_N - R'_N)$, уже не может быть обнаружено.

Следовательно, для большей точности измерения необходимо, чтобы:

а) сила тока в цепи соответствовала условиям наибольшей чувствительности гальванометра; это может быть достигнуто изменением в.д.с. источника или шунтированием гальванометра,

б) сопротивление гальванометра было мало сравнительно с измеряемым R_X ; откуда следует, что этот метод применим, главным образом, для измерения больших сопротивлений, и

γ) источник тока обладал возможно большим постоянством в.д.с.

б) Измеряемое сопротивление и гальванометр включаются параллельно (схема б), и искомое сопротивление определяется путем сравнения разности потенциалов между точками a и b , c и d цепи.

Если сопротивление гальванометра велико, и вследствие этого ток, через него ответвляющимся, можно пренебречь, т. е. принять, что $I_X = I_N$, то $U_{ab} = I_X R_X$ и $U_{cd} = I_N R_N$, откуда

$$R_X = \frac{U_{ab}}{U_{cd}} = R_N \dots \dots \dots 4$$

Более точные результаты получаются, когда мы подберем R_N так, чтобы $U_{ab} = U_{cd}$.

В этом случае

$$R_X = R_N \dots \dots \dots 5$$

Если сопротивление гальванометра значительно больше измеряемого и для него справедлива зависимость $I = C\alpha$, то при мало разнящихся по величине углах отклонения α_X и α_N можно положить

$$\frac{R_X}{R_N} = \frac{\alpha_X}{\alpha_N}$$

или

$$R_X = \frac{\alpha_X}{\alpha_N} \cdot R_N \dots \dots \dots 6$$

Следовательно, для большей точности измерения необходимо:

а) урегулировать в цепи с помощью сопротивления $r_{доб}$ силу тока так, чтобы она отвечала наибольшей чувствительности гальванометра;

β) подобрать гальванометр большого сопротивления, откуда следует, что этот способ применим, главным образом, для измерения небольших сопротивлений, и наконец.

γ) пользоваться источником с возможно большим постоянством его э.д.с.

3. Нулевые методы относятся к числу наиболее точных по самому их принципу, так как измерительный прибор в этих случаях работает в условиях максимальной чувствительности. Мы здесь разберем только ограниченное число основных измерительных схем, базирующихся на этом методе.

А) Метод мостика Витстона в своем общем виде основан на известной теореме Фрелиха, гласящей, что если замыкание и размыкание тока в одной из диагоналей моста (рис. 237) не влияют на постоянство силы тока в другой его диагонали, то сопротивления плеч его связаны следующими соотношениями:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

или

$$R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3 \quad \dots \text{(см. приложение I)}$$

Это есть общий случай равновесия схемы мостика (метод ложного нуля); он может быть использован для измерения сопротивлений, если в одно из плеч включить измеряемое, например, R_1 , а в три других плеча—соответственно подобранные известные сопротивления R_2 , R_3 и R_4 ; тогда

$$R_1 = \frac{R_2}{R_4} R_3 \dots \dots \dots 7$$

Частным и наиболее часто в измерительной практике используемым случаем равновесия мостика является тот случай, когда в момент его равновесия замыкание и размыкание одной из диагоналей моста не сопровождается возникновением тока в другой его диагонали (нулевой метод).

Из выражения 7 явствует, что равновесия мостика можно достигнуть двояким путем: изменяя отношение $\frac{R_2}{R_4}$ при неко-

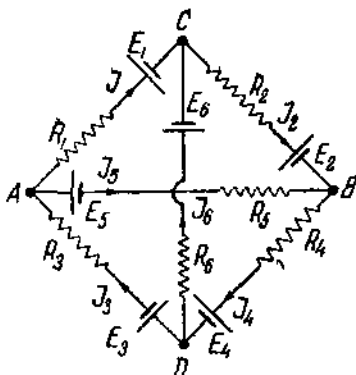


Рис. 237.

тором постоянным R_3 , мостик с переменным отношением плеч, — или меняя R_3 при неизменном, выбранном нами отношении $\frac{R_2}{R_4}$, — мостик с постоянным отношением плеч.

Электротехническими фирмами строится большое количество специальных приборов, называемых „мостиками“. Их внешнее оформление отлично друг от друга, но по принципу все они суть мостики с переменным или же постоянным отношением плеч. Выполняются они обычно по типу магазинных сопротивлений (магазинные мостики) или же в виде так называемых линейных мостиков. Из первых надо отдать предпочтение мостикам с декадными магазинами сопротивлений.

Вторые обычно являются по принципу работы мостиками с переменным отношением плеч;

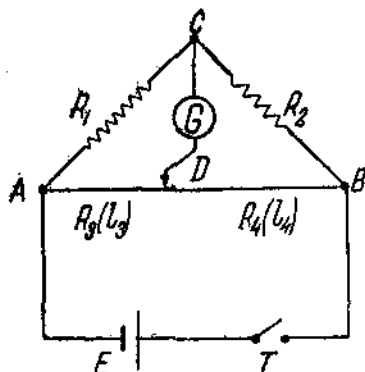


Рис. 238.

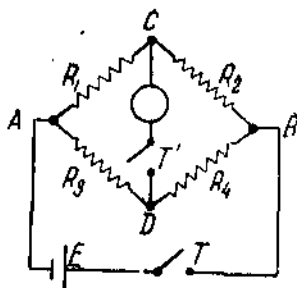


Рис. 239.

у них в качестве сопротивлений R_3 и R_4 служит калиброванная, т. е. однородная по составу материала и с одинаковым по всей ее длине поперечным сечением, проволока AB (схема рис. 238).

При передвижении вдоль нее подвижного металлического контакта D (ползунок) отношение сопротивлений $\frac{R_3}{R_4}$ изменяется, и при надлежащем подборе постоянного сопротивления R_2 равновесие схемы может быть достигнуто. При этом, поскольку проволока калибрована, т. е. имеет по всему своему протяжению одинаковое сопротивление на единицу длины, отношение сопротивлений $\frac{R_3}{R_4}$ может быть заменено отношением $\frac{l_3}{l_4}$ отрезков проволоки; это последнее обычно и отмечается на шкале, находящейся под проволокой.

В мостиках магазинных (схема рис. 239) тем или иным отношением R_3 балансных плеч задаются при помощи магазинов сопротивлений R_3 и R_4 с подразделениями в 1, 10, 100 и 1000 ом, а уравнивание схемы достигается изменением сопротивления R_2 , устроенного также в виде магазина, но с более мелкими подразделениями отдельных секций и с большим суммарным их сопротивлением (до 10 000 ом).

Выпускаемые фирмами мостики обычно заключают в себе в смонтированном виде сопротивления плеч, ключи в цепях диагоналей, а также зажимы, необходимые для присоединения измеряемого сопротивления, батареи и гальванометра.

Иногда гальванометр монтируется в самом приборе. Не останавливаясь далее на деталях конструкции существующих мостиков, ибо их чрезвычайно много, предлагаем ознакомиться с ними по образцам, имеющимся в лаборатории, путем осмотра и составления их монтажной схемы.

Для этого надо сопоставить принципиальную схему мостика (схемы 238 и 239) с данным прибором по его внешним признакам, расположению деталей, а если потребуется, то и путем проверки внутренних соединений его схемы помощью пробника (элемента с гальванометром).

Подобное сопоставление монтажной схемы данного мостика с его принципиальной схемой, и притом до работы с ним, абсолютно необходимо, для того, чтобы при последующем подсчете величины измеренного сопротивления знать точно, какие плечи его являются действительно противолежащими в схеме. Не зная этого, легко впасть в ошибку, если к данному мостику не приложено описания.

Ошибка может явиться результатом того, что произвольно намеченные нами обозначения плеч моста по его принципиальной схеме не совпадут с произвольно же намеченными обозначениями тех же плеч по его монтажной схеме. Тогда мы не будем знать, по какой из формул вычислять измеренное сопротивление, по

$$X = \frac{R_1}{R_2} \cdot R_3,$$

например,

$$X = \frac{1000}{100} \cdot 3 = 30$$

или

$$X = \frac{R_2}{R_1} \cdot R_3,$$

что даст уже для

$$X = \frac{100}{1000} \cdot 3 = 0,3.$$

Перейдем теперь к выяснению свойств метода мостика Витстона и, на основе этого, к установлению правил пользования им для получения наиболее точных результатов при измерениях.

а) Пределы величины сопротивлений, которые могут быть измерены данным готовым мостиком или по схеме мостика, собранной нами из отдельных деталей, зависят от максимального и минимального возможных значений для отно-

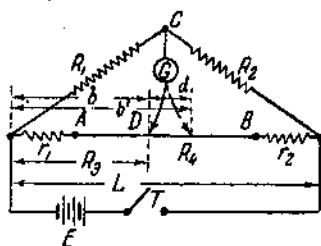


Рис. 240.

шения $\frac{R_3}{R_4}$ и сопротивления R_2 . При этом необходимо, однако, помнить, что слишком большая разница в величинах отдельных сопротивлений R_3 , R_4 или R_2 в момент равновесия мостика значительно понижает чувствительность метода вследствие большого неравенства сил токов в ветвях мостика и невозможности поставить гальванометр в условия работы, соответствующие его максимальной чувствительности. Поэтому, при работе на данном мостике, не следует пользоваться возможностью измерять им предельные для него сопротивления.

В линейных мостиках, где длина калиброванной проволоки не может быть по чисто конструктивным соображениям велика, пределы возможных отношений также не могут быть большими. Для расширения пределов измерения этими мостиками часто снабжают их сопротивлениями r_1 и r_2 (схема рис. 240), как бы удлиняющими калиброванную проволоку. Если в такой схеме измерить R_1 , а затем, поменяв местами R_1 и R_2 , вновь его определять, то его величина будет

$$R_1 = R_2 \frac{L+d}{L-d},$$

или

$$R_1 = R_2 + 2R_2 \frac{d}{L}, \quad (\text{см. приложение II})$$

где $d = b' - b =$ разности отсчетов по шкале мостика для обоих случаев измерения, т. е. для обоих положений ползунка D на калиброванной проволоке в момент равновесия мостика, а

$$L = AB + r_1 + r_2,$$

т. е. общей длине плеч R_3 и R_4 моста, выраженной в омах.

Чем меньше при этом d по сравнению с L , тем точнее будет измерено R_1 . Кроме того, поскольку в выражение для R_1 входит разность отсчетов положения ползунка D , то предотвращаются все ошибки, связанные с производством отсчета и возможной неточностью шкалы мостика.

б) Чувствительность схемы мостика зависит от соотношения сопротивлений его плеч, гальванометра r_g и источника ρ ; условий, способствующих наибольшей чувствительности гальванометра; места расположения гальванометра и источника в схеме, и силы тока в цепях мостика.

1) Теория метода (см. прилож. п. III) показывает, что наимыгоднейшим соотношением сопротивлений ветвей и диагоналей моста было бы то, при котором (схема рис. 241)

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = r_g = \rho$$

$$r_g \cong \frac{(R_1 + R_3)(R_2 + R_4)}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} =$$

равнодействующему сопротивлению между зажимами гальванометра, и

$$\rho = \frac{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} =$$

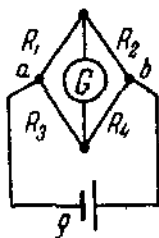


Рис. 241.

равнодействующему сопротивлению между зажимами источника.

Эти условия, однако, противоречат друг другу, и поэтому, для повышения чувствительности метода надо стремиться хотя бы к такому равенству

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4.$$

При работе же с линейными мостиками представляется весьма существенным, чтобы отношение $\frac{R_3}{R_4}$ было близко к 1 (середина калиброванной проволоки) или, что то же, чтобы

$$R_1 \cong R_2 \dots \dots \dots (\text{см. приложение IV}).$$

При этих условиях, помимо повышения чувствительности метода, сводится к минимуму и ошибка при определении отношения $\frac{R_3}{R_4}$.

2) Условия, способствующие наибольшей чувствительности гальванометра, сводятся к подбору, при данном гальванометре, наивыгоднейшего сопротивления той внешней цепи, на которую гальванометр работает в схеме мостика. Это сопротивление, в свою очередь, зависит от системы гальванометра.

Для гальванометра типа Томпсона (с подвижной магнитной системой), обладающего сопротивлением обмоток, равным r_g , условием наибольшей чувствительности является равенство

$$r_g = r_a, \dots \dots \dots (\text{см. приложение V}),$$

где r_a равно сопротивлению внешней цепи, на которую он работает.

Для гальванометра с подвижной катушкой (магнито-электрическая система) угол отклонения обратно пропорционален $r_g + r_a$, т. е., вообще говоря, он тем больше, чем меньше это суммарное сопротивление.

Однако, эти гальванометры обладают своеобразным свойством: их подвижная система отклоняется аperiodически только при определенной величине сопротивления внешней цепи гальванометра (критическое сопротивление).

Если r_a сильно отличается от свойственного данному гальванометру критического сопротивления, то колебания подвижной системы будут или периодическими или же, наоборот, чрезмерно замедленными, т. е. система будет крайне медленно подходить к предельному значению угла отклонения.

Таким образом, наивыгоднейшим условием для гальванометров этого типа было бы равенство $r_g = 0$, ибо r_a не может быть сделано произвольно малым. Практически же следует брать гальванометр с таким наименьшим сопротивлением r_g , которое в сумме с r_a обеспечивало бы аperiodический и наиболее ускоренный характер колебаний его подвижной системы.

3) Место расположения гальванометра и источника тока в той или иной из диагоналей мостика имеет в смысле чувствительности метода важное значение, несмотря на то, что соотношение, определяющее момент ра-

новесия, не изменится от перемены их местами. Из выражения $R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3$, отвечающего моменту равновесия мостика, следует, что сопротивление R_1 и R_4 , как равно R_2 и R_3 , не могут быть одновременно оба ни наибольшими, ни наименьшими и, следовательно, в уравновешенном мостике плечи с наибольшими сопротивлениями всегда будут смежными. При этом другая пара также смежных плеч, но обладающих наименьшими сопротивлениями, будет, очевидно, шунтировать гальванометр или батарею, в зависимости от того, в какие диагонали моста тот и другая введены. Это шунтирование смежными плечами наименьшего сопротивления неизбежно, и оно, конечно, понижает чувствительность схемы.

Выбирая из двух зол меньшее, надо, очевидно, шунтировать тот из приборов (гальванометр или источник), сопротивление которого меньше.

Гальванометр обычно обладает сопротивлением большим, нежели источник, почему его рекомендуется приключать к тем вершинам мостика, где сходятся попарно два наибольших и два наименьших из сопротивлений его плеч.

При работе с линейными мостиками необходимо считаться еще с одним обстоятельством, иногда противоречащим только что сказанному. Гальванометр в этом случае надо вводить в диагональ, содержащую подвижной контакт; это обеспечивает равенство сил токов, протекающих в момент равновесия по калиброванной проволоке, равномерный нагрев ее по всей длине и, следовательно, постоянство отношений, отсчитываемых по шкале мостика.

4) Силы токов, циркулирующих в ветвях и особенно в диагонали, содержащей гальванометр, также играют решающую роль в смысле повышения чувствительности.

Предел величинам этих токов кладется пропускной способностью плеч мостика, т. е. той наибольшей силой тока в них, при которой нагрев частей схемы еще настолько мал, что не приводит к изменению величины их сопротивлений. Необходимо поэтому избегать протекания свыше 0,05 ампер по ветвям схемы.

Задача. Подсчитайте приблизительно величину допустимого напряжения источника в точках a и b схемы 241, если

$$R_1 = 10; R_2 = 30; R_3 = 100; R_4 = 300 \Omega.$$

Ответ. Не более 2 вольт.

в) Величина ошибок, допускаемых при измерениях по методу мостика, может быть определена

следующим способом: тщательно уравновесив мостик, изменяют отвечающее равновесию отношение $\frac{R_3}{R_4}$ так, чтобы гальванометр дал еще весьма небольшие отклонения от нуля в обе стороны, и вычисляют отвечающие им сопротивления R'_1 и R''_1 . Тогда искомое сопротивление

$$R_1 = \frac{R'_1 + R''_1}{2},$$

а ошибка в процентах

$$\Delta R_1 = \pm \frac{R'_1 - R''_1}{R'_1 + R''_1} 100\%.$$

г) Точность измерений по методу мостика от непостоянства напряжения источника не зависит; она в первоклассных приборах может достигать 0,05%.

д) Типы мостиков Витстона и правила работы на них. 1) Мостики с постоянным отношением балансных плеч.

На рис. 242 а и б представлен общий вид двух типов декадных магазинных мостиков фирмы Сименс и Гартман-Браун: штепсельного и рычажного. Ими можно производить измерения сопротивлений в пределах от 0,0001 и до 9999900 ом.

Рисунок 243 дает общее представление о внешнем виде магазинных мостиков фирм: Карпантье, Гартман-Браун и Сименс на различные пределы измерения. Схема внутренних соединений этих мостиков принципиально ничем не отличается от схемы рис. 239.

На рис. 244 а, б и в представлены внешний вид и основная схема внутренних соединений декадных магазинных мостиков зав. Электроприбор с пределами измерений от 0,0001 ома и до 10 мегом. Мостик включает в себе: сравнительное сопротивление R , балансные плечи r_1 и r_2 , гальванометр G , чувствительностью 4×10^{-6} А, коммутатор K , с помощью которого последовательно с гальванометром можно ввести балластное сопротивление в 5000 ом для предохранения его обмоток от перегрузки током в начале работы на мостике, когда он еще далек от условий уравновешенности. Вблизи равновесия это сопротивление выводится, для чего штепсель из гнезда DC переносится в гнездо $BГ$. На наружной крышке гальванометра, а также против балансных сопротивлений мостика выгравированы надписи: „много“, „мало“, „умножить“, „разделить“. Эти надписи очень упрощают ра-

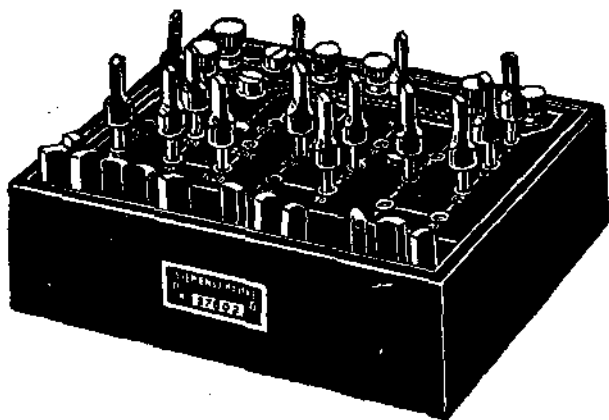


Рис. 242-а. Декадный штепсельный мостик фирмы Сименс.

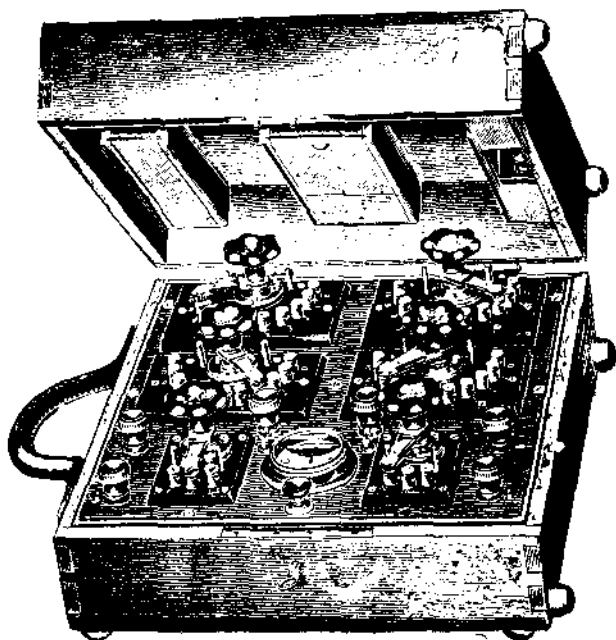


Рис. 242-б. Рычажный декадный мостик фирмы Гартман.

боту на мостике, указывая, в каком направлении надо изменять сопротивление на сравнительном плече R для достижения равновесия, а также, какое из сопротивлений балансных плеч надо ввести в формулу

$$R_x = \frac{r_1}{r_2} \cdot R$$

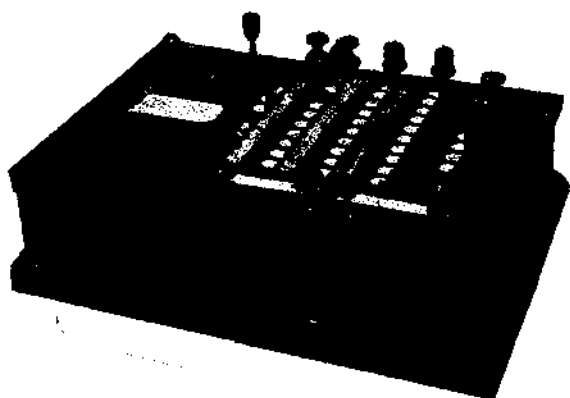


Рис. 244-а. Декадный мостик завода Электроприбор (старая конструкция).

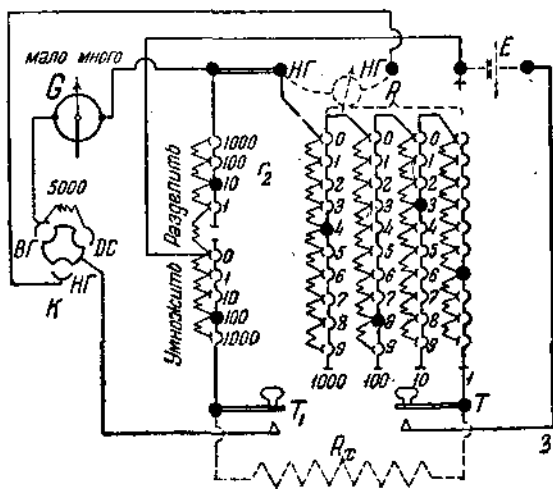


Рис. 244-б.

для подсчета величины измеренного мостиком сопротивления. Два зажима $HГ$ и $HГ$, а также штепсельное гнездо $HГ$ на коммутаторе K позволяют выключить смонтированный в приборе гальванометр и заменить его другим, который подключается, как показано пунктиром на схеме. На верхней доске прибора кроме того смонтированы ключи T и T_1 , для замыкания цепей батарей и гальванометра.

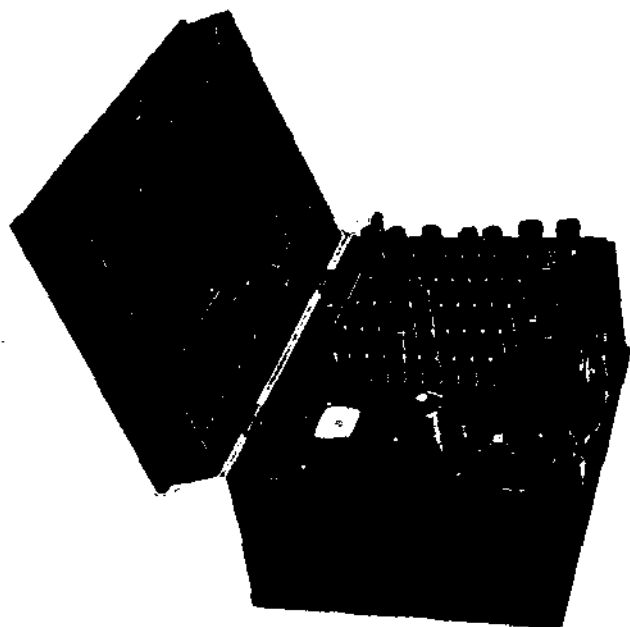


Рис. 244-в. Декадный мостик завода Электроприбор (новая конструкция).

Наконец, к мостику прилагается нижеследующая таблица наивыгоднейших соотношений его плеч, руководствуясь которой можно обеспечить наиболее точные результаты измерений (см. табл. стр. 263).

2) Мостики с переменным отношением плеч. На рис. 245 а и б представлены общий вид и схема соединений линейного мостика Кольрауша. Током для питания этого мостика может послужить постоянный ток от элементов или же переменный ток от небольшой индукционной катушки S . Ее применение необходимо при измерениях таких сопротивлений, которые при протекании по ним постоянного

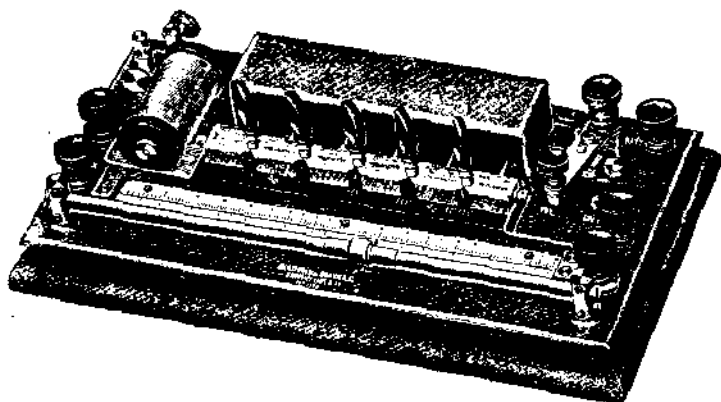


Рис. 245-а. Линейный мостик системы Кольрауша.

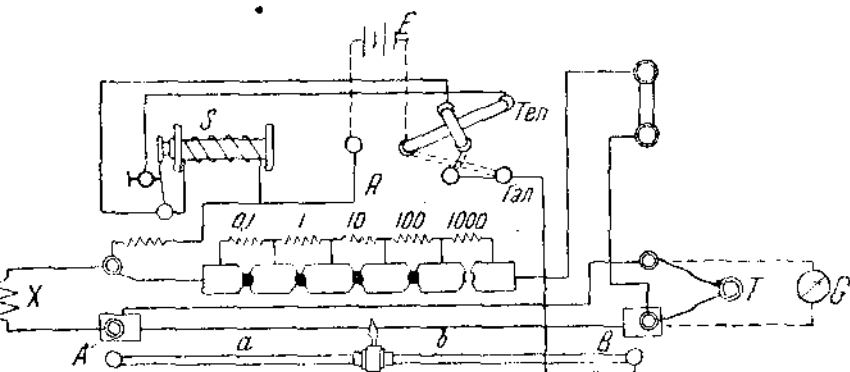


Рис. 245-б.

Измеряемое сопротивление в омах	Максимальное напряжение батареи	Вставленные штепселя	
		Умножить	Разделить
0—10	2	1	1 000
10—100	2	10	1 000
100—1 000	4	100	1 000
1 000—10 000	4	1 000	1 000
10 000—100 000	10	1 000	100
100 000—1 000 000	10	1 000	10
1 000 000—10 000 000	20—40	1 000	1

тока разлагаются, одновременно с чем меняется их сопротивление (например, жидкости, заземления и т. п.).

Балансными плечами в нем служат отрезки a и b калиброванной проволоки $A - B$. Постоянное сопротивление берется на магазине R ; в качестве индикатора момента равновесия служит гальванометр G или телефон T в зависимости от того, какого рода током питается схема.

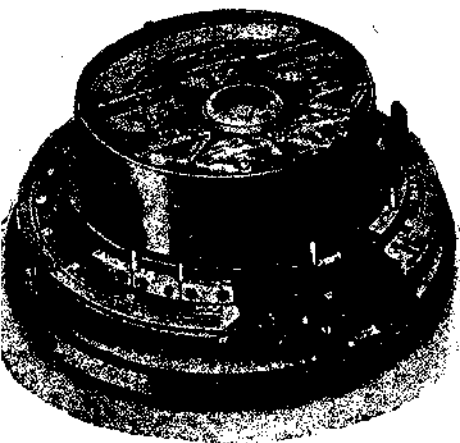


Рис. 246-а.

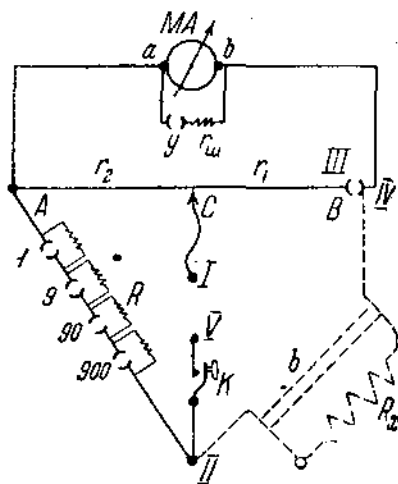


Рис. 246-б.

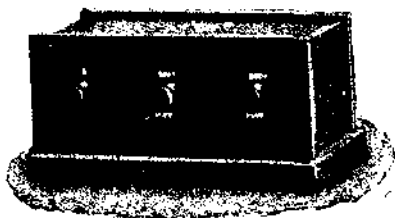


Рис. 246-в.

На рисунках 246 а, б и в представлены общий вид, а также основная схема внутренних соединений весьма распространенного в лабораторном и станционном обиходах прибора, именуемого „универсальным гальванометром“. Одним из его многообразных назначений является измерение им сопротивлений, как линейным мостиком. Мы здесь опишем три основных

способа его применения, а именно, как измерителя силы тока, измерителя напряжений и, наконец, как мостика.

Универсальный гальванометр состоит (см. схему рис. 246-б) из точного миллиамперметра MA магнитоэлектрической системы со шкалой на 150 делений в соединении с калиброванной проволокой AB , балансным магазином R сопротивлений в 1, 9, 90 и 900 Ω , качом K и дополнительным сопротивлением r_m , шунтирующим миллиамперметр (когда цепь шунта замкнута при посредстве штепселя y , то равнодействующее сопротивление прибора между точками a и b в точности равно 1 Ω). К прибору прилагается набор шунтов в 1/9; 1/99; 1/999 ома и особая вилка b для их приключения, а также особый шунтовой штепсель, который будучи вставлен в гнездо магазина R и параллельно сопротивлению последнего в 1 Ω , образует равнодействующее сопротивление в 0,1 Ω ; штепсель в 300 Ω , применяемый при измерениях сопротивлений электролитов и элементов и, наконец, зажимы I, II, III, IV и V.

Измерение силы тока. При вставленном штепселе y постоянная прибора $C = 0,001$ А, следовательно, при отклонении стрелки прибора на 150 делений, т. е. на всю шкалу, максимальная сила тока, могущая быть измеренной, равна $0,00 \times 150 = 0,15$ А.

В этом случае вводят прибор в цепь последовательно посредством зажимов II и IV, при чем все штепселя на магазине R необходимо вставить, а штепсель между зажимами III и IV — вынуть.

Для измерения токов более 0,15 А к зажимам II и IV подключается особая вилка (см. рис. 246-в), под клеммы которой вводится шунт; цепь тока приключается под зажимы шунта.

При шунте в 1/9 Ω пределы измерения силы тока увеличиваются до 1,5 А, а постоянная прибора равна 0,01 А. При шунте в 1/99 Ω постоянная прибора = 0,1 А, а предел измерения расширяется до 15 А и т. д.

Измерение напряжений. Штепсель y , а также штепсель между ламелями магазина R , которые соединены сопротивлением в 1 Ω , должны быть вставлены, остальные штепселя вынуты. Измеряемое напряжение подводится к клеммам особой вилки, подключаемой к зажимам II и IV прибора. Постоянная прибора в этом случае $C = 1$ вольту; пределы измерения — от 0 до 150 вольт; общее сопротивление прибора 1000 Ω .

Если выключить еще сопротивление в 900 Ω (вставить соответствующий штепсель), то постоянная прибора равна 0,1 В,

пределы измерения — от 0 до 15 В, а общее сопротивление прибора — 100 Ω .

Если выключить сопротивления в 900 и 90 Ω , то постоянная прибора равна 0,01 В; пределы измерения от 0 до 1,5 В и общее сопротивление 10 Ω и, наконец, при выключенных сопротивлениях в 900, 90 и 9 Ω постоянная прибора = 0,001 В, пределы измерения — от 0 до 0,15 В и общее сопротивление прибора = 1 Ω . Для расширения пределов измерения свыше 150 В к прибору присоединяется добавочное сопротивление (рис. 246-в).

Измерение сопротивлений. Измеряемое сопротивление R_x подключается к зажимам II и III; штепсель между лапками III и IV надо вставить; штепсель у, до установления положения подвижного контакта С, близкого к равновесию мостика, должен быть вставлен, а затем, для большей чувствительности вынут.

Пределы измерения этим мостиком, в зависимости от введенного на плече R сопротивления и отношения $\frac{r_1}{r_2}$ сопротивлений калиброванной проволоки, колеблются от 0,01 до 3—4000 Ω .

Калиброванная проволока натянута по ребру шиферного диска, на наружной поверхности коего выгравированы цифры, дающие величины отношения $\frac{r_1}{r_2}$. Измеряемое сопротивление вычисляется по формуле

$$R_x = \frac{r_1}{r_2} \cdot R.$$

е) Правила работы на описанных мостиках сводятся к следующему. Если измеряемое сопротивление даже приблизительно неизвестно по своей величине, то, задавшись отношением балансных плеч моста, равным 1 (например, 100/100), вводят на уравнительном магазине R наименьшее сопротивление и, замкнув на мгновение ключи мостика, замечают, в какую сторону отклоняется стрелка гальванометра. Затем на магазине R вводят наибольшее сопротивление, вновь на мгновение замыкают ключи и замечают сторону отклонения. Если это последнее противоположно первому, то остается только подобрать такое R , при котором повторное замыкание и размыкание ключей не вызовет колебаний стрелки гальванометра. Если же отклонения происходят в одну и ту же сторону, то надо изменить взятое ранее отношение балансных плеч и повторить опыт.

После того как сопротивление R_x приблизительно определено, подбирают такой величины сопротивления плеч моста, которые гарантируют его максимальную чувствительность, и вновь производят измерение.

Замыкание цепей схемы, во избежание вредного влияния самоиндукции (экстратоков размыкания), надо вести в такой последовательности: сперва замыкать ключ источника, а затем гальванометра; размыкание же их производить в обратном порядке.

Во избежание погрешностей из-за возникающих в схеме термоэлектродвижущих сил, цепи мостика надо замыкать на сколь возможно короткие промежутки времени и делать два измерения, коммутируя направление тока.

Если подразделения уравнительного магазина R недостаточно малы и полного равновесия достичь нельзя, то прибегают к одному из следующих способов:

1) Интерполируют, т. е. определяют те ближайшие к истинному R_2 значения R'_2 и R''_2 , при которых гальванометр дает отклонения α_1 и α_{II} в противоположные от нуля его шкалы стороны.

Если при этом R'_2 отвечал угол отклонения α_1 , а R''_2 — отклонение α_{II} , то, следовательно, разности $R''_2 - R'_2$ соответствовал общий размах стрелки прибора в $\alpha_1 + \alpha_{II}$ делений шкалы. На одно деление шкалы, таким образом, приходится

$$\frac{R''_2 - R'_2}{\alpha_1 + \alpha_{II}}.$$

Тогда истинное

$$R_1 = \frac{R_3}{R_4} \cdot R'_2 + \frac{R''_2 - R'_2}{\alpha_1 + \alpha_{II}},$$

если

$$R'_2 < R_2$$

или

$$R_1 = \frac{R_3}{R_4} \cdot R''_2 - \frac{R''_2 - R'_2}{\alpha_1 + \alpha_{II}},$$

если

$$R''_2 > R_2.$$

2) Шунтируют магазин R_2 таким сопротивлением r , при котором мостик уравнивается; тогда

$$R_1 = \frac{R_3}{R_4} \cdot \frac{R_2 \cdot r}{R_2 + r}.$$

Б) Метод дифференциального гальванометра применим по преимуществу для измерения небольших сопротивлений: по принципу он схож с методом замещения, но с той лишь разницей, что каждая из обмоток a и b гальванометра измеряет подобно вольтметру и одновременно падения напряжений в измеряемом R_X и эталонном R_N сопротивлениях (схема рис. 247). При этом направления токов, отвечающих по обмоткам катушек, должны быть такими, чтобы образованные ими магнитные поля действовали навстречу друг другу.

Отрегулировав при помощи сопротивлений r схему так, чтобы гальванометр не давал отклонения, мы можем написать

$$\frac{R_X}{R_N} = \frac{r_b}{r_a + r}, \dots \dots \dots (\text{см. прилож. VI})$$

где r_a и r_b — сопротивления катушек гальванометра.

Дабы исключить необходимость отдельного измерения этих последних, повторно уравнивают схему, для чего в цепи катушек вводят известные сопротивления R_1 и R_2 и регулируют их так, чтобы гальванометр опять не давал отклонений.

Тогда

$$\frac{R_X}{R_N} = \frac{r_b + R_2}{r_a + r + R_1}.$$

Из этих уравнений получаем

$$R_X = R_N \cdot \frac{R_2}{R_1} \dots 8.$$

Из большого числа способов применения дифференциального гальванометра для измерения сопротивлений описанный способ (предложенный Хивисайдом) наиболее прост, но не в ущерб точности. При нем, как это видно из выражения R_X , нет надобности знать сопротивления r_a , r_b и r , и нет никакой необходимости уравнивать сопротивления r_a и r_b , что при других способах неизбежно.

Если измеряемое сопротивление весьма мало, то, дабы переходные сопротивления в точках, где оно присоединяется, не повлияли на результат измерения, следует выбрать

гальванометр, у которого сопротивление катушек велико, или же вводить в их цепь добавочные сопротивления.

Сравнивая этот метод с описанным выше методом замещения, нетрудно понять, что при нем не требуется постоянства э.д.с. источника, и чувствительность гальванометра используется нацело (нулевой метод).

При работе с дифференциальным гальванометром следует:

а) до включения в измерительную схему проверить полярность его обмоток, дабы в дальнейшем включить их навстречу друг другу;

б) до уравнивания гальванометра и во избежание чрезмерных отклонений его подвижной системы следует ввести в цепь полностью балластное сопротивление R .

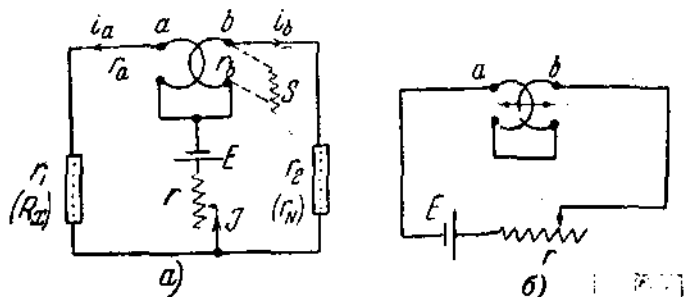


Рис. 248.

Для измерения сопротивлений порядка тысяч омов дифференциальный гальванометр применяется в схеме параллельного включения сопротивлений R_x и R_N (см. схему рис. 248-а). В этом случае для измерений и подсчета величины измеряемого сопротивления необходимо предварительно:

а) проверить, находятся ли обе катушки, при пропускании по их обмоткам одного и того же тока, под воздействием одинакового по величине и обратного по направлению вращающего момента, для чего их включают согласно схеме рис. 248-б. Если при этом обнаружится неравенство моментов, и подвижная система отклонится, то гальванометр включают по схеме рис. 248-а (сохраняя обратное направление вращающих моментов) и более сильную катушку шунтируют таким сопротивлением S , чтобы отклонения не наблюдалось;

б) убедиться в том, каково соотношение сопротивлений обмоток обеих катушек гальванометра, т. е. величина $\frac{r_b}{r_a} = C$.

Если условие α осуществлено, то $i_a = \frac{E - I \cdot r}{r_a}$, а $i_b = \frac{E - I \cdot r}{r_b}$, и вращающие моменты $M_1 = C_1 \cdot i_a$ и $M_2 = C_2 \cdot i_b$ равны друг другу, или, что то же, $C_1 i_a = C_2 i_b$, где C_1 и C_2 — коэффициенты пропорциональности, зависящие от размеров и числа витков катушек, а также напряжения поля в междуполосном пространстве магнита прибора.

Из предыдущих равенств имеем

$$\frac{i_a}{i_b} = \frac{C_2}{C_1} = C, \dots \dots \dots (a)$$

а также

$$\frac{i_a}{i_b} = \frac{r_b}{r_a} = C \dots \dots \dots (b)$$

Для определения C вводим на магазинах (до того замкнутых накоротко) некие сопротивления r_1 и r_2 , подобранные так, чтобы отклонения гальванометра опять не наблюдалось. При этом в цепях катушек гальванометра протекут некие токи i'_a и i'_b , для которых будем иметь соотношение

$$\frac{i'_a}{i'_b} = C = \frac{r_b + r_2}{r_a + r_1} \dots \dots \dots (c)$$

или

$$C \cdot r_a + C \cdot r_1 = r_b + r_2 \dots \dots \dots (d)$$

Но из уравнения (b) $r_b = C \cdot r_a$ и, сопоставляя это с уравнением (d), имеем $C \cdot r_1 = r_2$, откуда искомое отношение сопротивлений катушек

$$\frac{r_b}{r_a} = \frac{r_2}{r_1} = C \dots \dots \dots (e)$$

Определив отношение C , вводят в схему дополнительно к r_1 измеряемое сопротивление R_X , а на магазине r_2 подбирают такое сопротивление r_N (сверх ранее на нем взятого r_2), при котором гальванометр опять перестанет давать отклонения. Тогда $\frac{r_b + r_N}{r_a + R_X} = C$, или $\frac{r_N}{R_X} = C$, откуда после сопоставления этого результата с уравнением (e), имеем окончательно

$$R_X = \frac{r_1}{r_2} \cdot r_N \dots \dots \dots (f)$$

Если $C=1$, то $R_X = r_N$ и, наконец, если во время опыта не удастся окончательно устранить отклонения подвижной системы

гальванометра, то меняют местами R_X и R_N , а R_X вычисляют по формуле $R_X = \frac{r_2}{r_1} R_N$.

Наконец, если и в этом случае не удастся устранить отклонение, то регулируют r_N так, чтобы получить два отклонения (вправо α_1 и влево α_2 от нуля, соответственно сопротивлениям r'_N и r''_N) и вычисляют истинное значение r_N , отве-

чающее равновесию схемы, как $r_N = r'_N + (\alpha_2 - \alpha_1) \frac{r_N - r'_N}{\alpha_2 - \alpha_1}$.

Способ этот применим для измерения относительно больших сопротивлений, ибо тогда и при малом сопротивлении гальванометра изменения силы тока в его катушках практически зависят только от величин измеряемого и сравнительного сопротивления.

с) Компенсационный метод, идея которого изложена в предыдущей главе, также может быть использован для измерения сопротивлений (по преимуществу небольших и весьма малых).

Он сводится к определению отношения напряжений $\frac{U_X}{U_N}$ на зажимах измеряемого R_X и эталонного R_N сопротивлений (схема рис. 202) в те моменты, когда эти напряжения уравниваются соответственно подобранными напряжениями между рычагами P_1 и P_3 , скользящими по контактам реостатов R_3 и R_5 главной цепи компенсационной схемы. Установив в дополнительной цепи ток некоторой силы I , поддерживают его постоянным, переводят лапки коммутатора P в положение $B-B$ и, передвигая рычаги P_1 и P_2 , подбирают между некоторыми точками (напр., $a-b$) главной цепи сопротивление $r_N = 10^n \cdot R_N$, где $n = 2$ или 3 . После этого, при помощи реостатов R_7 и R_8 , так изменяют общее сопротивление вспомогательной цепи, чтобы гальванометр G перестал давать показания, т. е. компенсируют напряжение U_N на зажимах эталонного сопротивления напряжением между точками a и b главной цепи. Когда это достигнуто то, убедившись, что сила тока как во вспомогательной, так и в дополнительной цепи не изменилась, передвигают коммутатор P в положение $A-A$ и, не меняя общего сопротивления в вспомогательной цепи, переводят рычаги P_1 и P_2 в новое положение (напр., $a'-b'$), при котором гальванометр вновь не дает показаний (другими словами, компенсируют напряжение U_X).

Если э.д.с. E и суммарное сопротивление R_0 всей вспомогательной цепи постоянны, то для первого случая $\frac{U_N}{E} = \frac{r_N}{R_0} = \frac{10^a \cdot R_N}{R_0}$, а для второго $\frac{U_X}{E} = \frac{r_X}{R_0}$, где r_X равно сопротивлению между точками a' и b' .

Если же ток в дополнительной цепи также остался неизменным, то

$$\frac{U_X}{U_N} = \frac{R_X}{R_N}.$$

Сопоставляя все три пропорции, получаем

$$\frac{U_X}{U_N} = \frac{r_X}{r_N} = \frac{R_X}{R_N},$$

откуда

$$\frac{R_X}{R_N} = \frac{r_X}{r_N} = \frac{R_X}{10 \cdot R_N}$$

или, окончательно

$$R_X = \frac{r_X}{10^a}.$$

К недостаткам метода относится необходимость постоянства э.д.с. источников E и E_1 .

Метод особенно применим в тех случаях, когда желательно выяснить зависимость измеряемого сопротивления от силы протекающего через него тока.

§ 38. Измерение весьма малых сопротивлений.

1) **Общие замечания.** Методика измерения весьма малых сопротивлений осложняется тем, что вспомогательные провода и контакты, при посредстве которых измеряемое сопротивление вводится в измерительную схему, обладают собственным сопротивлением. Последнее по своей величине часто может быть больше измеряемого, и, следовательно, для получения истинного значения измеряемого сопротивления необходимы такие методы, при которых эти добавочные, или, как их принято называть, переходные сопротивления исключались бы из величины, полученной для R_X , или же прикладывались, благодаря особо придуманной схеме, не к R_X , а к частям самой измерительной схемы.

Кроме того, в толстых проводах и стержнях ток в точках его включения не распределяется сразу же и равномерно по всему поперечному сечению стержня.

Характер его распределения представлен на рис. 249, из коего явствует, что если стержень включить в измерительную цепь в точках a и b , то результат измерения будет ошибочным. В этом случае некоторая часть материала не пронизывается током, а между тем, при определении удельного, например, сопротивления материала стержня, в подсчет вводится весь его объем. Во избежание ошибок рекомендуется приключать стержень к измерительной схеме, несколько отступая от его концов, а именно, в точках c и d , и за истинную его длину принимать L , а не L' .

Термоэлектрические явления также могут сильно сказаться на точности измерения весьма малых сопротивлений, а поэтому во время опыта рекомендуется менять в измерительной схеме направления тока и за истинное брать среднее из ряда парных измерений.

Для уменьшения ошибок от влияния на результат измерения сопротивлений соединительных проводов, их необходимо брать толстыми и короткими.

Если же это невозможно по условиям опыта, то их сопротивление должно быть измерено отдельно и вычтено из полученного для R_x результата.

Из очень большого числа методов измерения весьма малых сопротивлений мы здесь остановимся только на трех, являющихся основными, если не считать описанных выше методов дифференциального гальванометра и компенсационного способа, которые также могут быть использованы для измерения малых сопротивлений.

Методы эти нулевые; к ним относятся: метод обыкновенного мостика, метод Матиссена и метод двойного мостика Томсона.

2) Метод обыкновенного мостика применяется исключительно для определения удельных сопротивлений хороших проводников. Стержень R_x из испытуемого материала (строого цилиндрической формы) закрепляется с помощью особых массивных зажимов M и N на доске прибора (рис. 250), образуя одно плечо мостика.

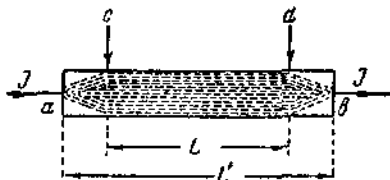


Рис. 249.

Остальные его плечи состоят из двух магазинов R_1 и R_2 и калиброванной проволоки AB . Буквами D и D' обозначены особые зажимы в виде ножей, при посредстве которых можно ввести в плечо MH моста любую часть l_1 или l_2 испытуемого стержня.

Измерение сводится к повторному определению сопротивления отрезков стержня длиной l_1 и l_2 , для чего мостик дважды уравновешивается путем подбора соответствующего отношения R_1 и R_2 и надлежащих положений подвижного контакта, например, в точках d и d' .

В первом случае сопротивление отрезка $l_1 = \frac{R_1}{R_2} \cdot S_1$, а во втором — $l_2 = \frac{R_1}{R_2} \cdot S_2$, где S_1 и S_2 — сопротивления отрезков калиброванной проволоки. В величины l_1 и l_2 входят, очевидно, и те добавочные сопротивления, от влияния которых необ-

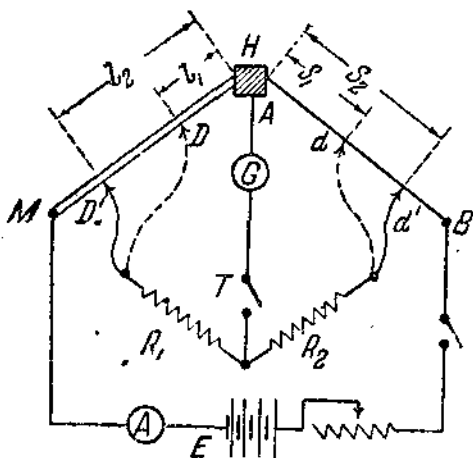


Рис. 250.

ходимо избавиться. Если положить, что эти последние при обоих измерениях одинаковы, то, вычисляя разность сопротивлений

$$(l_2 - l_1) = \frac{R_1}{R_2} (S_2 - S_1) = R_x, \dots (10)$$

мы тем самым их исключим.

Если проволока AB калибрована, то разность ее сопротивлений ($S_2 - S_1$) можно заменить разностью ($d' - d$) положений движка, отсчитанных по шкале прибора.

Для дальнейшего подсчета величины удельного сопротивления испытуемого материала надо тщательно промерить в нескольких местах калиброметром диаметр стержня в мм и взять из полученных результатов среднее d . Переведем далее длину отрезка $l_2 - l_1$ в метры, нетрудно подсчитать и искомое удельное сопротивление по формуле

$$\rho = \frac{R_x \cdot q \text{ мм}^2}{(l_2 - l_1) \text{ м}} \dots (11)$$

Диаметр стержня может быть определен также по удельному γ весу материала, его длине L и по весу P образца; тогда площадь его сечения $S = \frac{P}{\gamma L}$. Если удельный вес материала не известен, то его нетрудно определить, взвесив образец сперва в воздухе $P'_{\text{кг}}$, а затем в прокипяченной воде $P''_{\text{кг}}$; тогда объем образца $V = \frac{P' - P''}{\rho_{\text{в}}} \text{ мм}^3$, а площадь сечения $S = 1,003 \frac{V}{l} \cdot 10^8 \text{ мм}^2$. Коэффициент 0,003 учитывает плотность воды и потерю веса в воздухе.

Во время опыта необходимо точно измерить температуру. Полученный результат для удельного сопротивления следует привести по нормам СССР к температуре 20°C . Это делается по формуле

$$R_X = R_{20} [1 + \alpha (t_x - 20^\circ)],$$

т. е.

$$R_{20} = \frac{R_X}{1 + \alpha (t_x - 20^\circ)}.$$

Здесь t_x — температура, при которой было определено R_X ; α — температурный коэффициент металла при 20°C .

3) **Способ Маттисена** по идее является наиболее точным, так как при подсчете величины измеряемого сопротивления R_X приходится исходить из величин потенциалов на концах измеряемого сопротивления и компенсировать их соответствующими подобранными положениями подвижного контакта на калиброванной проволоке. По соединительным проводам при этом ток не протекает и, следовательно, добавочных падений напряжений не наблюдается. Измерение выполняется по схеме рис. 251. В качестве сопротивления R_N рекомендуется брать нормальное сопротивление.

Опыт определения R_X сводится к четырехкратному уравновешиванию мостика соответственно положениям переключателя P на контактах 1, 2 и 3 и 4, т. е. к отысканию, при по-

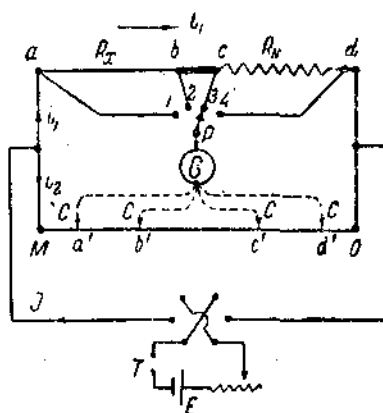


Рис. 251.

стоянном значении силы тока I , таких положений a' , b' , c' и d' подвижного контакта C на калиброванной проволоке $M-O$, при которых гальванометр G не дает отклонений. Когда эти условия выполнены, то мы имеем

$$U_a = U_{a'}; U_b = U_{b'}; U_c = U_{c'} \text{ и } U_d = U_{d'},$$

откуда

$$\frac{U_a - U_b}{U_c - U_d} = \frac{U_{a'} - U_{b'}}{U_{c'} - U_{d'}}.$$

Но

$$U_a - U_b = i_1 \cdot R_X; U_{a'} - U_{b'} = (\text{сопр. } a' - b') i_2 = i_2 \cdot a'b'$$

$$U_c - U_d = i_1 \cdot R_N; U_{c'} - U_{d'} = i_2 (\text{сопр. } c' - d') = i_2 \cdot c'd'$$

или

$$\frac{i_1 \cdot R_X}{i_1 \cdot R_N} = \frac{i_2 \cdot a'b'}{i_2 \cdot c'd'},$$

а если проволока MO калибрована, то

$$\frac{R_X}{R_N} = \frac{l_1}{l_2}$$

или

$$R_X = \frac{l_1}{l_2} \cdot R_N \dots \dots \dots (11)$$

Способ этот весьма пригоден для определения удельного сопротивления проводников, но несколько кропотлив, и это ограничивает область его применения.

4) Метод двойного мостика Томсона является основным для измерения весьма малых сопротивлений (см. рис. 252).

Идея метода принадлежит Томсону и заключается в следующем. В момент равновесия схемы, т. е. тогда, когда мы путем подбора величин известных сопротивлений $P=M$; $O=L$; $\frac{P}{O} = \frac{M}{L} = m$ и R_N , при заданном неизвестном R_X , достигаем равенства потенциалов точек e и f , мы имеем на основании законов Кирхгофа

$$i_1 \cdot P = i_X \cdot R_X + i_2 \cdot M \text{ или } i_X \cdot R_X = P(i_1 - i_2) = M(i_1 - i_2) \dots \dots \dots (a)$$

$$i_1 \cdot O = i_2 \cdot L + i_N \cdot R_N \text{ или } i_N \cdot R_N = O(i_1 - i_2) = L(i_1 - i_2) \dots \dots \dots (6)$$

Разделив уравнение a на b и приняв во внимание, что при равновесии $i_x = i_N$, а $P = Om$ и $M = Lt$, получаем окончательно

$$R_x = \frac{P}{O} \cdot R_N = \frac{M}{L} \cdot R_N \dots \dots \dots (12)$$

Столь простое выражение для R_x получается в результате подбора таких величин для сопротивлений M , P , O и L , которые удовлетворяют пропорции $\frac{P}{O} = \frac{M}{L}$, представляю-

щей отношение балансных плеч моста. Это отношение может быть взято нами постоянным в пределах измерения данного R_x , и тогда, чтобы уравновесить мостик, необходимо иметь возможность изменять R_N (взяв его в виде калиброванной проволоки). Можно поступить и наоборот, задавшись постоянным R_N , одновременно

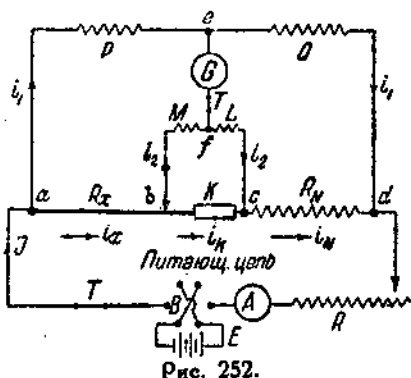


Рис. 252.

и в одном и том же соотношении менять P и O или M и L . В первом случае мы будем иметь мостик с постоянным, а во втором — с переменным отношением балансных плеч. Все выпускаемые различными фирмами двойные мостики и строятся по одному из этих принципов, и хотя их внешнее оформление различно, но сам метод один и тот же. В мостиках с переменным отношением плеч это последнее обычно осуществляется при помощи кривельных реостатов, связанных рукоятками попарно (P с M или O с L); меняя положение рукояток, мы одновременно и одинаково изменяем отношение $\frac{P}{O}$ или $\frac{M}{L}$ и достигаем равновесия мостика. В мостиках с постоянным отношением плеч сопротивления P , M , O и L обычно делаются в виде штепсельных магазинов, а равновесие достигается изменением R_N в виде калиброванной проволоки. Для выяснения вопроса, почему мы можем, работая на этом мостике, не считаться с добавочными и переходными сопротивлениями, обратимся к схеме рис. 253, которая представляет собою схему 252, но только в развернутом для ясности виде. Обозначим через r_1 сумму сопротивлений M плюс добавочные и переходные сопротивления между ним

и R_X , а через r_2 — сумму L плюс добавочные сопротивления между ним и R_N .

Тогда для момента равновесия имеем

$$(R_X + r_1) \cdot O = (R_N + r_2) P;$$

отсюда

$$R_X \cdot O + r_1 \cdot O = R_N \cdot P + r_2 \cdot P,$$

и, следовательно, истинное значение

$$R_X = \frac{R_N \cdot P + r_2 \cdot P - r_1 O}{O}.$$

Однако, если при измерении задаться для P и O сопротивлениями не менее 10 ом, то разность $r_2 P - r_1 O$ при весьма

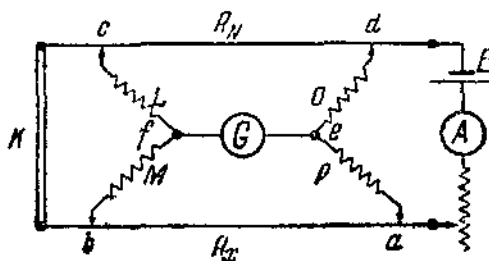


Рис. 253.

малых значениях самих переходных сопротивлений и вследствие того, что она входит в формулу для R_X в виде отношения к величине O , может быть принята равной нулю. Следовательно, искомое сопротивление можно вычислить как

$$R_X \approx \frac{P}{O} \cdot R_N \dots \dots \dots (13)$$

Постоянство э.д.с. источника E при этом методе не требуется.

Пределы величины измеряемого сопротивления зависят от максимального и минимального значений отношения $\frac{P}{O} = \frac{M}{L}$ и величины R_N . Фирменные мостики обычно строятся на пределы от 0,000001 до 0,1 и даже до 1 ома. В качестве R_N применяются нормальные сопротивления или толстая калиброванная проволока сопротивлением около 0,01 ома.

Для повышения чувствительности метода сила тока в главной цепи может быть доводима до 5 ампер. Что же касается магазинов M , P , O и L , то через них нельзя пропускать ток более 0,3 — 0,05 ампера.

Гальванометр в схеме Томсона может оказаться замкнутым в момент равновесия на очень небольшое сопротивление

($\approx 10 \Omega$); поэтому при выборе его необходимо предпочесть гальванометр с малым критическим сопротивлением и большой чувствительностью по напряжению.

Кроме того, для создания в момент, близкий к равновесию схемы, как можно большей разности потенциалов между точками включения гальванометра (точки e и f) и, следовательно, для повышения чувствительности мостика, часть схемы, соединяющая R_X и R_N , должна быть выполнена в виде толстого и короткого проводника или массивного металлического зажима (на схеме отмеченного буквой K).

Выверка мостика, которую следует производить перед ответственными измерениями, выполняется путем включения в его схему нормальных сопротивлений взамен R_X .

Для определения чувствительности двойного мостика поступают так: уравновесив мостик при некоторых значениях для R_N, P, M, L, O и вычислив $R_X = \frac{M}{L}$, $R_X = \frac{P}{O} \cdot R_N$, изменяют одновременно P и M на некоторую величину ΔP (желательно небольшую); при этом гальванометр даст показание α . Тогда разность значений для измеряемого сопротивления будет

$$\Delta R_X = (R_X - R'_X) = R_N \frac{\Delta P}{O} \text{ ом,}$$

и этой разности отвечает отклонение подвижной системы гальванометра на α делений шкалы. Разность сопротивлений $\frac{(R_X - R'_X)}{\alpha}$ в омах, приходящаяся на одно деление шкалы гальванометра, и служит мерою чувствительности схемы. У хороших мостиков и при соответствующем выборе гальванометра оно достигает величины $1 \cdot 10^{-6}$ ома.

5) Типы мостиков. а) На рис. 254-а и б представлены общий вид и схема внутренних соединений одного из лучших двойных мостиков фирмы Сименс с переменным отношением балансных плеч O и L . Внутренняя схема этого мостика образована двумя одинаковыми рычажными декадными магазинами сопротивлений (O и L), рычаги коих связаны жесткими тягами из изоляционного материала (показаны пунктиром). Этим достигается совершенно одинаковое изменение суммарного (от 0,1 и до 999,9 ома) сопротивления всех декад каждого магазина при передвижении рычагов для уравновешивания мостика. Сопротивления P и M сделаны в виде штепсельных магазинов на 10, 50 и 100 ом каждый. К зажимам мостика W_1 и W_2

присоединяются измеряемое R_X и эталонное R_N сопротивления, соединенные последовательно и в таком виде введенные

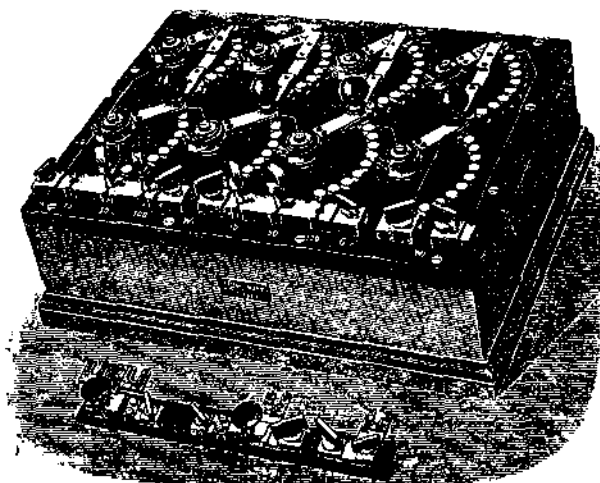


Рис. 254-а. Двойной мостик фирмы Сименс (рычажный).

в цепь источника тока E через переключатель B ; последний позволяет коммутировать направление тока в цепи.

Это необходимо для того, чтобы избавиться от ошибок, вызываемых в схеме возникновением термоэлектродвижущих сил и контактных разностей потенциалов. Для этого каждое измерение надо произвести дважды при различных направлениях тока и из полученных результатов взять среднее.

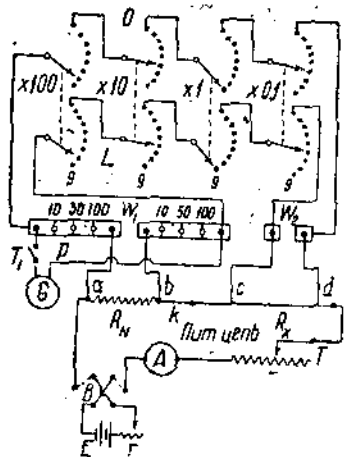


Рис. 254-б.

В качестве эталонного сопротивления к мостику прилагается набор нормальных (одиночных) сопротивлений от 0,1 до 0,0001 ома, в соответствии с чем пределы измерения этим мостиком при подключении R_N к зажимам W_1 составляют от 0,00005 и до 10 ом. Если же поменять местами

R_X и R_N (схема рис. 254-б), то подсчет величины измеряемого сопротивления надо производить уже по формуле $R_X = \frac{O}{P} \cdot R_N$, и тогда пределы измерения составят от 0,000001 до 0,2 ома.

В нижеследующей таблице приводятся данные о том, какими нормальными сопротивлениями следует пользоваться при измерениях различных сопротивлений, чтобы создать для схемы наивыгоднейшие условия в смысле ее чувствительности.

Величина нормального сопротивления	Измеряемое сопротивление— омы.			
	от	до	от	до
0,1	0,001	0,2	0,05	10
0,01	0,0001	0,02	0,005	1,0
0,001	0,00001	0,002	0,0005	0,1
0,0001	0,000001	0,0002	0,00005	0,01
Если вычисляют по формуле:				
$R_X = \frac{P}{O} \cdot R_N$			$R_X = \frac{O}{P} \cdot R_N$	

Наибольшая сила тока, которую можно устанавливать в питающей цепи мостика, может быть доведена в видах повышения чувствительности метода до 5А.

К мостику прилагается особая вилка с ключами и контактами для подключения ее под зажимы W_1 и W_2 . Это позволяет быстро перемонтировать схему для пользования прибором, как обычным мостиком Витстона с пределами измерения от 1,1 и до 10000 ом. Наконец, для измерения еще больших сопротивлений, примерно, до 10^5 ома, в гнездо магазина P с сопротивлением в 10 ом надо вставить особый штепсель в 10/9 ома, прилагаемый к прибору.

Работа на этом мостике сводится к следующему:

а) Если R_X неизвестно даже приблизительно, то задаются на магазинах P и M одинаковыми сопротивлениями по 100 или 50 ом; к зажимам W_2 подключают нормальное сопротивление, например, в 0,1 ома; спаренные рычаги магазинов O и L ставят на наибольшее сопротивление; замыкают ключ T источника, а затем на мгновение ключ T_1 гальванометра и наблюдают сторону отклонения указателя гальванометра.

Затем на магазинах O и L берут наименьшее сопротивление и вновь наблюдают сторону отклонения гальванометра. Если эти отклонения произошли в разные стороны от положения покоя, то измерение данного R_x возможно и сводится к подбору такого сопротивления (одинакового) на магазинах O и L , при котором повторное замыкание и размыкание ключа в цепи гальванометра не вызывает отклонений его подвижной системы.

Если же в предыдущем случае отклонения гальванометра оба раза наблюдались в одну и ту же сторону, что указывает на несоответствие взятых нами нормального сопротивления или же сопротивлений на магазинах P и M , то меняют последние и вновь повторяют опыт.

Если и это не даст желаемых результатов, то заменяют нормальное сопротивление другим и т. д., пока не уравновесят мостик.

Когда искомое сопротивление измерено, то, исходя из его величины, подбирают такие соотношения плеч моста и такое нормальное сопротивление, которые гарантировали бы наибольшую чувствительность схемы (см. таблицу).

β) Если порядок величины измеряемого сопротивления известен, то для ускорения работы можно рекомендовать такой прием: при $R_x < R_N$ схему собирают как на рис. 254-б и искомое сопротивление вычисляют по формуле $R_x = \frac{O}{P} R_N$ если же $R_x > R_N$, то, поменяв местами R_x и R_N , уравнивают мостик и измеряемое сопротивление вычисляют по формуле $R_x = \frac{P}{O} R_N$.

Сила тока в питающей цепи мостика может быть доведена до 5 А, если это допустимо для нормального и измеряемого сопротивлений.

б) На рис. 255-а и б представлен общий вид и схема двойного мостика фирмы Гартман и Браун, отличающегося от описанного выше тем, что нормальным сопротивлением в нем служит калиброванная проволока $A-B$ с нажимающим на нее металлическим ползунком D . Передвигая ползунок вдоль по проволоке, достигают равновесия мостика при определенном соотношении сопротивлений P , M , O и L , измеряемое же сопротивление вычисляют по формуле $R_x = \frac{P}{O} R_N$, где R_N — сопротивление проволоки между ее началом (точкой A) и ползунком D , прочитываемое на шкале, укрепленной под проволокой.

Гибкие шнуры, подводящие ток к магазинам P , M , O и L , позволяют поменять в схеме местами сопротивления, взятые на этих магазинах, и тем самым расширить пределы измерения на мостике от 0,001 и до 10 ом.

Работа на этом мостике не отличается в принципе от работы на мостике Сименса, но только необходимо стремиться

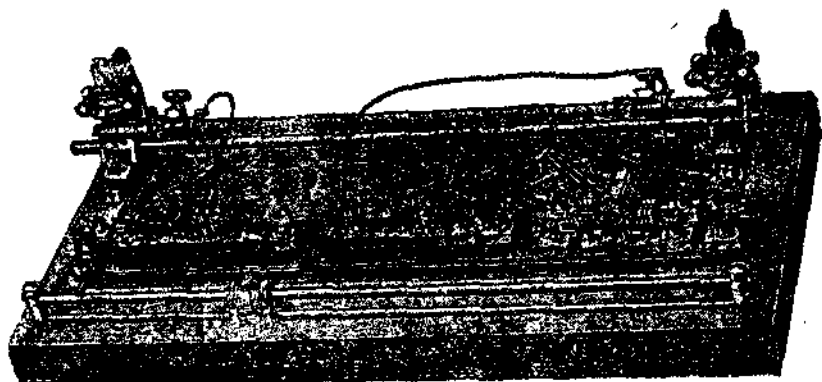


Рис. 255-а. Двойной мостик фирмы Гартман.

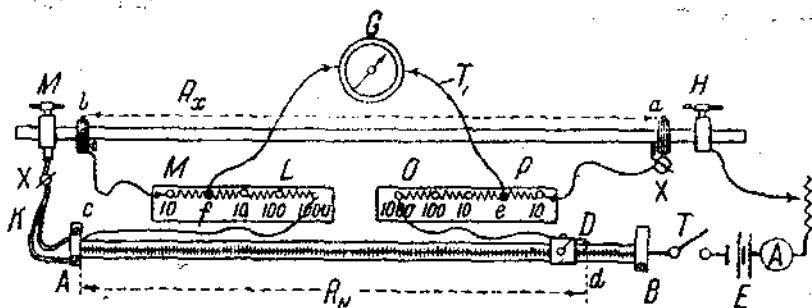


Рис. 255-б.

к тому, чтобы в момент равновесия ползунок находился ближе к концу B проволоки (будет меньше относительная ошибка в отсчете истинного положения ползунка). Мостик, в основном, приспособлен для измерения сопротивлений в виде проводов. Если измеряемое сопротивление имеет иной вид, например, амперметр, шунт и т. п., то его зажимы вместе с концами

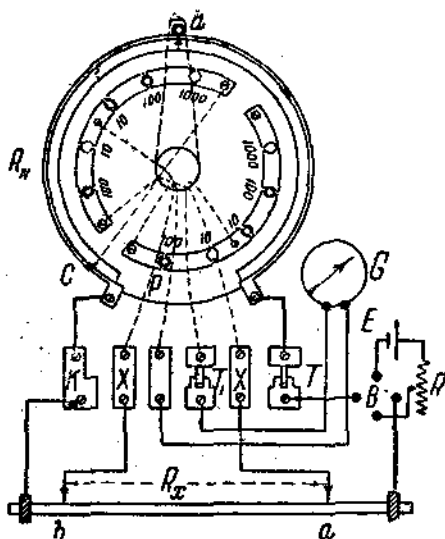


Рис. 256-а.

следний снабжен нониусом для более точного отсчета. Благодаря малой длине калиброванной проволоки пределы измерения этим мостиком меньше, чем у описанных выше. Недо-

a и b гибких шнуров под-
ключаются под специаль-
ные зажимы, обозначенные
на схеме буквами $X-X$.

в) На рис. 256-а и б по-
казана схема и, до извест-
ной степени, конструктив-
ное выполнение двой-
ного мостика фирмы
Сименс (более ста-
рого типа). В нем
нормальным сопротивле-
нием также служит кали-
брованная проволока, на-
тянутая по ребру шифер-
ного диска, на поверхности
которого нанесена шкала;
деления последней выра-
жают сопротивления про-
волоки от точки c и до
указателя ползунка a . По-

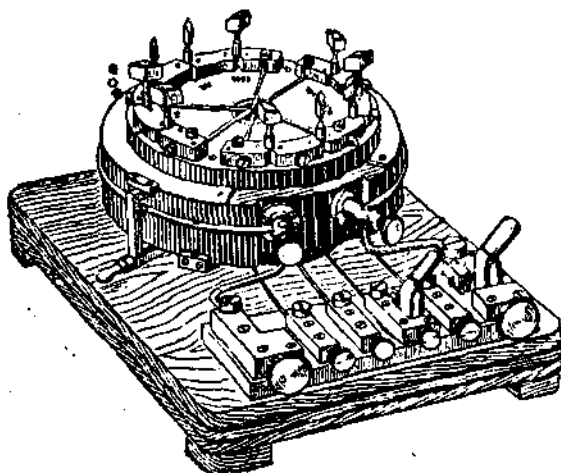


Рис. 256-б. Двойной мостик фирмы Сименс (штансельный).

статком его является подвижной контакт ползунка на проголке, ослабление которого часто приводит к ошибочным результатам.

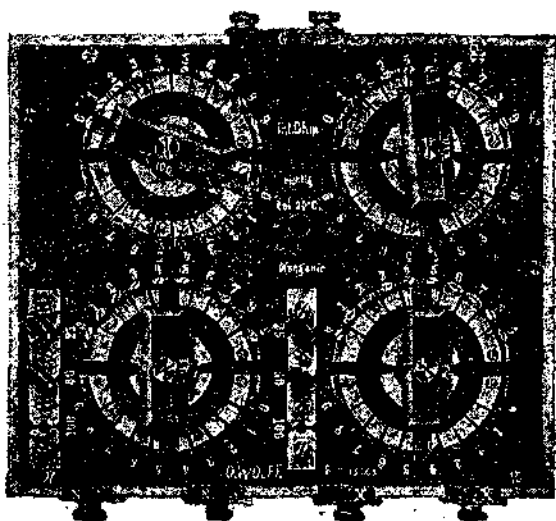


Рис. 257-а. Двойной декадный мостик сист. Вольф.

г) На рис. 257-а и б представлены внешний вид и монтажная схема одного из лучших двойных мостиков системы Вольфа. На ней приняты те же обозначения, что и на принципиальной схеме рис. 254-б. Основным его отличием от описанного выше мостика фирмы Сименс является то, что в нем постоянными сопротивлениями задаются на магазинах O и L , а равновесие находят, меняя плавно и притом одновременно сопротивления рычажных декадных магазинов P и M ; одновременно потому, что рычаги этих магазинов механически

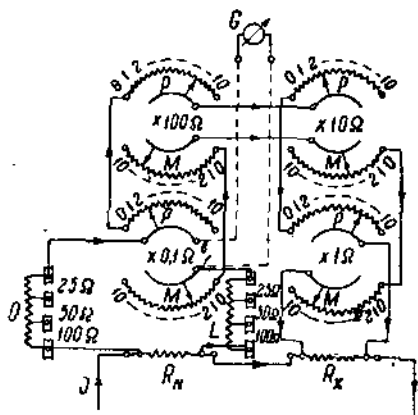


Рис. 257-б.

между собою связаны, так что при поворотах одного передвигается автоматически и другой.

При монтаже схемы любого из описанных выше мостиков с постоянным R_N необходимо следить за тем, чтобы не перекрестить тех проводов, которыми к схеме подключается измеряемое или нормальное сопротивления, ибо в этом случае уравновесить мостик не представляется возможным.

Замыкание и размыкание цепей батарей и гальванометра при работе надо производить в той же последовательности, как и у обычного мостика Витстона, чем гальванометр предохраняется от баллистического отклонения его подвижной системы.

Кроме того, в начале работы, когда мы далеки от равновесия, рекомендуется включать последовательно с гальванометром большое добавочное сопротивление или же снижать силу тока в питающей схеме цепи источника.

д) На рис. 258 изображена схема двойного универсального мостика фирмы Баччини. В основном он мало отличается от описанного выше двойного мостика фирмы Сименс; универсальным же его можно назвать потому, что при вставленных в

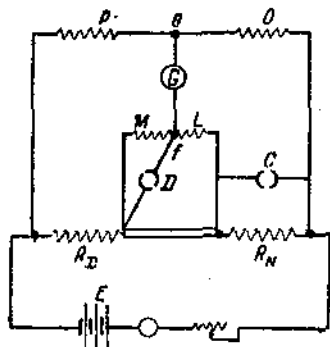


Рис. 258.

гнезда С и D щетселях схема его преобразовывается в схему обычного мостика Витстона для измерения сопротивлений средней величины.

§ 39. Измерение весьма больших сопротивлений.

1. Общие замечания. Методика измерений весьма больших сопротивлений, к которым относятся изоляторы, масла, дерево и ряд органических соединений, разнится в зависимости от их величины, аппаратуры, коей располагает экспериментатор, свойств измеряемого сопротивления (присущей ему емкости, и наблюдающегося в нем под ее влиянием остаточного заряда; изменения его сопротивления под влиянием электрического тока, температуры и влажности) и, наконец, условий работы.

Общею для всех вообще методов измерения весьма больших сопротивлений является необходимость самой тщательной

изоляции всех частей измерительной схемы, как друг от друга, так и от земли, а также применения источника тока с напряжением не менее того рабочего напряжения, при котором испытуемый объект обычно работает. Пренебрежение этими правилами легко приводит к результатам, не имеющим ничего общего с действительностью.

Из весьма большого числа способов измерения, выработанных практикой, мы здесь остановимся только на трех наиболее употребительных и вместе с тем отличающихся по принципу и области применения, а именно: методе непосредственного измерения, методе сравнения отклонений и методе потери заряда.

2. Метод непосредственного измерения осуществляется по одному из вариантов схемы рис. 259, где V — вольтметр, лучше статический, а если такого не имеется, то с возможно большим сопротивлением; E — источник тока с напряжением порядка 100 — 200 вольт. Если пренебречь сопротивлением шунтированного гальванометра G , то измеряемое сопротивление определяется из выражения $R_x = \frac{U}{I}$, где U и I — одно-

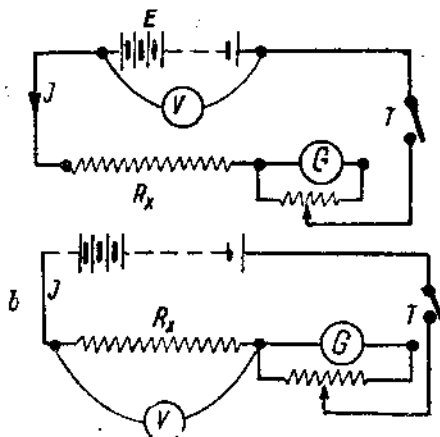


Рис. 259.

временно снятые показания приборов. Зная же приведенное сопротивление R гальванометра с шунтом или же вольтметра r_v , нетрудно вычислить поправку, и тогда истинное значение R_x равно

$$R_x = \frac{U - I \cdot R}{I} \quad \text{или} \quad R_x = \frac{U}{I - \frac{U}{r_v}} \dots \dots (14)$$

3. Метод сравнения отклонений применим, когда сопротивлениями источника и гальванометра можно пренебречь по сравнению с измеряемым, и когда источник обладает достаточно большой и постоянной э.д.с.

Идея метода сводится к отсчету показаний α_x и α_N гальванометра при включении источника E сперва на измеряемое R_x , а затем на эталонное R_N сопротивления (схема рис. 260).

Тогда

$$\frac{R_x}{R_N} = \frac{\alpha_N}{\alpha_x},$$

или

$$R_x = \frac{\alpha_N}{\alpha_x} \cdot R_N \dots \dots \dots (15)$$

Если удастся подобрать R_N таким, чтобы $\alpha_x = \alpha_N$, то $R_x = R_N$. Тогда точность метода будет наибольшей, а сам он может быть назван методом замещения. В обоих случаях от источника E требуется постоянство э.д.с.

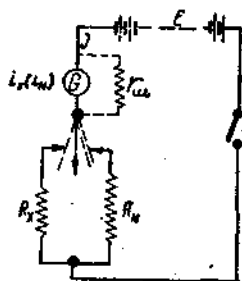


Рис. 260.

На практике мы редко располагаем возможностью подобрать $R_x = R_N$, так что обычно $\alpha_x \neq \alpha_N$, а если они еще и сильно разнятся, то метод приводит к ложным результатам. Действительно, отношение $\frac{R_x}{R_N} = \frac{\alpha_N}{\alpha_x}$ справедливо в том лишь случае, когда углы отклонения подвижной системы гальванометра прямо пропорциональны отсчетам их изображений на шкале, что остается справедливым только для небольших углов отклонения.

Поэтому если R_N сильно разнится от R_x то для получения примерно одинаковых α_x и α_N следует или регулировать напряжение U источника, или же шунтировать гальванометр. Допустим, что при отсчете α_x нам пришлось шунтировать гальванометр таким сопротивлением, при котором степень его чувствительности стала $\frac{1}{K_x}$ (например $K_x = \frac{1}{100}$); это, согласно теории шунтирования, указывает на то, что при данном шунте сила тока в главной цепи в 100 раз больше той, которая протекала бы в ней при том же угле отклонения незашунтированного гальванометра. Пусть далее для получения небольшого угла отклонения α_N пришлось сделать чувствительность гальванометра равной $\frac{1}{K_N}$.

Тогда для первого случая $i_x = C \cdot \alpha_x \frac{1}{K_x} = \frac{E}{R_x}$, а для второго $i_N = C \cdot \alpha_N \frac{1}{K_N} = \frac{E}{R_N}$, где C — постоянная гальванометра, величина, как известно, обратная его чувствительности. Разделив эти уравнения друг на друга, получим

$$\frac{\alpha_x}{\alpha_N} \cdot \frac{K_N}{K_x} = \frac{R_N}{R_x},$$

откуда

$$R_x = \frac{\alpha_N \cdot K_x}{\alpha_x \cdot K_N} R_N. \quad (16)$$

Если в обоих описанных случаях потребуется кроме того еще изменить и напряжение источника E , то искомое сопротивление определится по формуле

$$R_x = \frac{U_x \cdot K_x \cdot \alpha_N}{U_N \cdot K_N \cdot \alpha_x} \cdot R_N. \quad (17)$$

где U_x и U_N — напряжения на зажимах источника.

Каждое измерение необходимо начинать при самой малой чувствительности гальванометра, повышая ее постепенно.

Метод этот наиболее распространен при определении удельного сопротивления плохих проводников, а также при измерениях изоляции приборов, сетей и кабелей.

4. Метод потери заряда применяется по преимуществу для измерения очень больших сопротивлений (более 100 мегом), когда крайне затруднительно подобрать достаточной величины сравнительное эталонное сопротивление R_N . Метод основан на возможности наблюдать процесс разряда конденсатора известной емкости через измеряемое сопротивление R_x и на основе этого определить величину последнего. Измерение может быть осуществлено двояким способом.

а) при помощи электрометра или статического вольтметра Э (рис. 261). Конденсатор известной емкости C_N фарад заряжают от источника E до некоторого напряжения U_0 между его обкладками. Затем его разряжают через измеряемое сопротивление R_x , например, в виде пластинки M из испытуемого материала, зажатой между двумя электродами.

$$\text{Тогда } R_x \text{ в омах} = \frac{T_{\text{сек}}}{C_N \ln \frac{U_0}{U}} \quad (\text{см. приложение VII})$$

Здесь T — время от начала разряда конденсатора в секундах и U — напряжение в вольтах через T секунд;

б) при помощи баллистического гальванометра, когда, например, измеряется сопротивление изоляции кабеля $A-B$ (см. схему рис. 262). Кабель погружают для этого вместе с металлическим электродом K в бак D с водой. Переводя ключ P в нижнее положение, заряжают кабель, как некоторую емкость до потенциала U_0 и тотчас же перебрасывают ключ в верхнее положение, причем отсчитывают первое наибольшее отклонение α_0 подвижной системы гальванометра, вызванное импульсом разрядного тока.

Затем кабель вновь заряжают и переводят по секундомеру ключ P в среднее положение (кабель отключен от источника и в зависимости от состояния его изоляции разряжается быстрее или медлен-

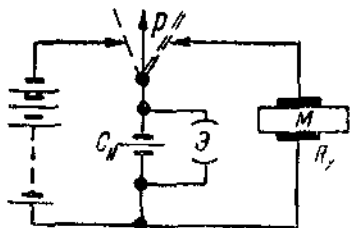


Рис. 261.

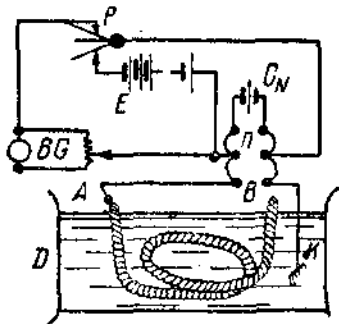


Рис. 262.

нее). По прошествии T секунд ключ P вновь переводят в верхнее положение и отсчитывают отклонение α_T гальванометра.

Тогда искомое сопротивление изоляции кабеля найдется из выражения

$$R_x = \frac{T_{сек}^*}{C_{каб} \ln \frac{\alpha_0}{\alpha_T}}, \quad (\text{см. приложение VIII})$$

где C — неизвестная нам емкость кабеля. Ее нетрудно определить в той же схеме, если приключить к свободным контактам переключателя P эталонную емкость C_N (конденсатор).

Заряжая последовательно эту емкость, а затем кабель, и наблюдая углы α_N и α_C отклонения баллистического гальванометра при их разряде имеем

$$Q_N = C_N \cdot U_0 = C_{бал} \cdot \alpha_N,$$

$$Q_C = C \cdot U_0 = C_{бал} \cdot \alpha_C,$$

откуда

$$\frac{C_N}{C} = \frac{\alpha_N}{\alpha_C}$$

или

$$C = \frac{\alpha_C}{\alpha_N} C_N.$$

5. Особенности измерительных схем. В связи со сказанным выше о необходимости выполнять измерение весьма больших сопротивлений при напряжении не ниже того рабочего напряжения, при котором измеряемый объект будет работать, отметим следующее. Если измеряемое сопротивление представляет собою пластинку M , то ее зажимают (схема рис. 263) между двумя металлическими электродами A и B ,

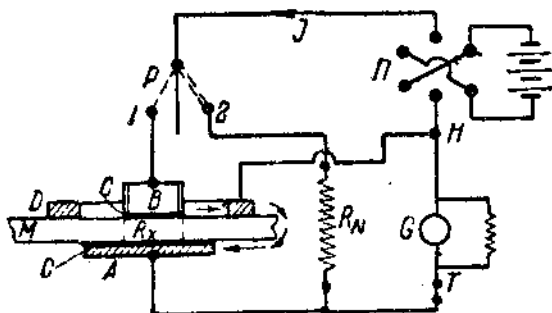


Рис. 263.

причем между ними и ею прокладываются для улучшения контакта листки станиоля C . Более совершенный контакт достигается помощью электродов из ртути, для чего в бюvetteкку наливают ртуть, на нее кладут испытуемую пластинку, а на поверхность пластинки накладывают кольцо B , внутрь которого также наливается ртуть. Подготовленный таким способом образец вводится в схему, причем во избежание возможного отклонения части тока по поверхности образца, минуя его толщ, вокруг электрода (или кольца) накладывается плоская кольцеобразная пластинка D называемая „охранной“ (или двойное кольцо с налитой в него ртутью). Пластинка эта должна быть соединена проводником с такой точкой схемы (например H), чтобы ответвляющийся по поверхности образца ток не учитывался измерительным прибором. В противном случае результаты измерения будут ошибочными.

Опыт сводится к отсчету показаний α_x и α_n гальванометра при 1 и 2 положениях переключателя P . Искомое R_x вычисляется по формулам 16 или 17 в зависимости от того, пришлось ли шунтировать гальванометр или изменять напряжение источника для предохранения гальванометра от чрезмерно больших отклонений.

Определив путем нескольких промеров среднее значение R_x и зная длину L пути тока через испытуемую пластинку, а также площадь F верхнего электрода, вычисляем удельное объемное сопротивление материала при температуре опыта

$$\rho_t = R_x \cdot \frac{F}{L} \text{ оми-сантиметров.}$$

При измерении необходимо следить за самой тщательной изоляцией всех частей схемы и опыт начинать при самой низкой чувствительности гальванометра $\left(\frac{1}{1000} - \frac{1}{10000}\right)$.

Если объектом измерения является изоляция кабеля, то бухту его, длиною L метров, с выведенными наружу и покрытыми парафином концами, погружают за 24 часа до измерения в бак с водою. Делается это с той целью, чтобы за это время вода успела проникнуть в места порчи изоляции; тогда при последующем измерении получатся результаты, более отвечающие рабочему режиму испытуемого кабеля. Перед измерением один конец кабеля зачищают до его жилы, а поверх изоляции на оба конца кабеля плотно навивают по несколько витков медного проводника, конец которого подключают к точке H схемы (охранное кольцо).

Напряжение источника E не должно быть ниже 100 вольт, и, наконец, плюс источника тока во время измерения необходимо присоединять к электроду K , а не к жиле кабеля, имея в виду, что ток утечки через изоляцию кабеля, по величине которого мы собственно и судим о состоянии изоляции, вызывает явление электролиза в тех веществах, которые соприкасаются с жилой кабеля, т. е. в его изолирующем слое. Так как эти вещества содержат в себе некоторое количество влаги, то при ее разложении наблюдается либо окисление металла жилы (если она является анодом), либо его восстановление (когда он служит катодом). В первом случае для R_x получается преувеличенное значение, а во втором — преуменьшенное.

Концы кабеля, выступающие из воды, должны быть сухи и покрыты парафином, не дающим влаге доступа к его жиле.

Во время опыта направление тока рекомендуется изменять, и если данные для R_x , полученные при разных направлениях тока, очень отличаются друг от друга, то изоляцию кабеля нельзя признать удовлетворительной.

В момент включения батареи на заряд кабеля, гальванометр следует замкнуть накоротко, дабы предохранить его от большого тока, являющегося суммой тока заряда и тока утечки.

Опыт ведется в последовательности, указанной при описании метода.

Для подсчета удельного сопротивления изолирующего материала кабеля надо исходить из выражения $R_x = \rho \frac{d}{2\pi r L}$, где d — толщина слоя изоляции, r — радиус наружной цилиндрической поверхности кабеля и L — его длина. Это выражение справедливо, когда d значительно меньше r . В противном случае вычисление надо вести по формуле

$$R_x = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{r_0}{r_1},$$

где r_0 и r_1 — радиусы наружной и внутренней поверхностей слоя изоляции.

Тогда искомое

$$\rho = \frac{R_x \cdot 2\pi L}{\ln \frac{r_0}{r_1}}.$$

Из предыдущей формулы явствует, что R_x обратно пропорционально L , а поэтому, если R_x есть общее сопротивление изоляции кабеля длиной L км, то сопротивление его изоляции R_x на 1 км, очевидно, в L раз больше.

Если задачу измерения является определение не объемного, а поверхностного сопротивления какого-либо изоляционного материала, то на наружную поверхность пластинки из испытуемого материала накладываются два электрода в виде ножей, расположенные параллельно друг другу на точно известном расстоянии L . Электроды эти, подобно электродам А и В рис. 263, соединяются с источником тока, в цепь коего введен гальванометр, в параллель же к электродам подключается статический вольтметр. Поверхностное сопротивление подсчитывается по закону Ома из расчета на 1 см² площади испытуемого материала. Фирма Гартман и Браун строит для этой

цели специальное приспособление, снабжая последнее особой металлической пластинкой, выполняющей роль упомянутого выше охранного кольца.

§ 40. Некоторые частные случаи измерения сопротивлений.

1) Сопротивление гальванометра может быть определено, по методу Томсона в схеме мостика, причем испытуемый гальванометр G (рис. 264) одновременно служит индикатором момента равновесия мостика.

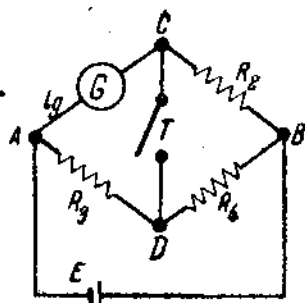


Рис. 264.

В подобной схеме можно так подобрать сопротивления плеч, что при замыкании и размыкании ключа T угол отклонения подвижной системы испытуемого гальванометра не изменится. Это возможно при постоянстве разности потенциалов точек C и D , т. е. в момент равновесия мостика.

Тогда искомое сопротивление

$$r_x = \frac{R_3}{R_4} \cdot R_2 \dots (18)$$

Для повышения чувствительности метода необходимо, чтобы угол отклонения гальванометра не был мал, и чтобы $R_3 \gg R_4$.

2) Внутреннее сопротивление элементов может быть измерено различными способами; из них надо отдать предпочтение тем, которые позволяют не только определить его величину, но и выяснить ее зависимость от силы тока, которая обуславливает степень поляризации элемента, что сказывается на его сопротивлении.

а) Метод Кольрауша сводится к измерению внутреннего сопротивления элемента в схеме линейного мостика Витстона, питаемого переменным током от зуммера Z (схема 265).

В плечо AC предпочтительно вводить два одностипных, включенных навстречу элемента, дабы уменьшить силу даваемого ими постоянного тока, а следовательно, и поляризацию. В момент равновесия имеем

$$2\rho = \frac{R_3}{R_4} R_2,$$

$$\rho = \frac{1}{2} \cdot \frac{R_3}{R_1} \cdot R_2 \dots \dots \dots (19)$$

Мостики с зуммером или небольшой катушкой Румкорфа строятся различными фирмами под общим названием мостиков Кольрауша (рис. 245).

6) Метод Маиса базируется на общем случае теории мостика Витстона и не требует источника тока, роль которого выполняет сам исследуемый элемент (рис. 266).

Для момента равновесия, когда замыкание и размыкание ключа T не сказыв-

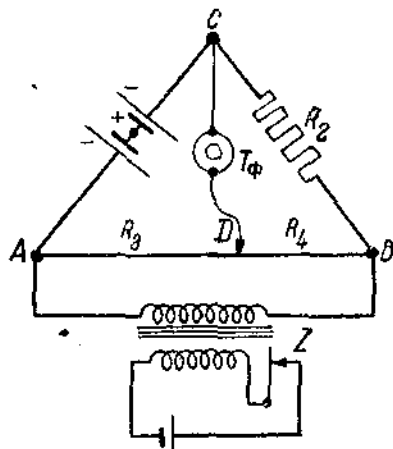


Рис. 265.

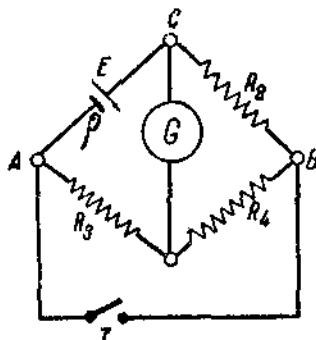


Рис. 266.

вается на величине угла отклонения подвижной системы гальванометра, имеем

$$\rho = \frac{R_3}{R_1} \cdot R_2 \dots \dots \dots (\text{см. приложение IX})$$

Если испытуемых элементов несколько, и они однотипны, то для уменьшения поляризации рекомендуется соединять их в две нечетные по количеству элементов группы и включать эти группы навстречу друг другу.

3) Сопротивление электролитов необходимо определять, питая измерительную схему переменным током, ибо постоянный ток их разлагает, отчего их сопротивление не остается постоянным.

Измерение проще всего произвести мостиком Кольрауша, налив испытуемый электролит в сосуд особой формы. Уравновесив мостик, мы для искомого сопротивления получим

$$R_x = \frac{R_3}{R_4} \cdot R_2 = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{l}{q} \dots \dots \dots (20)$$

Для определения удельной проводимости надо в тот же сосуд налить тот же объем жидкости, удельная проводимость σ_1 , которой точно известна, например, концентрированного раствора поваренной соли, для которого удельная проводимость, отнесенная к столбу длиной в 1 м при температуре 18°C и поперечном сечении в 1 мм² равна

$$\sigma_1 = [215 + 4,8 (t - 18^\circ)] 10^{-7}.$$

Произведя измерение вновь, мы получим сопротивление этой (контрольной) жидкости. Пусть оно равно R_x' . Тогда удельная проводимость испытуемой жидкости определится как

$$\sigma = \frac{R_x' \cdot \sigma_1}{R_x} \dots \dots \dots (21)$$

4) Сопротивление заземлений также должно определять при переменном или хотя бы пульсирующем токе, так как под

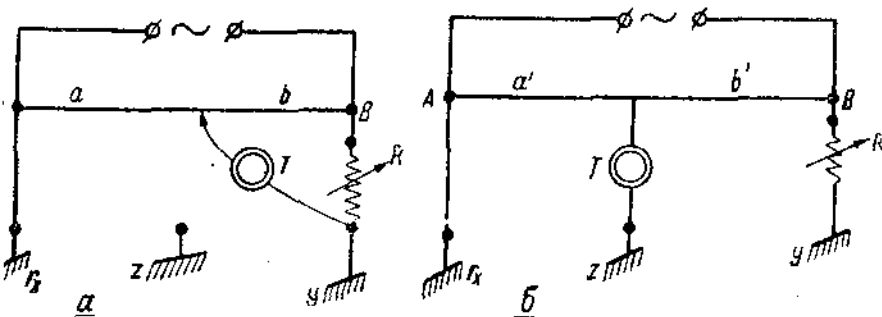


Рис. 267.

влиянием постоянного тока, в местах его перехода от металлической части заземления к влажной почве, возникала бы э.д.с. поляризационного характера. Все существующие методы измерения требуют устройства по меньшей мере двух вспомогательных заземлений кроме измеряемого. Они могут быть несовершенны, но должны быть как можно более постоянными,

причем они должны отстоять одно от другого на 10 — 15 м, дабы исключить ошибки измерения из-за неравномерного распределения падения напряжения в земле.

а) Метод Витстона требует двух измерений, двух вспомогательных заземлений z и y (схема рис. 267) и позволяет определить только два сопротивления: измеряемое r_x и одно из вспомогательных. Первое измерение производится по схеме а и дает при равновесии

$$\frac{r_x + y}{R} = \frac{a}{b} = m,$$

или

$$\frac{r_x + y + R}{R} = m + 1 \dots \dots \dots (a)$$

Второе измерение производится по схеме (б) и дает

$$\frac{r_x}{y + R} = \frac{a'}{b'} = m'$$

или

$$\frac{r_x}{r_x + y + R} = \frac{m'}{m' + 1} \dots \dots \dots (б)$$

Из уравнения (а) и (б) получаем

$$\frac{r_x}{R(m + 1)} = \frac{m'}{m' + 1},$$

откуда

$$r_x = m'R \cdot \frac{m + 1}{m' + 1} \dots \dots \dots (22)$$

Подобным же способом можно вывести, что

$$y = R \frac{m - m'}{m' + 1} \dots \dots \dots (23)$$

На этом принципе основано устройство особых мостиков для измерения сопротивления заземлений, которые отличаются от обычных мостиков системы Кольрауша только соответствующим подбором сопротивлений магазина R .

б) Метод Кристенсена позволяет определить искомое сопротивление заземления путем одного только измерения, причем одно из вспомогательных заземлений (на схеме рис. 268 заземление z) служит шунтом для плеч a и b мостика.

Кроме этих плеч мостик содержит плечи c и d постоянного сопротивления и калиброванную проволоку AB . Для измерения r_x задаются такими сопротивлениями плеч a и b схемы, чтобы они были значительно больше вероятного сопротивления вспомогательного заземления z .

Затем передвигают ползунок D до получения равновесия мостика. Если при этом удастся достигнуть равенства $a = b = c = d$, то искомое сопротивление $r_x \cong r_n$, где r_n — сопротивление проволоки между точкою B и ползунком D в момент равновесия. Если же подобрать сопротивления плеч в отношении

$$\frac{c}{b} = \frac{b}{a} = m,$$

то

$$r_x \cong m \cdot r_n \text{ (см. приложение X) } \dots \dots \dots (24)$$

Мостики этой системы строятся фирмой Микст и Генест.

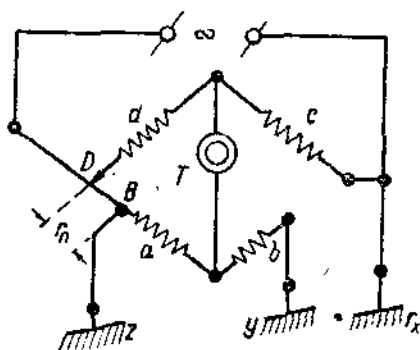


Рис. 268.

в) Компенсационный метод применен сравнительно недавно фирмой Сименс. Ею выпущен прибор, заключающий в себе индуктор, включаемый для измерения последовательно с измеряемым сопротивлением, первичной обмоткой трансформатора и вспомогательным сопротивлением. Вторичная обмотка того же трансформатора включена на цепь, образованную плавно

меняющимся сопротивлением, в виде реохорда со скользящим по его проволоке металлическим движком. Последний соединяется через нулевой электроизмерительный прибор со вторым вспомогательным заземлением. Кроме того, начальный (ближайший к измеряемому сопротивлению) зажим реохорда непосредственно соединен с тем зажимом прибора, который приключен к измеряемому сопротивлению.

Для измерения вращают ручку индуктора и одновременно с этим подыскивают такое положение движка на реохорде, пока нулевой прибор не покажет отсутствия тока в его цепи.

Для этого момента падение напряжения между измеряемым и вторым вспомогательным заземлениями равно, очевидно, падению напряжения на сопротивлении реохорда от его начала (соединенного с цепью первичной обмотки трансформатора) и до места, где находится движок (компенсация). Если коэффициент трансформации трансформатора равен 1, то искомое сопротивление заземления равно, очевидно, сопротивлению, введенному на реохорде. Это позволяет отсчитывать величину измеренного сопротивления непосредственно по шкале реохорда, не производя никаких подсчетов. (Внешний вид см. рис. 269).

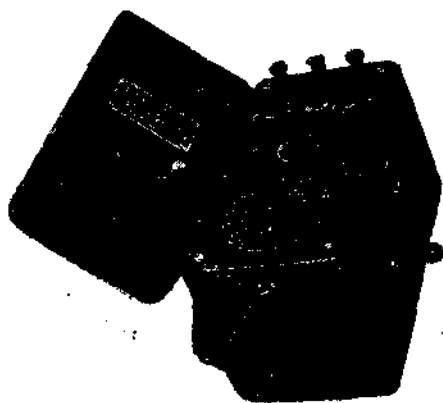


Рис. 269. Омметр фирмы Сименс.

5) Калибрование измерительных проволок,

т. е. подразделение их на n равных по сопротивлению частей, может быть осуществлено по схеме рис. 269-а, где I и II — две замкнутые цепи с отдельными источниками тока E и e ; AB' — калибруемая проволока, закрепленная в точках M и N , с расположенной под ней полоской из бумаги для разметки на ней

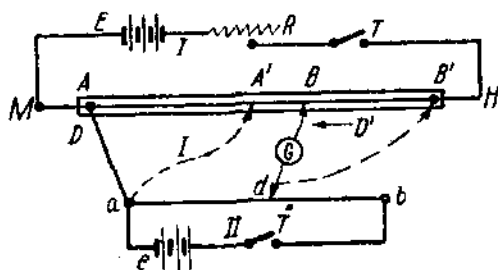


Рис. 269-а.

шкалы; G — гальванометр; $a-b$ — вспомогательная проволока; D и d — подвижные контакты.

Опыт ведут так: соединив точки A и a , находят, передвигая контакты D' и d , такую точку B на калибруемой проволоке, чтобы гальванометр дал неко-

торое отклонение α . Затем, не изменяя положения контакта d , передвигают движок D' в точку B' , а движок D в такую точку A' на калибруемой проволоке, чтобы угол отклонения остался без изменения. Тогда при постоянстве E и e сопротивление отрезка $A-B$ будет, очевидно, равно сопротивлению

отрезка $A' - B'$. Если теперь повторить опыт, но сделать так, чтобы точки B и A' совпали, то полученная точка разделит всю проволоку AB' на две равные по сопротивлению части. Точку эту отмечают на шкале. Затем таким же способом делают каждый из полученных отрезков и т. д.

§ 41. Измерение сопротивления изоляции и нахождение места повреждения.

Способы измерения сопротивления изоляции электрических сетей, установок и машин представляют столь широко разработанную область измерений, что в пределах этого курса мы можем, кроме методов измерения весьма больших сопротивлений, из коих некоторые применимы и для целей измерения изоляции, остановиться только на весьма ограниченном числе методов, выбрав из них наиболее распространенные. Эти последние видоизменяются в зависимости от того, находится ли или не находится испытываемая сеть под рабочим напряжением, и имеют целью определить не только сопротивление изоляции всей сети относительно земли, но также и изоляцию проводов относительно друг друга и земли. Это необходимо потому, что сети с одним заземленным, а другим хорошо изолированным проводами, хотя и обладают общим сопротивлением изоляции равным нулю, но все же признаются годными для работы.

Перед измерением изоляции сетей необходимо предварительно выключить все приемники, соединяющие оба провода между собою.

1. Измерение изоляции электрической сети, не находящейся под напряжением, и определение места повреждения.

а) Измерение изоляции. — Метод вольтметра. Один полюс вспомогательной батареи элементов или аккумуляторов с напряжением не ниже рабочего напряжения сети, соединяют через вольтметр V с жилой провода A . Другой полюс батареи через лампочку L , играющую роль предохранителя для вольтметра, соединяют с хорошим заземлением Z (схема рис. 270) и отмечают показание U_1 вольтметра. Затем отсоединяют вольтметр в точке A и присоединив его этим зажимом непосредственно к заземлению, вновь отмечают показание U_2 вольтметра, равное, очевидно, напряжению батареи.

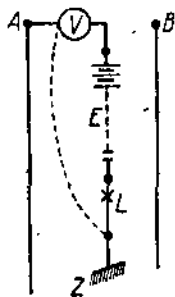


Рис. 270.

Напряжение $U_1 = I \cdot r_v$, где $I = \frac{U_2}{r_v + R_{XA}}$; где R_{XA} равно сопротивлению всех путей утечки с провода A , а r_v — сопротивление вольтметра.

Отсюда имеем

$$R_{XA} = r_v \left\{ \frac{U_2}{U_1} - 1 \right\} \dots \dots \dots (25)$$

Определив таким же способом сопротивление изоляции провода B , т. е. R_{XB} , нетрудно вычислить и сопротивление изоляции сети в целом, а именно

$$P_X = \frac{R_{XA} \cdot R_{XB}}{R_{XA} + R_{XB}} \dots \dots (26)$$

Для определения сопротивления изоляции проводов относительно друг друга вместо заземления пользуются вторым проводом.

Метод легко приводит к ошибочным результатам, если вспомогательная батарея сама плохо изолирована от земли или провода ее заменяющего.

Точность измерения зависит от постоянства в.д.с. батареи, сопротивления вольтметра и его чувствительности; чем они больше, тем лучше результаты.

К заземлению необходимо подключать положительный полюс батареи (§ 46). Применяв взамен вольтметра гальванометр с пропорциональной шкалой и отметив отклонения a_1 и a_2 , имеем по предыдущему

$$R_{XA} = r_g \left\{ \frac{a_2}{a_1} - 1 \right\} \dots \dots \dots (27)$$

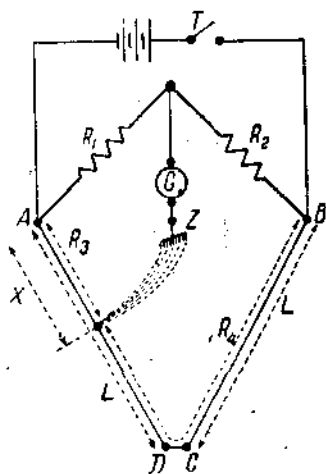


Рис. 271.

6) Определение места повреждения изоляции кабеля проще всего осуществляется в схеме мостика Витстона (рис. 271) и состоит в том, что отдаленный конец D жилы поврежденного кабеля или провода соединяется коротко с обратным проводом BC (вспомогательным или контрольным) включаемым в схему мостика. Гальванометр одним зажимом соединяется с хорошим заземлением Z . В момент

равновесия мостика и для случая, когда сечения испытуемого и вспомогательного проводов одинаковы и, следовательно, сопротивления их жил пропорциональны длинам, имеем

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{X}{2L - X} = \frac{R_3}{R_4},$$

откуда

$$X = \frac{2L \cdot R_1}{R_2 + R_1} \dots \dots \dots (28)$$

где $2L$ равны сопротивлению обоих проводов.

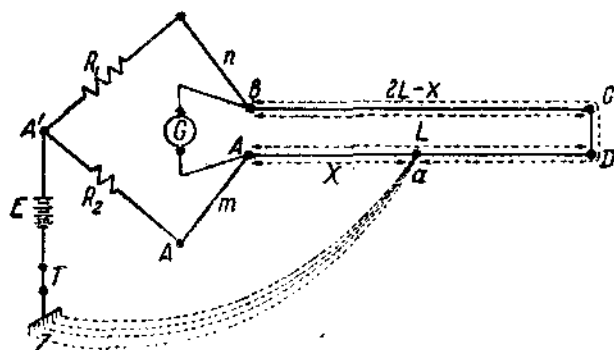


Рис. 272.

Если сечения S_1 и S_2 испытуемого и вспомогательного проводов различны, то

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{\frac{X}{S_1}}{\frac{L}{S_2} + \frac{L-X}{S_1}}.$$

Способ дает хорошие результаты, когда изоляция повреждена в одном месте, и когда изоляция вспомогательного провода хороша.

Описанный способ (Муррея) применим в тех случаях, когда сопротивление жилы испытуемого кабеля относительно велико ($>0,1$ ома). Если же оно мало, то сопротивления соединительных проводов, с помощью которых испытуемый кабель подключается к схеме мостика, складываясь с измеряемым сопротивлением, могут привести к ошибке в определении места повреждения.

В этих случаях лучше воспользоваться несколько видоизмененным способом (Варлея), схема которого позволяет приложить переходные сопротивления m и n к магазинам мостика, а не к исследуемому кабелю (схема рис. 272).

После уравнивания схемы имеем

$$X = \frac{2L(R_2 + m)}{R_1 + R_2 + m + n} \Omega.$$

В этом уравнении неизвестными являются $2L$, m и n ; их надо измерить отдельно, причем, если задаться для R_1 и R_2 сопротивлениями, значительно большими, нежели m и n , то предыдущее уравнение упрощается, а именно

$$X = \frac{2L \cdot R_2}{R_1 + R_2} \dots \dots \dots (29)$$

В обоих случаях необходимо, очевидно, измерить сопротивление $2L$. Зная его, а также диаметр жилы кабеля и удельное сопротивление материала, уже нетрудно по измеренному сопротивлению X подсчитать и эквивалентную ему длину кабеля от точки A до места его порчи a .

2. Измерение изоляции сети, находящейся под напряжением.

Метод Фриша состоит в последовательном измерении напряжений (рис. 273)

- а) сети, т. е. между проводами U ,
- б) между положительным проводом и землей U_+ ,

- в) между отрицательным проводом и землей U_- .

Если сопротивление вольтметра r_v , то сопротивление изоляции положительного провода

$$r_+ = r_v \frac{U - U_+ - U_-}{U_-} \dots \dots \dots (\text{см. приложение XI})$$

Сопротивление изоляции отрицательного провода

$$r_- = r_v \frac{U - U_+ - U_-}{U_+}$$

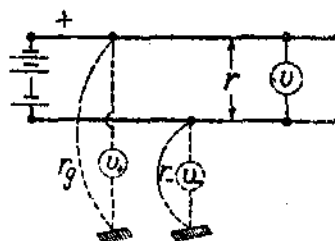


Рис. 273.

и, наконец, сопротивление изоляции всей сети

$$r = r_v \frac{U - U_+ - U_-}{U_+ + U_-}.$$

Если r_v очень мало по сравнению с r_+ и r_- , то приближенно можно считать, что

$$\frac{U_+}{r_v} = \frac{U - U_+}{r_-}$$

$$\frac{U_-}{r_v} = \frac{U - U_-}{r_+},$$

откуда

$$r_+ = r_v \frac{U - U_-}{U_+}$$

и

$$r_- = r_v \frac{U - U_+}{U_-} \dots (30)$$

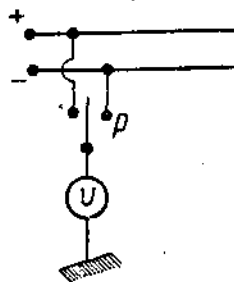


Рис. 274.

Из этого вытекает, что сопротивление изоляции одного из проводов можно представить в функции от разности потенциалов между землей и другим проводом. Это позволяет разметить шкалу вольтметра непосредственно в омах измеряемого сопротивления, на чем и основано устройство особых приборов, называемых испытателями изоляции. Последние монтируются на распределительных досках станций, имеют вид обычного измерительного прибора и включаются на тот или иной провод сети при помощи переключателя P (схема рис. 274).

§ 42. Специальные технические приборы для измерения сопротивлений изоляции.

Приборы, специально строящиеся для целей быстрого измерения сопротивлений обычных, а также изоляции, носят общее наименование **омметров** и по принципу их действия могут быть подразделены на две основные группы.

К первой относятся **омметры**, показания которых зависят от постоянства э.д.с. источника, а поэтому они снабжаются или поправочными графиками или, что проще и чаще практикуется, особыми приспособлениями, позволяющими изменять чувствительность прибора при сохранении его градуировки

в омах. По принципу эти приборы суть вольтметры магнито-электрической системы, шкала коих размечена в омах измеряемого сопротивления. Для этого вольтметр включается по схеме рис. 275 последовательно с известным переменным сопротивлением R ; меняя это последнее и отмечая каждый раз показание стрелки прибора, наносят на его шкале значения величин этого сопротивления.

Градуировать вольтметры в омах возможно также путем расчета. Для этого необходимо как можно точнее измерить сопротивление r_v вольтметра и, зная то постоянное напряжение U , при котором омметр будет применяться, а также число делений n его шкалы (шкала при этом предполагается равномерной), произвести подсчет, руководствуясь следующим: если подключить наш вольтметр непосредственно к напряжению U (т. е. при нулевом сопротивлении R в схеме 275), то сила тока в цепи прибора будет

$$i_v = \frac{U}{r_v} = n_{\max} \text{ делений шкалы.}$$

Если подключить последовательно к вольтметру определенное сопротивление R_1 , то

$$i_1 = \frac{U}{r_v + R_1} = n_1 \text{ делений шкалы.}$$

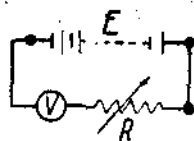


Рис. 275.

Отсюда

$$\frac{n_1}{n_{\max}} = \frac{U}{r_v + R_1} \cdot \frac{r_v}{U} = \frac{r_v}{R_1 + r_v}$$

и, следовательно, искомое деление равномерной шкалы будет

$$n_1 = n_{\max} \cdot \frac{r_v}{R_1 + r_v} \dots \dots \dots (a)$$

По этой формуле нетрудно уже подсчитать цену различных делений шкалы вольтметра в омах. Шкала подобного омметра получится, очевидно, неравномерной, с нулем у правого ее конца и более сжатой у левого конца. В качестве вольтметра, градуируемого как омметр, желательно, но не обязательно воспользоваться прибором магнито-электрической системы. Описанный, например, в первом отделе книги 10-омный прибор фирмы Сименс легко может послужить омметром. Допустим, например, что нам требуется измерить сопротивление изоляции якоря электрической машины относительно

ее станины, пользуясь сетью постоянного тока напряжением 110 В. Приключив к этому прибору добавочное сопротивление $r_{доб}$ на ближайший больший предел измерений, т. е. на 150 вольт, измерим сперва напряжение сети, для чего в схеме рис. 276 поставим переключатель P на контакт 1 и отсчитаем число делений шкалы, на которое отклонится стрелка прибора, т. е. измерим напряжение U_1 сети. Допустим, что оно оказалось равным 110 вольт. Поставив затем переключатель на контакт 2, соединенный с коллектором машины, вновь измерим напряжение U_2 . Последнее, очевидно, будет меньше, поскольку часть общего напряжения сети израсходуется при

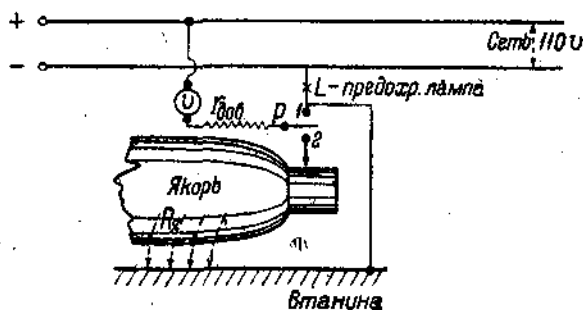


Рис. 276.

этом в сопротивлении изоляции машины. Искомое сопротивление изоляции найдем по формуле (25), а именно

$$R_{\text{из}}^x = r_v \left\{ \frac{U_1}{U_2} - 1 \right\},$$

где r_v — сопротивление вольтметра вместе с приключенным к нему добавочным сопротивлением. Сопротивление самого 10-омного прибора равно 1000 ом, а добавочное сопротивление для пределов измерения до 150 вольт равно 49000 ом (из расчета по 1000 ом на каждые 4 вольта шкалы).

Задача. Подсчитайте возможные пределы измерения сопротивлений этим прибором при напряжении сети 220 В.

Подобная градуировка или измерение верны только при постоянстве э.д.с. источника E . Но так как в условиях практики, и главным образом по вине источника питающего исследуемую сеть, трудно достичь постоянства э.д.с., то омметр снабжают шунтом, магнитным

или обычным, с помощью которого прибор можно выверять перед измерениями.

Магнитный шунт представляет собою железную пластинку A (схема 277), которую можно отдалять от полюсных наконечников NS постоянного магнита прибора или к ним приближать. Если напряжение источника, посылающего ток через гальванометрическую рамку a , прибора больше того, при котором омметр градуировался, то он даст, очевидно, ошибочные показания. Тогда, приближая пластинку к полюсным наконечникам, мы отвлечем через нее часть потока. Напряжение H поля при этом уменьшится, и чувствительность прибора понизится.

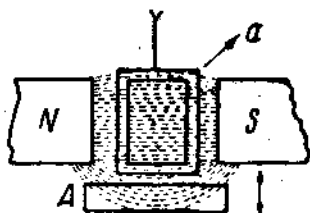


Рис. 277.

Если э.д.с. источника меньше, то пластинку надо отодвинуть. Внутри подобных приборов обычно монтируется особое сопротивление, служащее для выверки его шкалы (нуля шкалы), при замыкании на которое стрелка омметра должна стать против нуля шкалы. Если этого не происходит, то, регули-

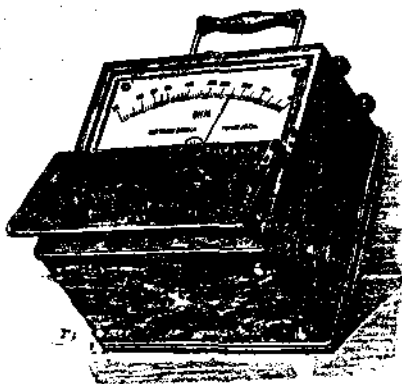


Рис. 278-а. Омметр переносный тип Бругера.

руя положение шунта, приводят стрелку на нуль. После этого прибор готов для измерения неизвестного сопротивления, если только э.д.с. источника вновь не изменится.

Обычный шунт представляет собою плавно меняющееся сопротивление, которым шунтируется обмотка гальванометрической рамки прибора. Изменяя его величину, мы тем самым изменяем чувствительность омметра и, подобно предыдущему, можем произвести выверку его нуля.

Стремление изжить основной недостаток, присущий омметрам первой группы, — неравномерность и сжатость делений в левой части их шкалы — привело к целому ряду конструкций и схем, так или иначе разрешающих эту задачу. Из них мы остановимся на омметрах, работающих по принципу

дифференциального прибора; показание у них является функцией разности ампер-витков двух обмоток, образующих подвижную систему.

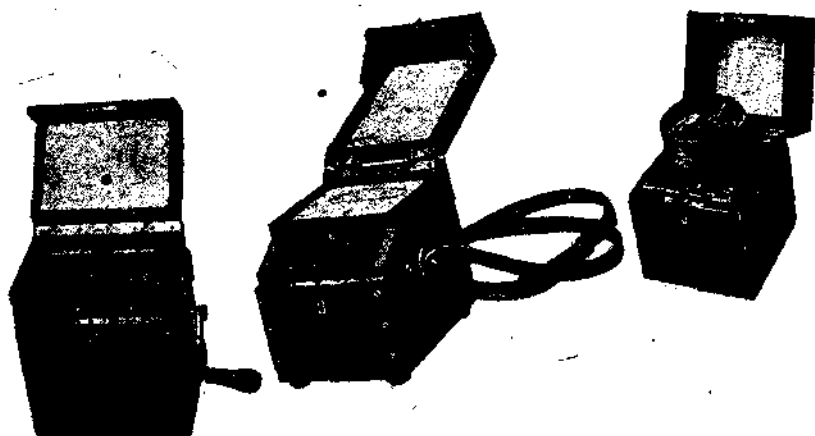


Рис. 278-б. Испытатели изоляции.

На рис. 279 представлена принципиальная схема омметра фирмы Нормы, как пример одного из многочисленных типов подобного рода приборов. Здесь E — источник тока от 15 до 50 вольт; R — регулируемое сопротивление; a и b — токовая и вольтметровая обмотки прибора, намотанные на один и тот же каркас и образующие подвижную систему прибора; X — измеряемое сопротивление и, наконец, r — сопротивление, равное сопротивлению обмотки b . Подвижная система прибора находится в междуполюсном пространстве постоянного магнита $N-S$. При полном равенстве ампер-витков обеих обмоток, действующих встречно, стрелка прибора устанавли-

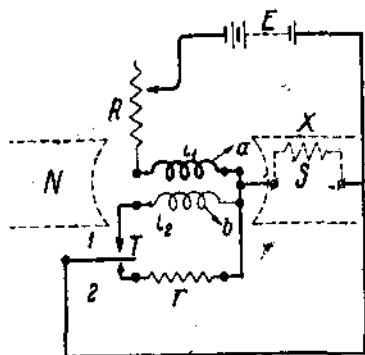


Рис. 279.

вается на нулевом делении шкалы. Если ввести в цепь прибора измеряемое сопротивление X , перевести ключ T на контакт 2 и подрегулировать сопротивление R так, чтобы стрелка при-

бора установилась на наибольшем делении шкалы, то через обмотку *a* прибора будет проходить некий ток

$$i_1 = \frac{U}{r + a + R + X}$$

и притом всегда одинаковый, поскольку перед каждым измерением мы его подрегулируем на максимальное отклонение стрелки прибора.

Если вслед за этим перевести ключ на контакт 1, то через рамку будет проходить ток i_2 , пропорциональный падению напряжения $i_1 \cdot X$ на зажимах измеряемого сопротивления, ибо, как сказано выше, ток i_1 всегда одинаков по силе.

Ток i_2 , протекающий по обмотке *b*, поэтому пропорционален измеряемому сопротивлению; он вызывает пропорциональное же уменьшение отклонения стрелки прибора. Отсюда явствует, что шкала подобного прибора должна иметь равномерные деления, что является большим преимуществом этой системы омметров. Строятся приборы этого типа на пределы измерения в 0,01; 0,1; 1; 10; 100; 1000 и 300 000 омов; их изменение достигается простым переключением особого коммутатора.

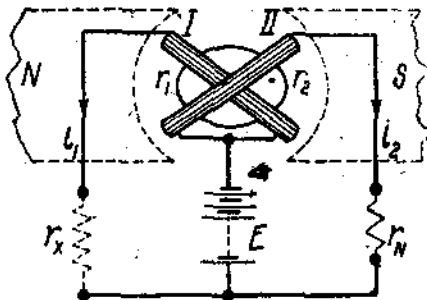


Рис. 280.

Ко второй группе омметров относятся приборы, показания которых не зависят от постоянства э.д.с. источника. Основным типом приборов этой группы является омметр системы Бругера, состоящий из двух, под углом расположенных и жестко связанных гальванометрических рамок I и II (рис. 280). Система рамок снабжена подвесом, не создающим никакого направляющего момента, а поэтому в нерабочем состоянии система рамок занимает безразличное положение в междуполусном пространстве постоянного магнита NS. При пропускании по обмоткам рамок токов i_1 и i_2 создаются магнитные поля, в результате взаимодействия которых с полем постоянного магнита система рамок занимает некоторое устойчивое положение относительно шкалы прибора, например, на *n* делениях шкалы.

Тогда

$$r_x = (r_1 + r_2) \cdot C \cdot f(a) - r_1, \dots \text{ (см. приложение XII)}$$

где C — постоянная прибора; r_1 и r_2 — сопротивление обмоток и r_n — известное сопротивление.

Из этого выражения явствует, что: 1) измеряемое сопротивление не зависит от напряжения источника, почему его возможное непостоянство на результатах измерения не скажется, и 2) шкала подобного прибора может быть размечена непосредственно в омах.

Пределы измеряемых этими приборами сопротивлений колеблются от 0,1 ома и до 100 мегом, в зависимости от величины сопротивления r_n и э.д.с. источника. (Общий вид см. рис. 278-а).

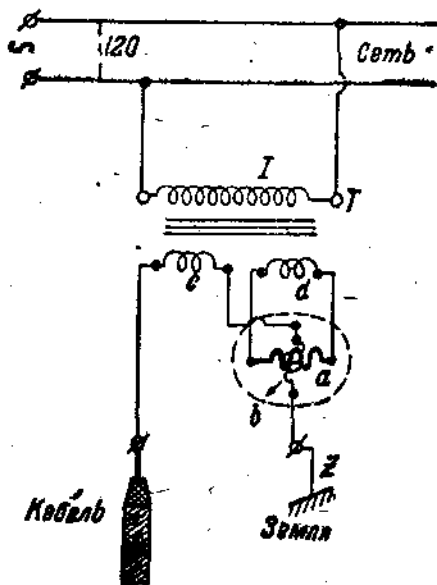


Рис. 281.

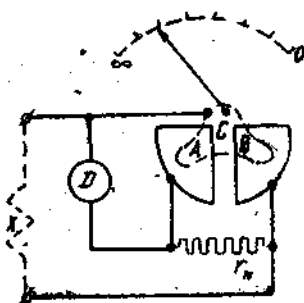


Рис. 282.

Третий тип омметров, известный под наименованием меггера Эвершедта, состоит из небольшого генератора постоянного тока, якорь которого приводится во вращение от руки, и магнитоэлектрического прибора с тремя подвижными катушками без противодействующей силы. Через две из них, соединенные последовательно и питаемые током от генератора, проходит постоянный ток, вследствие чего эти катушки стремятся повернуться в поле прибора в определенную сторону. Третья катушка, скрепленная с первыми двумя, обтекается током, сила которого зависит от измеряемого сопротивления. Она стремится вращаться в обратную сторону, и равновесие

всей этой подвижной системы, т. е. ее угол поворота, зависит от измеряемого сопротивления.

Шкала приборов этого типа неравномерна, и для улучшения ее вида полюсным наконечникам постоянного магнита придают особую форму или же располагают одну катушку над другой в сфере воздействия различных по конфигурации магнитных полей; одну, например, в равномерном, а другую в радиальном поле (прибор, именуемый метромом).

Наконец, фирмой Нальдер строятся электростатические омметры, схема которых представлена на рис. 281. Здесь A и B — квадранты; C — бисквит; D — индуктор, развивающий напряжение до 1000 вольт; r_N — известное сопротивление и, наконец, X — измеряемое. Угол поворота бисквита и скрепленной с ним стрелки зависит от соотношения r_N и X и не является функцией напряжения.

Для непосредственного измерения изоляции фирма Всеобщая Компания Электричества строит омметры, работающие от сети переменного тока напряжением 120 вольт. По существу это электродинамические вольтметры (рис. 282). Неподвижная обмотка прибора a и подвижная b подключаются к сети не непосредственно, а через две секции c и d вторичной обмотки трансформатора, смонтированного внутри прибора. Его первичная обмотка I подключается к сети. Омметры этого типа особо широко применяются при измерениях температур.

Наконец, на рис. 278-б представлен общий вид менее точных омметров первой группы, применяемых в качестве испытателей изоляции.

§ 43. Особенности измерения сопротивлений при переменном токе.

При измерении сопротивлений на переменном токе необходимо считаться со следующим: сопротивление данного проводника при переменном токе, вследствие его поверхностного распределения больше, чем при токе постоянном, и тем больше, чем больше частота, магнитная проницаемость и удельная проводимость материала. Поэтому надо принять, как правило, что измерение сопротивлений в цепях переменного тока должно производиться с помощью тока той частоты, при которой данный проводник работает. Измерения эти лучше всего производить с помощью тех же методов, которыми пользуются при измерениях коэффициентов само- и взаимной индукции.

При наличии точных амперметра и ваттметра сопротивление проводника может быть определено по схеме *a* или *б* (рис. 283). Сняв одновременно показания приборов, получим приближенно

$$R_x = \frac{P'}{I^2}.$$

В обоих случаях ваттметр учтет мощность P' , которая больше действительно расходуемой P в измеряемом сопротивлении по схеме *a* на величину мощностей, потребляемых в амперметре и в толстой обмотке ваттметра, а по схеме *б* на сумму мощностей в амперметре и тонкой обмотке ваттметра. Кроме того это заключение справедливо в том лишь случае, когда ток и напряжение в тонкой обмотке ваттметра совпадают по фазе.

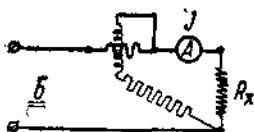


Рис. 283.

При работе с тепловым амперметром и хорошим ваттметром электродинамического типа рекомендуется применять схему *б*, так как сопротивление обмоток этих приборов можно считать чисто активным.

Если же поправок вводить не предполагается, то при небольших напряжениях на зажимах измеряемого сопротивления выгоднее схема *б*, а при малых значениях силы тока выгоднее схема *a*.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ VIII.

1. Какую из схем рис. 235 *a* или *б* надо применить при измерении сопротивлений обмоток якоря электрической машины.
2. Оказывает ли влияние на точность измерений по методу вольтметра и амперметра возникновение термодвижущих сил; если оказывает, то в каких точках цепи они возникают и каким способом исключить их влияние?
3. Измеряя сопротивление по методу замещения, мы можем применять две схемы включения прибора и измеряемого сопротивления; укажите область применения каждой из этих схем, те условия, которые гарантируют наибольшую точность измерения по каждой из них, а также укажите, необходимо ли при них постоянство в.д.с. источника и требуется ли внять постоянную измерительного прибора?
4. В чем разница между общим и частным случаем равновесия схемы мостика Витстона?
5. Какая разница в конструкции мостиков с постоянным и переменным отношением балансных плеч?
6. От чего зависят пределы сопротивлений, могущих быть измеренными в схеме мостика, и каким способом расширить эти пределы?
7. От каких обстоятельств зависит чувствительность схемы мостика?

8. Приведите условия, способствующие наибольшей чувствительности гальванометра в схеме мостика.

9. Какими соображениями обуславливаются места гальванометра и источника в схеме мостика?

10. Как определить ошибку, допускаемую данным мостиком, и какие выгоды мы приобретаем, если производим измерение, дважды меняя местами измеряемое и одно из известных сопротивлений?

11. Перечислите правила работы на мостиках.

12. Зависит ли точность результатов измерения по методу мостика от непостоянства в.д.с. источника.

13. Какому из методов — замещения или дифференциального гальванометра — вы отдадите предпочтение и почему?

14. В каких случаях особенно применим метод компенсации, и какими условиями обеспечивается точность измерения по этому методу?

15. В чем трудность измерения весьма малых сопротивлений и какими способами их можно преодолеть или хотя бы уменьшить?

16. Какое отличие в схемах двойных мостиков с переменным и постоянным отношением балансных плеч?

17. Объясните, почему в схеме двойного мостика часть ее, соединяющая неизвестное и эталонное сопротивления, должна обладать ничтожно малым сопротивлением.

18. Как определить чувствительность схемы двойного мостика?

19. При каком из методов измерения весьма малых сопротивлений нет необходимости считаться с переходными и добавочными сопротивлениями и почему? Есть ли смысл при работе по этому методу менять направление тока, и требуется ли при нем постоянство в.д.с. источника?

20. Какую предосторожность необходимо соблюдать при измерениях весьма больших сопротивлений?

21. Требуется ли постоянства в.д.с. источника метод сравнения отклонений?

22. Почему при измерениях сопротивлений более 100 мегом предпочтительнее метод потери заряда?

23. Можно ли измерить сопротивление изоляции кабеля по методу сравнения отклонений, и если можно, то встречается ли необходимость в устройстве „охранного“ кольца?

24. Укажите условия повышения чувствительности метода Томсона при измерении сопротивления гальванометров.

25. В чем смысл включения двух однотипных элементов при определении внутреннего сопротивления элементов по методу Манса?

26. Какие требования предъявляются к вспомогательным заземлениям, необходимым при измерениях сопротивления заземлений?

27. Перечислите условия, гарантирующие точность измерения изоляции сети по методу вольтметра.

28. Перечислите методы измерения весьма больших сопротивлений, применимые для измерения изоляции электрических сетей и установок.

29. Для какой цели в омметрах устраивают магнитный шунт?

30. В каких случаях определение места повреждения кабеля по методу мостика даст правильные результаты?

31. Почему при измерениях сопротивления изоляции сетей и кабелей надо плюс источника тока включить на заземление, а не на жилу провода?

32. На какую максимальную точность измерения можно рассчитывать при измерении сопротивлений по методу амперметра и вольтметра, если вести эту работу с приборами магнито-электрической системы II класса?

33. Какой гальванометр следует взять для измерения весьма малого сопротивления двойным мостиком — с большой чувствительностью по току или по напряжению?

ПРИЛОЖЕНИЕ К ГЛАВЕ VIII.

А. Вывод формул, приведенных в главе VIII.

1.

В схеме 237 наметим произвольно направления э.д.с. и токов в плечах и диагоналях моста и величинами их E_1, E_2 и т. д. будем считать алгебраическими, т. е. могущими иметь как положительные, так и отрицательные значения. Через R_1, R_2 и т. д. обозначим совокупность всех сопротивлений, включая и сопротивление источника, ветвей и диагоналей моста. Применяя второй закон Кирхгофа к контурам $ACBA$ и $ABDA$, имеем

$$\text{для } ACBA \quad E_1 + E_2 - E_5 = I_1 R_1 + I_2 R_2 - I_5 R_5 \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$\text{для } ABDA \quad E_5 + E_3 + E_4 = I_5 R_5 + I_3 R_3 + I_4 R_4 \quad \dots \dots \dots (2)$$

Выразив токи в трех плечах моста через величину сил токов в его диагоналях и четвертом плече, например I_1 , можем написать

$$I_2 = I_1 + I_5; \quad I_4 = I_5 + I_3 = I_1 + I_5 + I_3; \quad I_3 = I_1 + I_5.$$

Подставив это в уравнения 1 и 2, имеем

$$E_1 + E_2 - E_5 = I_1 (R_1 + R_2) + I_5 R_5 - I_5 R_5 \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$E_5 + E_3 + E_4 = I_5 (R_5 + R_3 + R_4) + I_1 (R_3 + R_4) + I_5 R_4 \quad \dots \dots (2)$$

Если теперь мы разомкнем диагональ CD , то $I_5 = 0$, а I_5 , согласно формулировке теоремы Фреллиха, останется без изменения. Допустим, что это нами достигнуто, но при этом, очевидно, сила тока I' не останется прежней, а примет некоторое иное значение, например, I'_1 . Так как левые части выражений 1 и 2 при этом не изменятся, то ясно, что правые их части будут равны новым выражениям, а именно:

$$I_1 (R_1 + R_2) + I_5 R_5 - I_5 R_5 = I'_1 (R_1 + R_2) - I_5 R_5$$

$$I_1 (R_3 + R_4) + I_5 R_4 + I_5 (R_5 + R_3 + R_4) = I'_1 (R_3 + R_4) + I_5 (R_5 + R_3 + R_4)$$

или

$$\frac{I_5 R_5}{I_5 R_4} = \frac{(I'_1 - I_1)(R_1 + R_2)}{(I'_1 - I_1)(R_3 + R_4)}$$

Поделив два последних уравнения одно на другое, имеем

$$\frac{R_1 + R_2}{R_3 + R_4} = \frac{R_5}{R_4},$$

откуда

$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_5}{R_4},$$

что и требовалось доказать.

II.

При первом измерении имеем

$$R_1 = R_2 \frac{R_3}{R_4} = R_2 \frac{b}{L-b},$$

при втором

$$R_1 = R_2 \frac{L-b'}{b'}.$$

Преобразуем пропорцию

$$\frac{b}{L-b} = \frac{L-b'}{b'},$$

а именно

$$\frac{L-b'}{b} = \frac{b'}{L-b}$$

или

$$\frac{L-b'+b}{L-b+b'} = \frac{L-b'-b}{L-b-b'}.$$

откуда

$$R_1 = R_2 \frac{L+(b-b')}{L-(b-b')} = R_2 \frac{L+d}{L-d}.$$

Произведя в последнем выражении деление $L+d$ на $L-d$ и ограничиваясь двумя членами в частном, получим

$$R_1 = R_2 + 2R_2 \frac{d}{L}.$$

III.

Выведем формулу, связывающую силу тока I в цепи источника со значением силы тока i_g через гальванометр применительно к схеме рис. 284. Сходя из законов Кирхгофа и полагая, что ток в ветви с R_3 равен $i_3 = I - (i_1 + i_g)$, можем написать

$$(i_1 + i_g) R_1 + i_g r_g - [I - (i_1 + i_g)] R_3 = 0$$

или, раскрыв скобки и прибавив и вычтя для упрощения дальнейших выводов член $i_1 r_g$,

$$(i_1 + i_g) R_1 + i_1 r_g + i_g r_g - i_g r_g - IR_3 + (i_1 + i_g) R_3 = 0,$$

откуда для контура I имеем

$$(i_1 + i_g) \underbrace{(R_1 + R_3 + r_g)}_A - i_1 r_g - R_3 I = 0. \quad (a)$$

Обозначая ток, текущий в ветви с сопротивлением R_4 , через $i_4 = I - [(i_1 + i_g) + i_g]$ и при выводе прибавляя и вычитая $i_1 r_g$, имеем для контура II

$$i_1 \underbrace{(R_2 + R_4 + r_g)}_B - (i_1 + i_g) r_g - IR_4 = 0. \quad (б)$$

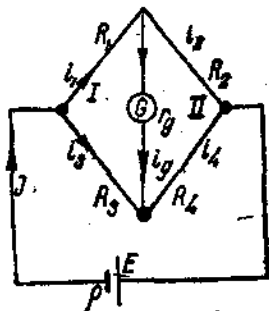


Рис. 284.

Из выражений a и b нетрудно уже определить величину сил тока i_g' протекающего через гальванометр. Для этого перенесем выражения a и b в таком виде:

$$(i_1 + i_g) A - i_1 r_g = R_3 I, \dots \dots \dots (a)$$

$$i_1 B - (i_1 + i_g) r_g = R_4 I \dots \dots \dots (b)$$

Отсюда

$$i_1 A + i_g A - i_1 r_g = R_3 I$$

$$i_1 B - i_1 r_g - i_g r_g = R_4 I$$

или

$$\begin{array}{l|l} i_1 (A - r_g) + i_g A = R_3 I & \text{умножим на } (B - r_g) \\ i_1 (B - r_g) - i_g r_g = R_4 I & \text{ " " } (A - r_g). \end{array}$$

Тогда

$$i_1 (A - r_g) (B - r_g) + i_g A (B - r_g) = R_3 I (B - r_g),$$

$$i_1 (B - r_g) (A - r_g) - i_g r_g (A - r_g) = R_4 I (A - r_g).$$

Вычтя, имеем

$$i_g [A (B - r_g) + r_g (A - r_g)] = I [R_3 (B - r_g) - R_4 (A - r_g)],$$

откуда

$$i_g = \frac{I [R_3 (B - r_g) - R_4 (A - r_g)]}{A (B - r_g) + r_g (A - r_g)}$$

или

$$\begin{aligned} i_g &= \frac{I [R_3 (R_2 + R_4 + r_g - r_g) - R_4 (R_1 + R_3 + r - r_g)]}{(R_1 + R_3 + r_g) \{R_2 + R_4 + r_g - r_g\} + r_g \{R_1 + R_3 + r_g - r_g\}} = \\ &= \frac{I [R_3 (R_2 + R_4) - R_4 (R_1 + R_3)]}{r_g (R_1 + R_3 + R_2 + R_4) + (R_2 + R_4) (R_1 + R_3)} \end{aligned}$$

или

$$i_g' = \frac{I [R_3 R_2 - R_4 R_1]}{r_g (R_1 + R_3 + R_2 + R_4) + (R_2 + R_4) (R_1 + R_3)} \dots \dots (1)$$

Для условий, близких к равновесию мостика, когда в цепи гальванометра тока нет, сила тока I' от источника равна

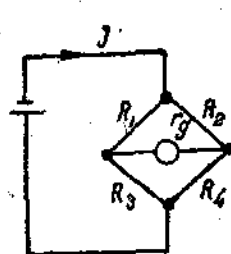


Рис. 285.

$$I' = \frac{E}{r + \frac{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}} \dots \dots \dots (a)$$

Если в схеме поменять местами гальванометр и батарею (см. рис. 285), то, согласно предыдущему, имеем

$$i_g' = \frac{I' [R_1 R_4 - R_2 R_3]}{r_g (R_1 + R_2 + R_3 + R_4) + (R_1 + R_2) (R_3 + R_4)} \dots (2)$$

и соответственно

$$I' = \frac{E}{r + \frac{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}} \dots \dots \dots (b)$$

Анализируя эти выражения, приходим к выводу, что невыгоднейшие условия работы мостика, в смысле достижения максимальной чувствительности схемы, таковы:

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = \rho = r_g,$$

$$\rho = \frac{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4},$$

$$r_g = \frac{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}.$$

Действительно, если мы применим гальванометр типа Томсона, постоянная C_g которого дается выражением $C_g = K \sqrt{r_g}$, где K — отклонению его подвижной системы при силе тока в 1 ампер и $r_g = 1$ ому, то при силе тока через гальванометр, равный I'_g , угол отклонения

$$\alpha = K I'_g \sqrt{r_g} \dots \dots \dots (2)$$

или, пользуясь выражением 1, имеем

$$\alpha = K I'_g \sqrt{r_g} = \frac{K I' (R_3 R_4 - R_1 R_2) \sqrt{r_g}}{r_g (R_1 + R_2 + R_3 + R_4) + (R_3 + R_4)(R_1 + R_2)} \dots \dots (1')$$

Это выражение, в котором единственной переменной является r_g , должно быть по условию максимальным.

Но $\frac{da}{dr_g}$ будет равно 0, если

$$r_g' = \frac{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} \dots \dots (r)$$

или, что то же, гальванометр должен обладать сопротивлением, равным равнодействующему сопротивлению плеч моста между его выводами.

Допустим, что условие (r) не соблюдено, и r'_g в n раз больше оптимального, т.е.

$$r'_g = n \frac{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}.$$

Подставив его в выражение 1', получим

$$\alpha' = \frac{K I' (R_3 R_4 - R_1 R_2) \sqrt{n}}{(n+1) \sqrt{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)(R_1 + R_2 + R_3 + R_4)}}.$$

Максимум α' будет при $n=1$, и отношение действительного α' к максимально возможному α будет

$$\frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{2\sqrt{n}}{n+1}.$$

Это может быть изображено графически в виде кривой Oab (рис. 286)

Перейдем к вопросу о невыгоднейшем месте расположения гальванометра. Пусть взятое на плече R_4 сопротивление отачается на величину δR_4 от его значения, в точности отвечающего равновесию мостика. Тогда,

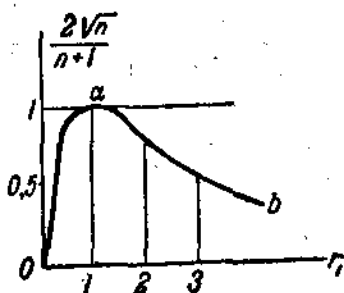


Рис. 286.

переходим к выражениям 1 и 2 и подставив в них приближенные значения для I' и I'' (выражения а и б), получим

$$I'_g = \frac{-ER_1 \delta R_4}{r_g(R_1 + R_2)(R_3 + R_4) + \frac{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)(R_2 + R_4)(R_1 + R_3)}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}} =$$

$$= \frac{ER_1 \delta R_4}{M_1},$$

$$I''_g = \frac{ER_1 \delta R_4}{M_2} =$$

$$= \frac{ER_1 \delta R_4}{r_g(R_1 + R_3)(R_2 + R_4) + \frac{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)(R_2 + R_4)(R_1 + R_3)}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}}.$$

Лучшим из возможных мест расположения гальванометра будет такое, когда в одном из приведенных выражений знаменатель будет наименьшим. Возьмем их разность

$$M_1 - M_2 = r_g [(R_1 + R_2)(R_3 + R_4) - (R_1 + R_3)(R_2 + R_4)] =$$

$$= r_g [(R_1 - R_3)(R_2 - R_4)] \dots \dots \dots (а)$$

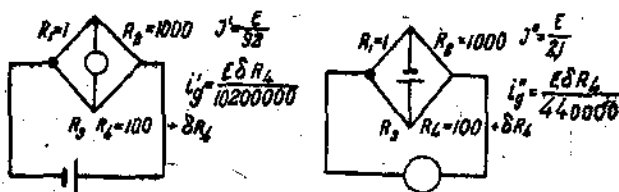


Рис. 287.

Из этого выражения явствует, что в том случае, когда накрест лежащие сопротивления плеч моста попарно равны друг другу, чувствительность гальванометра будет независима от того, в какую из диагоналей он включен.

Если знаменатель $M_2 < M_1$, то надо пользоваться схемой 285, если же $M_2 > M_1$, то выгоднее будет работать по схеме 284. Лучшим же расположением гальванометра будет такое, когда его зажимы подключены к тем вершинам мостика, где сходятся два наибольших и два наименьших из сопротивлений плеч.

Рассмотрение более точных выражений I'_g и I''_g , включающих E и r источника, приводит к равенству

$$M_1 - M_2 = (r_g - r)(R_1 - R_3)(R_2 - R_4) \dots \dots \dots (б)$$

откуда следует, что то из сопротивлений — гальванометра r_g или источника r , которое больше, надо включить к тем вершинам моста, где соответственно смыкаются два наибольших и два наименьших из сопротивлений его плеч (шунтирование). Для иллюстрации того, какое влияние на чувствитель-

ность схемы оказывает неправильное расположение гальванометра, разберем два примера его расположения при измерении $R_3 = 0,1$ ома, если $r_g = 100$ Ω , а $r = 1$ Ω (см. рис. 287).

Разность $M_1 - M_2$ в этом случае положительна, а поэтому надо воспользоваться схемой, представленной справа, ибо при работе по ней мы видим, что I'_g почти в 23 раза больше, чем I''_g , а I'' почти в 44 раза больше I' .

Из этого примера видно также, что, чем больше неравенство сопротивлений плеч мостика, тем большее значение имеет правильное место расположения гальванометра. При этом, однако, необходимо помнить об опасности перегрева того плеча мостика, которое обладает наименьшим сопротивлением. Действительно, ватты, рассеиваемые в плечах мостика при $E = 2$ вольт, равны

Схема	Ватты рассеивания в плечах				Примечание
	R_1	R_2	R_3	R_4	
Левая . . .	0,000004	0,004	0,00004	0,04	Если держать цепь мостика долго замкнутой, то можно пережечь плечо R_1
Правая . . .	0,9	0,0009	0,09	0,00009	

IV.

Действительно, для момента равновесия

$$R_1 = \frac{R_3}{R_4} \cdot R_2 \quad dR_1 = \frac{dR_3}{R_4} \cdot R_2 - \frac{R_3 dR_4}{R_4^2} \cdot R_2$$

откуда

$$dR_1 = R_2 \frac{1}{R_4^2} (R_4 dR_3 - R_3 dR_4).$$

Дабы ошибка была равна нулю, надо чтобы $dR_1 = 0$, а это будет тогда, когда $R_4 dR_3 = R_3 dR_4$, ибо $R_2 \neq 0$.

Если при этом сделать допущение, что ошибки при отсчетах R_4 и R_3 одинаковы, то для соблюдения последнего условия необходимо, чтобы $R_3 = R_4$, а, следовательно, и $R_1 = R_2$.

V.

Сила тока, протекающего через обмотки гальванометра, очевидно, обратно пропорциональна сумме $r_g + r_a$. С другой стороны, у гальванометров этого типа угол отклонения α растет пропорционально силе тока и $\sqrt{r_g}$. Последнее вытекает из нижеследующего: у двух гальванометров этого типа, имеющих катушки одинакового объема, угол отклонения растет пропорционально числу витков катушки, в то время как их сопротивление r_g растет пропорционально квадрату числа витков. Следовательно, α будет расти пропорционально $\sqrt{r_g}$. Таким образом, в результате

$$\alpha = \frac{\sqrt{r_g}}{r_g + r_a}$$

и достигает своего максимума при $r_g = r_a$, т. е. когда внешнее сопротивление, на котором работает гальванометр, равно сопротивлению самого гальванометра.

VI.

Исходя из обозначений на схеме, для первого случая равновесия имеем

$$I_1 = I_2; \quad \frac{I_1}{I_N} = \frac{R_N}{r_a + r} \quad \text{и} \quad \frac{I_2}{I_X} = \frac{R_X}{r_b}.$$

Так как $I_1 = I_2$, то и $I_N = I_X$, ибо $I_1 + I_N = I_2 + I_X = I$.

Следовательно,

$$\frac{R_N}{r_a + r} = \frac{R_X}{r_b}$$

или

$$\frac{R_N}{R_X} = \frac{r_a + r}{r_b}.$$

Для второго случая равновесия, после введения сопротивлений R_1 и R_2 , имеем

$$\frac{R_N}{R_X} = \frac{r_a + r + R_1}{r_b + R_2}.$$

Следовательно,

$$\frac{r_a + r + R_1}{r_b + R_2} = \frac{r_a + r}{r_b}$$

или

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{r_a + r}{r_b}.$$

Отсюда

$$\frac{R_N}{R_X} = \frac{R_1}{R_2}$$

или

$$R_X = \frac{R_2}{R_1} \cdot R_N.$$

VII.

Вывод формулы

$$R_X = \frac{T_{\text{сек}}}{C_{N_{\text{far}}} \ln \frac{U_0}{U}}$$

базируется на следующем. Разрядный ток конденсатора равен, очевидно, скорости уменьшения его заряда. Но $Q = C_N U$, следовательно, скорость уменьшения заряда равна скорости уменьшения напряжения на его обкладках, умноженной на его емкость, т. е. $-\frac{dU}{dt} C_N$.

Сила же разрядного тока

$$i = \frac{U}{R_X}.$$

откуда

$$\frac{U}{R_X} = - \frac{dU}{dt} \cdot C_N$$

или, умножив обе части равенства на $\frac{dt}{U}$, имеем

$$\frac{dt}{R_X} = - \frac{dU}{U} \cdot C_N.$$

Из курса высшей математики известно, что если dU есть бесконечно малое изменение U , то $\frac{dU}{U}$ равно изменению $\ln U$, т. е. $\frac{dU}{U} = d \ln U$.

Следовательно,

$$\frac{dt}{R_X} = - C_N \ln U,$$

где dt есть приращение времени разряда конденсатора, а $d \ln U$ — отвечающее ему изменение логарифма. Суммируя обе части последнего выражения от начала разряда и кончая некоторым моментом, т. е. за некоторый конечный промежуток времени в $T_{\text{сек}}$, получим

$$\frac{T}{R_X} = C_N (\ln U_0 - \ln U)$$

или

$$R_X = \frac{T_{\text{сек}}}{C_N \ln \frac{U_0}{U}}.$$

Если проследить путь тока во время опыта, то под R_X надо понимать не только R_X , но также и сопротивление изоляции конденсатора и электрометра в их параллельном соединении, т. е. $R_{\text{с.э.}}$. Тогда истинное R'_X определится из выражения

$$\frac{1}{R'_X} = \frac{1}{R_X} + \frac{1}{R_{\text{с.э.}}}$$

VIII.

Между первым наибольшим углом α_0 отклонения баллистического гальванометра, его баллистической постоянной $C_{\text{бал}}$ и протекившим через него количеством электричества Q_0 имеет место зависимость $Q_0 = C_b \alpha_0$. При втором разряде кабеля, вследствие потери им за время T части своего заряда, угол α_T , очевидно, будет меньше α_0 . Сама же потеря заряда определится из выражения

$$dQ = - C dU = i dt = \frac{U}{R_X} dt$$

Вычитая уравнения (1) из (4) и (5); (2) из (6) и, наконец, — (3) из (7), получаем

$$i'_2 - i_2 = i'_1 - i_1 \dots \dots \dots (a)$$

$$i''_2 - i_2 = i''_1 - i_1 \dots \dots \dots (б)$$

$$(i'_1 - i_1) r_1 = - (i'_1 - i_1) r_2 \dots \dots \dots (в)$$

$$(i'_2 - i_2) \rho = - (i'_2 - i_2) R_N \dots \dots \dots (г)$$

Уравнения (a) и (б) дают

$$\frac{i'_1 - i_1}{i''_1 - i_1} = \frac{i'_2 - i_2}{i''_2 - i_2} \dots \dots \dots (A)$$

Уравнения (в) и (г) дают

$$\frac{i'_1 - i_1}{i''_1 - i_1} = - \frac{r_2}{r_1} \text{ и } \frac{i'_2 - i_2}{i''_2 - i_2} = \frac{R_N}{\rho} \dots \dots \dots (Б)$$

Сопоставляя (A) и (Б), мы можем написать

$$\frac{r_2}{r_1} = \frac{R_N}{\rho}$$

или

$$\rho = \frac{r_1}{r_2} R_N,$$

что и требовалось доказать.

Очевидно, что при этом способе измерения нет надобности в отдельном источнике тока для питания схемы.

X.

Для момента равновесия имеем, согласно законам Кирхгофа,

$$\left. \begin{aligned} r_x i_x + (y + b) i_b &= c i_c \\ a i_a + r_n i_n &= d i_d \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (a)$$

Если при этом $a = b = c = d$ и, как следствие равновесия мостика, $i_a = i_b$, а $i_c = i_d$, то $a i_a = b i_b$ и $c i_c = d i_d$.

Сопоставляя это с уравнением (a), получаем

$$r_x i_x + (y + b) i_b = b i_b + r_n i_n$$

или

$$r_x i_x + y i_b = r_n i_n$$

откуда

$$r_x + y \frac{i_b}{i_x} = r_n \frac{i_n}{i_x}.$$

Если $a \gg r_x$ и $b \gg r_n$, то $i_b \ll i_x$, а $i_n \cong i_x$ и, следовательно,

$$\frac{i_b}{i_x} \cong 0, \text{ а } \frac{i_n}{i_x} \cong 1,$$

откуда и вытекает, что $r_x \cong r_n$

XI.

Сумма сил токов, проходящих через вольтметр и через изоляцию того провода, к которому он присоединен, например, положительного, всегда

равна силе тока, протекающего через изоляцию другого провода, т. е. $I_v + I_+ = I_-$, а так как

$$I_v = \frac{U_+}{r_v}; I_+ = \frac{U_+}{r_+} \text{ и } I_- = \frac{U - U_+}{r_-},$$

то, следовательно,

$$\frac{U_+}{r_v} + \frac{U_+}{r_+} = \frac{U - U_+}{r_-}.$$

Если вольтметр присоединен к отрицательному проводу, то

$$\frac{U_-}{r_N} + \frac{U_-}{r_-} = \frac{U - U_-}{r_+}.$$

Из этих выражений нетрудно уже получить формулы для r_+ и r_- а получив их и, учитывая, что сопротивления эти включены параллельно одно другому, определить и сопротивление изоляции сети, т. е.

$$r = \frac{r_+ \cdot r_-}{r_+ + r_-}.$$

XII.

Вращающие моменты, испытываемые рамками, равны

$$\left. \begin{aligned} M_1 &= C_1 i_1 f(\alpha) \\ M_2 &= C_2 i_2 f(\alpha) \end{aligned} \right\} \text{ где } C_1 \text{ и } C_2 - \text{ постоянные рамок.}$$

Когда подвижная система отклонится на некоторый угол и остановится, то $M_1 = M_2$ или $C_1 i_1 f(\alpha) = C_2 i_2 f(\alpha)$, откуда

$$\frac{i_2}{i_1} = C f(\alpha).$$

Но, так как

$$i_1 = \frac{E}{r_x + r_1}, \text{ а } i_2 = \frac{E}{r_n + r_2},$$

то

$$\frac{r_x + r_1}{r_n + r_2} = C f(\alpha)$$

или

$$r_x = (r_n + r_2) C f(\alpha) - r_1.$$

Б. Справочные данные.

1. Более подробные сведения о методах измерения сопротивлений смотри в книге автора "Начала теории и практики измерения основных электрических величин", стр. 93—270, а также в книге В. В. Базилевич — Электротехнич. измерения и приборы, стр. 231—235 и 292—312.

2. Справочные сведения см. СЭТ:

а) удельные сопротивления и температурный коэффициент хороших проводников. Том 1, отд. 4, стр. 4.

б) Удельное сопротивление сплавов. Стр. 19 и 19.

в) Изолирующие материалы. Том 1, отд. 4, стр. 72.

ТАБЛИЦА I.
3. Свойство металлов.

Металлы и их сплавы	Удельное сопротивление в омметрах при 15°С	Удельная проводимость при 20°С	Температурный коэффициент от 0° — 100°С	Удельный вес
Алюминий	0,03	34	+ 0,0037	2,6
Свинец	0,21	5	+ 0,00417	11,3
Железо	0,10—0,14	10	+ 0,0045	7,2—7,9
Никель	0,10—0,12	9	+ 0,0041	8,35—8,9
Платина	0,094—0,11	10	+ 0,0024	21,15—21,5
Ртуть	0,95	1,063 (0°С)	+ 0,0090	13,5956
Серебро	0,016—0,0175	61	+ 0,0036	10,4—10,6
Сталь	0,10—0,25	6	+ 0,0045—0,005	7,85—7,87
Цинк	0,06	17	+ 0,0039	6,86—7,2
Олово	0,12	8,4	+ 0,0045	7,2—7,5
Медь	0,017—0,0175	57	+ 0,0043	8,9 (18°С)
Константан	0,49—0,51	2	— 0,00005	8,8 (18°С)
Манганин	0,42—0,54	2,4	+ 0,00001	8,4
Латунь	0,07—0,08	12,5	+ 0,0015	8,4—8,73
Нейзильбер	0,35—0,41	2,7	+ 0,00007	8,4—8,7
Никелин	0,40—0,44	2,5	+ 0,00022	
Платина-иридий	0,2	5	+ 1,0—1,7	21,6

ТАБЛИЦА II.

Свойства изолирующих материалов.
при темпер. 15—25° С (см. СЭТ).

М а т е р и а л	Объемн. сопрот. в $\Omega/\text{см}$	Поверхностное сопр. в $\Omega/\text{см}$		Диаек. постоянная ϵ	Угол потерь $\text{tg } \theta \times 10^3$	Частота тока при определ. угла потерь
		В а л ж н о с т ь				
		300/0	900/0			
Бакелит	$10^{11}-10^{14}$	$10^{10}-10^{12}$	10^8-10^{10}	5,2—8	10—30	10^6
Бакелизированный картон	$10^{11}-10^{13}$	$10^{11}-10^{12}$	10^8-10^9	4,5—6	10—45	50
Бумага кабельная	$10^{12}-10^{13}$	—	—	2,3—3,5	5—10	350
То же пропитанная	10^{15}	—	—	3,4—3,7	15—20	50
Дуб, пропитанный парафином . .	10^{12}	10^{13}	10^9	4,5—5	—	—
Кварц плавленый	10^{16}	10^{16}	3×10^{12}	3,5—3,6	0,12	10^6
Экссельстор	$10^{12}-10^{13}$	—	—	3,5—5,5	20—30	—
Миканит	10^{15}	10^{14}	10^9	4,5—6	—	—
Мрамор , ...	10^9-10^{11}	10^{11}	10^7	8,2	—	—
Парафин	$10^{15}-10^{16}$	10^{16}	4×10^{15}	2,1—2,2	0,05	500
Прессшпик	$10^{11}-10^{12}$	—	—	2,5—4	26	10^4
Слюда хорошая	$10^{15}-10^{17}$	10^{14}	10^{11}	6—7,5	0,1—0,2	5×10^6
Стекло	$10^{11}-10^{15}$	10^{14}	10^7	5,5—10	0,4—10	10^5
Фибра	10^9-10^{10}	3×10^{10}	10^7	2,5—8,2	70	10^6
Фарфор	$10^{14}-10^{16}$	10^{13}	10^8	4,5—6,5	12—27	50
Эбонит	10^{17}	6×10^{15}	10^{10}	2—3,5	2,5—23	1000

ГЛАВА IX.

Методы и приборы для измерения электрической мощности, коэффициента мощности, числа периодов тока и электрической работы.

§ 44. Приборы для непосредственного измерения мощности—ваттметры.

1) Общие замечания. При рассмотрении выражения для мощности в цепи постоянного тока $P = U \cdot I$ и переменного тока $P = U \cdot I \cos \varphi$, сам собою напрашивается способ их измерения; в первом случае — путем одновременного отсчета и перемножения показаний правильно включенных амперметра и вольтметра, а во втором случае — еще и фазометра, т. е. прибора, непосредственно измеряющего $\cos \varphi$ или угол сдвига φ по фазе между напряжением и током.

Однако, в цепях переменного и, особенно, многофазного тока, а также в случаях непостоянного режима цепи, этот способ мало пригоден и недостаточно точен.

Гораздо удобнее для этой цели пользоваться специальными приборами—так называемыми ваттметрами. Из существующих типов ваттметров наибольшим распространением пользуются приборы, основанные на электродинамическом принципе, затем индукционные, и, наконец, тепловые.

2) Электродинамические ваттметры по принципу работы отличаются от электродинамических амперметров и вольтметров только тем, что их неподвижная (толстая) обмотка R (схема рис. 289) вводится в цепь тока последовательно, а подвижная (тонкая) r , вместе с добавочным сопротивлением r_g — параллельно тем точкам a и b цепи, напряжение между которыми требуется измерить для определения мощности.

Согласно теории электродинамометра, в момент равновесия системы его катушек, т. е. когда подвижная катушка отклонится на некоторый угол α относительно неподвижной (рис. 73), вращающий момент M_1 (образованный электродинамической

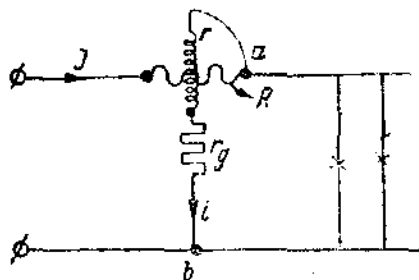


Рис. 289.

парой и пропорциональный силам токов I и i в обеих катушках) равен моменту сопротивления M_2 пружины, скрепленной с осью подвижной катушки, т. е.

$$M_1 = C_1 I i \cos \alpha = M_2 = C_2 \alpha.$$

Отсюда $I i \cos \alpha = C \alpha$ или, если умножить обе части этого равенства на сумму сопротивлений $r + r_g$, то $I \cdot i (r + r_g) \cos \alpha = C \alpha (r + r_g)$, где C — постоянная прибора, зависящая от его конструктивных данных.

Таким образом,

$$I U \cos \alpha = C' \alpha$$

или

$$P = I U = C' \frac{\alpha}{\cos \alpha}.$$

Из этого выражения явствует, что между измеряемой мощностью и углом отклонения подвижной катушки линейная зависимость существует в том только случае, если момент вращения M_1 не зависит от взаимного положения катушек, т. е. от угла α , образованного их плоскостями или их полями.

В этом случае выражение для мощности принимает вид

$$P = I \cdot U = K \alpha,$$

и прибор становится удобным в обращении, так как при измерениях им мощности не приходится вычислять значения $\cos \alpha$, и кроме того, шкала имеет равномерные деления.

Это оказывается практически осуществимым, если придать катушкам такую форму, взаимное расположение и размеры, чтобы силовые линии поля неподвижной катушки при любом угле поворота подвижной действовали на эту последнюю равномерно (см., например, рис. 87).

Итак, при соблюдении указанных условий $P = I U = K \alpha$ и, следовательно, ваттметр непосредственно учитывает мощность постоянного тока.

При измерениях подобным прибором в цепях переменного тока, в общем случае, между напряжением U и силой тока I имеется некоторый угол φ сдвига по фазе, а поэтому выражение для мощности, измеряемой ваттметром, принимает следующий вид:

$$P = I U \cos \varphi = K \alpha \dots \dots \text{(см. приложение I).}$$

Последнее выражение, однако, не учитывает возможного фазного сдвига между током i , протекающим через подвиж-

ную обмотку ваттметра и ее добавочное сопротивление, и напряжением U цепи. Если между ними имеется сдвиг по фазе на некоторый угол γ (диаграмма рис. 290), то предыдущее выражение должно быть написано так:

$$P = UI \cos(\varphi - \gamma) \cos \gamma \dots \text{(см. приложение II)}.$$

Так как угол γ зависит от соотношения активного и индуктивного сопротивлений всей цепи подвижной катушки, т. е. от $r + r_g$ и ωL , то показания подобного ваттметра, очевидно, зависят от частоты тока, что представляет большие неудобства.

Поэтому, конструкторами прилагается ряд мер к тому, чтобы между током в подвижной катушке ваттметра и напряжением не было сдвига.

Основная мера — это понижение коэффициента самоиндукции L и емкости C обмоток подвижной катушки и добавочного к ней сопротивления до возможного минимума при одновременном увеличении их активного сопротивления. Это достигается намоткой добавочного сопротивления в бифиляр для снижения индуктивности и секционно, — для уменьшения емкости.

Независимо от этого, применяются два следующих способа: часть добавочного сопротивления шунтируется емкостью или же сопротивлением, обладающим самоиндукцией. Этим достигают того, что у хороших ваттметров угол γ не превышает 1,1 минуты, и тогда погрешность их показаний не превосходит погрешностей отсчета.

Более подробно об этом — см. приложение III.

Таким образом, одним и тем же ваттметром электродинамической системы можно пользоваться как при постоянном, так и при переменном токах, а, следовательно, его градуировку можно производить на постоянном токе, но меняя для каждого отсчета его направление. Эта возможность является существенным преимуществом ваттметров электродинамической системы.

Шкала этих ваттметров почти равномерна и только в начале и конце несколько сжата.

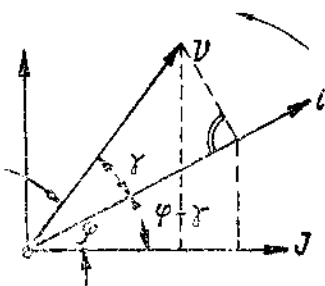


Рис. 290.

[В остальном эти приборы обладают теми же свойствами, что и электродинамические амперметры и вольтметры, т. е.

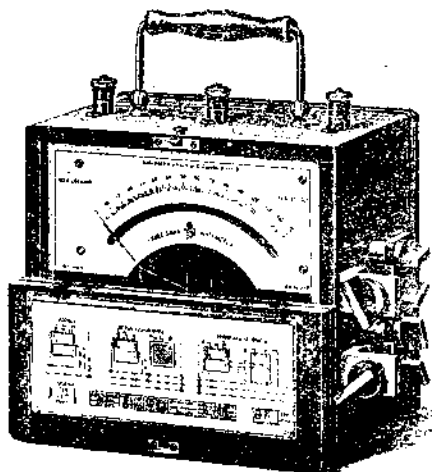


Рис. 291-а. Лабораторный ваттметр фирма Гартман.

они подвержены воздействию магнитных полей и не выдерживают перегрузки в цепи подвижной катушки.

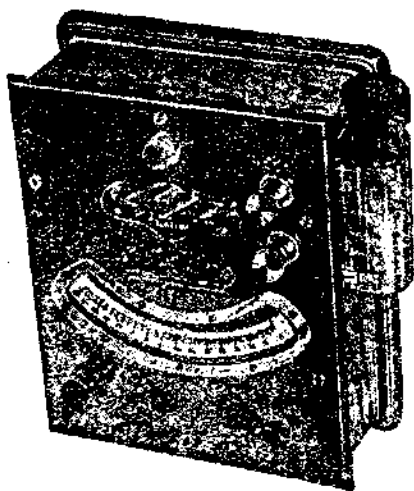


Рис. 291-б.

В конструктивном отношении эти ваттметры различаются, главным образом, по взаимному расположению катушек; у некоторых типов неподвижная катушка объемлет подвижную, а у других—наоборот. Противодействующий момент в них, обычно, создается спиральными пружинами, скрепленными с осью подвижной катушки; успокоение—воздушное. В некоторых типах, с целью выравнивания относительной ошибки отсчета, начальные деления шкалы искусственно увеличиваются. У ваттметров для распределительных до-

сок шкала непосредственно размечается в единицах мощности; у лабораторных же типов, обычно, отмечаются максимальные значения силы тока в толстой катушке и напряжения для подвижной, а по этим данным уже нетрудно подсчитать их постоянную. На рис. 291—293 представлен внешний вид подобных приборов.

Лабораторные ваттметры строятся на 2—3 предела по силе тока (до 400 А) и напряжению (до 600 В) в цепях неподвижных и подвижных катушек, а, следовательно, и на различные пределы измеряемой мощности. Дости-

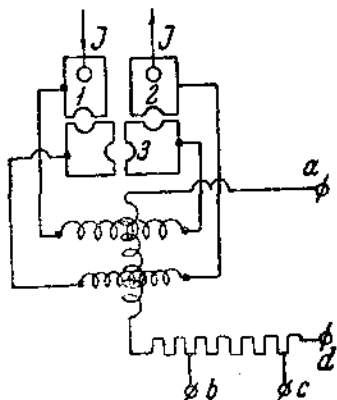


Рис. 292-а.

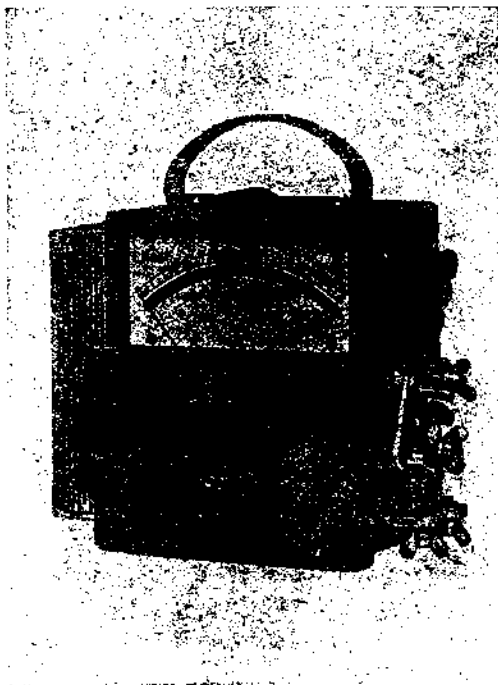


Рис. 292-б. Лабораторный ваттметр фирмы Эллиот.

гают этого, разделяя неподвижную катушку на две — четыре части и соединяя их последовательно, параллельно или смешанно, а также секционируя добавочное сопротивление в цепи подвижной катушки. На рис. 292-а и б представлена схема коммутации обмоток и общий вид ваттметра на 2 предела измерения по силе тока и 3 предела измерения по напряжению; первое осуществляется помощью штепселей, которые вставляются в гнезда 1,2 или 3 коммутатора К, а

второе—подключением цепи подвижной катушки посредством зажимов $a-b$ или $a-c$ или $a-d$.

На рис. 293-а представлен внутренний вид прецизионного ваттметра фирмы Сименс. На рис. 293-б представлен внешний вид ваттметра завода Электроприбор на 2,5—5А и 120—240 В.

Пример. Лабораторный ваттметр построен на 2 предела измерения по силе тока, а именно на 12,5 и 25 А и на 3 предела по напряжению — 30, 150 и 300 вольт. Шкала его имеет 150 делений. Определите постоянную прибора для каждого предела измерения.

Ответ. $K = 2,5$ ватта; $K_1 = 12,5$; $K_2 = 25$; $K_3 = 5$; $K_4 = 25$ и $K_5 = 50$ ватт на одно деление шкалы (см. приложение IV).

Для дальнейшего расширения пределов измерения мощности в цепях переменного тока ваттметры включают через посредство измерительных трансформаторов тока и напряжения. Постоянная прибора в этом случае увеличивается пропорционально их коэффициенту трансформации.

Пример. Ваттметр со шкалой на 150 делений, рассчитанный на 5 А и 90 В (принятый в Германии стандарт) включен в цепь через посредство трансформатора тока с коэффициентом трансформации $U = 25/3$ и трансформатора напряжения с коэффициентом трансформации $U_1 = 6000/100$.

При измерении стрелка ваттметра отклонилась на 45 делений. Определить: постоянную ваттметра без трансформаторов, с ними, а также величину измеренной мощности.

Ответ. $K = 3$ ватта на 1 деление шкалы, $K_2 = 900$ ватт и $P = 40,5$ киловатт (см. приложение V).

Одной из разновидностей точных ваттметров, в которых приняты особые меры к уменьшению влияния на их показания магнитных полей от окружающих приборов, проводов с током, а также поля земли, являются астатические ваттметры. В них подвижная система состоит из двух плоских, дважды изогнутых под прямым углом (рис. 76) катушек S_1 и S_2 . Число витков у обеих одинаково, но направления намотки противоположны, а поэтому, в результате взаимодействия их с посторонними полями, создаются два вращающих момента, направление обратно друг другу. Благодаря тому, что одна из этих катушек вынесена из внутреннего пространства неподвижных обмоток прибора, взаимодействие полей катушек S и S_1 создает вращающий момент и, следовательно, прибором можно пользоваться для измерений. Приборы этой системы, по преимуществу, лабораторного типа, строятся на силу тока до 30 А и напряжения до 1500 В, для чего к ним прилагаются отдельно смонтированные добавочные сопротивления.

Источниками погрешностей электродинамических ваттметров являются: а) относительно боль-

шая зависимость их показаний от воздействий посторонних магнитных полей, почему при градуировке и измерениях рекомендуется коммутировать направление тока в цепи подвижной системы (с этой целью лабораторные и переносные типы ваттметров обычно снабжаются особыми переключателями тонкой обмотки); б) то же от температуры—обычно при ее повышении получаются преувеличенные показания вследствие ослабления упругости пружины, скрепленной с осью подвижной системы; в) изменение показаний вследствие самоиндукции подвижной катушки;

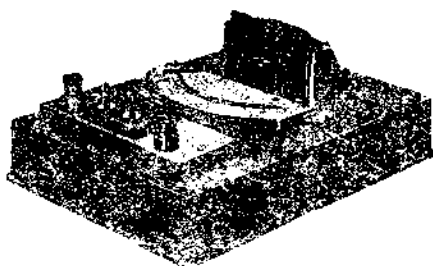


Рис. 293-а. Внутренний вид прецизионного ваттметра фирмы Сименс.

г) потери на токи Фуко, индуктируемые в металлических частях ваттметра, а также от емкости, присущей бифилярной обмотке добавочных сопротивлений (это влияет обратно влиянию самоиндукции и поэтому отчасти, но неодинаково при различных частотах тока, компенсирует его) и, наконец, д) незначительные погрешности от взаимной индукции катушек. Однако, путем рациональной конструкции, можно снизить эти погрешности; например, в хороших лабораторных ваттметрах на силу тока не свыше

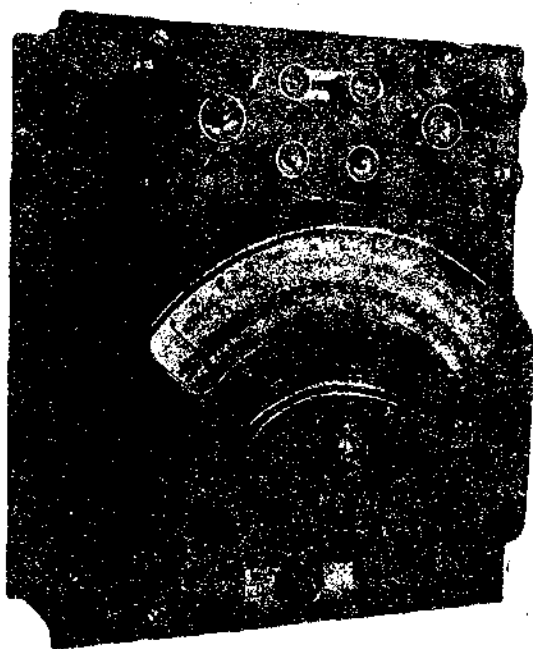


Рис. 293-б. Лабораторный ваттметр завода Электроприбор.

20 А они могут быть доведены всего до 0,1% от наибольшего показания, при условии, что ими пользуются при частотах не выше 100 пер/сек. Для частот до 1000 пер/сек. строятся специальные ваттметры.

Собственное потребление энергии лабораторными ваттметрами этой системы, применяемыми без трансформаторов, составляет около 4—5 W, при силе тока в неподвижной катушке до 50 А, и около 1 W на каждые 30 V цепи подвижной катушки.

3) **Ферродинамические ваттметры**, подобно амперметрам и вольтметрам этой же системы, потребляют для создания того же вращающего момента, меньшую мощность, чем электродинамометры без железа, так как в них поток, создаваемый неподвижной катушкой, замыкается через железо. Они поэтому менее чувствительны к внешним магнитным полям. Однако, самоиндукция подвижной обмотки у них больше, а поэтому точность у них меньше, и применяются они, главным образом, как технические приборы.

4) **Индукционные ваттметры** строятся двух типов: с экраном и типа Феррариса. Первые отличаются от амперметров и вольтметров той же конструкции только тем, что в них, взамен одного электромагнита, имеется два или три. Обмотка одного из них вводится в цепь последовательно, а обмотки остальных, подобно вольтметровой обмотке обычного ваттметра,—параллельно тем точкам цепи, напряжение между которыми требуется измерить для определения мощности. Показания их пропорциональны мощности, затрачиваемой в цепи (см. приложение VI). Схема подобного ваттметра представлена на рис. 294, где I—электромагнит с обмоткой, включаемый в цепь последовательно, II и III—электромагниты, обмотки коих соединены последовательно и в таком виде подключены к точкам *a* и *b* цепи; А—алюминиевый диск, сидящий на оси О, снабженный стрелкой, и Т—пластинки, прикрывающие часть полюсных наконечников электромагнитов II и III.

Шкала этих ваттметров почти равномерная и может быть сделана до 320°; они потребляют мощность порядка 2 W на последовательную и на параллельную обмотки; влияние внешних полей на их показания ничтожно, и, наконец, они значительно дешевле электродинамических ваттметров. Однако на их показания весьма влияют: температура, частота, форма кривой тока и колебания напряжения, почему точность их не выше 1—2%, и ими пользуются, как техническими приборами.

Ваттметры типа Феррариса (рис. 295) подобны амперметрам и вольтметрам той же системы, но при пользовании ими обмотки одной пары (противолежащих) электромагнитов в последовательном соединении вводятся в цепь тока, а другой пары — в цепь напряжения.

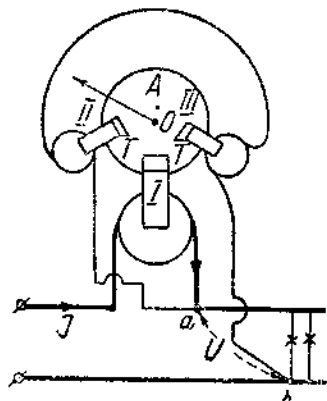


Рис. 294.

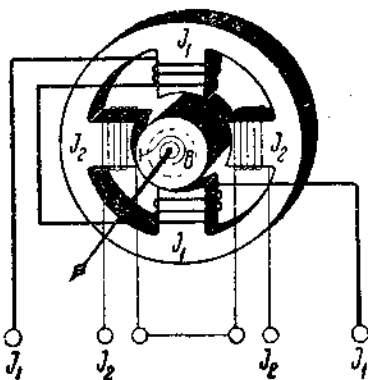


Рис. 295.

Показания их также пропорциональны мощности, они недороги и обладают теми же свойствами, что и приборы с экраном.

Общим недостатком этих приборов является то, что они неприменимы в цепях постоянного тока, а также в цепях переменного тока, имеющих составляющую тока постоянного.

При ошибочном включении их в цепь постоянного тока приборы эти обычно приходят в негодность, так как омическое сопротивление их обмоток весьма невелико, ток в этом случае велик, и если даже обмотки не перегорят, то все же под влиянием остаточного намагничивания их градуировка уже нарушится.

5) **Тепловые ваттметры** просты по конструкции, независимы в широких пределах от частоты тока, что делает их применимыми в радиотехнике, и относительно недороги, но не получили все же распространения ввиду большой зависимости их показаний от температуры, а также значительного расхода в них энергии. Принцип действия одного из существующих типов тепловых ваттметров поясняет рис. 296, где

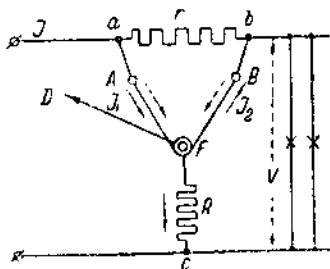


Рис. 296.

AB — тонкая нагреваемая током проволока, закрепленная неподвижно на концах и перекинута в середине своей длины через металлический блок F , снабженный стрелкой D и оттягиваемый вниз особой пружиной.

От блока сделан отвод к добавочному сопротивлению R , свободный конец которого соединен с точкой C цепи; сама же проволока соединена в точках a и b с шунтом r .

Благодаря шунту, через проволоку ответвляется некоторая, например, $\frac{I}{n}$ часть главного тока, т. е. ток силой $\frac{I}{n}$, который и протекает как помечено на схеме сплошными стрелками. Но так как проволока вместе с добавочным сопротивлением R включена еще и в параллель к напряжению U цепи, то по ней проходит некоторый ток, пропорциональный этому напряжению; его направление помечено на схеме пунктирными стрелками. Результирующие токи в частях AF и BF проволоки при этом равны $I_1 = \frac{I}{n} + \frac{U}{2R}$ и $I_2 = \frac{I}{n} - \frac{U}{2R}$. В тепловых приборах удлинение нагреваемой током проволоки пропорционально квадрату тока, следовательно, разность удлинений Δl частей AF и BF ее, в данном случае пропорциональна разности квадратов сил токов, т. е.

$$I_1^2 - I_2^2 = C_1 \Delta l$$

или

$$\left(\frac{I}{n} + \frac{U}{2R}\right)^2 - \left(\frac{I}{n} - \frac{U}{2R}\right)^2 = C_1 \Delta l,$$

откуда

$$\frac{2UI}{nR} = C_1 \Delta l$$

или, окончательно,

$$P = C \Delta l,$$

где

$$C = \frac{C_1 n R}{2}.$$

Таким образом, мощность, измеряемая подобным прибором, пропорциональна разности удлинений частей проволоки; разность эта вызывает поворот блока F и, следовательно, показание прибора.

б) Реактивные ваттметры для учета реактивной мощности $P_1 = UI \sin \varphi$ строятся подобно обычным ваттметрам, но только в них создается намеренно сдвиг по фазе на 90° ме-

ду напряжением сети и напряжением на зажимах подвижной катушки. Такой ваттметр фактически измерит мощность $P_1 = UI \cos (90^\circ - \varphi) = UI \sin \varphi$.

7) Регистрирующие ваттметры строятся по типу регистрирующих амперметров и вольтметров.

8) Суммирующие ваттметры (например, для измерения мощности в цепях многофазного тока) представляют собою 2—3 обыкновенных ваттметра, совмещенных в одном приборе, и притом так, что подвижные их системы между собою связаны механически, т. е. укреплены на общей оси. В большинстве случаев это индукционные или ферродинамические приборы, значительно реже — электродинамические. Точность показаний у них ниже, чем у обыкновенных ваттметров вследствие взаимного влияния систем.

§ 45. Правила включения ваттметров для измерений.

Ваттметр может быть включен по одному из единственно возможных вариантов схемы рис. 297, причем в обоих случаях измеренная им мощность не равна фактически расходуемой мощности.

Действительно, если мы работаем по схеме I и желаем определить мощность $U_1 I_1$, отдаваемую генератором, то ваттметр учитывает мощность $U_1 I$, которая меньше действительной на величину потери мощности в вольтметровой обмотке ваттметра, т. е.

$$P = P_1 + \frac{U_1^2}{r + r_g},$$

ибо

$$P = U_1 I_1 = U_1 I + i U_1 = U_1 I + \frac{U_1^2}{r + r_g}.$$

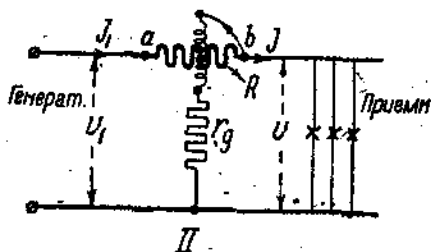
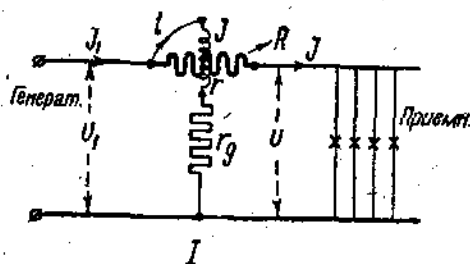


Рис. 297.

Измеряя по той же схеме мощность UI , потребляемую приемниками, ваттметр опять учтет мощность $U_1 I$, которая больше действительной на величину потерь мощности в амперметровой обмотке ваттметра, т. е.

$$P = P_1 - I^2 R,$$

ибо

$$P = UI = U_1 I - (U_1 - U) I = U_1 I - I R I = U_1 I - I^2 R.$$

Работая по схеме II, мы для случая измерения мощности, отдаваемой генератором, получаем

$$P = P_1 + I_1^2 R,$$

ибо

$$P = U_1 I_1 = UI_1 + (U_1 - U) I_1 = UI_1 + I_1 R I_1 = UI_1 + I_1^2 R.$$

И, наконец, исследуя в той же схеме приемник, мы имеем

$$P = P_1 - \frac{U^2}{r + r_g},$$

ибо

$$P = UI = UI_1 - iU = UI_1 - \frac{U^2}{r + r_g}.$$

Таким образом, во всех случаях измерений мощности ваттметром заведомо делается ошибка, величина которой зависит от соотношения величин мощностей, потребляемых обмотками ваттметра, а также от силы тока и напряжения в цепи. Поэтому в каждом частном случае, и особенно при измерениях небольших мощностей, необходимо принимать в расчет приведенные выше поправки.

Если поправку ввести можно, что связано с необходимостью точного промера сопротивлений обмоток, а также силы тока или напряжения в цепи, то обе схемы равноценны в смысле точности измерений. Если же поправку ввести затруднительно, то надлежит руководствоваться нижеследующим. Выгоднее выбрать ту из схем включения, где в качестве поправки надо учесть мощность, потребляемую в цепи тонкой (вольтметровой) обмотки прибора. Объясняется это, во-первых, тем, что при постоянном напряжении сети эта поправка постоянна по величине, и во-вторых, тем, что относительно большое сопротивление этой цепи легче измерить, нежели малое сопротивление цепи неподвижной (толстой) обмотки.

Помимо этого, критерием для выбора той или иной из возможных схем включения должны служить относительные

величины тока и напряжения в цепи. Если мы измеряем мощность цепи, в которой ток мал, а напряжение велико, и поправок ввести не можем, то выгоднее, очевидно, та схема включения, где поправка обуславливается потерей мощности в амперметровой цепи ваттметра. Если же сила тока велика, то выгоднее применить схему, при которой поправкой является потеря мощности в вольтметровой цепи ваттметра.

Фирмой Вестон строятся ваттметры, в которых, благодаря некоторому усложнению конструкции, ошибки из-за собственного потребления мощности прибора автоматически корректируются. Для этого цепь вольтметровой обмотки ваттметра снабжается особой „компенсационной“ катушкой K (схема рис. 298), в виде нескольких витков, навитых на неподвижную

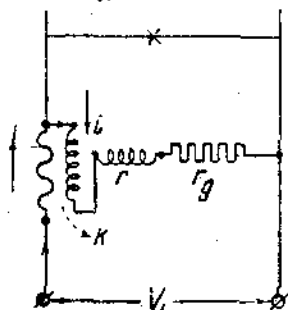


Рис. 298.

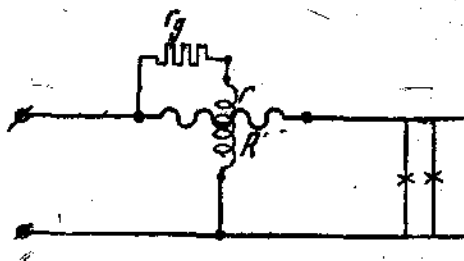


Рис. 299.

катушку, и притом так, чтобы поле этих витков было противоположно ее полю. При этих условиях отклонения подвижной системы ваттметра автоматически уменьшаются на величину, пропорциональную энергии, расходуемой в катушке K .

При больших углах сдвига по фазе в цепи потребителя, компенсационной катушкой все же не рекомендуется пользоваться, так как из-за присущей ей самоиндукции, а также взаимной индукции, при измерениях легко получают ошибочные результаты.

Задача. Подсчитайте величины относительных ошибок при измерении мощности, расходуемой в цепи потребителя, по вариантам I и II схемы 297, если для измерения мы пользовались ваттметром на 25 А и 600 В, причем собственный расход мощности в его токовой катушке при полной нагрузке был 5 Вт, а сопротивление цепи вольтметровой обмотки было 20000 Ω . При измерении стрелка ваттметра отклонилась на 100 делений шкалы; вся же шкала имела 150 делений. При этом известно, что в момент измерения сила тока в цепи потребителя была 24 А, а напряжение равнялось 500 В.

Ответ. 0,045% и 0,125% (см. приложение VII).

Цепь подвижной катушки ваттметра вместе с добавочным сопротивлением r , необходимо включать как на схемах рис. 297, а не 299, дабы между катушками прибора при измерениях не могли возникать большие разности потенциалов и электростатические взаимодействия.

Первое легко приводит к пробое изоляции катушек и, следовательно, порче прибора, а второе к ошибочным показаниям.

Поэтому в ваттметрах с добавочными сопротивлениями, монтированными внутри прибора, у тех зажимов его подвижной и неподвижной катушек, которые должны быть соединены между собою на прямую, делаются пометки (+; ± и т. п.) или же соответствующие зажимы располагаются рядом.

§ 46. Фазометры.

Приборы для непосредственного измерения коэффициента мощности или угла сдвига по фазе строятся по принципу электродинамических или ферродинамических приборов и называются фазометрами.

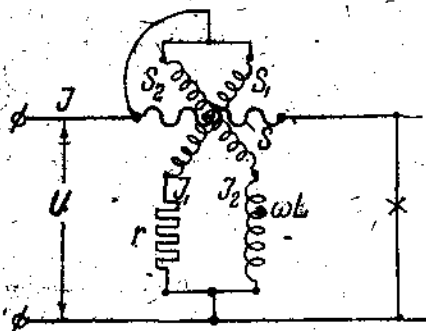


Рис. 300.

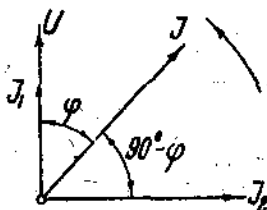


Рис. 301.

Подвижная система первых образована двумя жестко между собою скрепленными под прямым углом катушками S_1 и S_2 (рис. 300), подвешенными на подвесе, не оказывающем на нее никаких направляющих воздействий. Система эта находится внутри неподвижной катушки S , включаемой в цепь последовательно, т. е. так же, как и токовая обмотка ваттметра. Последовательно с обмотками подвижных катушек введены активное r и индуктивное ωL сопротивления, подобранные так, чтобы между токами I_1 и I_2 , по ним протекающими, был всегда сдвиг по фазе на угол в 90° .

Если в цепи между током I и напряжением U имеется сдвиг по фазе на угол φ , то ток I_1 , совпадает по фазе с на-

пряжением в цепи U ; ток I_2 отстает от напряжения U на 90° , а от тока I на $90^\circ - \varphi$ (рис. 301).

В результате взаимодействия полей катушек подвижная система отклоняется на некоторый угол α (схема рис. 302) относительно оси неподвижной катушки.

При этом, на катушку S_1 действует вращающий момент $M_1 = C_1 I I_1 \sin \alpha \cos \varphi$, а на катушку S_2 равный ему момент

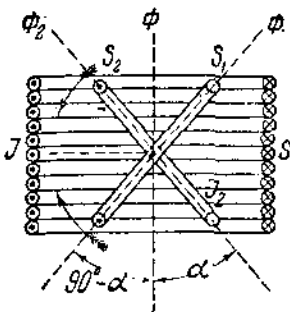


Рис. 302.

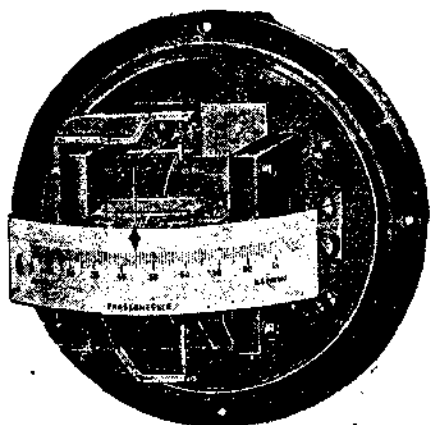


Рис. 303. Внутренний вид фазометра.

$M_2 = C_2 I I_2 \sin \varphi \cos \alpha$, т. е. $C_1 I I_1 \sin \alpha \cos \varphi = C_2 I I_2 \sin \varphi \cos \alpha$, откуда

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{C_2 I I_2}{C_1 I I_1} \operatorname{tg} \varphi = \frac{C_2}{C_1} \cdot \frac{I_2}{I_1} \operatorname{tg} \varphi$$

или

$$\operatorname{tg} \alpha = C \operatorname{tg} \varphi$$

Таким образом, угол α поворота подвижной системы прибора находится в прямой зависимости от угла сдвига φ по фазе. Это позволяет разметить шкалу подобного прибора непосредственно в значениях угла φ или $\cos \varphi$ (рис. 303).

В последнем случае шкала подобного фазометра неравномерна. Ее можно улучшить, подобрав параметры обмоток так, чтобы $I_1 = I_2 \sqrt{3}$. Тогда

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{C \operatorname{tg} \varphi}{\sqrt{3}},$$

и шкала получается более равномерной. Поскольку сила тока I_2 , текущего по ветви, содержащей большое индуктивное сопротивление, зависит от частоты (приблизительно—обратно ей пропорциональна), показания этого рода приборов зависят от частоты тока. Это одинаково относится ко всем тем приборам,

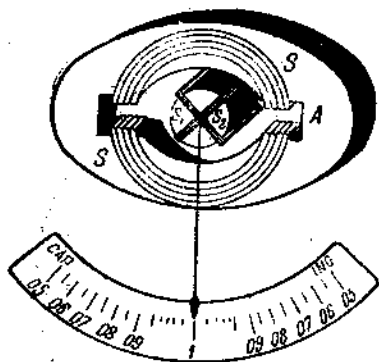


Рис. 304.

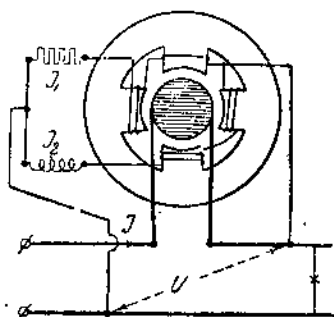


Рис. 305.

в цепях которых мы искусственно создаем сдвиг по фазе, и которые поэтому должны работать при той частоте, для которой они градуировались. Из последнего выражения $\operatorname{tg} \alpha$ явствует, что при перемене знака φ изменяется знак и у α , т. е., если характер нагрузки цепи изменится и станет вместо индуктивного емкостным, то подвижная система прибора отклонится в другую сторону. Это позволяет строить фазометры с двухсторонней шкалой для индуктивной и емкостной нагрузок.

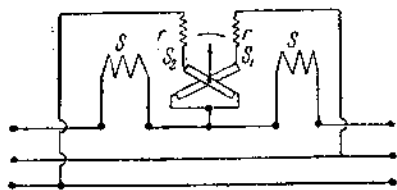


Рис. 306.

Кроме электродинамических, некоторые фирмы строят также и ферродинамические фазометры двух типов: подобные ферродина-

мическим приборам (рис. 304) или же по образцу приборов индукционной системы, типа Феррарис. У последних токовая катушка подвижна и расположена подобно вращающемуся цилиндру этих приборов. Вольтметровые же катушки неподвижны (рис. 305). Шкала у этих фазометров равномерна; они обладают теми же свойствами, что и ферродинамические приборы и строятся обычно на силу тока в 5 А и напряже-

342

рис 110 V. Если сила тока или напряжение в цепи выше, то они включаются через посредство измерительных трансформаторов; эти последние иногда монтируются внутри самого прибора. Собственное потребление энергии прибором составляет около 6—8 W.

Фирмой Вестингауз строятся фазометры, у которых все три катушки неподвижны, подвижной же системой служит Z-образная пластинка из мягкого железа.

Фазометры для цепей трехфазного тока не имеют индуктивного сопротивления; подвижные их катушки скреплены под углом в 120° , и они включаются в цепь, как показано на схеме рис. 306. Пригодны они только при равномерной нагрузке фаз и для той частоты при которой они градуированы.

§ 47. Приборы для измерения частоты тока.

Частотомеры по принципу действия разделяются на вибрационные, в которых использовано явление механического резонанса, электромагнитные, основанные на изменении электрического сопротивления их цепи при изменении числа периодов тока, электродинамические и тепловые.

1) Вибрационные частотомеры представляют собою один или несколько электромагнитов *A*, перед полюсными наконечниками коих расположена система тонких стальных пружинок *a, a* (рис. 307-а), закрепленных одним концом в общей подставке *b*. Периоды собственных колебаний пластинок подобраны в определенном диапазоне, например, от 80 до 120 колебаний. При пропускании по обмоткам электромагнитов переменного тока каждая пластинка дважды за время одного периода притягивается к электромагниту, причем наиболее сильное притяжение, а, следовательно, и размах колебания будет у той пластинки, собственный период колебания которой совпадает с числом периодов тока (резонанс). Дабы эти колебания было удобно наблюдать и отсчитывать по шкале прибора, верхние части пластинок окрашены в белый цвет, и во время действия прибора его шкала имеет вид, представленный на рис. 307-б. Если такой прибор снабдить еще дополнительным электромагнитом постоянного тока и подобрать силу тока в его обмотке так, чтобы результирующее поле за один период тока притягивало пластинки не дважды, а только один раз, то пределы измерения данным частотомером могут быть удвоены.

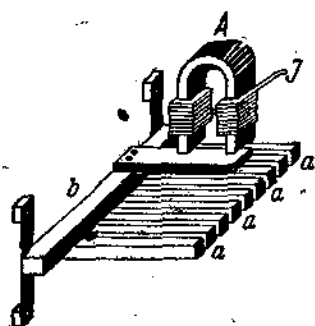


Рис. 307-а.



шкала

Рис. 307-б.

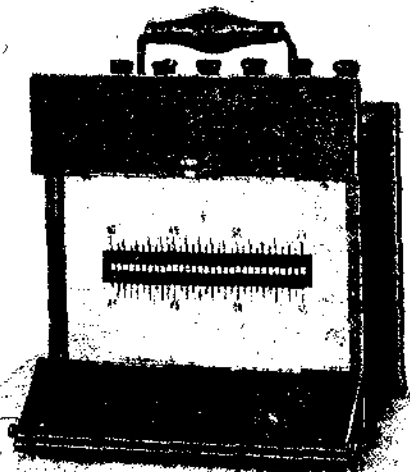


Рис. 307-в. Язычковый частотомер.

Частотомеры этого типа строятся на различные пределы измерений, от 5 до 750 периодов или от 10 до 1500 перемен тока (фот. рис. 307-в).

Включаются они в цепь при напряжениях до 120—220 В подобно вольтметрам и непосредственно, а при больших напряжениях—через добавочные сопротивления. Частотомеры этого типа неприемлемы на подвижных установках. На рис. 307-г представлен общий вид частотомера для распределительных досок.

2) Электродинамические частотомеры по принципу устройства почти не отличаются от индукционных фазометров, но только в цепь одной из пар неподвижных

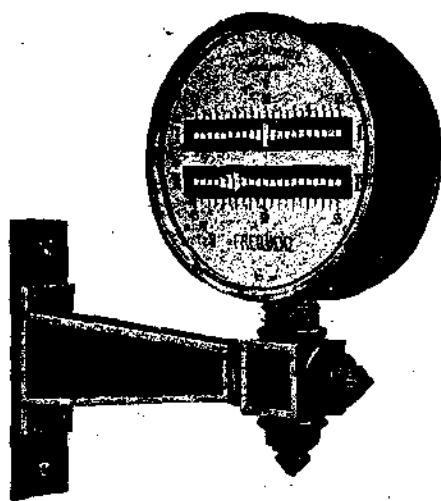


Рис. 307-г. Установочный тип язычкового частотомера.

катушек взамен омического сопротивления (схема 305) вводится емкость. При этих условиях угол α отклонения подвижной катушки связан с токами I_1 и I_2 в неподвижных катушках и углом сдвига φ по фазе между ними следующей зависимостью:

$$\operatorname{ctg} \alpha = K \frac{I_2}{I_1} \cos \varphi.$$

При изменении частоты тока меняются как отношение сил токов, так и $\cos \varphi$, а, следовательно, и угол отклонения подвижной системы прибора, и притом почти пропорционально частоте, почему шкала этих приборов довольно равномерна.

Показания электродинамических частотомеров почти не зависят от формы кривой тока и колебаний напряжения.

Точность их показаний составляет около $1-1\frac{1}{2}\%$.

Фирма Вестон строит частотомеры по принципу мостика

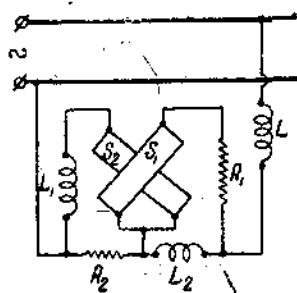


Рис. 308.

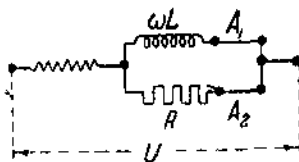


Рис. 309.

Витстона (схема рис. 308), уравновешенного для тока определенной частоты.

При изменении частоты равновесие схемы нарушается, соотношение сил токов в подвижных катушках изменяется, а вместе с этим изменяется и пространственное положение подвижной системы.

3) Частотомеры системы Феррье представляют собою два тепловых миллиамперметра, соединенных в одном приборе. В цепь нагреваемой проволоки A_1 одного введено активное, а в цепь другого A_2 индуктивное сопротивление, как на схеме рис. 309. Стрелки приборов перекрещиваются над шкалой, снабженной градуировочными кривыми соответственно определенному диапазону частот. При изменении частоты соотношение сил токов, протекающих по ветвям схемы, нарушается, вследствие чего изменяется нагрев проводочек A_1 и A_2 , а, следовательно, перемещается точка пересечения стрелок прибора.

§ 48. Непосредственные способы измерения мощности.

Непосредственный метод измерения мощности ваттметром видоизменяется в зависимости от рода тока и характера нагрузки цепи.

1. В цепях постоянного и однофазного переменного тока ваттметр включается согласно вышеприведенным правилам, и мощность вычисляется по углу отклонения подвижной системы и по постоянной прибора. В случае измерений мощности менее 1 kW следует вводить поправки на собственное потребление прибора.

Если в цепь переменного тока, кроме ваттметра, включены, как на схеме рис. 310, еще амперметр и вольтметр, то, сняв одновременно показания со всех

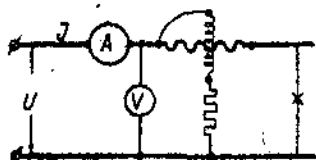


Рис. 310.

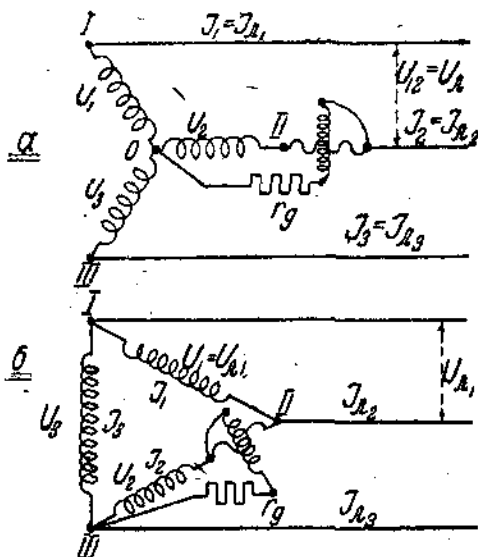


Рис. 311.

этих приборов, будем иметь: P — мощность активную, учитываемую ваттметром, UI — мощность кажущуюся, определяемую из показаний амперметра и вольтметра, и

$$\cos \varphi = \frac{P}{UI}$$

коэффициент мощности в цепи.

2. В цепях трехфазного переменного тока измерение мощности помощью ваттметров видоизменяется в зависимости от характера нагрузки цепи, способа включения тех объектов, мощность в которых желают измерить, и, наконец, в зависимости от того, доступны ли для соединения

вольтметровой обмоткой ваттметра те точки исследуемой цепи, разность потенциалов между которыми должна быть учтена ваттметром для получения искомой мощности (например, общая точка соединения в звезду обмоток трехфазного двигателя).

В дальнейшем мы разберем только наиболее распространенные способы измерения в цепях трехфазного тока без нулевого провода.

а) Метод одного ваттметра применим в том только случае, когда нагрузка всех фаз уравновешена,

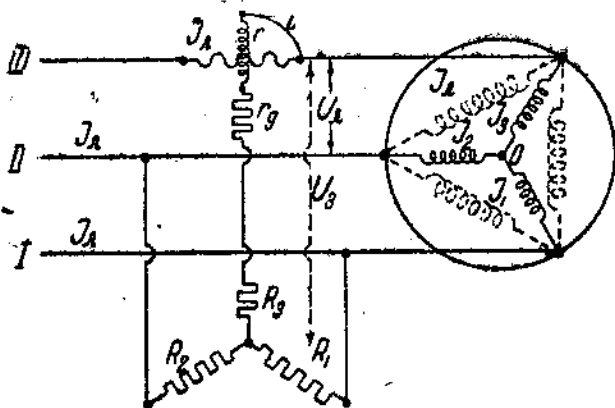


Рис. 312.

т. е. когда все фазные напряжения, токи и углы сдвига равны друг другу. Тогда, исходя из обозначений на схемах рис. 311, имеем

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = U_1 I_1 \cos \varphi_1 + U_2 I_2 \cos \varphi_2 + U_3 I_3 \cos \varphi_3$$

$$P = 3 U_1 I_1 \cos \varphi_1 = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi,$$

где $U_1 I_1$ и φ_1 — фазное напряжение, ток и угол сдвига между ними, а U_L — линейное напряжение $= U_1 \sqrt{3}$.

Таким образом, в случае уравновешенной трехфазной системы общая расходуемая в ней мощность равна утроенному показанию ваттметра, включенного так, что он учитывает мощность в одной из фаз.

Если нулевая точка 0 системы недоступна для подключения к ней вольтметровой обмотки ваттметра или, если нагрузка включена треугольником, то создают так называемую искусственную нулевую точку. На схеме рис. 312 показано

включение ваттметра с искусственной нулевой точкой, образованной тремя сопротивлениями, подобранными по величине так, чтобы $R_1 = R_2 = R_3 + r + r_g$. В этом случае мощность всей системы также будет равна утроенному показанию ваттметра. Действительно, напряжения между любым из линейных проводов и точкой 0, благодаря симметрии всей системы, очевидно, равны $U_1 = U_2 = U_3$; показание же ваттметра, согласно его теории, пропорционально $P = K\alpha = I \cdot i \cos \varphi_1$, где i — ток в его вольтметровой обмотке, равный

$$\frac{U}{r + R_3 + r_g}.$$

Следовательно,

$$P = K\alpha = \frac{I_1 U_1}{r_g + r + R_3} \cos \varphi_1$$

или

$$(r_g + r + R_3) K\alpha = I_1 U_1 \cos \varphi_1,$$

или

$$R_3 K\alpha = I_1 U_1 \cos \varphi_1,$$

или

$$R_1 K\alpha = I_1 U_1 \cos \varphi_1.$$

Вся же мощность равна

$$P = 3 U_1 I_1 \cos \varphi_1 = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi_1.$$

На этом принципе основано устройство специальных ваттметров для измерений в уравновешенных трехфазных цепях; к ним прилагается набор сопротивлений для образования искусственной нулевой точки. Последняя иногда монтируется в самом приборе, и тогда его шкала размечается непосредственно в величинах $3 U_1 I_1 \cos \varphi$, т. е. уже не требуется увеличивать показаний прибора в три раза.

б) Метод двух ваттметров позволяет измерить мощность трехфазной системы независимо от того, уравновешена ли система или неуравновешена, и, кроме того, не требует доступности нулевой точки. Основывается он на следующем: если в схеме а или б рис. 313 одновременно снять показания двух включенных в нее ваттметров, то их алгебраическая сумма даст величину общей мощности системы. Действительно, работая по схеме а и сняв показания с ваттметров, мы видим, что первый учитывает мгновенную мощность

$$U'_{13} I'_1 = (U'_1 - U'_3) I'_1,$$

второй

$$U'_{23} I'_2 = (U'_2 - U'_3) I'_2,$$

где U'_{12} и U'_{23} — мгновенные значения линейных напряжений. Кроме того, при соединении цепи в звезду, по законам Кирхгофа, для мгновенных значений сил токов имеем

$$I'_1 + I'_2 + I'_3 = 0 \quad I'_3 = -(I'_1 + I'_2),$$

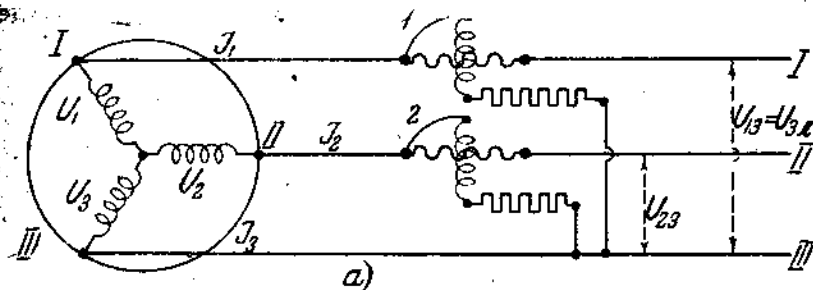


Рис. 313-а.

и, следовательно, мгновенная мощность, учитываемая обоими ваттметрами, равна:

$$(U'_1 - U'_3) I'_1 + (U'_2 - U'_3) I'_2 = U'_1 I'_1 + U'_2 I'_2 - U'_3 (I'_1 + I'_2) = U'_1 I'_1 + U'_2 I'_2 + U'_3 I'_3,$$

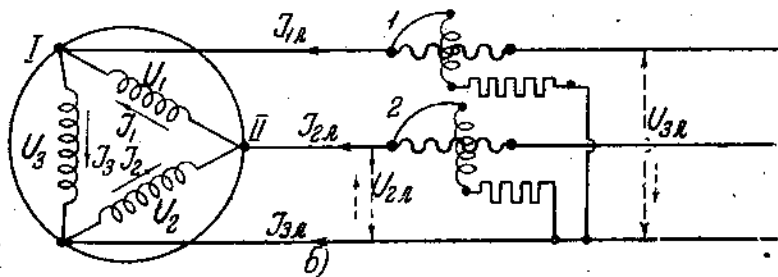


Рис. 313-б.

т. е. равна суммарной мгновенной мощности всей системы.

Для случая соединения цепи в треугольник и согласно обозначениям схемы, б первый ваттметр учтет мгновенную мощность

$$U'_{31} I'_{12} = U'_3 (I'_3 - I'_1),$$

ибо

$$I_{12} = I_2 - I_1,$$

где I_{12} — линейный, а I_2 и I_1 — фазовые мгновенные значения тока и U_{12} — мгновенное линейное напряжение, равное фазовому U_3 .

Второй ваттметр учтет мгновенную мощность, равную

$$(-U_{21}) I_{21} = (-U_2) (I_1 - I_2) = U_2 I_2 - U_2 I_1,$$

где знак минус перед U_{21} поставлен потому, что это напряжение имеет направление обратное U_{31} . Если принять во внимание, что $U_1 + U_2 + U_3 = 0$, а $U_2 + U_3 = -U_1$, то суммарная мощность, учитываемая обоими ваттметрами, равна

$$\begin{aligned} U_3 (I_2 - I_1) + U_2 (I_2 - I_1) &= U_3 I_2 - U_3 I_1 + \\ &+ U_2 I_2 - U_2 I_1 = U_2 I_2 + U_3 I_2 - I_1 (U_2 + \\ &+ U_3) = U_1 I_1 + U_2 I_2 + U_3 I_3, \end{aligned}$$

т. е. она опять равна суммарной мгновенной мощности всей системы.

Так как показания ваттметров пропорциональны не мгновенным, а средним алгебраическим значениям мощностей за период T , то интегрируя выражение $P = U_{12} I_1 + U_{23} I_2$ за время T , мы получим искомую мощность всей цепи в виде алгебраической суммы отдельных мощностей, измеренных ваттметрами, а именно,

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T U_{12} I_1 dt + \frac{1}{T} \int_0^T U_{23} I_2 dt = P_1 + P_2$$

или

$$P = P_1 + P_2 = K_1 \alpha_1 + K_2 \alpha_2.$$

Если постоянные ваттметров равны, т. е. $K_1 = K_2$, то

$$P = U (\alpha_1 + \alpha_2).$$

Результат измерения мощности, как явствует из выражения $U_{12} I_1 + U_{23} I_2$, не зависит ни от формы кривой переменного тока, ни от симметрии или асимметрии напряжений и нагрузок в исследуемой цепи и, следовательно, мощность, измеренная обоими ваттметрами равна

$$P = P_1 + P_2 = 3 U_1 I_1 \cos \varphi \dots (\text{см. приложение VIII})$$

При этом необходимо, чтобы ваттметры были включены в цепь совершенно симметрично, т. е. чтобы к свободной фазе (на рис. 313, провод III) были подключены одинаковые зажимы подвижных катушек (например, помеченные знаком $+$ или $\pm$ или $*$); то же относится и к катушкам неподвижным.

Обычно для получения общей мощности надо сложить показания обоих ваттметров, но иногда наблюдается, что стрелка одного из ваттметров отклоняется в обратную сторону, за нуль шкалы.

Причиной этому могут быть несоблюдение вышеприведенного правила о необходимости полной симметрии включения обоих ваттметров в цепь, или же сдвиг между током и напряжением в соответствующей фазе на угол $\varphi > 60^\circ$, возможный при сильно индукционной или емкостной нагрузке этой фазы (см. приложение IX).

В этом случае надо проверить симметрию включения ваттметров, а если она соблюдена, то, переключив тонкую обмотку ваттметра, давшего отклонение в обратную сторону, отсчитать его показание и вычислять общую мощность, как $P = P_1 - P_2$ (алгебраическая сумма).

При работе по этому методу также следует вводить поправки на собственное потребление энергии обмотками ваттметра. Поправки эти, в зависимости от места включения его вольтметровой обмотки и от того, измеряем ли мы мощность, отдаваемую в цепь источником или потребляемую приемником, равны $P_1 = \pm 2 P_{r_a}$ или $P_2 = \pm 2 \frac{U_2}{r + r_g}$ (ср. § 45).

Дабы во время измерений по этому методу быстро определить, надо ли складывать или вычитать показания P_1 и P_2 для вычисления общей мощности, поступают так: увеличивают немного активную нагрузку потребителя и если при этом один из ваттметров уменьшает свое показание, то надо произвести вычитание, в противном случае — сложение показаний.

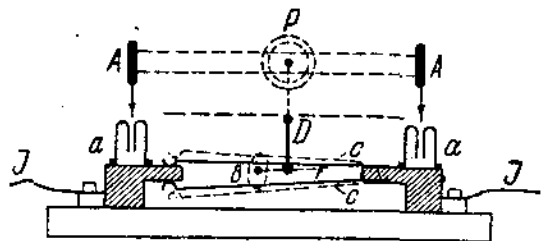


Рис. 314.

Способ этот предложен Ароном и часто называется его именем; он может быть осуществлен и помощью одного только

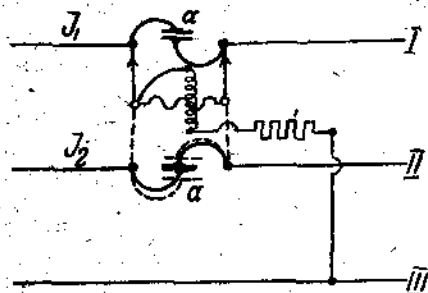


Рис. 315.

ваттметра, если последний ввести сперва в одну, а затем в другую фазу цепи, снять его показания и сложить их алгебраически. Для этой цели строятся особые переключатели в виде рубильника с приспособлением для самозамыкания тех его контактов, между которыми в данный момент не вставлены лезвия рубильника. На рис. 314 показана схематически

одна сторона подобного переключателя в тот момент, когда лезвия $A - A$ рубильника еще не вдвинуты между контактами $a - a$; последние при этом замкнуты между собою на прямую посредством пружинки $с - с$. Если рубильник нажать вниз до отказа, то штырь D , скрепленный с его рукояткой P , опустится вниз и надавит на рычаг F , скрепленный с шайбой B овальной формы. Шайба при этом повернется вокруг своей оси и раздвинет пружины $с - с$, как показано пунктиром; в этот момент непосредственное металлическое соединение между контактами $a - a$ нарушится. Задняя сторона переключателя, на чертеже не показанная, устроена точно так же, а ножи самого рубильника могут быть по желанию переброшены

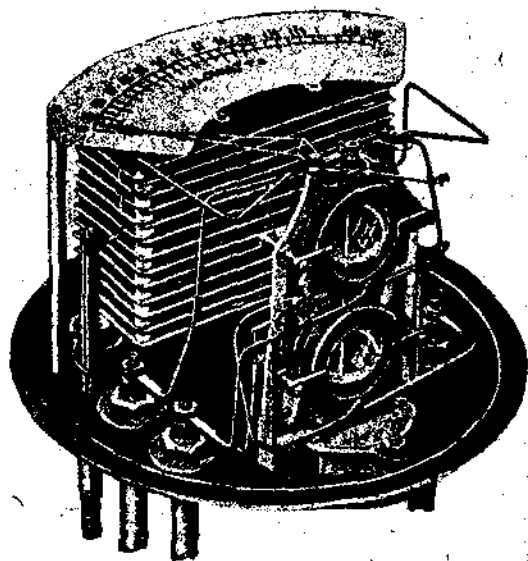


Рис. 316. Внутренний вид ваттметра 3-х фазного тока.

на ту или другую сторону переключателя. На рис. 315 представлена схема включения одного ваттметра с этим переключателем; при положении его ножей, показанном на чертеже сплошными линиями, ваттметр измеряет мощность $U_{13}I_1$. Если же рубильник перебросить как показано пунктиром, то тот же ваттметр измерит мощность $U_{23}I_2$. Складывая алгебраически оба показания, мы получим общую мощность цепи. При этом необходимо тщательно проследить за симметрией включения ваттметра.

На принципе измерения мощности по методу Арона основано устройство особых ваттметров, которые непосредственно учитывают мощность всей трехфазной системы, т. е. сумму $P = P_1 + P_2$, и притом не требуют никаких переключений. Для этого два одинаковых электродинамических или по Феррарису ваттметра монтируются в одном приборе, причем их подвижные системы закрепляются на одной общей оси, снабженной стрелкой. В цепь они включаются по схеме Арона; поэтому вращающие моменты, действующие на их подвижные системы, суммируются алгебраически, и, следовательно, результирующий момент, а с ним и поворот стрелки прибора, пропорциональны сумме мощностей $P_1 + P_2$ (рис. 316).

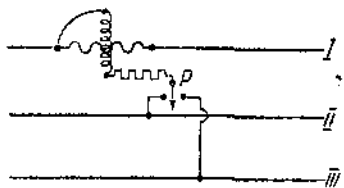


Рис. 317.

Примечание. При заведомо симметричной и уравновешенной нагрузке трехфазной цепи (например, при измерениях мощности, потребляемой двигателями трехфазного тока) общая ее мощность может быть измерена и одним только ваттметром, если его включить как на схеме рис. 317 и произвести два измерения соответственно двум возможным положениям переключателя P . Полученные при этом отсчеты складывают алгебраически, и эта сумма равна общей мощности цепи, т. е.

$$P = P_1 + P_2 = 3 U_{I1} I_1 \cos \varphi \dots \text{(см. приложение X)}$$

Если симметрия включения ваттметра соблюдена, и при этом в одном случае ваттметр дает обратное показание, то надо переключить его вольтмерную обмотку, снять показание и общую мощность цепи вычислить по равенству $P = P_1 - P_2$.

§ 49. Косвенные способы измерения электрической мощности.

В обычных условиях эксплуатационной практики эти способы употребляются редко, так как они требуют больше времени, чем непосредственный способ, связаны с необходимостью

вычислений и далеко не всегда могут дать более точные результаты. К ним относятся:

1) Метод вольтметра и амперметра, применимый по преимуществу в цепях постоянного тока и сводящийся к одновременному отсчету и перемножению показаний этих приборов, с учетом поправок на собственное потребление ими электрической энергии. Поправки эти зависят от схемы включения приборов (рис. 235) и вычисляются на тех же основаниях, что и поправки к показаниям ваттметра (см. § 45). При наличии фазометра этим методом можно пользоваться и в цепях переменного тока.

2) Метод трех вольтметров или трех амперметров используется в цепях однофазного переменного тока, когда нет ваттметра. Оба эти способа требуют (схема и рис. 318), помимо приемника P , мощность в котором надо измерить, еще и

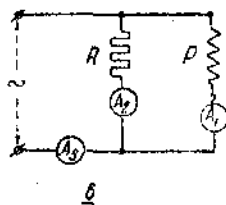
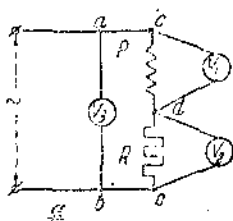


Рис. 318.

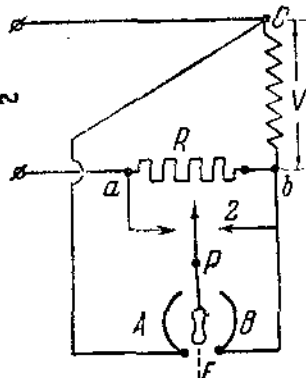


Рис. 319.

вспомогательное безиндукционное сопротивление R , включаемое в первом случае последовательно, а во втором параллельно приемнику.

Сняв одновременно показания с трех вольтметров или соответственно с трех амперметров, будем иметь в первом случае

$$P = \frac{U_3^2 - U_2^2 - U_1^2}{2R};$$

во втором

$$P = \frac{(I_2^2 - I_1^2 - I_3^2) R}{2} \dots \dots \dots (\text{см. приложение XI}).$$

Метод дает наибольшую точность при $U_1 = U_2$ и $I_1 = I_2$, т. е. при больших углах сдвига по фазе между током и напряжением.

Неудобствами его являются необходимость иметь безиндукционное сопротивление и производить одновременный отсчет показаний трех приборов, что увеличивает систематическую ошибку измерения.

3) Метод электрометра может быть использован для выверки ваттметров, а также при измерениях потерь в диэлектриках и конденсаторах. При нем также необходимо иметь известное безиндукционное и безземкостное сопротивление R (схема рис. 319). Опыт сводится к двум последовательным наблюдениям углов отклонения бисквита F электрометра соответственно двум положениям переключателя P . Согласно теории электрометра зависимость между углом отклонения его бисквита, потенциалами бисквита и квадрантов A и B выражается через

$$\alpha = C (U_A - U_B) \left\{ U_F - \frac{U_A + U_B}{2} \right\},$$

где C — постоянная прибора, а U_A , U_B , U_F — потенциалы квадрантов и бисквита. Поэтому, когда переключатель P стоит на контакте 1, угол отклонения бисквита равен

$$\alpha_1 = C (U_c - U_b) \cdot \left\{ U_a - \frac{U_c + U_b}{2} \right\},$$

где U_c , U_b , U_a — потенциалы соответствующих точек цепи.

Когда переключатель P стоит на контакте 2, то имеем, поскольку при этом $U_F = U_b$,

$$\alpha_2 = C (U_c - U_b) \cdot \left\{ U_b - \frac{U_c + U_b}{2} \right\}.$$

Из этих выражений имеем

$$\alpha_1 - \alpha_2 = (U_c - U_b) (U_a - U_b),$$

но

$$U_c - U_b = U, \text{ а } U_a - U_b = I \cdot R.$$

Следовательно,

$$\alpha_1 - \alpha_2 = C \cdot U \cdot I \cdot R,$$

а так как отклонения бисквита электрометра соответствуют средним квадратическим значениям разностей потенциалов, то $\alpha_1 - \alpha_2 = C U I R \cos \varphi$, где φ — угол сдвига между U и I .

Отсюда

$$UI \cos \varphi = \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{C \cdot R} = P,$$

т. е. искомой мощности.

Преимуществом этого метода является его независимость от частоты и формы кривой тока.

§ 50. Приборы для измерения электрической работы.

1. Общие замечания. Электрическая энергия, расходуемая в цепи потребителя, может быть выражена в самом общем виде одним из следующих равенств:

$$A = \int_0^t v i dt,$$

или

$$A = U I \cos \varphi t,$$

где v и i — мгновенные, U и I — действующие значения напряжения и силы тока, а $\cos \varphi$ — коэффициент мощности цепи.

Последнее выражение в цепях постоянного, а также и переменного токов при $\cos \varphi = 1$ принимает вид $A = U I t$.

В зависимости от режима работы генератора и потребителей возможны различные способы измерения электрической энергии.

Если U и $\cos \varphi$ остаются постоянными, то $A = U \cos \varphi I t$ и, следовательно, электрическая работа может быть определена путем измерения среднего значения силы тока за определенный промежуток времени.

В этом случае можно воспользоваться показаниями описанных в параграфе 35 счетчиков ампер-часов или регистрирующего амперметра и счетчика времени.

Если постоянными остаются I и $\cos \varphi$, то достаточно иметь регистрирующий вольтметр и счетчик времени.

Наконец, если расходуемая мощность $U I \cos \varphi$ постоянна, то достаточно одного счетчика времени.

В соответствии с этим строятся специальные приборы под общим названием счетчиков; они подразделяются на счетчики ватт-часов, счетчики ампер-часов и счетчики часов в зависимости от того, какие из величин, входящих в выражение электрической работы, являются переменными.

Весьма многочисленные типы счетчиков по их назначению и области применения разделяются на регистрирующие и

обыкновенные. Первые не только учитывают общее количество израсходованной энергии, но и регистрируют графически характер ее потребления. Вторые же служат только для расчетов между производителями и потребителями энергии.

Область применения первых ограничивается, по преимуществу, электрическими станциями, где важно знать не только общее количество отданной энергии, но и изменение нагрузки во времени. Принцип устройства в них приспособлений для записи не отличается от того, на котором основаны регистрирующие амперметры и вольтметры. Запись ведется автоматически на особой масштабной бумаге, в виде непрерывной или пунктирной линии.

Обыкновенные счетчики учитывают расходуемую энергию посредством особого счетного механизма, приводимого во вращательное или колебательное движение от оси прибора, на которой закреплена его подвижная система.

Счетный механизм счетчиков представляет собою систему зубчатых колес, приводимых в движение от оси (вала) прибора, причем их передаточные числа подбираются так, чтобы на циферблате отсчитывались показания непосредственно в единицах электрической работы, например, в киловатт или ватт-часах.

По системе и принципу действия счетчики подразделяются на электродинамические и магнитомоторные, применяемые в цепях постоянного тока, и индукционные, годные только при переменном токе.

Из весьма большого числа существующих разновидностей счетчиков мы здесь вкратце остановимся только на двух, наиболее часто применяемых в практике.

2. Типы счетчиков электрической энергии. 1) Электродинамические счетчики по принципу действия суть небольшие электродвигатели шунтового возбуждения, у которых магнитная система образована двумя неподвижными катушками без сердечников $A-A$ (схема рис. 320-а). Обмотки этих катушек в последовательном соединении вводятся в цепь подобно токовой обмотке ваттметров и учитывают составляющую I в выражении $UIt = A$. Подвижная вольтметровая обмотка F счетчика выполнена по типу обмотки якоря электродвигателя и соединена своими выводами с коллекторными пластинками коллектора K , укрепленного на валу $a-a$ прибора. Обмотка эта при помощи щеток $b-b$ вводится в цепь параллельно тем ее точкам $c-c$, между которыми надо

измерять напряжение U для подсчета электрической работы. В цепь вольтметровой обмотки счетчика кроме того вводится добавочное сопротивление R , монтируемое в виде отдельных катушек, и еще так называемая „компенсационная“ катушка

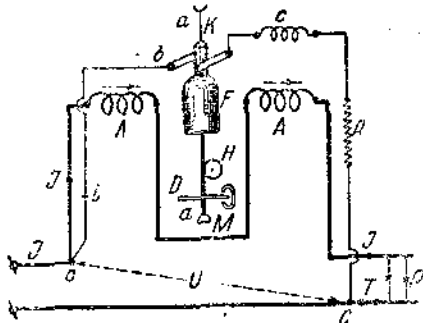


Рис 320-а.

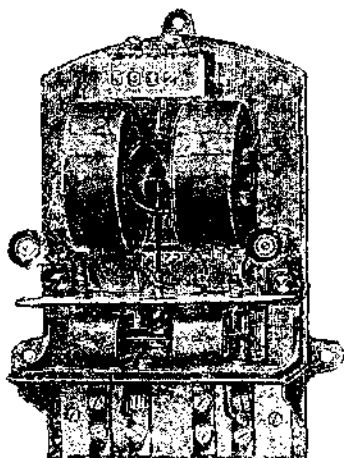


Рис. 320-б.

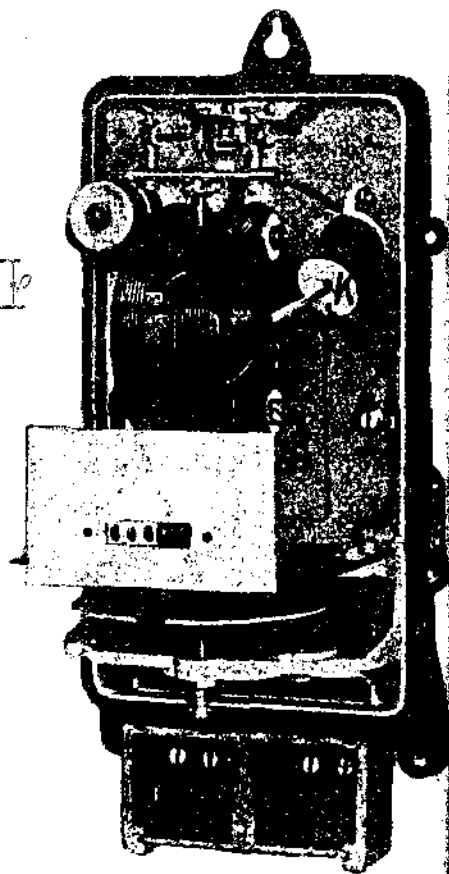


Рис. 320-в. Внутренний вид электродинамического счетчика эл. энергии.

C , назначение которой будет выяснено дальше. На валу счетчика укреплен алюминиевый диск D , который при вращении вала перемещается в междуполюсном пространстве постоянного подковообразного магнита M ; при этом в его толще индуцируются токи Фуко, порождающие тормозящий момент

подвижной системы счетчика. Вращательное движение вала, посредством его навитованной части и зубчатки H , передается счетному механизму, на схеме не показанному.

Дабы подобный прибор выполнял свое назначение, необходимо, чтобы секундное число оборотов n_s его вала было пропорционально мощности $U \cdot I$, потребляемой приемниками P . Это, в свою очередь, осуществимо, если противоэлектродвижущая сила E , индуцируемая в обмотках якоря, столь незначительна, что ею можно пренебречь по сравнению с напряжением U цепи, а также если поле неподвижных катушек счетчика прямо пропорционально току I . Тогда сила тока и цепи вольтметровой обмотки равна

$$i \cong \frac{U}{R + r_a + C},$$

а не

$$i = \frac{U - E}{R + r_a + C},$$

как это имело бы место при значительной по величине противоэлектродвижущей силе E . Здесь r_a , R и C — сопротивления якоря, добавочное и компенсационной к тушки.

Это достигается тем, что как якорь, так и неподвижные катушки не содержат железных сердечников; тем, что сопротивление вольтметровой цепи счетчика, велико, и, наконец, тем, что при расчете прибора задаются небольшим числом оборотов его якоря.

Вращающий момент подобного двигателя пропорционален току в его шунтовой (вольтметровой) цепи и напряжению H поля неподвижных катушек, т. е. пропорционален токам I и i . Но сила тока i пропорциональна напряжению U , а поэтому вращающий момент $M_{вр} = K \cdot U \cdot I$, где K — коэффициент пропорциональности.

Противодействующий момент создается, с одной стороны, токами Фуко, индуцируемыми в диске, а с другой — моментом трения вала в подшипниках, а также нажимом щеток о коллектор, трением тела якоря о воздух и, наконец, трением зубчаток счетного механизма.

Допустим на мгновение, что моменты трения отсутствуют; тогда механическая мощность счетчика, равная $M_{вр} 2\pi n_s = KUI 2\pi n_s$, должна целиком переходить в мощность токов Фуко, которая пропорциональна э.д.с. E , индуцируемой в диске D , и силе токов Фуко, т. е. $E \cdot I_f$. Первая, в свою

очередь, пропорциональна секунднему числу n_s оборотов диска, т. е. $E = A \cdot n_s$, где A — коэффициент пропорциональности, а вторая пропорциональна $\frac{E}{r}$, где r — сопротивление диска токам Фуко.

Таким образом,

$$KUI2\pi n_s = EI_{\phi}$$

или

$$KUI2\pi n_s = A n_s \frac{E}{r} = \frac{A^2 n_s^2}{r}.$$

Определяя отсюда UI , делая сокращения и сводя все постоянные в одну C , имеем

$$P = UI = C n_s,$$

т. е. мощность пропорциональна секунднему числу оборотов якоря.

Вся же электрическая работа за время t равна

$$A = Pt = UI t = C n_s t = C n,$$

т. е. пропорциональна всему числу n оборотов якоря за этот промежуток времени. Число оборотов учитывается счетным механизмом прибора. Коэффициент C — так называемый переводный множитель или постоянная счетчика — указывает, какое количество электрической энергии в ватт, гектоватт- или киловатт-часах соответствует одному обороту якоря прибора.

Вывод этот сделан в предположении, что момент трений отсутствует; так как этого быть не может, то для его уравновешения и служит упомянутая выше компенсационная катушка C . Последняя располагается или внутри одной из неподвижных катушек или сбоку ее на особом подвижном кронштейне. Положение компенсационной катушки относительно якоря (или число ее витков) подбирается так, чтобы, в результате взаимодействия полей ее и якоря, момент трений в приборе нацело уравновешивался и притом в то время, когда ток через неподвижные катушки не проходит, т. е. когда цепь нагрузки разомкнута рубильником T . Меняя положение или число витков компенсационной катушки, можно достигнуть того, что якорь счетчика будет вращаться при выключенной нагрузке; подобное состояние называется „самоходом“ счетчика. Оно свидетельствует, очевидно, о том, что момент трений в приборе пересилен моментом взаимодействия полей

якоря и компенсационной катушки, а это для потребителя невыгодно. Обратное положение, т. е. недоуравновешение момента трений невыгодно для поставщика электрической энергии, а поэтому правильный подбор положения или числа витков компенсационной катушки является одной из важных операций при выверке счетчиков.

Момент сил трения, как показывают исследования, зависит от скорости вращения якоря, но не прямо ей пропорционален; при малых скоростях он приближается к некоторой постоянной величине. Так как скорость вращения якоря счетчика зависит от нагрузки, то отсюда следует, что компенсационная катушка не может обеспечить полного уравновешения момента трений при различных по величине нагрузках счетчика, а это неминуемо влечет за собою непостоянство переводного множителя счетчика. Поэтому, при выверке счетчика необходимо определять его постоянную для различных нагрузок, например, в 10, 25, 50, 75 и 100% от номинала и из полученных данных взять среднее.

В некоторых счетчиках для уничтожения самохода к валу прикрепляется железная проволока, которая при вращении вала проходит перед тормозным магнитом и им притягивается. На рис. 320-б и в представлен внутренний вид счетчиков.

Причинами погрешности счетчика являются:

а) Влияние температуры при повышении которой: 1) возрастает сопротивление якорных обмоток и, следовательно, уменьшается вращающий момент, 2) увеличивается сопротивление диска токам Фуко, и, как результат, уменьшается тормозной момент;

б) Влияние внешних магнитных полей, действие которых сказывается весьма сильно вследствие отсутствия сердечников в катушках и якоре. Так, например, поле земли при малых нагрузках счетчика дает погрешность 4% — 6%. В этих видах кожух счетчика делается из железа (экран), а внутри прибора над постоянным магнитом располагается металлическая перегородка, отделяющая его от катушек прибора.

в) Колебания напряжения, вызывающие изменение величины вращающего момента, а также момента, порождаемого компенсационной обмоткой.

Ошибка показаний счетчика, под которой разумеется разность между энергией A , указанной счетчиком, и энергией A_g действительно израсходованной в цепи, по отношению к этой последней, т. е. $\pm \Delta A = \frac{A - A_g}{A_g} 100\%$, колеблется в пределах

от 1,5% до 4% при изменениях нагрузки от 5% до 125% ее номинала.

Отношение $\frac{A_k}{A} = K$ носит наименование поправочного коэффициента или „поправки“ счетчика; оно показывает, насколько надо умножить показание A счетчика, чтобы вычислить действительно израсходованную энергию A_k .

Между „ошибкой“ и „поправкой“ имеется следующая зависимость:

$$\pm \Delta A = \left(\frac{1}{K} - 1 \right)$$

и

$$K = \frac{1}{1 \pm \Delta A}.$$

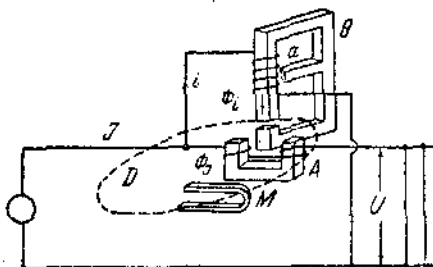


Рис. 321-а.

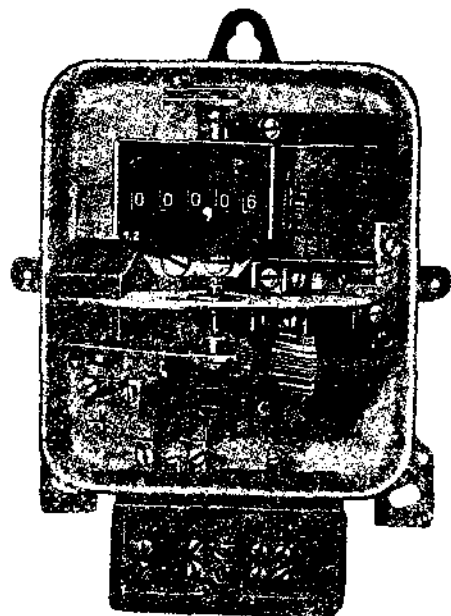


Рис. 321-б. Внутренний вид индукционного счетчика эл. энергии.

Собственное потребление энергии счетчиком для его вольтметровой цепи составляет около 1,3—2 ватт на 100 В; в токовой цепи оно колеблется от 1,5 до 30 ватт, в зависимости от номинала силы тока (30 ватт относятся к силе тока в 1000 А). Скорость вращения якоря около 50—100 оборотов в минуту. Допустимые пределы перегрузки — 25%.

Строятся электродинамические счетчики на силы токов от 5 А до 10 000 А. При силах токов свыше 10 000 А применяется шунтирование обмоток неподвижных катушек.

2) Индукционные счетчики в отличие от описанных выше электродинамических, применимы только в цепях перемен-

ного тока. По принципу действия они схожи с индукционными приборами, с тем лишь отличием, что их подвижная система вращается, и число оборотов ее учитывается счетным механизмом. На рис. 321-а представлена принципиальная схема индукционного счетчика, где A и B — два электромагнита, D — алюминиевый диск, вращающийся на непоказанной на схеме оси, и M — тормозной постоянный магнит. Обмотка электромагнита A из небольшого числа витков толстого проводника вводится в цепь нагрузки последовательно, а тонкая обмотка электромагнита B с большим числом витков подключается к цепи в параллель. Общий вид см. на рис. 321-б.

Токи I и i , протекающие по обмоткам электромагнитов, порождают два переменных магнитных потока Φ_I и Φ_i . Эти потоки пронизывают толщу диска D , причем поток Φ_I , как проходящий довольно длинный путь по воздуху, почти совпадает с породившим его током I , вернее, отстает от него на весьма небольшой угол α (диаграмма рис. 322). Поток Φ_i отстает от напряжения цепи, которому он по величине пропорционален, на угол $90^\circ + \alpha = \beta$.

Если нагрузка цепи индуктивна, и ток I отстает от напряжения U на угол φ , то Φ_I и Φ_i сдвинуты между собою на угол $(90^\circ + \alpha) - (\varphi + \alpha) = 90^\circ - \varphi$. Ток, индуцируемый в диске одним потоком, взаимодействуя с другим потоком, создают вращающий момент, пропорциональный произведению амплитуд этих потоков и синусу угла между ними, т. е. $K \Phi_I \Phi_i \sin(90^\circ - \varphi)$ или $K \Phi_I \Phi_i \cos \varphi$. Но так как потоки Φ_I и Φ_i пропорциональны I и U , то, следовательно, $M_{вр} = C U I \cos \varphi = C P$, где C — коэффициент пропорциональности. Таким образом, вращающий момент пропорционален мощности P , которая в свою очередь, пропорциональна секунднему числу n_s оборотов диска.

Механическая мощность, развиваемая при этом, поглощается в диске токами Фуко, которые в нем индуцируются при пересечении телом диска силовых линий поля постоянного магнита M . Таким образом, мы получаем примерно ту же конечную зависимость между моментами вращения и торможения, что и для описанного выше электродинамического счетчика.

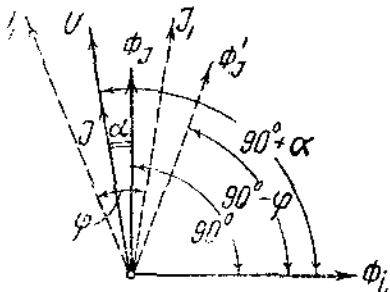


Рис. 322.

При выводе этой зависимости нами не учитывались активные и реактивные падения напряжений в обмотках электромагнитов, почему угол сдвига между потоками Φ_I и Φ_r может оказаться неравным ($90^\circ - \varphi$), что нарушит указанную выше пропорциональность между вращающим моментом и мощностью $P = UI \cos \varphi$, расходуемый в цепи потребителей.

Дабы этот сдвиг восстановить, прибегают к различным способам, из коих наиболее употребительны следующие. На сердечник электромагнита B , помимо основной намагничивающей обмотки, навивают несколько витков добавочной обмотки A_1 (рис. 323), соединенной последовательно с регулировочным сопротивлением r , меняя которое, можно достигнуть необходимого сдвига по фазе между Φ_I и Φ_r . Другой способ сводится к устройству так называемого „магнитного шунта“ (на рис. 321-а отмеченного буквой a), благодаря которому увеличиваются по-

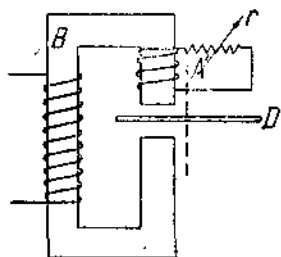


Рис. 323.

ток рассеяния и индуктивное сопротивление обмотки шунтового электромагнита B .

Помимо этого, пропорциональность между мощностью, затрачиваемой в цепи, и число M оборотов диска счетчика обуславливается сохранением пропорциональности между пото-

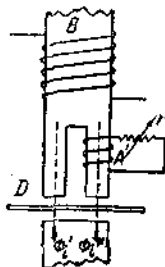


Рис. 324.

ком Φ_I и порождающим его током I . Между тем поток этот растет при нагрузке быстрее, чем ток I , и, следовательно, для сохранения выведенной выше зависимости надо создать некоторое добавочное вращающее усилие. Последнее чаще всего достигается тем, что упомянутую выше добавочную обмотку A навивают на один выступ сердечника шунтового электромагнита A , оставляя второй выступ свободным (рис. 324). При такой конструкции диск пронизывается не одним, а двумя сдвинутыми между собою на некоторый угол потоками Φ'_I и Φ''_I , которые и создают добавочное вращающее усилие. В других системах счетчиков той же цели достигают, снабжая полюсный наконечник электромагнита B небольшим медным экраном (принцип соответствующей группы индукционных приборов). Не останавливаясь далее на деталях конструкции этих счетчиков в исполнении различных фирм, ибо их весьма много, отметим только, что некоторые из них снабжаются приспособо-

блением для регулировки показаний; это достигается такой конструкцией шунтового электромагнита, при котором можно изменять длину его междуполюсного пространства.

Для измерения электрической энергии в цепях трехфазного тока используют метод Арона; два счетчика вводят в такую цепь по методу двух ваттметров.

На этом принципе основано устройство специальных счетчиков, представляющих собою два соединенных в одном приборе счетчика, и притом так, что показания их счетных механизмов автоматически суммируются (алгебраически).

Источниками погрешностей индукционных счетчиков являются: а) непостоянство момента трения его подвижной системы, который вообще значительно меньше, чем в счетчиках электродинамических, б) непропорциональность между Φ_I и I вследствие присутствия железного сердечника; в) повышение напряжения, вызывающее при малых нагрузках относительное увеличение числа оборотов диска; г) изменение частоты тока, в виду чего эти счетчики надо градуировать током той частоты, при которой им предстоит работать; д) изменение температуры; изменение ее на 25°C дает при $\cos \varphi = 1$ погрешность порядка $1,5\%$.

К достоинствам этих счетчиков надо отнести: а) дешевизну и прочность конструкции, б) допускаемую ими значительную перегрузку (до 300%), при которой погрешность их не превышает $2,5\%$, в) малое собственное потребление ими энергии: в шунтовой цепи — $0,5$ ватта, а в последовательной — до 1 ватта, г) большую чувствительность ($0,2$ — $0,3\%$ от номинала) по сравнению с электродинамическими счетчиками (около 1% от номинала).

Строятся эти счетчики на силу тока до 300 A и напряжение 600 V ; при больших значениях нагрузки они включаются через измерительные трансформаторы тока и напряжения.

3) Магнитомоторные счетчики строятся как счетчики амперчасов и пригодны только для постоянного тока. В них, как это описано выше, основное магнитное поле создается системой постоянных магнитов.

4) Специальные типы счетчиков. К ним относятся:

а) Счетчики реактивной энергии, т. е. индукционные счетчики, у которых угол сдвига по фазе между токами Φ_I и Φ_U равен 180° .

б) Указатели максимальной мощности, по типу индукционного счетчика, с очень сильным успокоением, стрелка

которых достигает своего 100% отклонения через 10—15 мин. после включения соответствующей нагрузки.

в) Счетчики двойного и тройного тарифа, имеющие несколько отдельных счетных механизмов, включаемых автоматически в определенные часы суток.

г) Счетчики излишков, которые учитывают энергию только при мощности не ниже определенной величины.

д) Комплексные счетчики, учитывающие как активную, так и некоторую определенную часть реактивной энергии.

5) Краткие извлечения из технических правил для счетчиков по нормам, утвержденным ВСНХ. Электрический счетчик при постановке его на месте применения должен удовлетворять следующим условиям:

а) Без нагрузки вновь установленный счетчик не должен изменять своих показаний при повышении напряжения на 10% сверх нормального.

б) Погрешность вновь устанавливаемого счетчика в пределах между 100% и 10% его номинальной нагрузки не должна превышать $\pm 3\%$ (для счетчиков уже установленных не больше $\pm 5\%$).

в) Счетчик должен приходить в движение и не останавливаться при нагрузке, составляющей не более 1% от номинала (для счетчиков уже установленных—2%).

г) Погрешность счетчиков переменного тока при $\cos \varphi = 0,5$ и для всех нагрузок его не ниже 10% не должна превышать $\pm 4\%$ (для счетчиков уже установленных не более $\pm 6\%$).

§ 51. Поверка ваттметров, фазометров и счетчиков.

Общие замечания. Поверка этих приборов имеет целью выяснить:

а) Насколько их показания P , A или $\cos \varphi$ соответствуют действительным значениям мощности P_g , энергии A_g или $\cos \varphi$ и попутно с этим определить их постоянную, ошибку или погрешность, вычисляемую как

$$\pm \Delta P = \frac{P - P_g}{P_g} 100\%$$

или

$$\pm \Delta A = \frac{A - A_g}{A_g} 100\%,$$

а также поправочный коэффициент K . Последний определяется как отношение

$$\frac{A_g}{A} = K$$

и, следовательно, указывает, насколько надо умножить показание прибора, чтобы получить истинную величину мощности или работы.

б) Собственное потребление этими приборами электрической мощности, с одной стороны, как фактор, определяющий возможную область их применения, а с другой, для подсчета тех поправок, на величину которых необходимо корректировать показания этих приборов при точных измерениях.

в) Влияние на их показания сдвига по фазе, а также внешних факторов, как например, поля земли и соседних проводов, а также частоты и формы кривой тока.

Выверка может быть осуществлена двояким способом: путем сравнения показаний выверяемого прибора с таким же прибором, но более точным и принятым за эталон, или же путем измерения точными приборами отдельных составляющих, входящих в выражения для подсчета мощности, энергии или соз ф. В этом последнем случае силу тока и напряжение рекомендуется измерять помощью компенсационных приборов.

Для удобства выверки всех этих приборов рекомендуется их токовые и вольтметровые цепи питать от отдельных и независимых источников энергии (рис. 327), что, помимо удобства работы, дает также экономию в расходовании электрической энергии во время опыта.

В качестве источников энергии предпочтительно пользоваться аккумуляторными батареями. Но выверка переменным током необходима, когда исследуются индукционные приборы и фазометры, а также при выяснении зависимости показаний ваттметров, счетчиков и фазометров от частоты тока и угла сдвига по фазе между током и напряжением; и тогда пользуются особыми фазорегуляторами или же специальными поверочными агрегатами.

Фазорегуляторы строятся по тому же принципу, что и моторы трехфазного тока: ротор у них заторможен, но с помощью особого механического приспособления его можно устанавливать в различных положениях относительно неподвижного статора. Когда обмотка статора включена в цепь трехфазного тока, то во внутренней полости статора, где находится ротор, возникает вращающееся магнитное поле,

и создаваемое им в обмотках ротора напряжение имеет ту же частоту, что и ток, питающий обмотки статора. Сдвиг же по фазе между ними зависит от пространственного взаимоположения обмоток статора и ротора и может быть регулируем изменением положения ротора.

Поверочные агрегаты обычно представляют собою две машины переменного тока, связанные особой муфтой, так что взаимное положение их роторов легко может быть изменяемо. Питая от одной машины токовую,

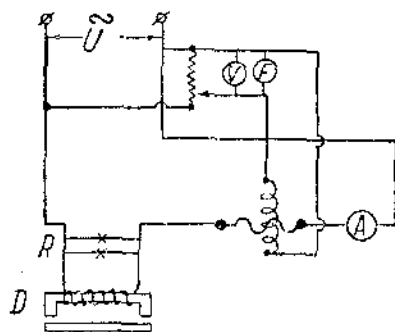


Рис. 325.

обмотки ваттметра, счетчика или фазометра, легко можно изменять сдвиг по фазе и вместе с этим питать обмотки выверяемого прибора от двух, по существу независимых, источников энергии.

За неимением фазорегуляторов или поверочных агрегатов необходимый сдвиг по фазе может быть достигнут помощью дроссельной катушки *D* (рис. 325) в параллельном соединении с ламповым реостатом *R*. Сдвиг по фазе между током и на-

пряжением в подобной цепи легко определяется по одновременно снятым показаниям точных амперметра, вольтметра

и ваттметра, как $\cos \varphi = \frac{P}{UI}$.

Чтобы его регулировать, комбинируют активное и индуктивное сопротивление реостата и дроссельной катушки.

1) Выверка ваттметров. Ваттметры электродинамической системы выверяются обычно на постоянном токе; что же касается ваттметров индукционных и указателей реактивной мощности, то их выверку надо производить током той частоты, при которой они будут работать.

При выверке электродинамических ваттметров, во избежание погрешности показаний вследствие влияния посторонних полей, необходимо, во-первых, так смонтировать схему опыта, чтобы исключить влияние полей, образованных токами в соседних проводах, и, во-вторых, перед повторным отсчетом коммутировать направление тока в обеих обмотках ваттметра или же повернуть прибор на 180° , чтобы исключить влияние поля земли.

Сама выверка может быть осуществлена двояким способом: путем сравнения показаний выверяемого P_x и точного P_n ваттметра (рис. 326) или по показаниям точных амперметра и вольтметра (рис. 327), а также фазометра F , если в процессе выверки желательно выяснить зависимость показаний от сдвига по фазе между током и напряжением (рис. 328).

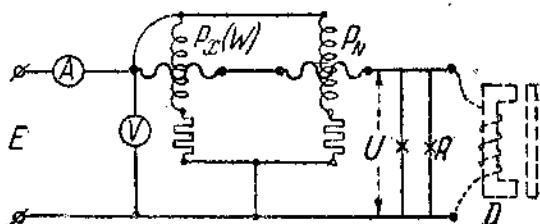


Рис. 326.

Первый способ применим только для выверки технических ваттметров, где обычно показания выверяемого прибора не корректируются в отношении собственного потребления ими электрической энергии.

В качестве точного берут электродинамический ваттметр, проградуированный предварительно на постоянном токе по схеме рис. 327, которая позволяет коммутировать направление

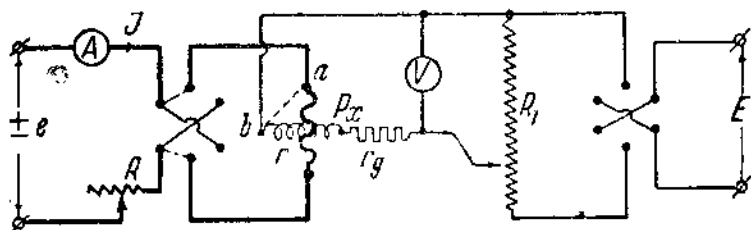


Рис. 327.

тока в обеих цепях ваттметра и тем самым избежать погрешности показаний вследствие влияния посторонних полей.

Во втором случае регулируют с помощью реостата R силу тока в амперметровой цепи ваттметра и, поддерживая потенциометром R_1 постоянное напряжение U на зажимах его вольтметровой цепи, одновременно снимают показания с амперметра, вольтметра и ваттметра (a_1). Затем коммутируют

направление токов в обеих цепях ваттметра и, проверив постоянство I и U , снимают с него второй отсчет (α_2). Тогда

$$P_{\text{ср}} = \frac{P_1 + P_2}{2} = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2},$$

где $P_{\text{ср}}$ — среднее показание ваттметра. Если действительная мощность, отсчитанная при этом по показаниям амперметра и вольтметра, была $P = UI$, то абсолютная погрешность показаний ваттметра, отнесенная к данному показанию, равна $f = P_{\text{ср}} - P$, а относительная $g = \frac{f}{P}$. Проведя опыт для различных по силе токов, от минимального до номинального его значения, подсчитывают среднее значение абсолютной ошибки его показаний $f_{\text{ср}}$ и также среднюю относительную ошибку, как $g_{\text{ср}} = \frac{f_{\text{ср}}}{P_n} 100\%$, где P_n — номинальная мощность, обычно помечаемая на приборе. Опыт заканчивают измерением сопротивлений обеих обмоток ваттметра и по этим данным вычисляют поправки на собственное потребление им электрической энергии, как $I^2 R$ и $i^2 (r + r_g) = \frac{U^2}{r + r_g}$.

Полученные данные для $g_{\text{ср}}$, $I^2 R$ и $\frac{U^2}{r + r_g}$ полезно представить в виде графика их зависимости от показаний ваттметра. Отсюда уже нетрудно вычислить истинную цену деления шкалы выверяемого прибора и сравнить ее с ценой деления по его данным, с тем, чтобы в дальнейшем пользоваться прибором для измерений мощности, отдаваемой источником электрической энергии или потребляемой приемниками.

Для всестороннего исследования ваттметра полезно его выверить не только при постоянном напряжении U и различных нагрузках, но и, наоборот, при различных напряжениях и постоянной нагрузке.

Если выверяется ваттметр, предназначенный для измерений в цепях переменного тока, то его показания должны быть проверены соответственно различным сдвигам в нагрузочной цепи. Это может быть осуществлено с помощью фазорегулятора, поверочного агрегата или дроссельной катушки; последний способ мало удобен и требует точного ваттметра или фазометра (рис. 326). Довольно удобный и относительно легко выполнимый средствами лаборатории способ заключается в следующем. На рис. 328 S_t означает статор трехфазного асинхронного двигателя; R_t — его ротор; T — трансформатор

и R — потенциометр. Если питать обмотки статора от сети трехфазного переменного тока, то во внутренней его полости возникает вращающееся магнитное поле, неизменное по величине.

Пересекая обмотки ротора, оно индуцирует в них э.д.с., фазовый угол которой по отношению к напряжению на зажимах обмотки любой из фаз статора легко можно изменять. Для этого надо повернуть ротор на определенный угол относительно обмоток статора и затормозить его в этом положении. Если двигатель четырехполюсный, то поворот ротора относительно статора на угол в 90° позволяет изменить сдвиг по фазе между $U_{ст}$ и $U_{рт}$ на угол в 180° .

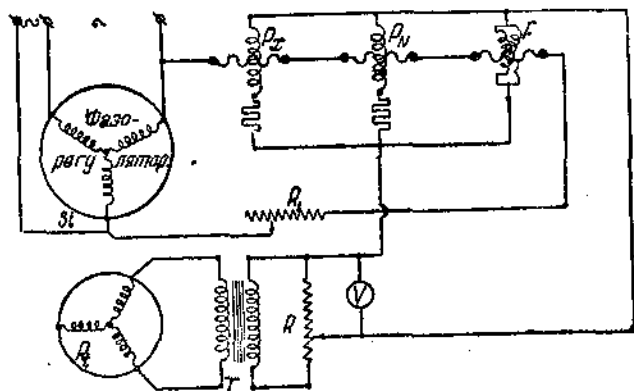


Рис. 328.

Беря ток от статора и регулируя его силу с помощью реостата R_1 , пропускают его через амперметровую обмотку испытуемого ваттметра (или фазометра, или счетчика). Напряжение к вольтметровым обмоткам этих приборов подводят от цепи ротора и регулируют его по величине с помощью трансформатора и потенциометра.

Отмечая одновременно показания амперметра, вольтметра и точного ваттметра P_N , нетрудно выяснить зависимость показаний выверяемого ваттметра от $\cos \varphi$ в его цепи, а именно: $P_N = UI \cos \varphi$, откуда $\cos \varphi = \frac{P}{UI}$, чему соответствует некоторое показание P_x выверяемого ваттметра.

В суммирующих ваттметрах трехфазного тока обычно каждый элемент проверяется в отдельности.

2) Выверка счетчиков электрической энергии. Задачей выверки счетчиков электрической энергии является: определение постоянной счетчика C , передаточного числа α и погрешности f его показаний. Кроме того, попутно с выверкой следует выяснить, какое влияние на его показания оказывают колебания напряжения в цепи и внешние магнитные поля, а также исследовать наклонность его к самоходу и, наконец, подсчитать собственное потребление им электрической энергии.

(1) Постоянной C счетчика называют то количество электрической энергии в ватт-секундах (или количество электричества в ампер-секундах), которое прошло через счетчик за время, отвечающее одному обороту и его диска, т. е.

$$\left. \begin{aligned} C &= \frac{A}{u} = \frac{U_{\text{вольт}} I_{\text{амп}} t_{\text{сек}}}{u} \text{ ватт-секунд} \\ C &= \frac{A}{u} = \frac{U \cdot I \cdot t}{u \cdot 3600} \text{ ватт-часов} \\ C &= \frac{A}{u} = \frac{U \cdot I \cdot t}{u \cdot 3600 \cdot 100} \text{ гектоватт-часов} \\ C &= \frac{A}{u} = \frac{U \cdot I \cdot t}{u \cdot 3600 \cdot 1000} \text{ киловатт-часов} \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{на один оборот} \\ \text{диска.} \end{array}$$

(2) Передаточным числом α счетчика называют число u оборотов его главной оси (или диска), соответствующее одному обороту барабана его счетного механизма, учитывающего целые киловатт-часы, т. е. $\alpha = \frac{u}{\text{kWh}}$.

(3) На счетчиках обычно отмечается так называемая фабричная постоянная C_ϕ счетчика, под каковой разумеют то приращение числа ватт-секунд (или ампер-секунд), которое указывает счетный механизм счетчика, когда его диск совершит один оборот, т. е. $C_\phi = \frac{n}{u}$.

(4) Сопоставляя выражения для C , α и C_ϕ , мы видим, что если к примеру

$$C_\phi = 1200 \frac{\text{Втсек}}{\text{оборот}},$$

то

$$\alpha = \frac{3600 \cdot 1000}{1200} = 3000 \frac{\text{оборотов}}{\text{kWh}};$$

таким образом, постоянные C и C_g счетчика связаны между собою в отношении передаточного числа.

Погрешностью f показаний счетчика называют отношение $\frac{C_g - C}{C} 100\%$, где C_g — действительная постоянная, определенная из опыта, а C — постоянная по фабричным или станционным данным; погрешность положительна, когда $C > C_g$. Сама выверка счетчиков может быть осуществлена двояким способом: по измеренным во время опыта U, I, t и снятому со счетного механизма показанию n (не менее одной цифры), или же по измеренным U, I, t и отсчитанному за время t (не менее 3 минут) опыта числу u оборотов главной оси (диска) счетчика. Сила тока и напряжение должны оставаться при этом постоянными. В первом случае постоянная C определится из выражения $C = \frac{A}{u} = \frac{U I t}{1000 \cdot 3600}$ и киловатт-часов на единичный оборот диска, а во втором $C_g = \frac{n}{u} = \frac{1000 \cdot 3600}{U I t}$ оборотов главной оси на 1 киловатт-час израсходованной электрической энергии.

Второй способ, хотя и не дает непосредственного значения искомой постоянной C счетчика, но он проще. Кроме того, зная C_g и определив в процессе опыта передаточное число a , легко подсчитать и постоянную C .

Постоянную необходимо определять как среднее арифметическое из постоянных для 10%; 25%; 50% и 100% от номинальной нагрузки счетчика, причем для каждого значения силы нагрузочного тока вычисляют две постоянные: одну при постепенном увеличении силы тока, а другую при его уменьшении. Найденные постоянные не должны отличаться более, чем на 2% от их средней арифметической. Само испытание должно производить при закрытом кожухе счетчика.

Выверка счетчиков постоянного тока осуществляется по схеме 327, причем нет особой надобности питать его токовую и вольтметровую обмотки от независимых источников энергии.

Для выверки счетчиков однофазного переменного тока, постоянная коих должна быть определена для различных углов сдвига по фазе, пригодна схема рис. 326, где P_N — точный ваттметр; D — дроссельная катушка; R — реостат; A и V — амперметр и вольтметр и W — испытуемый счетчик.

Регулируя силу тока в цепи с помощью реостата и дроссельной катушки и снимая одновременно показания с приборов, определяем угол фазного сдвига по формуле

$$\cos \varphi = \frac{P}{U \cdot I}$$

Для выверки счетчиков трехфазного тока, состоящих из двух спаренных и соединенных по схеме Арона однофазных счетчиков, пригодна схема рис. 329 где I и II — элементы счет-

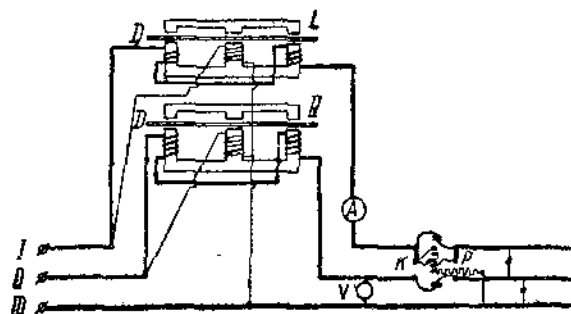


Рис. 329.

чика; K — ваттметровый переключатель; P — ваттметр; A — амперметр и V — вольтметр.

Для определения чувствительности счетчика снижают его нагрузку до того минимума $A_{\min}$, при котором он еще работает, не останавливаясь, и за меру чувствительности принимают отношение

$$\varepsilon = \frac{A_{\min}}{A_{\text{ном}}} 100\%,$$

где $A_{\text{ном}}$ — номинальная нагрузка, на которую построен счетчик. Наклонность счетчика к самоходу определяется при выключенной нагрузке и колебаниях напряжения.

По данным опыта, сведенным в соответствующую таблицу, строят графики:

а) Зависимости постоянной C_x счетчика от нагрузки (по оси абсцисс откладывается нагрузка в процентах от номинала, а по оси ординат — значения C_x).

б) Зависимости погрешностей f счетчика от нагрузки (по оси абсцисс — нагрузка в процентах от номинала, по оси ординат — значения $\pm f$).

в) Зависимости собственного потребления счетчиком электрической энергии от нагрузки, для чего необходимо измерить сопротивления его обмоток.

Кроме того следует дать результаты обследования счетчика в отношении самохода и влияния посторонних полей на его постоянную. Это последнее испытание производится при нагрузке в 50% и 75% от номинала; для этого на счетчик надевают или располагают вблизи его катушку и через обмотку ее пропускают постоянный ток такой силы, чтобы счетчик находился в сфере воздействия магнитного поля напряжением в 5 эрстедт.

Сопоставив все данные опыта с кратким извлечением из норм для счетчиков (§ 50), делают заключение о степени его пригодности.

3) Выверка фазометров проще всего осуществляется по схеме рис. 328, для чего, изменяя взаимное положение ротора относительно статора и устанавливая для каждого из них силу тока и напряжение, одновременно снимают показания с приборов.

Тогда искомый

$$\cos \varphi = \frac{P}{U \cdot I}.$$

Опыт рекомендуется провести для трех нижеследующих случаев и по полученным данным построить поправочные кривые фазометра, как $\Delta \varphi^0 = f(\varphi^0 \text{ прибора})$.

1. $I = \text{const}$; $V = \text{const}$; $\cos \varphi$ — изменяется,
2. $U = \text{const}$; $\cos \varphi = \text{const}$; I — изменяется,
3. $\cos \varphi = \text{const}$; $I = \text{const}$; V — изменяется.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ IX.

1. При соблюдении каких условий между углом отклонения подвижной системы ваттметра и измеряемой им мощностью существует линейная зависимость, и какими способами она достигается в существующих приборах?

2. Почему электродинамический ваттметр, проградуированный на постоянном токе, может быть использован для измерений в цепях тока переменного?

3. Какими способами расширить пределы измерений данным ваттметром?

4. В чем смысл применения астатической системы подвижных катушек ваттметра?
5. Перечислите источники погрешности показаний ваттметров различных систем.
6. Число ли применяются тепловые ваттметры?
7. Перечислите правила включения ваттметра и выведите формулу для подсчета поправок на собственное потребление им электрической энергии.
8. Какие меры применяются в некоторых типах ваттметров для компенсации ошибок показаний, обусловленных собственным потреблением ими электрической энергии?
9. Зависят ли показания фазометров от частоты тока?
10. В каких условиях практики нельзя пользоваться вибрационными частотомерами и почему?
11. Равномерна ли шкала у ваттметров типа Феррариса?
12. Когда можно пользоваться искусственной нулевой точкой при измерениях мощности трехфазного тока?
13. В чем смысл метода двух ваттметров и какие условия должны быть соблюдены при измерениях по этому методу?
14. Какими способами быстро выяснить, надо ли складывать или вычитать показания ваттметров при измерениях мощности по методу Арона?
15. Объясните назначение компенсационной катушки у счетчиков электрической работы.
16. Что такое постоянная счетчика?
17. Перечислите причины погрешностей электродинамических и индукционных счетчиков.
18. Что такое поправочный коэффициент счетчика?
19. Можно ли применять электродинамические счетчики в цепях переменного тока?
20. Чем обуславливается пропорциональность между мощностью, затрачиваемой в цепи индукционного счетчика, и числом оборотов его диска?
21. Почему при выверке ваттметров и счетчиков рекомендуется питать их токовые и вольтметровые обмотки от двух независимых источников электрической энергии?
22. Почему в схеме рис. 327 пунктиром показано соединение точек a и b , принадлежащих токовой и вольтметровой обмоткам прибора? Надо ли делать это соединение?
23. Почему в электродинамических счетчиках часть добавочного сопротивления шунтовой цепи делают из проводов с большим температурным коэффициентом?
24. Как по двум показаниям ваттметра определить коэффициент мощности цепи?
25. В каких случаях метод трех амперметров не пригоден для измерения мощности?

ПРИЛОЖЕНИЯ К ГЛАВЕ IX.

Выводы формул.

I.

1. Если положить, что подвижная катушка и добавочное к ней сопротивление обладают только активным сопротивлением, и подставить в уравнение $I i (r + r_g) = C \alpha$ вместо $i (r + r_g)$ равное ему мгновенное значение напряжения u' , а вместо I — мгновенное значение силы тока i'

в неподвижной катушке, т. е. $P' = I' u'$, то за время одного периода, будем иметь

$$\frac{(r + r_g)}{T} \int_0^T u' i' dt = C \alpha$$

или

$$\frac{1}{T} \int_0^T u' i' dt = K \alpha \dots \dots \dots (A)$$

Левая часть этого уравнения, как известно из теории переменных токов, выражает мощность тока $UI \cos \varphi$; следовательно, и в этом случае справедливо выражение $P = K \alpha$, показывающее, что зависимость между отклонением стрелки прибора и мощностью — линейная, и что показания ваттметра не зависят от формы кривой тока.

Если ток и напряжение синусоидальны, а нагрузка индуктивна η , следовательно, ток отстает по фазе от напряжения на угол φ , то мгновенные значения тока и напряжения

$$u' = U_m \sin \omega t,$$

$$i' = I_m \sin (\omega t - \varphi).$$

Подставив эти значения в формулу (A), получим

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T U_m \sin \omega t I_m \sin (\omega t - \varphi) dt = \frac{U_m I_m}{T} \int_0^T (\sin^2 \omega t \cos \varphi - \sin \omega t \cos \omega t \sin \varphi) dt = \frac{U_m I_m}{2} \cos \varphi = UI \cos \varphi = K \alpha.$$

Если ток опережает напряжение, то окончательное выражение для P не изменится.

II.

Действительно, если i и U не сдвинуты по фазе, то $P = UI \cos \varphi = = i (r + r_g) I \cos \varphi$. Если же между напряжением цепи и силой тока в подвижной катушке имеется сдвиг по фазе на некоторый угол γ , то сила тока в ней будет уже иная, а именно,

$$i' = i \cos \gamma = i \frac{r + r_g}{\sqrt{(r + r_g)^2 + \omega^2 L^2}},$$

и, следовательно, мощность, измеренная ваттметром, будет уже не P , а

$$P' = I i' (r + r_g) \cos (\varphi - \gamma)$$

или

$$P' = I i (r + r_g) \cos \gamma \cos (\varphi - \gamma).$$

Сопоставляя выражения для P и P' , имеем

$$P = P' \frac{\cos \varphi}{\cos \gamma \cdot \cos (\varphi - \gamma)} = \frac{1 + \operatorname{tg}^2 \gamma}{1 + \operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} \gamma} = P' F, \text{ где } F =$$

поправочный коэффициент, на который надо умножить мощность, намеряемую ваттметром, дабы получить ее истинное значение.

Для пояснения способа компенсации фазовой погрешности в цепи подвижной обмотки прецизионных ваттметров, а также компенсации в них температурных погрешностей приведем схему внутренних соединений ваттметра фирмы Сименс, принятого в Германии, как стандартный тип.

Здесь (сх. рис. 330) приняты следующие обозначения: R_1 — сопротивление медной обмотки подвижной катушки; R_2 — добавочное безиндукционное к ней сопротивление из манганина; R_3 — так называемое уравни-

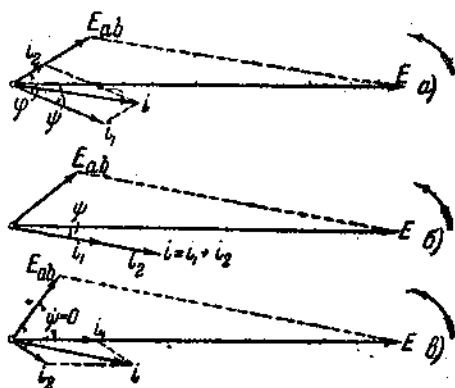
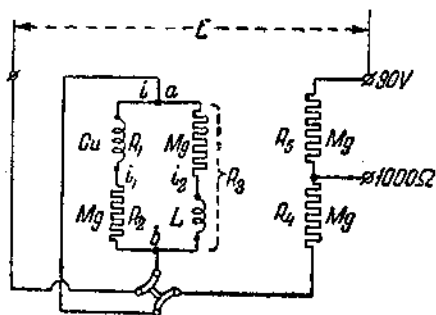


Рис. 330.

вающей подвижную катушку из медного проводника, во время работы прибора возрастает как за счет протекающего по ней тока, так и за счет тепла, выделяемого током, протекающим по неподвижной (токовой) катушке ваттметра. Поскольку при этом сопротивление ветви R_3 из манганинового проводника практически остается неизменным, происходит перераспределение токов i_1 и i_2 по величине; ток i_1 убывает, а ток i_2 возрастает, одновременно с чем возрастает и падение напряжения между точками a и b разветвления. А раз это напряжение возрастает, то, следовательно, ток i ослабевает меньше, чем ослабел бы при отсутствии сопротивления R_3 .

тельное сопротивление из манганина, причем некая его часть намотана в виде катушки, обладающей коэффициентом самоиндукции L ; R_4 и R_5 — добавочные сопротивления из манганина, — первое дополняет приведенное сопротивление между точками a и b внутренней цепи прибора до 1000Ω (к связанному с ним зажиму присоединяются наружные добавочные сопротивления). Сила тока, отвечающая полному отклонению стрелки прибора, подогнана, равной 30 mA , при каких условиях зажиму 1000Ω соответствует номинальное напряжение в 30 V . Температурная компенсация достигается за счет второго добавочного сопротивления $R_3 = 2000 \Omega$, смонтированного внутри прибора (если напряжение не более 90 вольт — зажим 90 V), а также наружных добавочных сопротивлений, если напряжение выше 90 вольт. Через описанный контур, в случае подключения его к постоянному напряжению, протекает приблизительно постоянный по силе ток, который между точками a и b ветвится по двум параллельным цепям. Сопротивление одной из них, содер-

Подобрав это сопротивление значительно большим сопротивлений $R_1 + R_2$, мы тем самым можем снизить колебания силы тока в этой ветви, а следовательно, скомпенсировать уменьшение вращающего момента, под влиянием которого подвижная система прибора отклоняется, т. е. сделать показания прибора почти независимыми от изменений температуры. Почти совершенная компенсация достигается еще благодаря тому, что противодействующий момент спиральных пружинок прибора при их нагреве несколько уменьшается.

Погрешности из-за собственного сдвига в цепи подвижной обмотки прибора, несмотря на ничтожно малый коэффициент ее самоиндукции (порядка 0,005 Н), благодаря наличию сопротивления R_3 , все же имеют место, и особенно при малых мощностях и повышенных частотах. Для компенсации фазовой погрешности часть сопротивления R_3 повторм выполняется в виде катушки. Если при этом так подобрать параметры ветвей $R_1 + R_2$ и R_3 , чтобы отношение полного сопротивления ветви R_3 к ее омическому сопротивлению было таким же, как и в ветви $R_1 + R_2$, то токи i_1 и i_2 будут совпадать по фазе как между собою, так и с током i , протекающим к точке разветвления. Последний же ток, ввиду большого омического сопротивления добавочных сопротивлений, не может быть сильно сдвинут относительно напряжения. Таким образом, и сдвиг тока относительно напряжения ббльшим быть не может, несмотря на наличие сопротивления R_3 . Если же отношение полного сопротивления уравнивательной ветви R_3 к ее омическому сопротивлению нарочно подобрать несколько ббльшим, нежели отношение тех же сопротивлений в ветви подвижной катушки прибора, то даже и упомянутый выше ничтожно малый сдвиг тока i_1 можно совершенно скомпенсировать.

Сказанное поясняется диаграммами рис. 330. На диаграмме *а* представлено расположение векторов токов и напряжений в схеме для того случая, когда сопротивление R_3 безиндукционно, т. е. когда ток i_2 совпадает по фазе с напряжением E_{ab} между точками *а* и *б*, а ток i_1 отстает от общего напряжения E , приложенного к зажимам вольтметровой цепи ваттметра.

Диаграмма *б* иллюстрирует тот случай, когда отношения полного сопротивления к омическому в обеих параллельных ветвях одинаковы, т. е. когда токи i_1 и i_2 совпадают по фазе, но общий ток i отстает на угол ψ от общего напряжения.

Наконец, диаграмма *в* отвечает случаю, когда полное сопротивление уравнивательной ветви больше, чем сопротивление ветви подвижной обмотки. Тогда ток i_1 совпадает по фазе с общим напряжением, а фазовый угол между i_2 и E_{ab} несколько больше фазового угла между i_1 и E_{ab} . Подобным способом фирма Сименс достигает в своих ваттметрах компенсации фазовой погрешности для довольно больших диапазонов частоты переменного тока.

IV.

Так как для ваттметров $P = K\alpha$, то его постоянная K при $I = 12,5$ А и $V = 30$ В равна $12,5 \times 30 = K \cdot 150$, откуда $K = \frac{375}{150} = 2,5$ ватта.

Подобным же образом постоянные для других пределов равны $K_1 = 12,5$; $K_2 = 25$; $K_3 = 5$; $K_4 = 25$ и $K_5 = 50$ ватт на одно деление шкалы.

V.

Постоянная ваттметра без трансформаторов

$$K = \frac{5 \cdot 90}{150} = 3 \text{ ватта}$$

на 1 деление шкалы; постоянная его с трансформатором тока

$$K_1 = K u = 3 \cdot \frac{25}{5} = 15 \text{ ватт}$$

на 1 деление шкалы, и, наконец, постоянная его с обоими трансформаторами

$$K_2 = K \cdot u \cdot u_1 = 3 \cdot \frac{25}{5} \cdot \frac{600}{100} = 3 \cdot 5 \cdot 60 = 900 \text{ ватт}$$

на одно деление шкалы:

Следовательно, измеренная мощность равна $P = 900 \cdot 45 = 40500 \text{ ватт} = 40,5 \text{ киловатт}$.

VI.

Под действием переменного тока I в диске индуцируется ток мгновенного значения i_1 , отстающий по фазе от первого на некий угол ψ_1 . Переменные магнитные поля электромагнитов II и III индуцируют в пластинках T токи мгновенного значения i_2 , отстающие от напряжения U на некий угол ψ_2 .

Если мгновенные значения напряжения U обозначим через u , силы тока I через i , а их максимальные значения через U_m и I_m и допустим, что между U и I имеется сдвиг по фазе на угол φ , то, согласно сказанному выше, можем написать

$$\left. \begin{aligned} u &= U_m \sin \omega t \\ i &= I_m \sin (\omega t - \varphi) \\ i_1 &= C_1 I_m \sin (\omega t - \varphi - \psi_1) \\ i_2 &= C_2 U_m \sin (\omega t - \psi_2) \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{где } C_1 \text{ и } C_2 - \text{постоян-} \\ \text{ные, зависящие от кон-} \\ \text{струкции прибора.} \end{array}$$

Вращающий момент, действующий на диск и заставляющий его повернуться на некоторый угол α , определяется из выражения

$$M_{\text{вр}} = C_1 C_2 \frac{1}{T} \int_0^T i_1 i_2 dt;$$

Подставив значения i_1 и i_2 , получим

$$M_{\text{вр}} = C_1 C_2 U I \cos (\psi_1 - \psi_2 - \varphi).$$

При соответствующей конструкции, размерах и взаимном расположении деталей прибора можно достигнуть того, чтобы $\psi_1 = \psi_2$, и тогда

$$M_{\text{вр}} = C_1 C_2 U I \cos \varphi.$$

Этот вращающий момент уравновешивается моментом сопротивления $M_c = C_8 \alpha$ и, следовательно,

$$C_1 C_2 U I \cos \varphi = C_8 \alpha,$$

или, заменяя все постоянные через одну, имеем

$$P = U I \cos \varphi = K \alpha.$$

Постоянная ваттметра

$$K = \frac{U \cdot I}{150} = \frac{600 \cdot 25}{150} = 100 \text{ ватт на одно деление.}$$

Измеренная ваттметром мощность

$$P_1 = 100 \cdot 100 = 10000 \text{ W.}$$

Потеря мощности в ваттметре при работе по схеме I равна

$$5 \frac{24^2}{25} = 4,5 \text{ W,}$$

а при работе по схеме II

$$\frac{500^2}{20000} = 12,5 \text{ W.}$$

Следовательно, мощность, измеренная ваттметром, больше действительной в первом случае на 4,5 W, а во втором — на 12,5 W и, соответственно этому, ошибки составляют 0,045% и 0,125%.

VIII.

Для доказательства обратимся к диаграмме 331 и рис. 313, где U_1, U_2 и U_3 обозначают фазные, а U_{12}, U_{23} и U_{13} — линейные напряжения; I_1, I_2 и I_3 фазные, или что то же, линейные токи и, наконец, φ — фазные углы. Диаграмма построена на основе выражения $U_{13}I_1 + U_{23}I_2$ и в предположении, что токи I_1 и I_2 отстают от фазных напряжений U_1 и U_2 на угол φ .

Мощность $P_1 = U_{13}I_1$, учитываемая первым ваттметром, согласно диаграмме, равна

$$P_1 = U_{13}I_1 \cos(30^\circ - \varphi) = U_{\lambda} I_{\lambda} \cos(30^\circ - \varphi),$$

а второго

$$P_2 = U_{23}I_2 \cos(30^\circ + \varphi) = U_{\lambda} I_{\lambda} \cos(30^\circ + \varphi).$$

Следовательно, общая мощность, или учитываемая, равна

$$P = P_1 + P_2 = U_{\lambda} I_{\lambda} [\cos(30^\circ - \varphi) + \cos(30^\circ + \varphi)] = U_{\lambda} I_{\lambda} 2 \cos 30^\circ \cos \varphi = \sqrt{3} U_{\lambda} I_{\lambda} \cos \varphi = 3 U_1 I_1 \cos \varphi,$$

ибо при соединении в звезду фазное напряжение $U_1 = U_{13} / \sqrt{3}$, фазный ток $I_1 = I_{\lambda}$ и, кроме того

$$2 \cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 2 = \sqrt{3}.$$

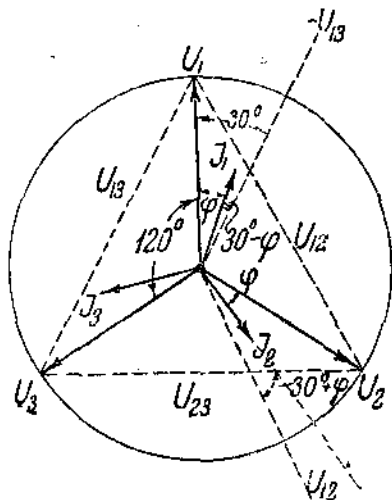


Рис. 331.

Для случая соединения цепи в треугольник получается тот же результат.

IX.

При безиндукционной нагрузке, когда $\varphi = 0$, имеем

$$P_1 = U_{13} I_1 \cos 30^\circ$$

и

$$P_2 = U_{23} I_2 \cos 30^\circ,$$

или

$$P_1 = U_{13} I_1 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \quad P_2 = U_{23} I_2 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2},$$

т. е. в этом случае показания обоих ваттметров одинаковы и равны каждой половине общей мощности цепи. При индуктивной нагрузке и $\varphi = 30^\circ$ имеем $P_1 = U_{13} I_1$ и $P_2 = U_{23} I_2 \cdot 0,5$. Если $\varphi = 60^\circ$, то

$$P_1 = U_{13} I_1 \frac{\sqrt{3}}{2},$$

а $P_2 = 0$ и, наконец, если $\varphi > 60^\circ$, то показание второго ваттметра становится отрицательным, т. е. его подвижная система отклоняется в обратную сторону.

При емкостной нагрузке получаются те же соотношения, но только ваттметры как бы меняются местами.

X.

Если переключатель P на схеме 317 поставлен влево, то согласно диаграмме рис. 332-а ваттметр учитывает мощность

$$P_1 = U_{12} I_1 \cos (\varphi - 30^\circ) = U_1 \sqrt{3} I_1 \cos (\varphi - 30^\circ).$$

При правом положении переключателя ваттметр учитывает мощность

$$P_2 = U_{13} I_1 \cos (\varphi + 30^\circ) = U \sqrt{3} I_1 \cos (\varphi + 30^\circ).$$

Преобразовывая эти выражения, имеем

$$P_1 = U_{12} I_1 \cos (\varphi - 30^\circ) = U_1 \sqrt{3} I_1 \cos (\varphi - 30^\circ) = U_1 I_1 \sqrt{3} \cos \varphi \frac{\sqrt{3}}{2} + \\ + \sin \varphi \frac{1}{2} = U_1 I_1 \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \varphi (\sqrt{3} + \operatorname{tg} \varphi)$$

$$P_2 = U_{13} I_1 \cos (\varphi + 30^\circ) = U_1 \sqrt{3} I_1 \cos (\varphi + 30^\circ) = U_1 I_1 \sqrt{3} \left(\cos \varphi \frac{\sqrt{3}}{2} - \right. \\ \left. - \sin \varphi \frac{1}{2} \right) = U_1 I_1 \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \varphi (\sqrt{3} - \operatorname{tg} \varphi).$$

Складывая эти показания, получим

$$P = P_1 + P_2 = 3 U_1 I_1 \cos \varphi,$$

т. е. полную мощность всей цепи.

Если $\varphi > 60^\circ$, то P_2 имеет отрицательное значение, и его надо вычитать из P_1 , чтобы определить истинное значение P .

Из той же диаграммы видно, что при $\varphi = 0$,

$$P_1 = U_1 I_1 \sqrt{3} \cos \varphi = \frac{3}{2} U_1 I_1 = 1,5 U_1 I_1,$$

т. е. измерение полной мощности можно осуществить одним ваттметром, причем нет надобности переключать его ваттметровую цепь.

Полная мощность в этом случае равна удвоенному показанию одного ваттметра, т. е.

$$P = 2 \cdot 1,5 P_1 = 3 P_1 = 3 U_1 I_1 \cos \varphi.$$

Метод двух ваттметров при уравновешенной нагрузке позволяет по одним только показаниям α_1 и α_2 ваттметров определить сдвиг по фазе или коэффициент мощности цепи.

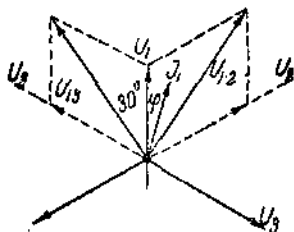


Рис. 332-а.

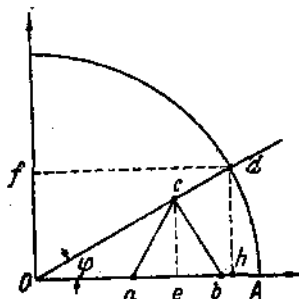


Рис. 332-б.

Действительно, складывая, а затем вычитая его показания, имеем по предыдущему

$$\alpha_1 + \alpha_2 = \sqrt{3} U_1 I_1 \cos \varphi, \quad \alpha_1 - \alpha_2 = U_1 I_1 \sin \varphi,$$

откуда

$$\sqrt{3} \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} = \operatorname{tg} \varphi.$$

Для вычисления угла φ или его косинуса проф. Кудерна предложил следующий способ: вдоль прямой OA (рис. 332-б) в некотором масштабе откладываем величины $P_2 = Ob$ и $P_1 = Oa$ (при работе одним ваттметром с переключателем или двумя ваттметрами с одинаковыми постоянными можно отложить углы отклонения α_1 и α_2) и строим на отрезке ab равносторонний треугольник abc .

Тогда угол $cob = \varphi$, ибо

$$\operatorname{tg} cob = \frac{Ce}{oe} = \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2} \cdot \operatorname{tg}(\widehat{ac})$$

$$\alpha_2 + \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2} = \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2} \sqrt{3}, \quad \alpha_2 + \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2} = \sqrt{3} \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2}.$$

Для отыскания по графику $\cos \varphi$ описывают четверть окружности радиусом OA (например, 100 мм) и продолжают прямую OC до пересечения с нею в точке d . Тогда

$$\cos \varphi = fd = Oh.$$

Для первого случая отложим в произвольном направлении (рис. 333-а) вектор тока I в цепи, вдоль которого откладываем также вектор U_2 падения напряжения в активном сопротивлении R_1 поскольку они совпадают по фазе. Вектор общего напряжения U_3 в зависимости от характера потребителя, т. е. от того, индуктивное ли или емкостное сопротивление он представляет, будет опережать или отставать от вектора I на некий угол γ . Вектор напряжения U_1 на зажимах потребителя будет, как известно из теории переменных токов, замыкающей треугольника напряжений, образуя с вектором I угол φ , соответствующий данному потребителю.

Из диаграммы имеем

$$P = U_1 I \cos \varphi,$$

а так как

$$U_3^2 = U_2^2 + U_1^2 + 2 U_2 U_1 \cos \varphi$$

и

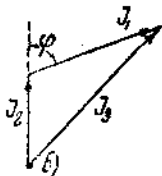
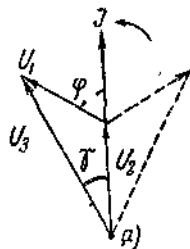
$$U_2 = IR,$$

то

$$U_3^2 = U_2^2 + U_1^2 + 2 IR U_1 \cos \varphi = U_2^2 + U_1^2 + 2 R U_1 I \cos \varphi = U_2^2 + U_1^2 + 2RP,$$

отсюда

$$P = \frac{U_3^2 - U_2^2 - U_1^2}{2R}.$$



Для второго случая диаграмма примет вид, представленный на рис. 333-б, а искомая мощность определится как

$$I_3^2 = I_2^2 + I_1^2 + 2 I_1 I_2 \cos \varphi,$$

а так как

$$I_2 = \frac{U}{R},$$

Рис. 333.

то

$$I_3^2 = I_2^2 + I_1^2 + \frac{2 \cdot U \cdot I_1}{R} \cos \varphi = I_2^2 + I_1^2 + \frac{2}{R} \cdot P.$$

откуда

$$P = \frac{(I_3^2 - I_2^2 - I_1^2) R}{2}.$$

ГЛАВА X.

Методы и приборы для измерения емкостей и коэффициентов само- и взаимной индукции.

§ 52. Общие замечания относительно методики измерения емкостей и коэффициентов само- и взаимной индукции.

Как известно, величина емкости одного и того же объекта зависит от того, измеряем ли мы ее при постоянном, переменном или быстро-переменном токе. То же относится и к вели-

чинам само- и взаимоиנדукции. Поэтому измерения их надо производить при посредстве того тока, в цепях которого они будут работать.

Действительно, емкость данного объекта зависит от числа перезарядов его в единицу времени, и, в некоторых случаях, отношение емкости, измеренной при токе высокой частоты, к емкости того же тела, измеренной постоянным током, может достигать значения 0,7—0,8.

Что касается коэффициента самоиндукции данного проводника, то, как известно, он может быть представлен в виде двух слагаемых; из них одно есть магнитное поле на единицу силы тока внутри проводника, а другое — то же вне проводника. Хотя первое слагаемое обычно составляет небольшую долю (1—3%) от полного потока, но с ним нельзя не считаться, если провода катушки имеют большое сечение и сделаны из магнитного материала.

Кроме того, внутреннее поле имеет различный вид в зависимости от характера распределения тока по сечению проводника. При токах переменных и по мере увеличения их частоты, поверхностное распределение тока проявляется все сильнее, и это сказывается на величине коэффициента самоиндукции: он уменьшается по мере возрастания частоты.

Само измерение емкостей или коэффициентов самоиндукции может быть осуществлено двояким способом: непосредственно, когда искомая величина определяется в результате измерения некоего силового действия тока, например, путем измерения силы зарядного и разрядного токов, и косвенным способом, путем сравнения с эталонами.

Косвенные способы, вообще говоря, проще, но для выполнения их с достаточной точностью необходимы эталонные конденсаторы и катушки, емкость и самоиндукция коих должны быть постоянными вне зависимости от частоты тока. В этом отношении лучшими эталонами емкостей надо признать конденсаторы с диэлектриком в виде сжатого газа, ибо в них не наблюдается остаточного заряда, а также потерь энергии в диэлектрике.

Однако, подобные конденсаторы мало распространены, и поэтому обычно пользуются конденсаторами с твердыми диэлектриками. Последние же обладают не только емкостным, но и активным сопротивлением. Поэтому при включении их под переменное напряжение в диэлектрике, помимо тока смещения, возникает и ток проводимости, а следовательно, нагрев диэлектрика и потеря в нем энергии.

В результате ток через подобный конденсатор сдвинут относительно напряжения на его обкладках на угол φ , меньший 90° . Такой конденсатор эквивалентен идеальному конденсатору (без потерь), включенному последовательно или параллельно с некоторым активным сопротивлением r или R

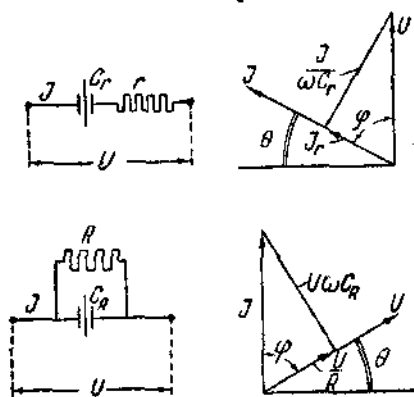


Рис. 334.

(диаграмма рис. 334) Угол θ , дополняющий до 90° угол сдвига φ , называют углом потерь, его тангенс, равный для первой диаграммы $\operatorname{tg} \theta = \omega r C$, а для второй $\operatorname{tg} \theta = \frac{1}{\omega R C}$, позволяет вычис-

лить потери в диэлектрике при заданных напряжении и частоте (см. приложение I).

Действительно, потери в конденсаторе могут быть представлены формулой

$$P = UI \cos \varphi,$$

а положив приближенно

$$I = \omega CU \text{ и } \cos \varphi \cong \operatorname{tg} \theta, \text{ получаем } P = U^2 \omega C \operatorname{tg} \theta.$$

Угол потерь зависит от частоты тока, активного сопротивления диэлектрика и характера его строения.

Процесс заряда конденсатора, не обладающего вовсе проводимостью, может быть представлен кривой $OA_1A_2A_3$ на рис. 335, приближающейся асимптотически к прямой, параллельной оси времен. Кривая эта показывает, что предельный заряд Q конденсатора, определяемый его емкостью, достигается через более или менее длительный промежуток времени.

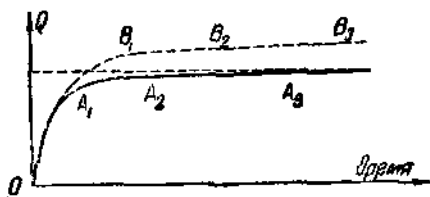


Рис. 335.

Если же конденсатор обладает проводимостью, то кривая его заряда подобна пунктирной кривой $OB_1B_2B_3$ на том же чертеже, т. е. конечный заряд его определить по существу не представляется возможным. Измерение емкости еще больше усложняется, если между конденсатором и источником, его заряжающим, имеются провода с некоторым омическим сопро-

тивлением r , или если сам источник обладает заметным сопротивлением.

Напряжение на обкладках конденсатора в этом случае сравнивается с напряжением источника через бесконечно большой промежуток времени, а при разряде подобный конденсатор не отдает сразу всего запасенного в нем заряда. Часто для полного его разряда требуется несколько повторных замыканий накоротко его обкладок.

Все сказанное крайне затрудняет точное измерение емкостей. К числу мер, способствующих успеху измерения, надо отнести: необходимую, весьма тщательную изоляцию источника тока и всех частей схемы; прямолинейное размещение соединительных проводов; прикосновение производящего опыт к ключам, коммутаторам и тому подобным вспомогательным приборам схемы на возможно короткий промежуток времени и, наконец, отсчет показаний с приборов через определенный обусловленный промежуток времени после замыкания цепи (например, при измерениях емкостей кабелей—через 1 минуту).

Для облегчения физических представлений емкость конденсаторов полезно рассматривать как некое сопротивление, равное $r_c^{\Omega} = \frac{1}{\omega C}$. В связи с этим параллельное включение емкостей равносильно уменьшению их равнодействующего сопротивления, а последовательное—простому суммированию.

Если емкость C и активное сопротивление r соединены параллельно, то емкость первой кажущимся образом увеличивается и становится равной $C_1 = C + \frac{C}{\omega^2 C^2 + r^2}$. Вводя в это выражение $r_c^{\Omega} = \frac{1}{\omega C}$, имеем для действующего сопротивления подобной цепи выражение $r'_c = r_c \frac{r^2}{r^2 + r_c^2}$. Оно показывает, что этим способом можно уменьшить сопротивление цепи, чем на практике и пользуются.

Наконец, при измерениях емкостей необходимо учитывать еще и то, что явление емкости имеет место не только между обкладками конденсатора, но и между ними, землей, соседними проводами и приборами схемы.

Эти добавочные емкости могут оказаться включенными последовательно или параллельно к емкости, подлежащей определению, и следовательно, могут исказить результаты измерения. В таком случае следует произвести отдельно измерение этих добавочных емкостей и учесть их при подсчете искомой емкости.

При косвенных измерениях коэффициентов само- и взаимной индукции необходимо учитывать взаимное влияние полей исследуемой и эталонной катушек, а также проводов схемы, и так располагать все эти элементы цепи, чтобы они как можно меньше влияли друг на друга.

Реостаты, которыми приходится пользоваться во время измерений, должны быть безиндукционными и беземкостными.

Что касается самой методики измерения, то при малых величинах измеряемых емкостей и самоиндукций обычно прибегают к мостовым методам, как дающим более точные результаты при наличии, конечно, хороших эталонов. В качестве индикатора момента равновесия мостика при частотах тока до 100 пер/сек. применяются вибрационные гальванометры, а для звуковых частот — телефоны. Ниже мы приводим весьма ограниченное число методов измерения емкостей и самоиндукции из имеющегося очень большого их числа.

§ 53. Методы и приборы для измерения емкостей.

1. Измерение емкостей на постоянном токе может быть осуществлено двумя основными способами: непосредственным и косвенным.

а) Способы непосредственные, когда искомая емкость определяется по измеренным напряжению U и заряду Q .

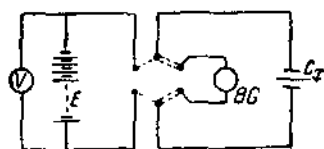


Рис. 336.

а) Баллистический способ. Зарядив в схеме рис. 336 исследуемую емкость C_x до известного напряжения, измеряемого вольтметром V , разряжают ее через баллистический гальванометр и наблюдают его первое наибольшее отклонение

α_m . Тогда $C_x = \frac{Q}{U} = \frac{C_b \alpha_m}{U}$, где C_b —

баллистическая постоянная гальванометра, определяемая путем отдельного опыта, например, по методу, описанному в § 20.

Способ этот, очевидно, непригоден, если диэлектрику испытуемой емкости свойственно явление остаточного заряда.

б) Способ Максвелла-Томсона является нулевым и выполняется по схеме рис. 337, где r_1, r_2 и r_3 — безиндукционные и беземкостные сопротивления; P — камертонный прерыватель; C_x — измеряемая емкость; E — аккумуляторная батарея напряжением 15—20 вольт, G — гальванометр и Z —

заземление. Если заставить камертонный прерыватель n раз в секунду заряжать и разряжать измеряемую емкость и при этом уравновесить, как обычно, мостик, то каждый заряд емкости будет равен $Q = C_x U$, где U — разность потенциалов точек B и C схемы. Под влиянием этой разности потенциалов между указанными точками будет протекать некоторый ток, средняя величина которого будет $I_{cp} = \frac{Q}{T} = n \cdot C_x U$. Точно такой же величины ток протекал бы между точками B и C и в том случае, если бы мы, при той же разности потенциалов U , выбрали для плеча моста BC такое сопротивление r_4 , чтобы

$$I_{cp} = \frac{Q}{T} = n \cdot C_x U = \frac{U}{r_4} = \frac{U}{\frac{1}{n \cdot C_x}}$$

В момент равновесия мостика мы имели бы равенство $r_1 \cdot r_4 = r_2 \cdot r_3$ или, учтя сказанное выше,

$$r_1 \cdot \frac{1}{n \cdot C_x} = r_2 \cdot r_3,$$

откуда искомая емкость

$$C_x = \frac{r_1}{r_2 \cdot r_3} \cdot \frac{1}{n} \dots (1)$$

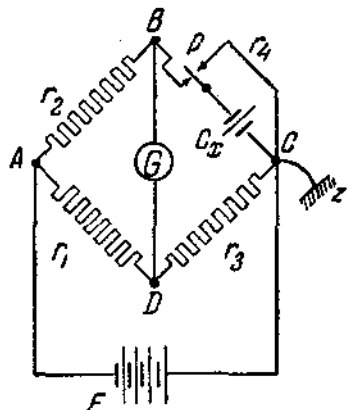


Рис. 337.

В этом выводе не учтены сопротивления гальванометра и батареи; их влиянием можно пренебречь, если сопротивление r_2 , а также величину $\frac{1}{n \cdot C_x}$ взять в 10 — 100 раз больше, чем r_1 , и если сопротивление гальванометра меньше 200 ом.

При хорошей конструкции прерывателя метод этот может дать весьма большую точность, порядка 0,001%.

б) Косвенные или сравнительные способы измерения емкостей основаны на сравнении измеряемой и эталонной емкостей. В практике они более употребительны, нежели непосредственные, но требуют, как сказано выше, хороших эталонных конденсаторов.

а) Компенсационный метод Томсона обладает всеми преимуществами нулевых способов и вместе с тем позволяет изменять (по желанию) продолжительность времени заряда измеряемой и эталонной емкостей. Последнее важно с точки зрения учета явлений диэлектрического гистерезиса

у диэлектрика испытуемой емкости, почему способ этот может дать хорошие результаты при испытаниях кабелей. Выполняется он по схеме рис. 338, где C_X , C_N — измеряемая и эталонная емкости; T — ключи; E — батарея аккумуляторов; R_1 и R_2 — сопротивления, G — гальванометр с несколько повышенным периодом собственных колебаний подвижной системы; Z — заземления. Опыт ведут в такой последовательности: замкнув ключи T_1 , T_2 и T_3 , заряжают обе емкости; тогда через последовательно соединенные сопротивления протекает некоторой силы ток I , и в них возникают падения напряжений $U_1 = I \cdot R_1$ и $U_2 = I \cdot R_2$. Благодаря этому емкостям сообщаются заряды $Q_X = C_X U_1 = C_X I R_1$ и $Q_N = C_N U_2 = C_N I R_2$

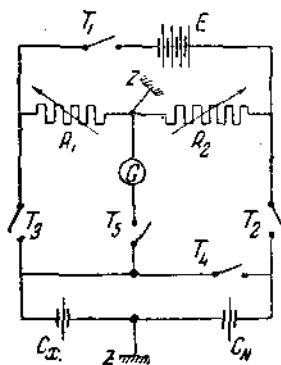


Рис. 338.

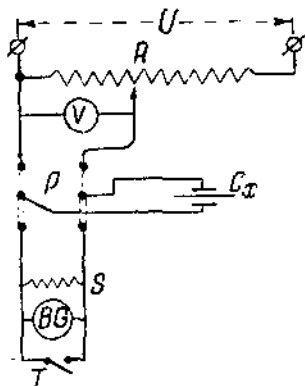


Рис. 339.

После этого размыкают ключи T_1 , T_2 и T_3 и замыкают ключ T_4 , в результате чего заряженные емкости разряжаются друг на друга. Если в этот момент замкнуть еще и ключ T_5 , то излишек заряда (не скомпенсированный) вызовет отклонение гальванометра. Задача опыта сводится к подбору таких по величине сопротивлений R_1 и R_2 , чтобы в момент замыкания ключа T_5 не наблюдалось никакого отклонения подвижной системы гальванометра.

Для этого, очевидно, нужно, чтобы

$$Q_X = Q_N$$

или

$$I C_X R_1 = I C_N R_2,$$

откуда

$$C_X = \frac{R_2}{R_1} C_N. \dots \dots \dots (2)$$

Опыт следует повторить несколько раз, коммутируя направление тока, и из полученных для C_X значений взять среднее. Кроме того, замыкание ключей T_4 и T_5 не должно быть одновременным: ключ T_5 надо замкнуть после замыкания ключа T_4 , но через сколь возможно короткий промежуток времени. Метод дает хорошие результаты, если конденсаторы C_X и C_N одинакового качества в смысле потерь в их диэлектриках.

В) Сравнение емкостей путем сравнения их зарядов при одинаковых потенциалах. Измерение выполняется по схеме рис. 339, где C_X и C_N — определяемая и эталонная емкости; P — переключатель; U — источник постоянного тока, включенный на потенциометр R ; V — вольтметр (лучше электростатический) и BG — баллистический гальванометр с шунтом S и успокоителем T .

Подключив измеряемую емкость к зажимам переключателя P , переводят его ножи в верхнее положение и заряжают емкость до напряжения U , указываемого вольтметром. Вслед за этим переводят ножи переключателя в нижнее положение и отсчитывают первое наибольшее отклонение α_X подвижной системы баллистического гальванометра.

Тогда

$$Q_X = C_{\text{бал}} \alpha_X = U_X C_X,$$

где $C_{\text{бал}}$ — баллистическая постоянная. Отсюда

$$C_X = C_{\text{бал}} \frac{\alpha_X}{U_X} \quad \text{и} \quad C_0 = \frac{U_X C_X}{\alpha_X}$$

Заменив измеряемую емкость эталонной, повторяют опыт тогда

$$Q_N = C_{\text{бал}} \alpha_N = U_N C_N$$

или

$$C_{\text{бал}} = \frac{U_N C_N}{\alpha_N}.$$

Из этих выражений имеем

$$C_X = C_{\text{бал}} \frac{\alpha_X}{U_X} = \frac{U_N C_N}{\alpha_N} \frac{\alpha_X}{U_X} = C_N \frac{U_N \alpha_X}{U_X \alpha_N} = K \frac{\alpha_X}{\alpha_N} \quad . \quad (3)$$

Если измеряемая емкость обладает заметной проводимостью, то первое отклонение гальванометра в момент ее разряда будет несколько уменьшено вследствие утечки через диэлектрик и, наоборот, отклонение в момент заряда по той же причине будет несколько увеличено.

В этом случае рекомендуется наблюдать углы отклонения как при разряде, так и при заряде исследуемой емкости а) если потребуется, то и эталонной) и взять из них среднее. Схема опыта должна быть видоизменена, как на рис. 340.

Для выяснения наивыгоднейших условий измерения составим выражение для предельной относительной ошибки измерения, полагая $d\alpha_X = d\alpha_N$, т. е.

$$\frac{dC_X}{C_N} = \frac{\alpha_N + \alpha_X}{\alpha_N \cdot \alpha_X} d\alpha_X = \frac{1 + \frac{\alpha_X}{\alpha_N}}{\alpha_X} \cdot d\alpha_X.$$

Исследуя это выражение, не трудно заметить, что ошибка будет наименьшей при α_X сколь возможно большом и равном

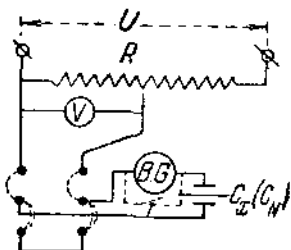


Рис. 340.

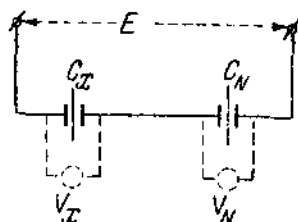


Рис. 341.

α_N . Этого можно достигнуть, располагая подразделенным эталонным конденсатором или же регулируя напряжение источника.

При очень разнящихся по величине емкостях C_X и C_N может представиться необходимым изменить, помощью шунта, чувствительность гальванометра. Если при этом нам придется воспользоваться таким шунтом, который в момент отсчета α_X снижает чувствительность гальванометра до $1/10 = K$, а в момент отсчета α_N до $\frac{1}{100} = M$, то выражение (3) надо переписать в таком виде:

$$C_X = K \cdot \frac{\alpha_X \frac{1}{K}}{\alpha_N \frac{1}{M}}.$$

или

$$C_X = K \cdot \frac{\alpha_X \cdot M}{\alpha_N \cdot K} \dots \dots \dots (4)$$

Ключ T в схеме служит для быстрого успокоения подвижной системы гальванометра после отсчета первого ее отклонения; в момент его замыкания возрастает электромагнитное торможение подвижной системы, и она быстро устанавливается в своем исходном положении.

Опыт измерения желательнее провести при различных напряжениях, но в тех только пределах, в которых между количеством электричества и углами отклонения сохраняется пропорциональность.

γ) Сравнение емкостей путем сравнения потенциалов. Две емкости—неизвестная C_X и эталонная C_N (рис. 341), будучи введены в цепь источника E в последовательном соединении, как на схеме, приобретают, очевидно, одинаковые заряды Q . Напряжения же на их обкладках обратно пропорциональны емкостям, т. е.

$$\frac{U_X}{U_N} = \frac{C_N}{C_X},$$

откуда

$$C_X = \frac{U_N}{U_X} \cdot C_N \dots \dots \dots (5)$$

Напряжения эти необходимо измерять электростатическим вольтметром или электрометром, присоединяя его поочередно к обкладкам обеих емкостей.

Результаты измерения тем точнее, чем меньше собственная емкость вольтметра, и чем лучше диэлектрик у исследуемой и эталонной емкостей.

2. Измерение емкостей на переменном токе. При измерениях емкостей на переменном токе необходимо считаться с некоторыми особенностями явлений заряда и разряда конденсатора в этом случае. Если к обкладкам конденсатора присоединить напряжение постоянного тока, то обычно в первые мгновения ток заряда оказывается относительно большим, ибо он складывается из тока заряда и тока проводимости.

Затем, как только разность потенциалов на обкладках конденсатора сравняется с приложенным напряжением, ток заряда прекратится, смещение в диэлектрике стабилизируется, а в цепи будет протекать слабый ток проводимости.

При переменном токе, благодаря периодическим изменениям напряжения, ток существует все время, складываясь из токов заряда, разряда и проводимости. Электрическое смещение в диэлектрике также не постоянно по направлению, и на его

образование расходуется энергия. Этим и объясняется кажущееся уменьшение сопротивления конденсатора при исследованиях его в цепях переменного тока по сравнению с результатами, полученными при токе постоянном.

Ввиду одновременного существования двух токов конденсатор в цепи переменного тока можно представлять себе как бы состоящим из двух параллельных ветвей, одна из которых определяет собою активное сопротивление, а другая—чистую емкость. Сказанное подтверждает необходимость измерения емкостей в тех, именно, условиях, в которых она будет работать.

Однако, из весьма большого числа существующих методов измерения емкостей подавляющее большинство осуществляются в условиях весьма отличных от рабочего режима. Вопрос еще больше осложняется при измерениях малых емкостей на токе повышенной и, особенно, высокой частоты.

Здесь мы рассмотрим только весьма ограниченное число основных методов измерения емкостей при переменном токе технической и звуковой частот.

1) Метод амперметра, вольтметра, ваттметра и частотомера является единственным позволяющим поставить

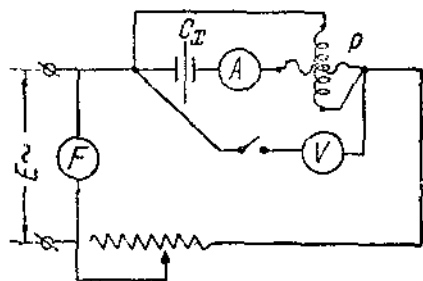


Рис. 342.

исследуемую емкость при измерении ее величины в рабочие условия. Выполняется он по схеме рис. 342, где C_x —измеряемая емкость; A , V , P , F —перечисленные выше измерительные приборы; R —регулирующее сопротивление и E —источник переменного тока.

Сняв одновременно показания с приборов, подсчитаем измеряемую емкость $C_r = \frac{b}{\omega}$, где $b = \omega \cdot C_x$ —реактивная проводимость, а $\omega = 2\pi f$ —угловая частота.

Величина реактивной проводимости вычисляется по формулам:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{r^2 + \left(\frac{1}{\omega C_x}\right)^2}}$$

и

или

$$P = I^2 r$$

$$r = \frac{P}{I^2} \dots \dots \dots (6)$$

Метод этот не отличается особой точностью потому, что он базируется на показаниях четырех приборов. Кроме того, точность получаемых результатов зависит, в сильной степени, от формы кривой тока; при небольших даже отступлениях ее от синусоиды надо, на основе анализа этой кривой, ввести поправки. Наконец, для уточнения результатов, следует производить измерение несколько раз и применить электростатический вольтметр, а если такового нет, то, при отсчете показав

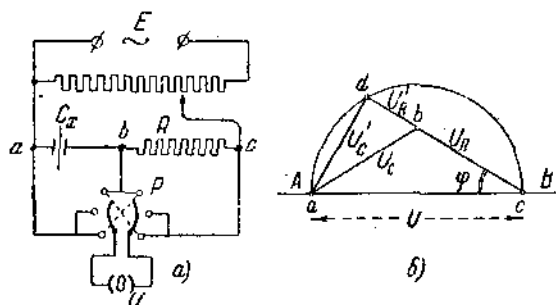


Рис. 343.

ний с амперметра и ваттметра необходимо размыкать цепь вольтметра. Это, в свою очередь, требует постоянства источника, питающего схему.

2) Метод трех вольтметров осуществляется по схеме рис. 343, где C_x — измеряемая емкость; R — беземкостное и безиндукционное сопротивление; P — переключатель; V — вольтметр статический или электрометр и E — источник переменного тока, включенный по схеме потенциометра. Поддерживая в цепи постоянную частоту, измеряют поочередно напряжения на зажимах $a-b$, $b-c$ и $a-c$, соответственно равные U_c , U_R и U .

Затем изменяют R и вновь измеряют напряжения между теми же точками. По данным нескольких опытов искомая емкость может быть определена графически или аналитически. На том же рисунке приведена диаграмма для этого случая; ее построение ведется в такой последовательности: вдоль прямой

AB в некотором масштабе откладывается отрезок $ac = U$ и из концов его радиусами $ab = U_c$ и $bc = U_R$ засекается точка b . Если бы емкость C_X представляла собою идеальный, т. е. без всяких потерь, конденсатор, то точка b расположилась бы на полуокружности, описанной из ac , как на диаметре. Но так как в подавляющем большинстве случаев этого нет, то напряжение U_c оказывается несколько большим того U'_c , которое было бы на зажимах идеального конденсатора. Продолжив радиус bc до пересечения с полуокружностью в точке d , мы выделяем отрезок db , равный потере напряжения на преодоление активного сопротивления нашей емкости.

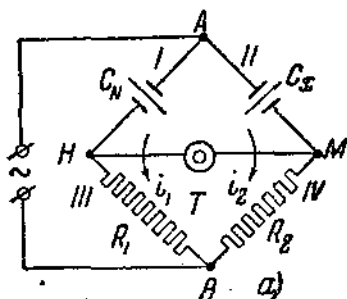


Рис. 344-а.

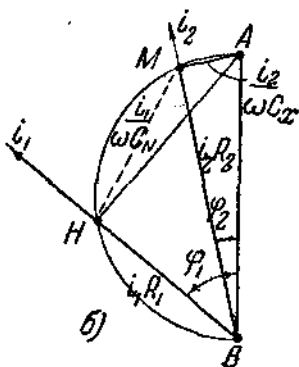


Рис. 344-б.

Если во время данного опыта сила тока в цепи не изменялась, то

$$I = \frac{U_R}{R} = U'_c \omega C_X,$$

откуда

$$C_X = \frac{I}{\omega \cdot U'_c} = \frac{U_R}{R U'_c \omega} \text{ фарад.}$$

Сила тока, напряжение и сопротивление должны быть выражены в амперах, вольтах и омах (см. приложение II).

3) Метод Сотти. В основу его положен способ измерения того емкостного сопротивления $\frac{1}{\omega C_X}$, которое оказывает переменному току исследуемая нами емкость. Для этого измеряемая и эталонная емкости C_X и C_N вводятся в схему мостика Витстона (схема рис. 344-а), два других плеча которого обра-

вованы безиндукционными и безъемкостными сопротивлениями R_1 и R_2 . Мостик питается переменным током; индикатором момента равновесия служит телефон T или вибрационный гальванометр. Равновесие схемы, т. е. отсутствие звука в телефоне, достигается подбором соответствующих величин сопротивлений R_1 и R_2 . На рисунке 344-б представлена диаграмма мостика для того случая, когда мы еще не достигли равновесия схемы. Вектор AB представляет в масштабе вольт напряжение источника между точками A и B мостика. Векторы сил токов i_1 и i_2 в ветвях с емкостями C_N и C_X должны, как известно, опережать это напряжение на некоторые углы φ_1 и φ_2 .

Отложив вдоль векторов силы тока падения напряжений в активных сопротивлениях, т. е. $i_1 R_1$ и $i_2 R_2$, и соединив полученные точки H и M с точкой A , мы получим векторы AH и AM . Последние представляют в принятом нами масштабе напряжения между точками AH и AM схемы, т. е. напряжения на зажимах конденсаторов. Напряжения эти равны $U_N = \frac{i_1}{\omega C_N} = HA$ и $U_X = \frac{i_2}{\omega C_X} = MA$, причем, поскольку углы AHB и AMB должны быть прямыми, точки H и M диаграммы, когда мы изменяем сопротивления R_1 и R_2 , перемещаются по полуокружности. Напряжение между точками H и M схемы, к которым присоединен телефон, выражается на диаграмме, очевидно, вектором HM . Последний в момент равновесия мостика должен быть равным нулю, и только тогда прекращается звук в телефоне.

Для этого требуется, чтобы

$$BH = BM \text{ или, что то же, } i_1 R_1 = i_2 R_2,$$

$$HA = MA \quad " \quad " \quad " \quad i_1 \frac{1}{\omega C_N} = i_2 \frac{1}{\omega C_X},$$

и наконец, чтобы $\varphi_1 = \varphi_2$, т. е. чтобы частичные падения напряжений в плечах мостика совпадали по фазе.

Из этих равенств следует, что для момента равновесия мостика должно быть соблюдено равенство

$$R_1 C_N = R_2 C_X,$$

откуда

$$C_X = \frac{R_1}{R_2} \cdot C_N \dots \dots \dots (7)$$

Наибольшая точность метода, как и в обычном мостике, получается при

$$R_1 = R_2 = \frac{1}{\omega C_N} = \frac{1}{\omega C_X}.$$

Так как конденсаторы, кроме емкости, обладают обычно и некоторой проводимостью, то равенства $R_1 C_N = R_2 C_X$ почти никогда достигнуть не удастся, а, следовательно, нельзя достигнуть и полного прекращения звука в телефоне.

О равновесии мостика поэтому судят по минимуму звука, что, конечно, приводит к некоторой ошибке, и тем большей, чем больше проводимость диэлектрика испытуемой емкости.

4. Метод Зейбта. Весьма удобной схемой мостика для измерения емкостей без потерь является схема, предложенная Зейбтом: она и внешний вид мостика изображены

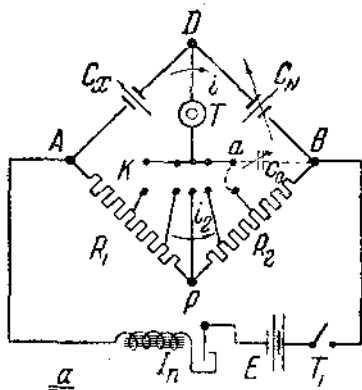


Рис. 345-а.

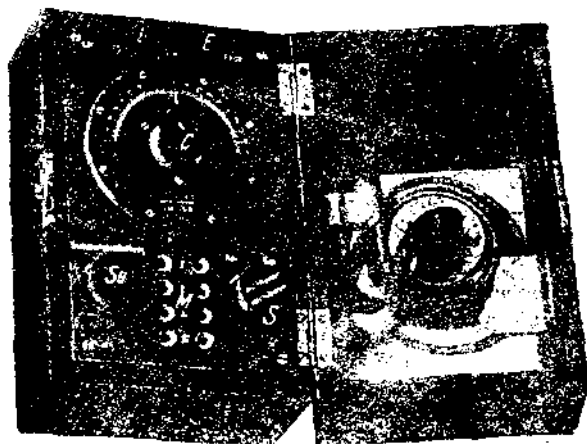


Рис. 345-б. Мостик Зейбта для измерения емкости.

на рис. 345. Отличие ее от принципиальной схемы, описанной выше, состоит лишь в том, что сопротивления R_1 и R_2 сек-

ционированы и соединены с гнездами штепсельного коммутатора K (М). Соединяя металлически между собою одну из пар, расположенных на схеме по вертикали гнезд коммутатора, мы тем самым устанавливаем определенное отношение $\frac{R_1}{R_2}$ ветвей мостика, содержащих активные сопротивления. Равновесие мостика достигается путем изменения эталонной емкости C_N в виде переменного конденсатора, и в этот момент, как и выше, получается

$$\frac{1}{\omega C_X} : R_1 = \frac{1}{\omega C_N} : R_2,$$

откуда

$$C_X = \frac{R_2}{R_1} \cdot C_N \dots \dots \dots (8)$$

Подобные мостики строятся для измерения емкостей от 50 до 100000 см и снабжаются графиками, выражающими зависимость между C_X и положением указателя переменного конденсатора C_N соответственно различным (обычно 5) величинам отношения $\frac{R_1}{R_2}$. Последнее достигается вставлением металлической вилки в одно из парных гнезд коммутатора K (М). Мостик питается от зуммера I_n . Если диэлектрику измеряемой емкости присущи потери, то, как было выяснено, острого минимума звука в телефоне достигнуть нельзя.

5. Измерение емкостей при высоком напряжении. Этот способ есть один из возможных вариантов метода мостика с тем лишь отличием, что в качестве индикатора момента равновесия применяется трубка Гейслера A (см. рис. 346), а источником, питающим схему, служит катушка Румкорфа, вторичная обмотка которой приключается к искровому разряднику F .

Плечи с омическими сопротивлениями заменены двумя катушками L_1 и L_2 без железа. Измерение сводится к подбору такой емкости C_N переменного эталонного конденсатора, при которой трубка перестает светиться. Для этого напряжения на зажимах обеих емкостей должны быть равны по величине и по фазе.

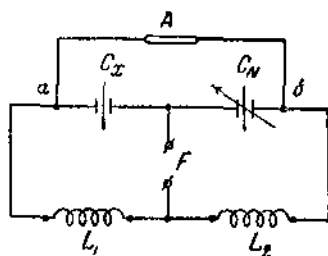


Рис. 346.

В момент равновесия имеем

$$\frac{\frac{1}{C'_N \omega}}{\frac{1}{C'_x \omega}} = \frac{L_2 \omega}{L_1 \omega}$$

или

$$C'_x \omega = \frac{L_2 \omega}{L_1 \omega} \cdot C'_N \omega,$$

или

$$C'_x = \frac{L_2}{L_1} C'_N.$$

Поменяв затем местами L_1 и L_2 и вновь уравновесив схему, получим

$$C''_x = \frac{L_1}{L_2} C''_N.$$

Из полученных для C_x двух значений определяем искомую емкость, как

$$C_x = \sqrt{C'_N \cdot C''_N} \dots \dots \dots (9)$$

Во избежание ошибок, обусловливаемых емкостью и самоиндукцией проводов схемы, надо брать их сколь возможно короткими и располагать прямолинейно. Приблизительно можно считать, что емкость прямолинейного провода равна в сантиметрах десятой доле длины, а коэффициент самоиндукции — десятикратной величине длины. Кроме того катушки должно так расположить, чтобы они не влияли друг на друга.

§ 54. Общая теория мостика Витстона при переменном токе.

Так как описанный в предыдущем параграфе мостовой метод измерения емкостей одинаково применим и для измерения коэффициентов само- и взаимной индукции, а также активных сопротивлений, и наиболее распространен для этих целей в электроизмерительной практике, то полезно несколько подробнее остановиться на теории этого вопроса (см. Круг, Основы электротехники).

В схеме мостика Витстона, плечи которого образованы сопротивлениями любого рода (активными, индуктивными или емкостными), при питании его от источника переменного тока, можно достигнуть равновесия, т. е. отсутствия звука в теле-

онс или отклонений подвижной системы вибрационного гальванометра, при соблюдении нижеследующих условий. В момент равновесия в диагонали моста, содержащей телефон или вибрационный гальванометр, не должно быть тока; частичный ток I_1 должен быть одинаков для ветвей I и II, а ток I_2 для ветвей III и IV (рис. 347), и, наконец, произведения полных сопротивлений противолежащих плеч моста должны быть равны друг другу, т. е. $z_1 \cdot z_4 = z_2 \cdot z_3$. Здесь z_1, z_2 и т. д. суть полные сопротивления плеч мостика, каждое из них может быть представлено в общем виде, как $z = r + \omega L - \frac{1}{\omega C}$ или в комплексной форме, как $\bar{z} = r + jx = z \cdot e^{j\varphi}$.

Тогда предыдущее условие равновесия напишется так:

$$\bar{z}_1 \cdot \bar{z}_4 = \bar{z}_2 \cdot \bar{z}_3,$$

или что то же, как

$$z_1 \cdot z_4 e^{j(\varphi_1 + \varphi_4)} = z_2 \cdot z_3 e^{j(\varphi_2 + \varphi_3)}.$$

Из последнего выражения после отделения вещественной и мнимой частей получаем два уравнения

$$z_1 \cdot z_4 = z_2 \cdot z_3,$$

$$(\varphi_1 + \varphi_4) = (\varphi_2 + \varphi_3).$$

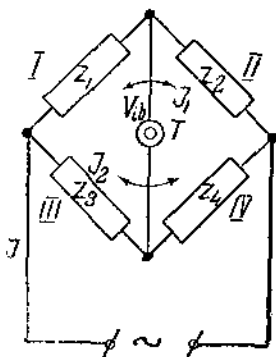


Рис. 347.

Таким образом, для достижения равновесия мостика на переменном токе оказывается недостаточным соблюсти только условие равенства произведений полных сопротивлений его противолежащих плеч; необходимо еще, чтобы суммы фазовых углов в противолежащих плечах моста были также равны друг другу. При рассмотрении метода Соти мы пришли к тому же выводу, ибо только при равенстве фазовых углов $\varphi_1 = \varphi_2$ (углы φ_3 и φ_4 для этого случая равны каждый нулю, поскольку сопротивления плеч R_1 и R_2 чисто активны) возможно уравновесить мостик.

В разбираемом нами общем случае плечи мостика могут быть образованы сопротивлениями любого рода, т. е. каждое из них может быть активным, емкостным, индуктивным или даже смешанным. С этой точки зрения условие равенства сумм фазовых углов в противолежащих плечах мостика

является не только вторым и обязательным условием для достижения равновесия мостика на переменном токе, но одновременно с этим указывает, в какие плечи мостика какого рода сопротивления возможно включать (для мостика, работающего на постоянном токе, это безразлично).

Действительно, если бы мы при монтаже схемы мостика ввели в плечи I и IV чисто активные сопротивления, для которых $\varphi_1 = \varphi_4 = 0$, то в плечи II и III мы уже не имели бы права ввести емкости (или самоиндукции), для которых углы φ_2 и φ_3 отрицательны (или положительные), ибо при этом не было бы удовлетворено равенство $\varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3$. Если же в плечо II ввести емкость, а в плечо III самоиндукцию (или наоборот), то мостик может быть уравновешен, если мы подберем их так, чтобы $-\varphi_2 = +\varphi_3$, и тогда второе условие равновесия мостика на переменном токе будет удовлетворено.

Если мы вынуждены в три плеча мостика ввести емкости, то последовательно или параллельно одной из них мы должны ввести такой величины активное сопротивление, чтобы удовлетворить второму условию для равновесия и т. д.

Помимо этих соображений, при монтаже схемы мостика рекомендуется так комбинировать роды сопротивлений в его плечах, чтобы в окончательное выражение для подсчета измеряемой величины не входила круговая частота ω тока, питающего схему мостика. По исследованиям Майера, если в конечное уравнение входит ω , то в момент равновесия мостика из-за обертонов полного исчезновения звука в телефоне достигнуть нельзя, а можно рассчитывать только на более или менее резкий минимум силы звука. Изложенная общая теория мостика Витстона приложима для случаев измерения не только емкостей, но и коэффициентов само- и взаимной индукции.

На ее основе различными фирмами, для разрешения различных конкретных задач измерения, строится очень большое количество внешне отличных один от другого мостиков, в схеме и работе которых используются вышеприведенные теоретические обоснования. В пределах настоящего курса мы остановимся лишь на нескольких схемах, наиболее характерных. В заключение необходимо еще отметить следующее: очень часто при работе на мостиках переменного тока не представляется возможным достигнуть острого минимума звука в телефоне, что приводит к погрешностям измерения. Объясняется это, главным образом, наличием в самой схеме мостика так называемых „паразитных“ емкостей, обуславливаемых соб-

ственной емкостью частей схемы как относительно друг друга, так и относительно земли. Влияние этих паразитных емкостей можно в известной мере снизить, заземляя отдельные точки схемы, а именно, одну из точек мостика, соединенную с источником тока, а также одну из точек, соединяемую с измеряемой емкостью или самоиндукцией. Полезно также те элементы схемы мостика, которые могут оказывать влияние на соседние элементы через посредство магнитного или электрического поля, удалять друг от друга или экранировать, помещая их в ящики, оклеенные станиолем; проводку схемы полезно вести кабелем, заземляя его оболочку.

На описании этих мостиков мы не будем останавливаться, поскольку ими пользуются, главным образом, в областях специальных измерений (телеграфных, телефонных и радио).

§ 55. Измерение диэлектрической постоянной и угла потерь.

1. Диэлектрическую постоянную ϵ изолирующего материала определяют как отношение емкости конденсатора, диэлектриком которого служит испытуемый материал, к емкости того же конденсатора, диэлектриком которого является среда с $\epsilon = 1$.

Сама методика измерения при этом видоизменяется в зависимости от свойств диэлектрика и условий предстоящей ему работы. Если ему не свойственно явление остаточного заряда, и одновременно с этим наблюдается зависимость от частоты тока, то измерение надо производить на постоянном токе. В противном случае предпочтительно измерять на переменном токе.

Для измерения диэлектрической постоянной жидкостей их наливают в сосуд из изоляционного материала, куда погружают два коаксиально расположенных цилиндра из тонких металлических листов. Емкость C_0 этой системы цилиндров должна быть измерена до заливки сосуда диэлектриком, а затем с ним (C_ϵ). Тогда искомая диэлектрическая постоянная определится так:

$$\epsilon = \frac{C_\epsilon}{C_0}.$$

Диэлектрическая постоянная твердых материалов измеряется по тому же способу, но взамен цилиндрического берут плоский конденсатор. Если через a обозначим расстояние между его обкладками, через d — толщину диэлектрика, а через

ϵ_b и ϵ_d — диэлектрические постоянные воздуха и испытуемого материала, то емкость подобного конденсатора с диэлектриком в виде воздуха будет

$$\frac{1}{C_b} = \frac{4\pi a}{\epsilon_b}.$$

Если вслед за этим между его обкладками зажать испытуемый материал, то емкость системы определится как

$$\frac{1}{C_e} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = \frac{4\pi(a-d)}{\epsilon_b} + \frac{4\pi d}{\epsilon_d} = \frac{4\pi}{\epsilon_b \epsilon_d} \left\{ (a-d) \epsilon_d + d \epsilon_b \right\}$$

Из этих уравнений имеем

$$\frac{C_e}{C_b} = \frac{a \epsilon_d}{(a-d) C_d + d \epsilon_b}$$

или

$$C_e = \frac{a \epsilon_d}{(a-d) \epsilon_d + d \epsilon_b} \cdot C_b,$$

откуда нетрудно вычислить и ϵ_d .

Опыт требует весьма тщательной постановки, так как измеряемые емкости ничтожно малы и, кроме того, трудно сконструировать конденсатор со всюду одинаковым расстоянием между обкладками, тем более, что последние должны быть по возможности тонкими. Лучшие результаты получаются тогда, когда применяют конденсатор с тремя параллельными друг другу обкладками, из коих внешние во время измерения заземляются.

Еще лучшие результаты дает следующий способ: два металлических диска A и B располагаются параллельно и на равных расстояниях a по бокам третьего диска D .

Диски A и B соединяются с противоположными квадрантами электрометра, а диск D с его бисквитом и с полюсом электрофорной машины, другой полюс которой заземляется.

Затем между дисками A и D устанавливают такое расстояние a , чтобы электрометр не давал никакого отклонения (емкость C_b). После этого между дисками A и D вводят пластинку испытуемого диэлектрика толщиной d . Так как емкость системы при этом увеличивается, то бисквит электрометра отклоняется на некоторый угол α . Тогда сближают диски A и D до тех пор, пока отклонение вновь не будет равно нулю.

Если нам пришлось для этого сблизить диски на расстояние B , то $C_b = C_\epsilon$, где C_ϵ — емкость системы с испытуемым диэлектриком.

Тогда

$$\frac{1}{C_b} = \frac{4\pi a}{\epsilon_b}$$

и

$$\frac{1}{C_\epsilon} = \frac{4\pi (a+b-d)}{\epsilon_b} + \frac{4\pi d}{\epsilon_d},$$

откуда

$$\epsilon_d = \epsilon_b \frac{d}{d-b}.$$

2. Угол потерь в конденсаторах определяется обычно по методу мостика, представляющего собою несколько видоизмененную схему мостика Соти (рис. 344).

Если измеряемой емкости свойственны заметные потери в диэлектрике, то в нем будет протекать ток проводимости. Конденсатор с подобным диэлектриком, включенный в плечо II мостика по схеме рис. 344-а, не позволит уравновесить схему, ибо мы не сможем выполнить второго, необходимо для равновесия схемы условия, чтобы $\varphi_1 + 0 = \varphi_2 + 0$ (см. § 54).

В самом деле, конденсатор C_X с плохим диэлектриком эквивалентен идеальному конденсатору C'_X без потерь в последовательном соединении с некоторым

активным сопротивлением r_1 , которым эти потери и обуславливаются (рис. 348). В то же время в плечо II введен эталонный конденсатор C_N без потерь, что и не позволит уравнять по величине фазовые углы сдвига между напряжениями и токами в ветвях I и II.

Дабы эти углы сделать равными, прибегают к одному из следующих способов:

а) Способ Вина, по предложению которого последовательно с эталонным конденсатором C_N вводят такой

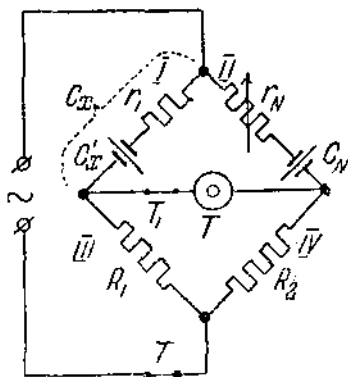


Рис. 348.

величины переменное активное сопротивление r_N , чтобы схема уравнилась (см. рис. 348).

Для момента равновесия будем иметь

$$R_2 \left(r_1 - \frac{I}{j\omega C_x} \right) = R_1 \left(r_N - \frac{I}{j\omega C_N} \right)$$

или

$$\frac{C_x}{C_N} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{r_N}{r_1},$$

откуда

$$C_x = \frac{R_2}{R_1} C_N,$$

Из этого выражения явствует, что для подсчета величины измеряемой емкости нет надобности знать сопротивления r_N и r_1 ; роль первого из них сводится только к тому, чтобы уравнивать по величине и знаку фазовые углы φ_1 и φ_2 , почему это сопротивление часто называют фазирующим.

Если же нам известны сопротивления r_N и частота ω тока, питающего схему мостика, то из соотношения

$$\frac{C_x}{C_N} = \frac{r_N}{r_1}$$

нетрудно вычислить и тангенс угла потерь в диэлектрике испытуемого конденсатора. Действительно, из диаграммы a на рис. 334 известно, что

$$\operatorname{tg} \theta = \omega r \cdot C_N$$

что в применении к схеме рис. 348 и в виду равенства

$$C_x \cdot r_1 = C_N \cdot r_N,$$

дает для искомого угла потерь выражение

$$\operatorname{tg} \theta = \omega \cdot C_N \cdot r_N \dots \dots \dots (1)$$

Если эталонная емкость C_N выражена в μF , сопротивления в омах, и опыт проводился при частоте тока в 50 периодов в секунду, то $C_x = C_N \cdot \frac{R_2}{R_1}$ микрофард, а $\operatorname{tg} \theta = \omega \cdot r_N \cdot C_N \cdot 10^{-6}$.

Первоначальное равновесие мостика может быть достигнуто или подбором отношения $\frac{R_2}{R_1}$ при постоянной емкости C_N или же с помощью переменного эталонного конденсатора при постоянном отношении плеч R_2 к R_1 . Острый же минимум

звука в телефоне или покой зайчика вибрационного гальванометра достигаются последующим подбором эталонного сопротивления r_N . Способ этот дает хорошие результаты для углов потерь порядка $1-3^\circ$, т. е. для сравнительно хороших диэлектриков.

б) Способ Нернста, отличающийся от способа Вина тем, что фазирование мостика достигается не последовательным, а параллельным соединением эталонной емкости с активным и точно известным сопротивлением r_N , а испытуемый конденсатор с потерями рассматривается как некий идеальный конденсатор C_x в параллельном соединении с активным сопротивлением R , эквивалентным потерям (рис. 349).

Для этого случая, исходя из выражения для проводимостей ветвей моста, мы в момент равновесия мостика будем иметь

$$\frac{1}{R_2} \left\{ \frac{1}{R} + \frac{1}{1/j\omega C_x} \right\} = \frac{1}{R_1} \left\{ \frac{1}{r_N} + \frac{1}{1/j\omega C_N} \right\},$$

или

$$R_2 \left\{ \frac{1}{R} + j\omega C_x \right\} = \frac{1}{R_1} \left\{ \frac{1}{r_N} + j\omega C_N \right\},$$

откуда

$$\frac{\frac{1}{R} + j\omega C_x}{R_2} = \frac{\frac{1}{r_N} + j\omega C_N}{R_1} \dots \dots \dots (a)$$

Отделяя вещественные и мнимые части последнего выражения, имеем

$$\frac{C_x}{C_N} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{r_N}{R},$$

откуда

$$C_x = \frac{R_2}{R_1} \cdot C_N \dots \dots \dots (2)$$

и одновременно с этим

$$\frac{1}{R \omega C_x} = \frac{1}{r_N \omega C_N},$$

откуда, как было пояснено выше в § 52, тангенс угла потерь определится как

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{1}{r_N \omega C_N}$$

Этот способ применим для конденсаторов относительно большой емкости с довольно большими потерями.

γ) Способ Шеринга, особенно пригодный для испытания высоковольтных кабелей. Фазирование в нем достигается путем шунтирования активного сопротивления R_2 конденсатором C_0 без потерь (рис. 350).

Условие равновесия для этой схемы, если мысленно заменить измеряемую емкость C_X идеальным конденсатором C'_X в последовательном его соединении с некоторым активным со-

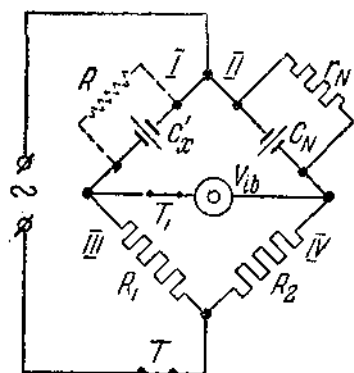


Рис. 349.

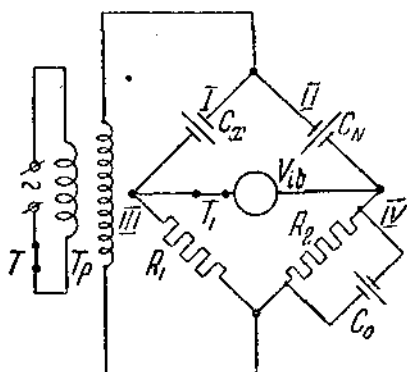


Рис. 350.

противлением r_1 , эквивалентным потерям, будет выполнено, согласно общей теории мостика, когда

$$z_1 \cdot z_4 = z_2 \cdot z_3$$

или, что то же, когда

$$r_1 - j \frac{1}{\omega C'_X} \cdot \frac{1}{\frac{1}{R_2} + j \omega C_0} = -j \frac{R_1}{\omega \cdot C_N},$$

или

$$r_1 - j \frac{1}{\omega \cdot C'_X} = -j \frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{1}{\omega C_N} + \frac{R_1 C_0}{C_N}.$$

Приравняв друг другу вещественные и мнимые части, имеем

$$C'_X = \frac{R_2}{R_1} C_N, \dots \dots \dots (3)$$

а также

$$r_1 = \frac{C_0}{C_N} \cdot R_1.$$

Кроме того, исходя из поясненного в § 52, можем определить и угол потерь в исследуемом конденсаторе как

$$\operatorname{tg} \theta = \omega \cdot C_0 \cdot R_2.$$

Этот способ можно видоизменять в смысле самой техники уравнивания схемы в зависимости от того, располагаем ли мы переменным сопротивлением R_2 или переменным конденсатором C_0 . Последний случай положен в основу специальных мостиков, строящихся фирмой Гартман и Браун для испытаний высоковольтных кабелей. В них применен эталонный конденсатор с диэлектриком в виде сжатого под давлением до 12 кг/см^2 азотом. Конденсатор C_0 — переменный, емкостью от 0,001 до $1 \text{ } \mu\text{F}$.

Описанный выше мостик системы Зейбта также может быть приспособлен и для определения угла потерь. Для этого на схеме рис. 345 между точками B и a вводят эталонированный конденсатор C_0 переменной емкости (как это показано на схеме пунктиром).

Помимо описанных выше и наиболее распространенных в практике модификаций основной схемы мостика для измерения емкостей, можно применить и другие — например, способ Максвелла, в котором плечами моста служат два безиндукционных и беземкостных сопротивления, эталонная катушка самоиндукции и, наконец, измеряемая емкость, параллельно которой введено известное активное сопротивление. Эта схема позволяет измерять как емкости, так и самоиндукции, делая таким образом этот способ универсальным. Однако, как и всем универсальным схемам, этой схеме присущи некоторые недостатки.

Вопрос. Предлагается начертить схему этого мостика, учитывая сказанное при рассмотрении общей теории мостиков переменного тока, и составить выражение для подсчета измеряемых им емкостей или самоиндукций.

§ 56. Понятие о приборах для непосредственного измерения емкостей.

Некоторыми фирмами в последнее время строятся специальные, прямо показывающие, переносные приборы под названием «фарадомессеров», предназначенные для непосредственного

измерения емкостей на переменном токе технической или повышенной до 1000 периодов частоты.

Первые строятся фирмой Гартман и Браун на различные пределы измерений (от десятков сантиметров и до десятка микрофард), и для пользования ими необходимо располагать переменным напряжением в 120 или 220 вольт технической частоты.

По данным фирмы, колебания напряжения от 100 до 130 или от 200 до 260 вольт, а частоты от 40 до 60 периодов, дают погрешность показаний подобных приборов не свыше 1%, если угол потерь измеряемой емкости не превышает 3° .

Принцип, положенный в основу действия этих приборов, сводится к следующему (схема рис. 351). В междупольном пространстве электромагнита M , первичная обмотка F_1 которого приключается к напряжению U осветительной сети переменного тока, на подвесе, свободном от каких-либо направляющих сил, висит рамка A . Она образована тремя коаксиально намотанными катушками S_1 , S_2 и S_3 , из коих две (S_1 и S_2) включены навстречу друг другу. Последовательно с катушкой S_1 вводится измеряемая, а с катушкой S_2 эталонная емкость. Эти две системы соединены между собою параллельно и приключены в точках a и D к вторичной обмотке F_2 электромагнита (трансформатора).

Ток в обмотке возбуждения F_1 почти чисто индуктивный, а токи в катушках S_1 и S_2 чисто емкостные и сдвинуты на 180° . Поэтому ток возбуждения и токи в подвижных катушках приблизительно равны по фазе и создают значительный вращающий момент. Так как катушки S_1 и S_2 включены навстречу, то прибор учитывает разность токов, протекающих через измеряемую и эталонную емкости. Направляющая сила подвижной системы создается током, индуктируемым в катушке S_3 , который замыкается через омическое сопротивление R и индуктивное L (дрессель). Так как емкости подключены не непосредственно к напряжению сети, то представляется возмож-

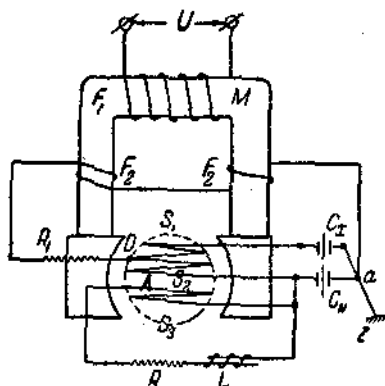


Рис. 351.

ным одну обкладку измеряемой емкости заземлить (2); это особенно важно при измерениях небольших емкостей.

Дроссель L служит для установки на нуль стрелки прибора, а в совокупности с активным сопротивлением R позволяет так подобрать постоянную времени сопротивлений в цепи катушки S_3 , что показания прибора мало зависят от колебаний частоты тока. В качестве аретира прибор снабжен особой пластинкой с пружиной, затормаживающей подвижную систему в то время, когда прибор не находится под напряжением. В момент подключения прибора к напряжению, пластинка эта силою магнитного поля, поворачивается, оттягивает пружинку и освобождает подвижную систему.

Измерение производится трансформированным напряжением, которое различно для приборов на различные пределы измерения; оно колеблется от 10 до 440 вольт.

По внешнему виду прибор ничем не отличается от ящичных переносных приборов лабораторного типа и снабжен приспособлением для зеркального отчета показаний.

Фирма Вестон также строит прямопоказывающие фарадометры. В одном типе она пользуется методом определения емкости через посредство одновременно измеряемых прибором силы тока, его частоты и напряжения на обкладках емкости.

Тогда

$$C_x = \frac{I}{E \cdot \omega} \cdot 10^6$$

в микрофарадах.

В другом типе использован принцип сравнения измеряемой и эталонной емкостей, схожий в известной мере с принципом фарадометра фирмы Гартман.

§ 57. Измерение коэффициентов само- и взаимной индукции.

При измерениях коэффициентов само- и взаимной индукции катушек необходимо различать два возможных в практике случая.

Испытуемая катушка не имеет железного сердечника, вблизи нее нет способных намагничиваться масс, она безъемкостна, и в ее обмотке и armатуре не могут возбуждаться токи Фуко. В этом случае ее коэффициент самоиндукции есть величина постоянная, и измерение его может быть выполнено на переменном токе, отличающемся по частоте от того тока, в цепях которого данная катушка будет работать.

Если же катушка снабжена железным сердечником, то даже при соблюдении всех остальных условий ее коэффициент самоиндукции есть функция магнитного состояния сердечника и числа намагничивающих его ампер-витков. В этом случае измерение необходимо производить в условиях, точно отвечающих условиям работы катушки.

Из весьма большого числа методов измерения коэффициентов само- и взаимной индукции L и M мы здесь остановимся на очень ограниченном числе основных и принципиально отличающихся друг от друга.

1) **Определение L по напряжению и силе тока, возможное для катушек без железа,** выполняется по одному из вариантов схемы рис. 352 и сводится к одновременному отсчету показаний амперметра и вольтметра. Если катушка имеет сопротивление r и не обладает емкостью, то при известной частоте тока

$$I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + \omega^2 L^2}},$$

откуда

$$L = \frac{1}{\omega} \left(\frac{U}{I} \right)^2 - r^2, \dots (1)$$

Искомый коэффициент самоиндукции определяется по этой формуле приближенно, по тем же соображениям, что и при измерениях сопротивлений по методу амперметра и вольтметра. (см. § 37). Действительно, пользуясь первым вариантом схемы, мы измеряем не только силу тока, протекающую через катушку, но также и ток

$$i = \frac{U}{r_0},$$

ответвляющийся через вольтметр. Этот ток, при условии, что вольтметр обладает только чисто омическим сопротивлением, надо геометрически вычесть из тока I , отсчитанного по амперметру, дабы получить ту его составляющую I_L , которая протекает в действительности через катушку. Величину этой составляющей и надо подставить в выражение для подсчета искомого коэффициента самоиндукции (см. приложение III).

Если измерение выполняется по второму варианту той же схемы, то вольтметр измерит и ту добавочную потерю напря-

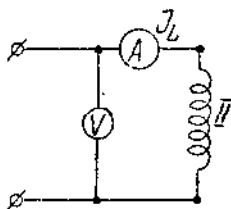
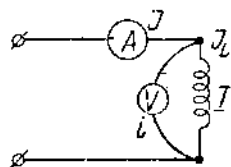


Рис. 352.

жения, которая имеет место в амперметре. Если сопротивление последнего чисто омическое, то потерю напряжения в нем $I_L \cdot r_a$ надо геометрически вычесть из показания вольтметра. Полученную разность и надо подставить в формулу для подсчета коэффициента самоиндукции (см. приложение IV).

Если испытываемая катушка содержит железный сердечник, то добавив в схемах рис. 352 еще ваттметр и сняв одновременно показания с него, с амперметра и вольтметра, можно приблизительно определить искомый коэффициент самоиндукции. Действительно, если в уравнение

$$L = \frac{1}{\omega} \sqrt{\left(\frac{U}{I}\right)^2 - r^2}$$

взамен r подставить некоторое воображаемое сопротивление r_1 , которое, будучи умножено на квадрат силы тока, дает мощность $P = I^2 r_1$, поглощаемую в катушке на нагревание, гистерезис и токи Фуко, то искомый коэффициент самоиндукции определится как

$$L = \frac{\sqrt{U^2 I^2 - P^2}}{\omega I^2} \dots (2)$$

Способ этот не отличается большой точностью, он требует введения поправок еще и на собственное потребление энергии обмотками ваттметра, но зато он удобен в тех случаях, когда требуется выяснить приблизительно зависимость коэффициента самоиндукции от силы тока, т. е. от магнитного состояния железа сердечника.

2) Определение L по методу трех вольтметров аналогично подобному же способу измерения емкостей и выполняется по схеме рис. 353-а где L_x — измеряемая самоиндукция; R безиндукционное и беземкостное сопротивление (например, ламповый реостат); A — амперметр; P — вольтметровый переключатель, U_1 — напряжение источника переменного тока и V — вольтметр или электрометр (двойное включение).

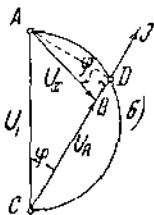
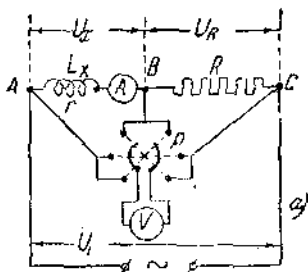


Рис. 353.

Если U_1 постоянно, то, измерив поочередно напряжения U_1 , U_x и U_R , а также силу тока I , определяют искомое L графически. Для этого, вдоль горизонтальной линии (диаграмма 353-б), в обусловленном масштабе откладывают напряжение $U_1 = AC$, а из точек A и C засекают точку B радиусами, равными $U_x = AB$ и $U_R = CB$.

Если бы исследуемая катушка обладала только индуктивным сопротивлением, то точка B на диаграмме совпала бы с точкой D , лежащей на полуокружности, описанной на CA , как на диаметре. Наличие же активного сопротивления r в катушке приводит к тому, что точка B отстоит от точки D на $DB = Ir$. Вектор AD при этом равен $I\omega L$, а $CB = IR$. По этим данным нетрудно подсчитать искомый коэффициент самоиндукции, очевидно равный

$$L_x = \frac{AD \cdot n}{I \cdot \omega}, \dots \dots \dots (3)$$

где n — масштабный коэффициент, принятый нами для построения диаграммы (например, n вольт = 1 мм).

Если сопротивление R известно по величине, то нет надобности вводить в схему амперметр.

Попутно с этим диаграмма дает возможность определить коэффициент мощности исследуемой катушки, т. е.

$$\cos \varphi_1 = \frac{BD}{AB} = \frac{I \cdot r}{I\omega L} = \frac{r}{\omega L},$$

а также сопротивление катушки, эквивалентное потерям в ней на нагревание, токи Фуко и гистерезис, как

$$r = \frac{BD \cdot n}{I} = \frac{BD}{\frac{U_R}{R}} = \frac{BD \cdot R}{U_R} \dots \dots \dots (\text{См. прилож. V}).$$

Наибольшая точность определения L_x получается при равенстве $AB = BC$.

Способ этот удобен для исследования катушек, содержащих железные сердечники, и позволяет выяснить зависимость L_x , $\cos \varphi_1$, r и I от положения сердечника.

В качестве вольтметра удобнее пользоваться электростатическим, дабы избежать необходимости вводить соответствующие поправки на величину мощности, расходуемой в приборе.

Этот способ позволяет также измерить коэффициент взаимной индукции M двух катушек. Для этого обмотки катушек соединяют согласно и измеряют их общий коэффициент самоиндукции $L' = L_1 + L_2 + 2M$. Затем их переключают так, чтобы магнитные поля катушек были направлены навстречу друг другу и вновь измеряют

$$L'' = L_1 + L_2 - 2M.$$

Отсюда искомый коэффициент взаимной индукции определится как

$$M = \frac{L' - L''}{4} \quad (4) \quad (\text{См. прилож. VI})$$

3) Метод мостика для измерения L и M является наиболее распространенным, чем и объясняется относительно большое число различных вариантов этого метода (до 12). Основными из них являются два мостовых метода, предложенные Максвеллом: метод баллистический и метод сравнения.

а) Метод баллистический осуществляется по схеме рис. 354, где L — исследуемая катушка, обладающая омическим сопротивлением R_1 ; R_2 , R_3 и R_4 — безиндукционные и безъемкостные сопротивления, BG — баллистический гальванометр, имеющий сопротивление g ; A — амперметр и E — источник постоянного тока. Измерение распадается на две части. Сперва обычным способом уравнивают схему мостика, а затем, не нарушая равновесия, размыкают ключ T и замечают угол α отклонения подвижной системы гальванометра. Это последнее вызвано возникновением в катушке L э.д.с. самоиндукции

$$E_s = -L \frac{di}{dt}$$

в момент прекращения в ней ранее протекавшего тока i . Под влиянием этой э.д.с. через цепь гальванометра протечет соответствующее количество электричества.

Зная баллистическую постоянную $C_{бал}$ гальванометра и силу тока I (по показанию амперметра A), определяем искомый коэффициент самоиндукции по формуле

$$L = \frac{C_{бал} \cdot L}{I} \cdot R \frac{(R_1 + R_2 + R_3 + R_4)}{R_3 + R_4}, \quad (\text{см. приложение VII})$$

где

$$R = \frac{g(R_3 + R_4) + R_3(R_2 + R_4)}{R_4}.$$

б) Метод сравнения измеряемого коэффициента самоиндукции L_X с эталоном L_N в схеме мостика Витстона пользуется настолько большим распространением, что некоторыми фирмами строятся для него специальные мостики. Кроме того, в практике пользуются большим числом вариантов этого метода, на которых мы остановимся ниже.

Принципиальная схема мостика для измерения L_X по методу сравнения с эталонным L_N представлена на рис. 355. Она отличается от обычных схем мостиков с переменным отношением балансных плеч тем, что к омическим сопротивлениям r_X и r_N катушек L_X и L_N могут [быть] последовательно добавлены безиндукционные и беземкостные сопротивления

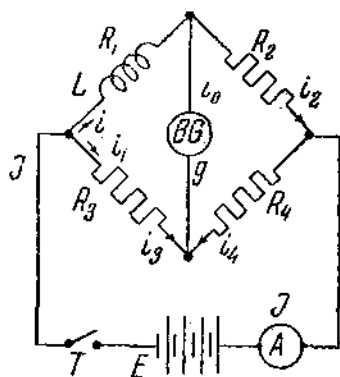


Рис. 354.

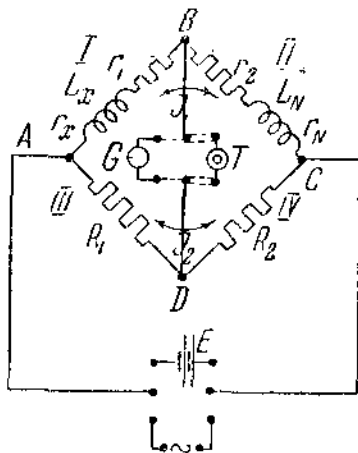


Рис. 355.

r_1 и r_2 , назначение которых будет выяснено ниже. Кроме того схема должна допускать поочередное включение источников постоянного и переменного токов, а, следовательно, и соответствующих индикаторов момента равновесия мостика; в первом случае — гальванометра G , а во втором — телефона T , или вибрационного гальванометра.

Для момента равновесия схемы мостика, содержащего, помимо чисто активных сопротивлений его плеч R_1 и R_2 , еще и катушки самоиндукции L_X и L_N с присущими их обмоткам активными сопротивлениями r_X и r_N недостаточно выполнить обычное при постоянном токе условие равновесия, т. е.

$$\frac{r_X}{r_N} = \frac{R_1}{R_2}.$$

Необходимо одновременно с этим удовлетворить еще двум условиям, а именно: а) чтобы

$$\frac{\sqrt{r_X^2 + \omega^2 L_X^2}}{\sqrt{r_N^2 + \omega^2 L_N^2}} = \frac{R_1}{R_2},$$

откуда следует, что и

$$\frac{L_X}{L_N} = \frac{R_1}{R_2}.$$

и б) чтобы частичные напряжения в ветвях мостика AD и DC , а также AB и BC совпадали по фазе.

Действительно, если мы выполним только два первых условия, то диаграмма напряжений для мостика в момент его кажущегося равновесия будет иметь вид, подобный изображен-

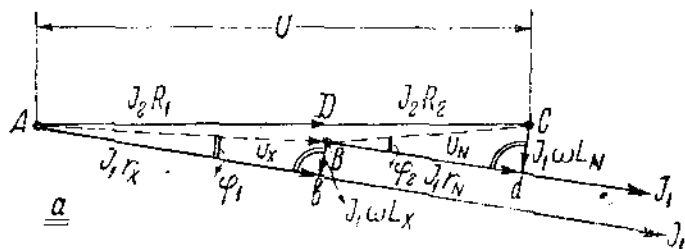


Рис. 356-а.

ному на рис. 356-а, где AC — вектор напряжения источника, питающего мостик; AD и DC — векторы частичных напряжений в ветвях R_1 и R_2 мостика, совпадающие по фазе с вектором силы тока I_2 ; AB — вектор падения напряжения в соответствующей ветви мостика, слагающийся из активного $I_1 r_X$ и индуктивного $I_1 \omega L_X$ напряжений и BC — вектор падения напряжения в плече BC мостика, слагающийся из $I_1 \cdot r_N$ и $I_1 \omega L_N$. Диаграмма эта построена в предположении, что первые два условия равновесия мостика соблюдены. Что же касается третьего, а именно, совпадения по фазе частичных напряжений в плечах мостика, то оно не соблюдено, т. е.

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Bb}{Ab} \neq \operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{Cd}{Bd}.$$

Вследствие этого точки D и B на диаграмме, между которыми в схеме мостика включен телефон, не совпадают, т. е.

между ними имеется некая разность потенциалов, под влиянием которой в телефоне будет слышен звук. Для действительного равновесия мостика необходимо, чтобы точка B совпадала с точкой D . Если бы активные сопротивления катушек были строго пропорциональны их коэффициентам самоиндукции, то это третье условие, при наличии первых двух, выполнялось бы автоматически. Но так как этого нет, то третье условие может быть осуществлено путем добавления к активным

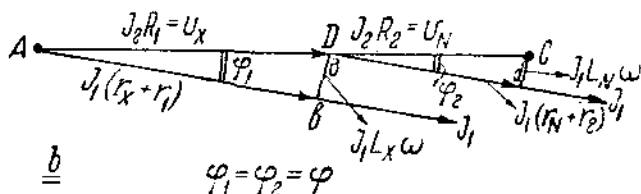


Рис. 356-б.

сопротивлениям катушек добавочных, активных же сопротивлений, r_1 и r_2 , такой величины, чтобы одновременно удовлетворялась пропорция

$$\frac{r_X + r_1}{r_X + r_2} = \frac{L_X}{L_N} = \frac{R_1}{R_2},$$

откуда

$$L_X = \frac{R_1}{R_2} \cdot L_N \dots \dots \dots (4)$$

В этом случае диаграмма примет вид как на рис. 356-б; точка B совпадает с точкой D , частичные падения напряжений в плечах мостика совпадут по фазе, углы φ_1 и φ_2 будут равны, и звук в телефоне прекратится.

Из выражения для L_X явствует, что добавленные сопротивления r_1 и r_2 не оказывают никакого влияния на измеряемую величину (конечно, если они безиндукционные и безъёмкостны).

Последовательность работы на подобном мостике сводится к следующему. Уравновешивают мостик на токе постоянном, т. е. добиваются соотношения

$$\frac{r_X}{r_N} = \frac{R_1}{R_2}.$$

Затем переключают его на переменный ток, и если звук в телефоне слышен, то подбирают такие сопротивления r_1 и r_2 ,

чтобы свести его к минимуму. В результате этого приведенное выше соотношение сопротивлений плеч моста, очевидно, нарушится, в чем можно убедиться, переключив мостик на постоянный ток. Тогда вновь регулируют сопротивления R_1 и R_2 так, чтобы гальванометр перестал давать отклонения. Затем переводят мостик на переменный ток и вновь подбирают сопротивления r_1 и r_2 и т. д. до получения равновесия как на переменном, так и на постоянном токах.

Добиться полного исчезновения звука в телефоне обычно не удастся. Объясняется это тем, что сопротивления R_1 , R_2 , r_1 и r_2 , равно как остальные элементы схемы, всегда обладают некоторой самоиндукцией и емкостью. Это искажает характер распределения токов в ветвях мостика и осложняет измерение, почему приходится ограничиваться подысканием как можно более резкого минимума звука в телефоне.

Если исследуемая катушка самоиндукции обладает одним лишь омическим сопротивлением r_X , и в ней не наблюдается расхода энергии, обусловливаемого потерями на вихревые токи в железе и в armатуре катушки, то в мостике, уравновешенном на переменном токе, должно и после переключения его схемы на ток постоянный сохраниться неизменным отношение

$$\frac{r_X + r_1}{r_N + r_2} = \frac{R_1}{R_2} = \frac{L_X}{L_N}.$$

Другими словами, в уравновешенном мостике после перехода на постоянный ток гальванометр не должен давать отклонения.

Если же гальванометр отклонение дает, то изменяют сопротивление r_1 (не меняя отношения $\frac{R_1}{R_2}$) до тех пор, пока при некотором его значении r_1' ток в гальванометре не прекратится.

Тогда прирост сопротивления r_1 до величины r_1' и будет равен тому сопротивлению, которое обуславливается перечисленными выше потерями, т. е. разность $r_1' - r$ будет равна сопротивлению, обусловливаемому потерями.

Для повышения точности измерений надо подобрать такие условия опыта, чтобы

$$L_X = L_N$$

$$R_1 = R_2.$$

Для получения резкого минимума звука в телефоне, что также способствует большей точности измерения, необходимо снижать

величину активных сопротивлений плеч мостика и повышать их индуктивные сопротивления. Последнее достигается увеличением частоты тока, питающего схему мостика.

Емкость частей схемы относительно земли может послужить источником значительных ошибок измерения, ибо при наличии этих емкостей в цепях мостика возникают зарядные токи, что затрудняет отыскание минимума силы звука. Для

уменьшения емкостных явлений полезно окружать катушки металлической оболочкой, соединяя ее проводниками с точкой B схемы.

Соответственно изложенному здесь, мы вкратце опишем довольно распространенные в лабораторной практике, специальные мостики, строящиеся фирмой Сименс.

а) Мостик для измерения больших самоиндукций, называемый часто мостиком Вина, помимо измерения самоиндукций может быть использован для измерения емкостей, а также сопротивления электролитов. Его монтажная схема и общий вид представлены

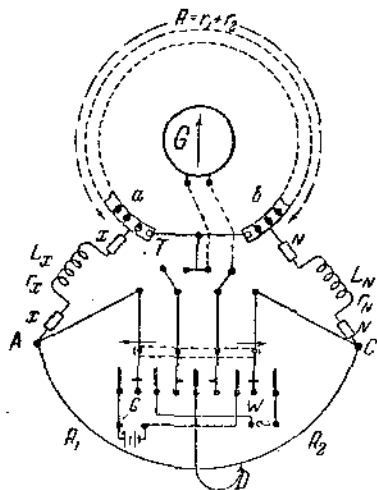


Рис. 7-1.

на рис. 357, где приняты те же обозначения, что и на схеме рис. 356, но взамен двух дополнительных сопротивлений r_1 и r_2 имеется одно сопротивление в виде штепсельного магазина R с подразделениями от 0,1 до 50 ом. Магазин этот помощью штепселей a и b может быть присоединен к L_x или L_N . В качестве сопротивлений R_1 и R_2 служит калиброванная проволока AC , натянутая по закраине шиферного диска прибора. Вдоль проволоки может передвигаться движок D , указатель которого отмечает на шкале величины отношений $\frac{R_1}{R_2}$ или, что то же, отношения длин проволоки. Помощью особого разрезного штепселя (а в новейших типах мостиков помощью особого переключателя) мостик переводится на питание постоянным (гнездо G) или переменным (гнездо W) током и соответственно на гальванометр G или телефон T . К зажимам X и N подключаются измеряемая и эталонная катушки самоиндукции. Уравновешивая мостик

последовательно на постоянном и переменном токе и вводя добавочное сопротивление к L_X или L_N , добиваются сколь возможно резкого минимума звука в телефоне и отсутствия отклонения гальванометра, и тогда

$$L_X = \frac{l_1}{l_2} \cdot L_N = \frac{R_1}{R_2} \cdot L_N \dots \dots \dots (5)$$

Если полного равновесия достигнуть не удастся, то причиной этого могут быть емкостные и индуктивные влияния или же наличие в катушке сопротивлений, обусловливаемых потерями на вихревые токи как в ней самой, так и в окружающих металлических предметах. В последнем случае, добившись возможного минимума звука в телефоне в момент питания схемы переменным током, переводят мостик на постоянный ток и изменяют одно лишь сопротивление R до исчезновения тока в цепи гальванометра. Если при этом сопротивление R было включено в ветвь, содержащую L_X , и для равновесия пришлось изменить его на величину r , то в момент равновесия мы будем иметь

$$r_X + R + r = \frac{l_1}{l_2} r_N.$$

Если же сопротивление R было в ветви, содержащей L_N , то

$$r_X = (r_N + R - r) \frac{l_1}{l_2}.$$

Отсюда уже нетрудно вычислить и сопротивление r , эквивалентное потерям.

Точность измерения на этом мостике может достигать 0,5%, если катушки свободны от потерь на вихревые токи.

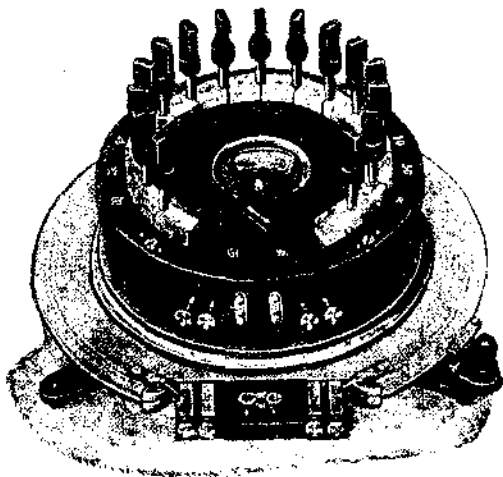


Рис. 357-б. Мостик для измерения индуктивностей фирмы Сименс.

Максимальная чувствительность мостика получается при

$$L_X = L_N.$$

β) Мостик для измерения малых самоиндукций (порядка 10^{-7} до 10^{-4} генри) построен по тому же принципу, что и описанный выше (схема и общий вид на рис. 358), но взамен постоянной эталонной катушки он снабжен тремя сменными катушками L_N , у которых коэффициент самоиндукции может изменяться в зависимости от положения подвижного железного сердечника M . Назначение добавочного сопротивления R в нем выполняют переменное сопротивление r в виде магазина и калиброванная проволока $a-c$, вдоль по которой скользит движок d .

Работа на мостике сводится к следующему: задаются таким отношением $\frac{R_1}{R_2}$ сопротивлений главной калиброванной проволоки AC и такой величиной сопротивления на магазине r ,

при которых наблюдается тупой минимум звука в телефоне. Затем меняют положение сердечника M и движка d до тех пор, пока не достигнут острого минимума звука.

Тогда

$$L_X = \frac{R_1}{R_2} L_N,$$

где L_N — величина коэффициента самоиндукции эталонной катушки, зависящая от положения в ней сердечника. Величина эта находится по графикам, прилагаемым к прибору.

Если в исследуемой катушке наблюдаются потери на вихревые токи, то эквивалентное им сопротивление можно определить, как было описано выше.

Мерой этого последнего будет величина сопротивления, отсчитанного на малой калиброванной проволоке $a-c$ при переводе мостика на постоянный ток и до достижения равновесия.

Описанные мостики питаются переменным током звуковой частоты от специальной машинки (рис. 28) или лампового генератора.

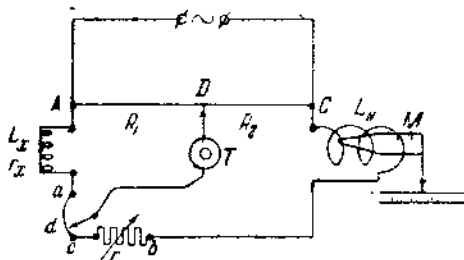


Рис. 358.

§ 58. Обобщение теории мостика Витстона на переменном токе для схем более сложного вида.

1. Общие замечания. Приведенная выше (§ 54) общая теория мостика Витстона на переменном токе полностью применима и для измерения самоиндукции.

Действительно, для схемы рис. 355 в момент равновесия мы будем иметь

$$z_1 \cdot z_4 = z_2 \cdot z_3,$$

или

$$\frac{z_1}{z_3} = \frac{z_2}{z_4},$$

или

$$\frac{(r_X + r_1 + j\omega L_X)}{R_1} = \frac{(r_N + r_2 + j\omega L_N)}{R_2}.$$

Приравняв друг другу порознь вещественные и мнимые части, получим

$$\frac{r_X + r_1}{r_N + r_2} = \frac{R_1}{R_2}$$

и

$$\frac{L_X}{L_N} = \frac{R_1}{R_2}.$$

Из этих пропорций следует, что для равновесия мостика необходимо одновременно соблюдается следующее соотношение

$$\frac{r_X + r_1}{r_N + r_2} = \frac{L_X}{L_N} = \frac{R_1}{R_2}$$

(ср. со сказанным в п. 6, п. 3 параграфа 57, 65).

Отсюда искомая самоиндукция определится как

$$L_X = \frac{R_1}{R_2} L_N,$$

т. е. аналогично сказанному выше (ср. уравнение 4).

Нелишним будет отметить, что, работая по этой схеме, мы можем, в зависимости от параметров катушек L_X и L_N получить различный по величине угол φ сдвига в ветвях I и II мостика.

Для момента равновесия схемы (см. диаграмму на рис. 356-б) он определится из

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega (L_N + L_X)}{r_N + r_2 + r_X + r_1}.$$

Из этого выражения явствует, что угол сдвига, при прочих равных условиях тем больше, чем больше частота тока, питающего схему, при каковых условиях легче уравновесить схему, т. е. достигнуть острого минимума звука в телефоне даже не прибегая к сопротивлениям r_1 и r_2 .

Помимо описанных выше мостиков фирмы Сименс в лабораториях можно встретить целый ряд более сложных схем, содержащих большее число ветвей. Их появление объясняется

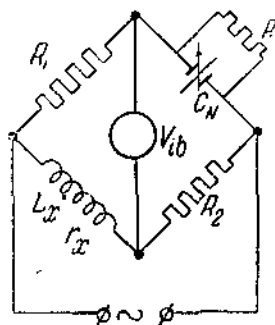


Рис. 359.

отчасти тем, что практически легче построить более точным эталон емкости, нежели эталон самоиндукции. Согласно же общей теории мостов переменного тока, для измерения ими самоиндукции вовсе не обязательно, в качестве сравнительного эталона, иметь эталон самоиндукции. Его можно заменить и эталоном емкости, как это, например, предложено Максвеллом для измерения значительных по величине самоиндукций. Схема мостика Максвелла представлена на рис. 359, где C_N — эталонная емкость; R_1 — R_2 — R — известные активные сопротивления и L_x — измеряемая нами самоиндукция. Для момента равновесия этой схемы необходимо соблюсти равенство

$$r_x \cdot R = R_1 R_2 = \frac{L_x}{C_N} \quad (\text{см. приложение VIII}).$$

Отсюда

$$L_x = R_1 R_2 C_N,$$

или

$$C_x = \frac{L_x}{R_1 R_2},$$

если этим мостиком измерять емкость путем сравнения с эталонной самоиндукцией. Кроме того $r_x = \frac{R_1 R_2}{R}$ для момента равновесия на постоянном токе.

Основным недостатком этого способа является то, что он не позволяет регулировать в отдельности мостик для измерения r_x или L_x .

Задача измерения самоиндукции помощью эталонной емкости может быть решена и такими, например, способами: в плечо, содержащее самоиндукцию L_x , и последовательно

с нею вводится эталон емкости, остальные же плечи образуются активными сопротивлениями (резонансный мостик), или же последовательно с тем из активных сопротивлений, которое расположено в схеме, как противолежащее плечу с измеряемой самоиндукцией, вводится эталонная емкость (мостик Хэя). Однако, этим схемам присущ тот недостаток, что в окончательное выражение для подсчета измеряемой самоиндукции входит частота тока в квадрате. Это снижает точность результатов, поскольку точное измерение частоты тока требует сложной аппаратуры и, кроме того, указывает на зависимость результатов от постоянства частот.

Вот те главные недостатки, которые и привели к разработке целого ряда более сложных схем мостиков с числом ветвей большим, нежели у описанных выше. Их общая теория, почерпнутая мною из книги проф. Черданцевой, как образец весьма простого обобщения, здесь и приводится.

Для схемы, изображенной на рис. 360 в момент ее равновесия, т. е. отсутствия тока на том участке диагонали CF , где включен вибрационный

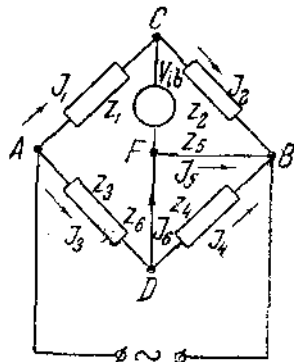


Рис. 360.

гальванометр или телефон, имеем $\bar{I}_1 = \bar{I}_2$ и $\bar{I}_5 = \bar{I}_6$. Применяя второй и первый законы Кирхгофа к контурам $ACFDA$, $CFBC$, $BFDB$, получим

$$\bar{I}_1 \bar{z}_1 - \bar{I}_5 \bar{z}_5 - \bar{I}_3 \bar{z}_3 = 0 \quad \dots \dots \dots (a)$$

$$\bar{I}_1 \bar{z}_2 - \bar{I}_5 \bar{z}_5 = 0 \quad \dots \dots \dots (b)$$

$$\bar{I}_5 (\bar{z}_5 + \bar{z}_6) - \bar{I}_4 \bar{z}_4 = 0 \quad \dots \dots \dots (в)$$

$$\bar{I}_4 = \bar{I}_5 - \bar{I}_3 \quad \dots \dots \dots (г)$$

Из уравнения (в), подставляя в него взамен $\bar{I}_4$ его величину из уравнения (г), имеем

$$\bar{I}_5 (\bar{z}_5 + \bar{z}_6) = (\bar{I}_5 - \bar{I}_3) \bar{z}_4$$

или

$$\bar{I}_3 = \frac{\bar{I}_5 (\bar{z}_5 + \bar{z}_6 + \bar{z}_4)}{\bar{z}_4}.$$

Подставляя последнее выражение для $\bar{I}_3$ в уравнение (а) и учитывая уравнение (б), имеем

$$\bar{z}_1 - \frac{\bar{z}_2 \bar{z}_6}{\bar{z}_5} - \frac{\bar{z}_2 \bar{z}_3}{\bar{z}_4 \bar{z}_5} (\bar{z}_4 + \bar{z}_5 + \bar{z}_6) = 0,$$

что после преобразований дает в окончательном виде следующее условие равновесия схемы:

$$\bar{z}_5 (\bar{z}_1 \bar{z}_4 - \bar{z}_2 \bar{z}_6) = \bar{z}_2 \{ \bar{z}_6 (\bar{z}_2 + \bar{z}_4) + \bar{z}_3 \bar{z}_4 \} \dots (1)$$

2. Типы сложных схем. а) Способ Андерсона является иллюстрацией только что изложенной теории. Он применим для измерения самоиндукций или емкостей, особенно—небольших. Кроме того им удобно пользоваться при техническом токе (50 Hz). Применяя уравнение 1 к схеме этого мостика, представленной на рис. 361, и подставляя в него значения:

$$\bar{z}_1 = r_X + j \omega L_X; \bar{z}_2 = R_2; \bar{z}_3 = R_3; \bar{z}_4 = R_4; \\ \bar{z}_5 = -j \frac{I}{\omega C_N} \text{ и } \bar{z}_6 = R_6,$$

получим

$$j \frac{I}{\omega C_N} [R_2 R_3 - (r_X + j \omega L_X) R_4] = R_2 [R_6 (R_3 + R_4) + R_3 R_4].$$

Отсюда

$$r_X \cdot R_4 = R_2 R_3$$

и

$$\frac{L_X}{C_N} = R_2 \left[R_6 \left(1 + \frac{R_3}{R_4} \right) + R_3 \right] \dots (2)$$

Если в качестве эталонного взят конденсатор постоянной емкости, то равновесие достигается изменением R_6 и одного из сопротивлений плеч мостика.

Максимальная чувствительность схемы достигается при

$$r_X = R_2; R_6 = R_4 = \frac{1}{2} r_X$$

и тогда

$$\frac{L_X}{C_N} = 2 r_X^2 \dots (3)$$

Для измерения этим мостиком емкостей желательно иметь в качестве эталона вариометр самоиндукции.

На том же принципе основано устройство мостика Илювича, представляющего вариант способа Андерсона. В нем нет сопротивления R_0 , а ветвь, содержащая емкость, подключается не к точке F схемы рис. 361, а к некоторой части сопротивления R_3 . Для момента равновесия этого мостика после применения общего уравнения (4) легко вывести, что

$$r_X \cdot R_4 = R_2 R_3$$

и

$$\frac{L_X}{C_N} = \frac{R_2}{R_4} (R_3 - r) (R_4 + r), \quad \dots \dots \dots (5)$$

где r — та часть сопротивления магазина R_3 , которая находится между точкой D схемы и ветвью, содержащей емкость.

Способ Баттерсуэрта, который дал схему мостика, отличную от описанных выше, представляется весьма удобным в работе при измерениях по преимуществу

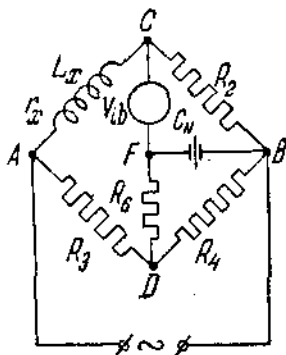


Рис. 361.

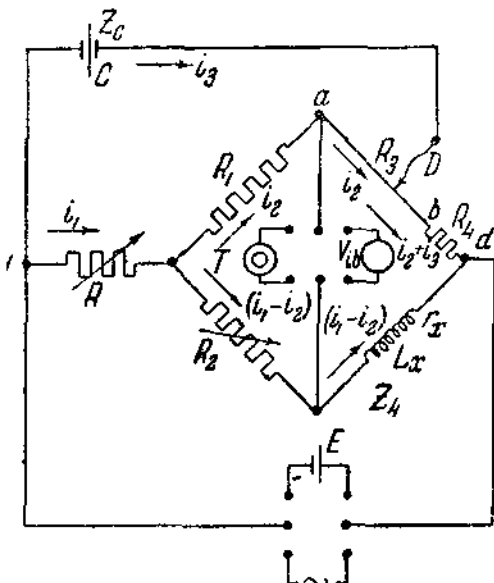


Рис. 362.

малых самоиндукций (до 10^{-5} генри). Схема его представлена на рис. 362, где R_1 и R_2 — безиндукционные и беземкостные сопротивления порядка 1000 ом в виде магазинов; R_3 и R_4 — сопротивления участков, разделяемых движком D на калиброванной проволоке $a-b$ в последовательном ее соединении с магазином bd на 10—15 ом; L_x — измеряемая самоиндукция с присущим ее обмотке активным сопротивлением

r_x ; C — конденсатор без потерь емкостью порядка $0,1 \mu F$ и, наконец, R — магазин сопротивления порядка 1000 ом, по возможности с мелкими подразделениями секций.

Для уравнивания схемы поступают так: помощью сопротивления R_2 добиваются равновесия мостика на постоянном токе; затем, изменяя положение движка D и сопротивление R (отнюдь не изменяя при этом R_2), уравнивают схему на переменном токе.

Когда это осуществлено, то

$$R_1 r_x = R_2 (R_3 + R_4)$$

$$I_x = \frac{C}{R_1} \cdot R_4 \left\{ R_2 (R_3 + R_1) + R (R_1 + R_2) \right\} \dots \dots \dots (6)$$

(см. приложение IX).

3. Общее представление о мостиках Гиббс и Вагнера.

Мостик Гиббс по своей схеме является обычным мостиком, где измеряемая самоиндукция сравнивается с эталонной при наличии в двух остальных плечах безиндукционных и беземкостных сопротивлений. Монтирована же она так, чтобы по возможности ослаблено было взаимное влияние друг на друга отдельных ее частей и тем самым была повышена точность результатов измерения. С этой целью все вершины моста сближены, а измеряемая и эталонная самоиндукция удалены на значительное расстояние; вся проводка выполнена двумя сближенными и расположенными параллельно проводниками, заключенными внутри медных трубок, служащих экранами. Омические сопротивления выполнены каждое в виде двух голых, параллельно натянутых проволок, по которым может передвигаться металлический ползунок, их соединяющий. Катушка, телефон, а также подводка тока от источника заэкранированы. При тщательном выполнении схемы и учете погрешностей от емкостных влияний точность измерения может быть повышена до 0,001%.

Схема мостика, предложенная Вагнером имеет целью снизить влияние так называемых утечек в схеме на результаты измерения. Они обуславливаются невозможностью совершенно уединить схему как относительно земли, так и от емкостного влияния лица, производящего измерение. Предложенный Вагнером мостик основан на методе сравнения измеряемой и эталонной емкостей (метод Сотти), но сама схема усложнена добавлением еще двух плеч, присоединенных в параллель к точкам A и B схемы рис. 344, одно из них содержит

омическое сопротивление в последовательном соединении с конденсатором переменной емкости, а другое — только сопротивление.

Между точкой соединения этих плеч и вершиной M мостика вводится второй индикатор, и о равновесии схемы судят по отсутствию тока в цепях обоих индикаторов.

4. Измерение коэффициентов взаимной индукции может быть осуществлено одним из способов, описанных выше при рассмотрении методов измерения коэффициента самоиндукции.

Из большого числа специальных методов измерения коэффициента взаимной индукции мы рассмотрим только один, предложенный проф. Пирани. Он сводится к сравнению коэффициента взаимной индукции M с эталонной емкостью C_N (схема рис. 363). При замыкании ключа T в цепи I возникает ток I_1 , и конденсатор C_N заряжается до некоторой разности потенциалов $U_1 =$ равной падению напряжения в безиндукционном сопротивлении R_1 . Заряд конденсатора при этом равен

$$Q_1 = U_1 \cdot C_N = I_1 \cdot R_1 \cdot C_N.$$

В следующий момент, при размыкании ключа T , во второй обмотке катушки взаимной индукции возникает э.д.с. взаимной индукции, равная $E_2 = -M_x \frac{dI_1}{dt}$, и одновременно с этим конденсатор разряжается через сопротивления R_1 и R_2 .

Если при этом падение напряжения в безиндукционном сопротивлении R_2 , равное $I R_2$, равно э.д.с. E , то гальванометр, очевидно, не даст никакого отклонения.

Достигнув путем подбора величины R_2 отсутствия отклонения гальванометра, мы будем иметь равенство мгновенных значений E_2 и $I \cdot R_2$, т. е.

$$-M_x \frac{dI_1}{dt} = I \cdot R_2$$

или

$$-M_x \int_1^0 dI_1 = R_2 \int_0^t I \cdot dt,$$

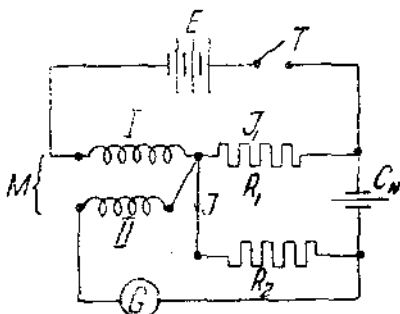


Рис. 363.

$$\text{или} \quad M_x \cdot I_1 = R_2 \cdot Q \quad (a)$$

Если в конденсаторе не наблюдается остаточного заряда,

$$\text{т. е.} \quad Q_1 = Q,$$

$$\text{то} \quad Q_1 = Q = I_1 R_1 C_N.$$

Подставляя это выражение в уравнение (a), получаем

$$M_x \cdot I_1 = I_1 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot C_N,$$

или окончательно

$$M_x = R_1 \cdot R_2 C_N \quad (7)$$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ X.

1. Перечислите причины, затрудняющие точное измерение емкостей и самоиндукций.
2. Что такое угол потерь?
3. Какие предосторожности надо соблюдать при измерениях емкостей и самоиндукций, дабы получить как можно более точные результаты?
4. При каких условиях компенсационный метод измерения емкостей (метод Томсона) может дать хорошие результаты измерения?
5. Укажите особенности заряда и разряда емкостей при измерении их величины на постоянном и переменном токах и вытекающее отсюда требование к методике их измерения.
6. Почему при измерении емкости по методу трех вольтметров необходимо пользоваться электростатическим прибором?
7. Можно ли по диаграмме рис. 343 подсчитать величину активного сопротивления исследуемой емкости?
8. Почему при измерениях емкостей в схеме мостика почти никогда нельзя достигнуть полного исчезновения звука в телефоне в момент равновесия мостика?
9. Объясните назначение фазировочного конденсатора в схеме мостиков, применяемых для измерения емкостей и угла потерь.
10. В чем принципиальная разница между методами измерения коэффициента самоиндукции катушек с железными сердечниками и без них?
11. Перечислите основные погрешности измерения коэффициента самоиндукции по методу амперметра, вольтметра и ваттметра.
12. Перечислите основные погрешности измерения самоиндукции по методу трех вольтметров.
13. Объясните назначение и порядок пользования добавочными активными сопротивлениями в плечах AB и AD схемы мостика (рис. 355) для измерения коэффициента самоиндукции.
14. Перечислите все условия, необходимые для достижения равновесия мостика при измерениях им коэффициентов самоиндукции.
15. При каких условиях добавочные сопротивления r_1 и r_2 в схеме рис. 355 не оказывают никакого влияния на величину измеряемого коэффициента самоиндукции?
16. Влияет ли на точность измерения коэффициента самоиндукции в схеме мостика изменение частоты тока?

17. В каком случае ощущается большая нужда в добавочных сопротивлениях r_1 и r_2 схемы рис. 355 для уравнивания схемы мостика—при большой или при малой частоте тока, питающего схему?

ПРИЛОЖЕНИЕ К ГЛАВЕ X.

I.

Значения диэлектрической постоянной ϵ , диэлектрической прочности $d \frac{KU}{mm}$, угла потерь и удельного сопротивления некоторых изолирующих материалов.

Наименование	ϵ	$d \frac{KU}{mm}$	Удельное сопр. в о.м.о.—с.м.	Угол потерь $\text{tg } \theta \times 10^3$	Частота тока при опред. θ
Бакелит	5,2—8	13—23	$10^{11}—10^{14}$	10—30	10^6
Дерево (дуб) . .	4,5—5	4—7	10^{11}		
Масло транс. . .	2,15—2,5	5—15	$10^{12}—10^{13}$	5	50
Парафин	2,1—2,2	15—30	$10^{15}—10^{18}$	0,05	500
Слюда	6—7,5	120—200	$10^{15}—10^{17}$	0,1—0,2	5×10^5
Стекло	5,5—10	10—40	$10^{11}—10^{15}$	0,4—10	10^5
Эбонит	2—3,5	8—10	10^{17}	2,5—23	1000

II.

Аналитический подсчет емкости по данным диаграммы рис. 343.

$$U_C^2 = U^2 + U_R^2 - 2 U U_R \cos \varphi; \quad U'_R = U_C^2 - U^2_C$$

но

$$U'_R + U_R = U \cos \varphi = \frac{U(U^2 + U_R^2 - U_C^2)}{2 U U_R},$$

откуда

$$U'_R = \frac{U^2 + U_R^2 - U_C^2}{2 U_R} - U_R = \frac{U^2 - U_R^2 - U_C^2}{2 U_R}$$

или

$$C = \frac{I}{\omega U'_C} = \frac{U_R}{R U'_C \omega} = \frac{2 U_R^2}{\omega R \sqrt{\{2 U U_R\} \cdot \{U^2 + U_R^2 - U_C^2\}}}$$

Попутно можно подсчитать и величину активного сопротивления емкости как

$$R_C = \frac{U'_R}{1} = \frac{U'_R \cdot R}{U_R} = R \frac{U^2 - U_R^2 - U_C^2}{2 U_R^2}.$$

III.

Графический способ нахождения I_L (см. рис. 364). Отложим отрезок $AB = U$, т. е. равный напряжению, измеренному вольтметром. В фазе с ним находится и вектор $BC = U \frac{r}{r_v}$. Засекая полу-

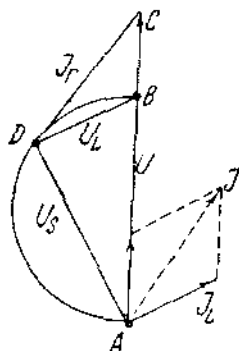


Рис. 364.

окружность из точки C радиусом $DC = I \cdot r$, мы получим точку D , соединив которую с точками A и B , получим два вектора, а именно, $DB = U_L = I_L \cdot r$, совпадающий по фазе с вектором тока I_L — через катушку, а также $DA = U_S = I_L \omega L$, перпендикулярный вектору тока I_L . Отсюда уже нетрудно определить I_L и подсчитать искомый коэффициент самоиндукции $L = \frac{U_S}{\omega I}$.

IV.

Вектор падения напряжения $I_L(r + r_a)$ пер-

пендикулярен (см. рис. 365) вектору напряжения

U_{S1} , расходуемого на преодоление в.д.с. самоиндукции катушки; отсюда

$$L = \frac{U_S}{\omega I}.$$

V.

Аналитический метод подсчета тех же величин.

Согласно диаграмме 353 имеем

$$U_X^2 = U_1^2 + U_R^2 - 2 U_S \cdot U_R \cos \alpha = \frac{U_1^2 + U_R^2 - U_X^2}{2 U_1 U_R};$$

$$AD = U_1 \sin \alpha = U_1 \sqrt{1 - \cos^2 \alpha}$$

или

$$AD = \frac{1}{2 U_R} \sqrt{(2 U_1 U_R)^2 - (U_1^2 + U_R^2 - U_X^2)^2}; \quad DB = U_1 \cos \alpha = \\ = U_R = \frac{U_1^2 + U_R^2 - U_X^2}{2 U_R}$$

$$r = \frac{DB}{I} = \frac{DB \cdot R}{U_R} = R \frac{U_1^2 + U_R^2 - U_X^2}{2 U_R^2}$$

$$L = \frac{AD}{\omega I} = \frac{AD \cdot R}{\omega \cdot U_R} = \frac{R}{2 \omega U_R^2} \cdot \sqrt{(2 U_1 \cdot U_R)^2 - (U_1^2 + U_R^2 - U_X^2)^2}$$

$$\cos \varphi = \frac{DB}{AB} \frac{U_1 - U_R - U_X}{2 U_R U_X}.$$

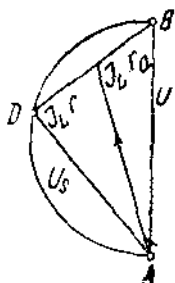


Рис. 365.

VI.

В катушках под влиянием протекающего через них переменного тока индуктируются в.д.с.

$$e_1 = - \left(L_1 \frac{dI}{dt} + M \frac{dI_2}{dt} \right)$$

и

$$e_2 = - \left(L_2 \frac{dI_2}{dt} + M \frac{dI_1}{dt} \right).$$

Но так как в нашем случае

$$I_1 = I_2 = I,$$

то

$$e_1 + e_2 = e = - (L_1 + L_2 + 2M) \frac{dI}{dt},$$

откуда их общий коэффициент самоиндукции будет

$$L' = L_1 + L_2 + 2M.$$

Для встречного включения тех же катушек

$$e = e_1 - e_2 = - (L_1 + L_2 - 2M) \frac{dI}{dt},$$

а их общий коэффициент самоиндукции

$$Z' = L_1 + L_2 - 2M$$

отсюда

$$M = \frac{L' - L''}{4}.$$

VII.

Обозначим через R_0 общее сопротивление мостика, состоящее из последовательно соединенных сопротивлений R_1 , R_3 и S , под которым, в свою очередь, будем разумеать равнодействующее сопротивление цепи, образованной гальванометром (сопротивление g) и сопротивлениями R_2 и R_4 , т. е.

$$R_0 = R_1 + R_3 + \frac{g(R_2 + R_4)}{g + R_2 + R_4}.$$

Тогда для момента размыкания ключа T можем написать

$$-L \frac{dI}{dt} - L_0 \cdot \frac{dI_0}{dt} = i_1 R_0 \dots \dots \dots (a)$$

Здесь L_0 коэффициент самоиндукции цепи гальванометра; i_0 —мгновенная сила тока в нем;

$$i_1 = i_3 = i_0 + i_2 = i_0 + i_2 \text{ и } i_0 \cdot g = i_2 (R_2 + R_4),$$

или так как

$$i_2 = i_1 - i_0, \text{ то } i_0 g = (i_1 - i_0) (R_2 + R_4),$$

откуда следует, что

$$i_1 = i_0 \frac{(g + R_2 + R_4)}{R_2 + R_4}.$$

Подставляя значения для R_0 и i_1 в уравнение (а), получаем

$$-L \frac{di}{dt} - L_0 \frac{di_0}{dt} = i_0 \frac{g + R_2 + R_4}{R_2 + R_4} \left\{ R_1 + R_3 + \frac{g(R_2 + R_4)}{g + R_2 + R_4} \right\}.$$

После умножения на dt и интегрирования в пределах $i=0$ и $0=0$ имеем

$$-L \int_i^0 di - L_0 \int_0^0 di_0 = \int_0^t i_0 dt \frac{g + R_2 + R_4}{R_2 + R_4} \left\{ R_1 + R_3 + \frac{g(R_2 + R_4)}{g + R_2 + R_4} \right\},$$

но так как

$$-L \int_i^0 di = Li; \quad L_0 \int_0^0 di_0 = 0 \quad \text{и} \quad \int_0^t i_0 dt = Q_0,$$

то

$$Li = Q_0 \left(\frac{g + R_2 + R_4}{R_2 + R_4} \right) \left\{ R_1 + R_3 + \frac{g(R_2 + R_4)}{g + R_2 + R_4} \right\},$$

или

$$Li = Q_0 (g + R_2 + R_4) \left\{ \frac{R_1 + R_3}{R_2 + R_4} + \frac{g}{g + R_2 + R_4} \right\} \dots \dots (6)$$

Понимая этого, для момента равновесия мостика при замкнутом ключе T которое мы не нарушили, имеем

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_2}{R_4}$$

или

$$\frac{R_1 + R_3}{R_3} = \frac{R_2 + R_4}{R_4},$$

откуда

$$\frac{R_1 + R_3}{R_2 + R_4} = \frac{R_3}{R_4}.$$

Подставляя последнюю пропорцию в уравнение (6), получаем

$$Li = Q_0 (g + R_2 + R_4) \left\{ \frac{R_3}{R_4} + \frac{g}{g + R_2 + R_4} \right\} = Q_0 \cdot \frac{R_3 (g + R_2 + R_4) g + R_4}{R_4}$$

$$Q_0 = \left\{ \frac{g(R_3 + R_4) + R_3(R_2 + R_4)}{R_4} \right\} = Q_0 \cdot R \dots \dots (с)$$

или

$$L = \frac{Q_0 \cdot R}{i}.$$

Для подсчета неизвестного тока i вспомним, что при равновесии мостика, когда ключ T еще замкнут,

$$I = i + i'$$

или

$$i' (R_3 + R_4) = (I = i) (R_3 + R_4) = i (R_1 + R_2)$$

или

$$i = \frac{I (R_3 + R_4)}{(R_1 + R_2 + R_3 + R_4)}.$$

Подставляя это значение i в уравнение (с), имеем окончательно

$$L = \frac{Q_0}{I} R \cdot \frac{(R_1 + R_2 + R_3 + R_4)}{R_3 + R_4} = \frac{C_{\text{бал}} \alpha}{I} R \cdot \frac{(R_1 + R_2 + R_3 + R_4)}{R_3 + R_4}.$$

VIII.

$$\bar{z}_1 = \bar{r}_X + j \omega L_X; \bar{z} = R_3; \bar{z}_3 = R_1; \bar{z}_4 = \frac{1}{\frac{1}{R} + j \omega C_N}$$

$$R_1 \cdot R_2 = \frac{(r_X + j \omega L_X) \cdot R}{1 + j \omega C_N R}$$

или

$$r_X R + j \omega L_X R = R_1 R_2 + j \omega C_N R R_1 R_2$$

$$r_X R = R_1 R_2$$

$$r_X R = R_1 R_2 = \frac{L_X}{C_N}, \text{ а } L_X = R_1 R_2 C_N$$

IX.

Допустим, что равновесие схемы на переменном токе достигнуто и что мгновенные частичные токи в плечах мостика имеют направления, указанные на схеме.

Тогда

$$R_1 \cdot i_2 - R_2 (i_1 - i_2) = 0 \dots \dots \dots (a)$$

$$R_3 \cdot i_2 + R_4 (i_2 + i_3) - Z_L (i_1 - i_3) = 0 \dots \dots \dots (б)$$

$$Z_c \cdot i_3 - R_3 i_2 - R_1 i_2 - R i_1 = 0 \dots \dots \dots (в)$$

Из уравнения (б) имеем

$$i_3 = \frac{Z_L (i_1 - i_2) - R_3 i_2 + R_1 i_2}{R_4} \dots \dots \dots (г)$$

и, подставляя его в уравнение (в), получаем

$$Z_c Z_L (i_1 - i_2) - Z_c R_3 i_2 - Z_c R_4 i_2 - R_4 R_3 i_2 - R_4 R_1 i_2 - R_4 R_1 i_2 = 0 \dots \dots (д)$$

или

$$(Z_c \cdot Z_L + Z_c R_3 + Z_c R_4 + R_4 R_3 + R_4 R_1) i_2 = (Z_c Z_L - R_4 R) i_1 \dots \dots (е)$$

Переписав уравнение (а) в виде

$$i_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} i_1 \dots \dots \dots (ж)$$

подставив его в уравнение (е) и произведя сокращения, имеем

$$R_3 Z_c (Z_L + R_3) + R_2 R_4 (Z_c + R_3 + R_1) = (Z_c Z_L - R_4 R) (R_1 + R_2) \dots \dots (з)$$

а после сокращения на $R_3 Z_c Z$ получаем

$$R_3 Z_c R_3 + R_2 R_4 (Z_c + R_3 + R_1) = R_1 Z_c Z_L - R_4 R (R_1 + R_2) \dots \dots (и)$$

Если подставить в это уравнение значения

$$\bar{Z} = r_x + j \omega L_x \text{ и } \bar{Z}_c = -\frac{j}{\omega C},$$

то получим

$$\begin{aligned} & -\frac{j}{\omega C} R_2 R_3 + R_2 R_4 \left\{ -\frac{j + \omega C (R_3 + R_1)}{\omega C} \right\} = \\ & = -\frac{j R_1 (r_x + j \omega L_x)}{\omega C} - \frac{R_4 R \omega C (R_1 + R_2)}{\omega C} \dots \dots \dots (\kappa) \end{aligned}$$

Отделив вещественные и мнимые члены, приравняв их порознь друг другу и сократив на $\frac{j}{\omega C}$, получим окончательно

$$R_2 (R_3 + R_1) = R_1 r_x$$

и

$$R_2 R_4 (R_3 + R_1) = \frac{L}{C} R_1 - R_4 R (R_1 + R_2),$$

откуда

$$L = \frac{C \cdot R_4}{R_1} \{ R_2 (R_3 + R_1) + R (R_1 + R_2) \}.$$

ОТДЕЛ ТРЕТИЙ.

ОСНОВЫ МЕТОДИКИ ТЕХНИЧЕСКИХ МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ.

ГЛАВА XI.

Основы теории и практики технических магнитных измерений.

§ 59. Общие замечания.

Задачами магнитных измерений являются:

- а) изучение магнитных полей, образованных различного рода электромагнитными механизмами и приборами,
- б) исследование магнитных свойств ферромагнитных, по преимуществу, материалов, применяемых для магнитопроводов таких механизмов и приборов и, наконец,
- в) исследование механических свойств тех же материалов на основе той несомненной связи, которая существует между их магнитными свойствами и физико-химическим строением.

Последняя задача образует специальную область исследований под названием „магнитного анализа“ и в настоящем курсе не рассматривается.

К магнитным же измерениям относится определение различных магнитных величин, как например, магнитной массы, магнитного момента, напряженности магнитного поля, магнитного потока, магнитной индукции, проницаемости, сопротивления, разности магнитных потенциалов, магнитодвижущей силы, потерь энергии в исследуемом материале на гистерезис и токи Фуко, остаточного намагничивания и величины задерживающей силы.

Практикой собственно технических магнитных измерений охватываются далеко не все перечисленные величины. Это объясняется, с одной стороны, отсутствием хорошо разработанных, с точки зрения техника, методов измерения и

практически удобных в обращении приборов, а с другой — трудностью производить подобные измерения и возможностью определять косвенно, например, вычислением искомые величины, как-то: магнитное сопротивление, разность магнитных потенциалов и магнитодвижущую силу.

С практической точки зрения наибольший интерес представляют те магнитные измерения, конечной целью которых являются:

а) Исследование соотношения между напряженностью поля, магнитной проницаемостью и магнитной индукцией, т. е. уравнения $B = \mu H$, связывающего между собою эти величины. Этого рода исследования весьма важны для динамостроения, так как их путем можно определить — непосредственно пригодность данного материала и косвенно — размеры, вес и коэффициент полезного действия проектируемой машины.

Само измерение обычно сводится к определению путем опыта основной кривой намагничивания исследуемого материала.

б) Определение потерь энергии на гистерезис и токи Фуко при перемагничивании исследуемого материала. Величина этого рода потерь служит основанием при расчете электрических машин и механизмов.

в) Исследование постоянных магнитов, что особенно важно при изготовлении измерительных приборов, магнитная система которых должна обладать по возможности постоянством остаточного намагничивания.

§ 60. Способы и приборы для исследования магнитных полей, т. е. определения намагничивающей силы или напряженности поля.

Способы определения намагничивающей силы могут быть подразделены в зависимости от величины этой силы. При малых намагничиваниях, порядка десятка гауссов, применяются описываемые в курсах физики способы магнитометра и магнитного торможения. Для определения намагничивающих сил значительной величины в технике, по преимуществу, пользуются двумя способами: индукционным методом и значительно реже методом, основанным на изменении электрического сопротивления металлов под воздействием магнитного поля (параграф 70).

Индукционный или баллистический метод сводится к измерению э.д.с., индуктируемой в испытательной катушке,

которую располагают в исследуемом поле так, чтобы оно пронизывало ее контур или же пересекалось ее витками. Сама же э.д.с. измеряется по тому количеству электричества, которое при этом протекает через цепь катушки, соединенной последовательно с обмоткой баллистического гальванометра.

Испытательная катушка изготавливается такой формы и размеров, чтобы ее было удобно вводить в исследуемое поле, выводить из него, поворачивать в нем на 180° или же охватывать ею металлический стержень, индукцию в котором требуется определить. Если исследуемое поле создается током, то испытательную катушку закрепляют неподвижно, а поле возбуждают, уничтожают или же изменяют от $+\Phi$ до $-\Phi$, включая, выключая или коммутируя намагничивающий ток.

а) Теория метода. Пусть число витков испытательной катушки равно n , площадь ее контура S , а поток, пронизавший этот контур, Φ . Тогда количество электричества в кулонах, протекшее в цепи катушки и последовательно с нею соединенной обмотке гальванометра, как известно, равно

$$Q = \frac{n \cdot \Phi}{R} 10^{-8} = \frac{n \cdot S \cdot H}{R} 10^{-8},$$

где R — суммарное сопротивление обмоток катушки и гальванометра.

Если время, в течение которого в катушке индуктируется э.д.с., значительно меньше периода колебаний подвижной системы гальванометра, то

$$Q = C_{\text{бал}} \alpha_m,$$

где $C_{\text{бал}}$ — баллистическая постоянная гальванометра, и α_m — первое и наибольшее отклонение его подвижной системы.

Тогда

$$C_{\text{бал}} \alpha_m = \frac{n S \cdot H}{R} 10^{-8},$$

или

$$H = \frac{1}{n S} C_{\text{бал}} R \alpha_m 10^8,$$

или

$$H = \frac{1}{n S} \cdot 10^8 C \alpha_m, \dots \dots \dots (a)$$

где

$$C = C_{\text{бал}} R.$$

Опыту измерения B должны предшествовать градуировка баллистического гальванометра на магнитный поток или же определение его баллистической постоянной путем вычисления ее по конструктивным постоянным гальванометра.

Градуировка гальванометра на магнитный поток чаще всего выполняется по индукционному же способу, согласно схеме рис. 366, где A — эталонный соленоид; C — индукционная

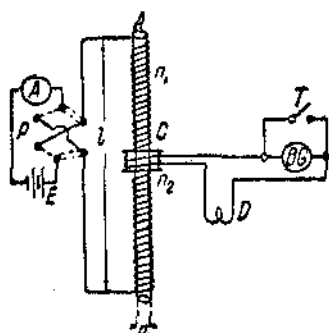


Рис. 366.

катушка его обтекающая; D — испытательная катушка; BG — баллистический гальванометр с успокоителем T ; E — источник постоянного тока и P — коммутатор направления тока.

При замыкании или размыкании тока в цепи эталонного соленоида внутри последнего создается или уничтожается магнитный поток Φ . Благодаря этому в индукционной катушке возникает э.д.с., порождается ток и наблюдается отклонение α подвижной системы гальванометра.

Магнитный поток вычисляется по формуле

$$\Phi = HS = \frac{0,4 \pi n_1 l}{l} \cdot \frac{\pi d^2}{4}, \dots \dots \dots (6)$$

где n_1 — число витков; l и d — длина и диаметр эталонного соленоида в сантиметрах, а I — сила протекающего по его обмотке тока в амперах.

Устанавливая в обмотке эталонного соленоида различные по величине силы токов I_1, I_2, I_3 и т. д., размыкая его цепь и наблюдая каждый первый наибольший угол $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ отклонения подвижной системы гальванометра, вычисляют по приведенной выше формуле зависимость между магнитным потоком и углами отклонения.

При этом необходимо помнить, что индукционная катушка C имеет обычно не один, а n_2 витков, почему отсчитанные нами углы отклонения соответствуют, очевидно, некоторым фиктивным потокам $n_2 \cdot \Phi_1, n_2 \cdot \Phi_2$ и т. д., а не Φ_1, Φ_2 и т. д.

Из выражения (а) видно, что постоянная гальванометра зависит от сопротивления R всей его цепи. Поэтому при градуировке необходимо в его цепь ввести также испытательную катушку D или эквивалентное ей сопротивление.

По данным градуировки строят график, подобно изображенному на рис. 367. Если результаты градуировки получаются в виде прямой OB , что указывает на наличие прямой пропорциональности между отклонениями гальванометра и магнитным потоком, то можно определить постоянную Φ_0 гальванометра в единицах магнитного потока, как величину потока $n_2 \cdot \Phi$, соответствующего отклонению подвижной системы гальванометра на одно деление шкалы, т. е.

$$\Phi_0 = \frac{n_2 \Phi}{\alpha} \dots \dots \dots (в)$$

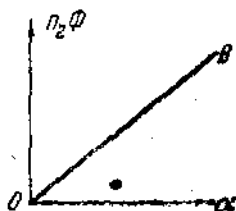


Рис. 367.

Примечание. Подсчитывая величины магнитных потоков по формуле (в), необходимо иметь в виду, что формула эта справедлива, строго говоря, только для соленоидов бесконечно большой длины. Действительно, для соленоида небольшой длины, как на рис. 368, свободные магнитные массы

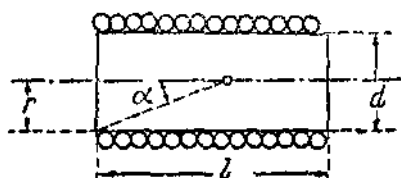


Рис. 368.

на его торцах ослабляют поле внутри и делают его неравномерным по сечению соленоида.

Напряжение поля в среднем сечении короткого соленоида, как известно из курса физики, выражается через

$$H' = \frac{0,4 \pi \cdot n \cdot I}{l} \cos \alpha,$$

где α — угол, под которым из центра соленоида виден радиус r одного из его оснований.

Поэтому при точных измерениях необходимо вводить поправку. Последняя легко вычисляется по данным рисунка, а именно,

$$H' = \frac{0,4 \pi \cdot n_1 I}{l} \cos \alpha = \frac{0,4 \pi \cdot n_1 I}{l} \cdot \frac{1}{\sqrt{l^2 + d^2}} = \frac{0,4 \pi \cdot n_1 I}{\sqrt{l^2 + d^2}}.$$

Обозначив через p отношение $\frac{d}{l}$, которое в большинстве случаев есть правильная дробь, получим

$$H' = \frac{0,4 \pi \cdot n_1 I}{\sqrt{l^2 + d^2}} = \frac{0,4 \pi \cdot n_1 I}{l} (1 + p^2)^{-\frac{1}{2}} = \frac{0,4 \pi \cdot n_1 I}{l} \left(1 - \frac{1}{2} p^2 + \frac{3}{8} p^4 - \frac{5}{16} p^6 + \dots\right).$$

Таким образом, ошибка, при условии пренебрежения поправкой, составит

$$H_{\Delta} = H - H' = - \frac{0,4 \pi \cdot n_1 I}{l} \left(\frac{1}{2} \rho^2 - \frac{3}{8} \rho^4 + \frac{5}{16} \rho^6 + \dots \right).$$

Относительные величины этой ошибки в процентах от H для различных значений $\frac{d}{l}$ даны в нижеследующей таблице:

$\frac{d}{l}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{9}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{15}$	$\frac{1}{20}$
$\frac{\Delta H}{H} 100 \%$	10,54	5,14	2,99	1,94	1,35	1,00	0,77	0,61	0,50	0,22	0,12

Из этой таблицы следует, что при длине соленоида, превышающей его диаметр в 200—300 раз, ошибка от пренебрежения поправкой исчезающе мала, и мы при подсчетах H можем пользоваться выражением (в).

Если соленоиду придать форму тора, т. е. замкнутого на себя кольца, то размагничивания не происходит, но зато распределение силовых линий по сечению тора не равномерно; они оказываются более сгущенными в близких к центру частях его сечения. По исследованиям М. Ллойда, отношение величины среднего напряжения H , полученного в результате деления полного потока, пронизывающего сечение тора, на площадь этого сечения, к истинному напряжению H' в центре сечения, выражается через

$$\frac{H}{H'} = \frac{2R}{a^2} (R - \sqrt{R^2 - a^2}),$$

где R и a суть размеры, указанные на рис. 369.

Если

$$\frac{a}{R} = \rho,$$

то
$$\frac{H}{H'} = \frac{2}{\rho^2} (1 - \sqrt{1 - \rho^2}) = (1 + \frac{1}{4} \rho^2 + \frac{1}{8} \rho^4 + \dots),$$

или

$$H = H' (1 + \frac{1}{4} \rho^2 + \frac{1}{8} \rho^4 + \dots).$$

Ошибка, очевидно, тем меньше, чем меньше отношение $\frac{b}{R}$.

Если придать короткому соленоиду форму, изображенную на рис. 370, и соблюсти указанные там соотношения его размеров, выраженные в единицах длины радиуса его цилиндрической части, то поле внутри его будет всюду почти равномерным.

б) Приборы для измерения напряженности поля: флюксметр, магнитный потенциометр. С обыкновенными баллистическими гальванометрами, у которых относительно мал коэффициент успокоения, работа весьма кропотлива. Так как их подвижная система крайне медленно

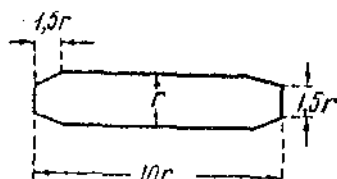


Рис. 370.

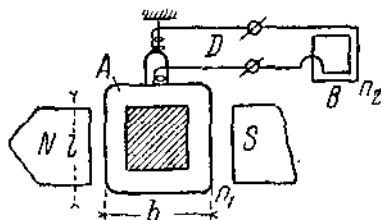


Рис. 371.

успокаивается, то приходится пользоваться успокоителем. Для этого, после отсчета угла отклонения, зажимы гальванометра замыкают накоротко помощью ключа T , изображенного на рис. 366.

При исследованиях сильных магнитных полей, образуемых в массивных железных массах, необходимо считаться с тем, что магнитное поле в них устанавливается не мгновенно, а по прошествии нескольких секунд. Тут нужен гальванометр по возможности с большим собственным периодом колебаний подвижной системы при разомкнутой цепи и вместе с тем, аperiodичный при цепи замкнутой.

Этим условиям удовлетворяет специальный прибор, именуемый флюксметром (рис. 371). По внутреннему устройству он схож с гальванометрами магнитоэлектрической системы, но отличается от них такой конструкцией подвеса гальванометрической рамки и подвода тока к ее обмотке, что вся эта система обладает ничтожно малым моментом кручения (практически равным нулю). Самой же рамке приданы такие размеры, форма и вес, чтобы момент инерции ее, а, следовательно, и период собственных колебаний, были по возможности большими (до 60 сек.). Действие прибора основано на

законе постоянства магнитного потока, связанного с контуром цепи образованной рамкой A и испытательной катушкой B , подключаемой к зажимам D прибора.

Если ввести испытательную катушку B в исследуемое поле, то в цепи прибора возникает мгновенный индуктированный ток, как результат изменения магнитного потока, пронизывающего цепь ADB . Индуктированный ток i возбudit свое поле, взаимодействие которого с полем неподвижных магнитов NS создаст вращающий момент пары сил M . Под влиянием этого момента, равного $M = H \cdot i_1 \cdot n \cdot l \cdot b$, рамка начнет двигаться в магнитном поле постоянных магнитов, и в ней будет индуктироваться ток обратного направления, порождающий тормозящий момент, под воздействием которого рамка остановится, отклонившись на некоторый угол α .

В начальный момент времени, $t = 0$ рамка находилась в покое, а по прошествии времени $t = t_{\text{св}}$ она, совершив перемещение, вновь достигает покоя. Тогда приращение количества движения, полученного рамкой за время t , очевидно, равно нулю.

Если подвес рамки не создает, как сказано выше, никакого тормозящего воздействия, то результирующий импульс J пары сил, равный приращению количества движения за промежуток времени от начала движения до остановки рамки, также равен нулю, т. е.

$$J = \int_{t=0}^{t=t} M dt = 0,$$

или

$$H \cdot n_1 \cdot l \cdot b \int_0^t i dt = 0,$$

или, что то же,

$$\int_0^t i dt = \int_0^q dq = 0,$$

откуда

$$q = 0.$$

Но количество электричества равно $q = \frac{\Delta \Phi}{r}$, где r сопротивление рамок A и B и соединительных между ними проводов, которое не может быть равно нулю.

Отсюда следует, что $\Delta \Phi = 0$, т. е. суммарный магнитный поток, связанный с обеими рамками, равный $\Phi = n_1 \Phi_A + + n_2 \Phi_B$, остается неизменным.

Другими словами, приращение магнитного потока, пронизывающего контур испытательной катушки B , пропорционально уменьшению магнитного потока, пронизывающего контур гальванометрической рамки A вследствие ее поворота на угол α , т. е.

$$n_2 \Delta\Phi_B = -n_1 \Delta\Phi_A,$$

или

$$\Delta\Phi_B = \frac{1}{n_2} C_{\text{бал}} \alpha,$$

где $C_{\text{бал}}$ — баллистическая постоянная прибора.

Шкала флюксметров равномерна и градуируется непосредственно в единицах магнитного потока способом, описанным выше.

Для измерения величины какого-либо потока быстро вводят в него испытательную катушку B нормально к силовым линиям и замечают угол отклонения α . Тогда $\Phi_x = \frac{C_{\text{бал}} \alpha}{n_2}$, а если известна площадь S испытательной катушки в квадратных сантиметрах, то из выражения $\Phi_x = B_x S$ нетрудно найти и величину индукции B_x . Этим путем весьма удобно определять индукцию в междужелезном пространстве электрических машин, электромагнитных механизмов и т. п.

Для измерения слабых полей Фишером сконструирован флюксметр особой системы. Он состоит из маленького тонкого металлического диска, вращающегося от особого привода со скоростью до 100 об/сек.

Внося этот диск в исследуемое поле плоскостью нормально к направлению силовых линий и измеряя помощью милливольтметра э.д.с. e , индуцируемую вдоль радиусов диска (рис. 372), можно измерить напряженность H поля (поле на чертеже следует представлять себе расположенным нормально к его плоскости).

Относительно недавно, в практику вошел новый прибор — магнитный потенциалометр (поис Роговского), пригодный не только для измерения магнитного потока, но также и разности магнитных потенциалов двух точек. Он представляет гибкую полосу одинакового повсюду сечения с завитой на нее равномерно обмоткой, состоящей из большого числа витков.

Для градуировки потенциалометр изгибают в виде кольца таким образом, чтобы он охватывал эталонный соленоид,

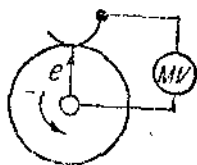


Рис. 372.

в котором коммутируют ток. Вычисляя магнитный поток соленоида и отсчитывая показания баллистического гальванометра приключенного к обмотке потенциалометра, составляют градуировочную кривую последнего. Для измерений концы потенциалометра помещают в две точки исследуемого поля, а затем, удаляя его от них или изменяя направление поля, отсчитывают показание гальванометра, пропорциональное величине полного потока вдоль оси потенциалометра.

§ 61. Способы измерения напряженности поля.

Способы измерения напряженности магнитного поля видоизменяются в зависимости от условий опыта.

Если исследуется поле в междужелезном пространстве какого либо электромагнитного механизма, то в него вводят испытательную катушку D (рис. 366), плоскостью, нормально к направлению силовых линий поля. Затем быстро вытягивают катушку из междужелезного пространства, или коммутируют направление тока, намагничивающего испытуемый механизм, и отсчитывают первое наибольшее отклонение заранее проградуированного гальванометра. Можно также взамен коммутирования тока, изменять его силу. По данным градуировки и углу отклонения вычисляют магнитный поток, как $\Phi = \frac{\Phi_0 a}{n_3}$, где n_3 — число витков испытательной катушки, а Φ_0 — постоянная гальванометра в единицах магнитного потока.

Зная площадь сечения S_3 испытательной катушки, нетрудно подсчитать и магнитную индукцию в том месте междужелезного пространства, где она находилась, а именно,

$$B = \frac{\Phi}{S_3}.$$

Примечание. Если намагничиваемый ток коммутируется по направлению, то отклонение гальванометра, очевидно, соответствует 2Φ .

Если исследование имеет целью определить индукцию в толще металла, а не в междужелезном пространстве, то задачу можно разрешить следующими способами.

1) Баллистический способ. а) Из исследуемого материала готовится длинный стержень, на него навивается равномерно намагничивающая обмотка, а поверх ее и по середине длины стержня надевается катушка D (рис. 366). Опыт ведут как описано выше, т. е. коммутируют или размыкают намагничивающий ток и отсчитывают показание (первое наибольшее)

баллистического гальванометра. Длина стержня с намагничивающей обмоткой, в видах равномерного распределения силового потока в среднем сечении стержня, а также для понижения размагничивающего влияния концов, должна в 300—500 раз превышать его диаметр. Это ограничивает применение указанного способа.

б) Исследуемому металлу придают форму замкнутого на себя плоского кольца (тора), на которое навивают равномерно намагничивающую обмотку (рис. 373). Поверх ее навивают обмотку испытательной катушки и ведут опыт, как описано выше. Равномерное

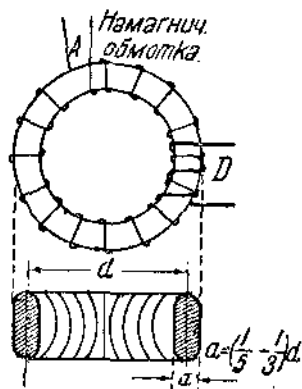


Рис. 373.

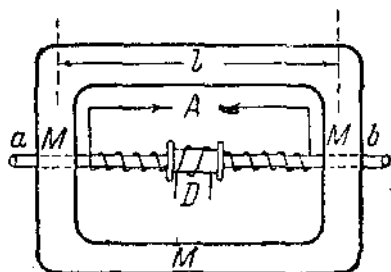


Рис. 374.

распределение намагничивающей обмотки на торе предотвращает магнитную утечку, а плоское сечение тора способствует равномерному распределению силовых линий по его сечению.

Однако, необходимость изготавливать образцы в виде тора и наматывать на них намагничивающую, а затем испытательную обмотку ограничивают применение этого способа в технике, хотя в смысле точности результатов измерения, его следовало бы предпочесть другим.

в) В практическом отношении наиболее удобен способ магнитного ярма, заключающийся в том, что испытуемый образец в виде цилиндрического стержня $a-b$ (рис. 374) длиной 25—30 см продевается через специальные отверстия в массивном железном яре M , где и закрепляется помощью особых металлических вкладышей.

На стержень надеваются намагничивающая A и испытательная D катушки; через обмотку первой пропускается намагничивающий ток, а вторая вводится в цепь баллистического гальванометра последовательно с индукционной катушкой C

(рис. 366). Размыкая или коммутируя ток в намагничивающей обмотке, отсчитывают первое отклонение гальванометра и определяют величину магнитного потока (Φ или 2Φ) в образце. Зная его сечение, обычно порядка 1 см^2 , вычисляют индукцию в нем.

Слабым местом подобного способа определения индукции является невозможность точного учета величины магнитных сопротивлений в местах стыка испытуемого стержня с ярмом (переходные магнитные сопротивления), а также самого ярма. Последнее может быть снижено, если сечение ярма в 50–100 раз больше сечения образца, и если ярмо изготовлено из высокосортового мягкого железа. Что же касается переходных магнитных сопротивлений в стыках стержня с ярмом, то сколь бы тщательно ни были изготовлены вкладыши между ними, все же там будут воздушные прослойки. Поэтому часть магнитодвижущей силы, образованной намагничивающим током, израсходуется на преодоление этих переходных сопротивлений. Следовательно, истинное значение намагничивающей силы H в испытуемом стержне будет меньше вычисленной по формуле

$$H_0 = \frac{0,4\pi n I}{l},$$

где n — число витков намагничивающей обмотки; I — сила намагничиваемого тока и l — средняя длина пути силового потока в исследуемом стержне.

Таким образом $H = H_0 - \Delta H$, где ΔH есть поправка, равная величине той намагничивающей силы, которая расходуется на преодоление переходных магнитных сопротивлений. (Опытное определение этой поправки см. дальше при рассмотрении способов исследования магнитных свойств ферромагнитных материалов).

2) Измерение напряженности поля по величине изменения электрического сопротивления металлов в магнитном поле. Свойством некоторых металлов, и в первую очередь висмута, изменять свое омическое сопротивление под воздействием магнитного поля пользуются для исследований не вполне замкнутых полей, так, например, полей в междужелезном пространстве электрических машин. Для этого из тонкой (0,5 мм) висмутовой проволоки навивают бифилярно плоскую спираль и помещают ее нормально к силовым линиям исследуемого поля (рис. 375). Предварительно она должна быть проградуирована на магнитный поток. Для этого ее помещают (нор-

мально) в поле известного напряжения и, опытным путем, определяют зависимость между напряженностью поля и величиною относительного изменения сопротивления спирали, т. е.

$$\frac{R_s - R_0}{R_0} = f(B),$$

где R_0 — сопротивление спирали вне поля, а R_s — в поле



Рис. 375. Висмутовая спираль.

определенной интенсивности. По данным опыта строится кривая этой зависимости.

Для $B \geq 1000$ относительное приращение сопротивления висмута пропорционально индукции, т. е.

$$\frac{R_s - R_0}{R_0} = \alpha B,$$

где α — коэффициент, определяемый как среднее значение для нескольких точек кривой указанной зависимости (рис. 376).

Затем градуированную спираль вводят в исследуемое поле и промеряют на мостике Витстона ее сопротивление. По полученным данным и графику вычисляют напряженность исследуемого поля.

При ответственных измерениях, а также при разности между температурами опыта и градуировки, превышающей 10° , необходимо вводить поправку, так как висмут обладает значительным температурным коэффициентом ($\alpha = 0,014$).

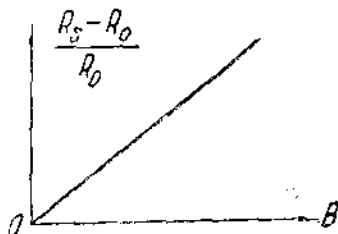


Рис. 376.

Относительное изменение сопротивления спирали подсчитывается тогда по формуле

$$R_t = \frac{R_s - R_0}{R_0} \{1 + 0,014 (t_2 - t_1)\},$$

если R_0 и R_s были измерены при одинаковой температуре. Некоторыми фирмами изготавливаются висмутовые спирали, сконструированные так, чтобы их удобно было вводить в междужелезное пространство электромагнитных механизмов и присоединять к схеме мостика. Существуют также специальные приборы, например, описываемый ниже аппарат Бруггера.

3) Измерение коэффициентов рассеяния. В электромагнитных механизмах почти всегда приходится наблюдать магнитное рассеяние, т. е. ответвление некоторой части потока через воздух помимо самого магнитопровода. Явление это наблюдается особенно заметным образом при больших значениях индукции и по преимуществу в тех местах магнитопровода, где, благодаря его форме, силовой поток изгибается или проходит через плоскость, разграничивающую два участка магнитопровода с различными коэффициентами магнитной проницаемости.

Поток рассеяния, а, следовательно, и коэффициент рассеяния, зависит от степени намагничивания, т. е. от величины индукции в частях магнитопровода, и поэтому их надо определять в зависимости от степени намагничивания.

Самый опыт сводится к измерению потоков Φ_1 и Φ_2 в указанных выше сечениях магнитопровода, для чего по большей части применяется баллистический метод.

§ 62. Примеры исследования магнитных полей.

1) Опытное получение кривых распределения полей в электрических машинах. а) Баллистический способ. На узкую полоску тонкого картона наклеивают плоскую длинную катушку из 20—30 витков тонкого изолированного проводника. Поверх катушки наклеивают вторую полоску картона и полученную этим способом испытательную катушку (рис. 377-а) закрепляют на якоре A испытуемой машины вдоль его оси. Толщина катушки должна быть такой, чтобы при повороте якоря машины она свободно ходила в междужелезном пространстве.

Концы обмотки испытательной катушки присоединяют к зажимам баллистического гальванометра или флюксметра G .

Опыт имеет целью определить порознь поля индукторов $N-S$ и якоря A машины соответственно различным углам поворота якоря (с закрепленной на нем катушкой) относительно нейтральной зоны $m-m$ машины. Отрегулировав с помощью реостатов r и p силы токов возбуждения (i) и нагрузочного (I), отсчитывают отклонения гальванометра порознь и при поочередном размыкании цепей возбуждения и якорной. Затем поворачивают якорь на угол,

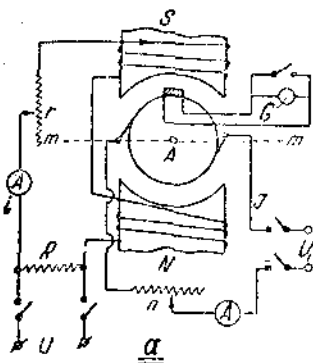


Рис. 377-а.

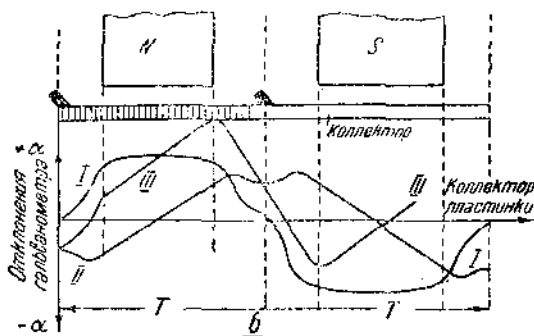


Рис. 377-б.

соответствующий, например, ширине одной коллекторной пластины, вновь поочередно размыкают цепи машины и отсчитывают углы отклонения гальванометра. Обойдя таким образом полную окружность, строят по полученным данным кривые распределения полей индукторов и якоря в функции угла поворота испытательной катушки (кривые I и II на рис. 377-б).

Сопротивление R , порядка 10000—20000 ом, вводится в цепь возбуждения с той целью, чтобы обезопасить намагничивающие обмотки от экстратоков размыкания. Геометрическое суммирование кривых I и II даст кривую III равнодействующего поля машины. Снятые описанным способом кривые необходимо привести к определенному масштабу индукции, что проще всего осуществить, определив масштаб ординат кривой I, т. е. потока, вступающего в якорь машины. Для этого по полюсному шагу машины T (а у двухполюсной машины по диаметру якоря) навивают добавочную обмотку a из 5—8 витков изолированного проводника, концы которого соединяют через баллистический гальванометр с индукционной катушкой B , надетой на эталонный соленоид A (рис. 378-а).

Установив в цепи возбуждения машин ту же силу тока i , при которой была снята кривая I распределения поля, и разомкнув эту цепь, отмечают угол отклонения α гальванометра, равный $\alpha = C \cdot \Phi_a \cdot n$, где C — постоянная гальванометра, Φ_a — поток, пронизывающий обмотку a , и n — число ее витков.

Вслед за этим пропускают через обмотку эталонного соленоида A некоторой силы ток I и в момент его размыкания отсчитывают показание гальванометра, равное $\alpha_A = C \cdot \Phi_A \cdot n_2$,

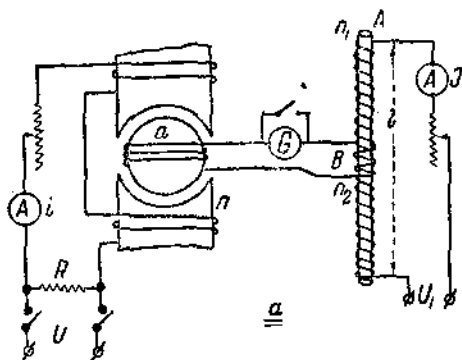


Рис. 378-а.

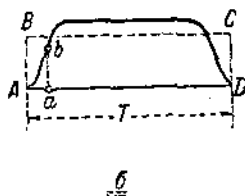


Рис. 378-б.

где Φ_A — поток соленоида, вычисляемый по его данным, т. е. по числу n_1 витков, длине l и диаметру d , а n_2 — число витков индукционной катушки B .

Тогда

$$\frac{\alpha}{\alpha_A} = \frac{\Phi_a \cdot n}{\Phi_A \cdot n_2}$$

или

$$\Phi_a = \frac{\Phi_A n_2}{\alpha_A \cdot n} \cdot \alpha,$$

где

$$\Phi_A = \frac{0,4 \pi \cdot n_1 \cdot I}{l} \cdot \frac{\pi d^2}{4}.$$

Отсюда

$$\Phi_a = \frac{0,4 \pi \cdot n_1 \cdot I \pi d^2}{l} \frac{n_2 \alpha}{\alpha_A \cdot n}.$$

Для подсчета величины средней индукции B_0 надо вступающий в якорь поток Φ_a разделить на площадь поперечного

сечения, соответствующую полюсному шагу T (у двухполюсной машины на площадь контура обмотки a), т. е. на

$$T \cdot Z = \frac{\pi D_a}{2\rho} \cdot Z,$$

где T — полюсный шаг, Z — длина якоря, D_a — диаметр якоря и 2ρ — число полюсов машины.

Таким образом,

$$B_0 = \frac{\Phi_a}{T Z} = \frac{\Phi_a}{\pi D_a \frac{Z}{2\rho}}.$$

По этим данным нетрудно определить и масштаб индукции для полученных из предыдущего опыта кривых распределений полей. Измерив площадь, ограниченную кривой I в кв. сантиметрах и построив равновеликий ей прямоугольник $ABCD$ (рис 378-б) с основанием $AD = T$, мы получим его высоту равной средней индукции $B_0 = AB$. При этом единице длины ординаты любой из точек кривой I поля будет соответствовать $\frac{B_0}{AB}$ единиц магнитной индукции. Индукция же для любой из интересующих нас точек в междужелезном пространстве машины, например, для точки a , будет равна $a \cdot b \frac{B_0}{AB}$.

б) Способ получения кривых распределения полей помощью градуированной висмутовой спирали сводится к размещению спирали плоскостью нормально к силовым линиям исследуемого поля и промеру приращения ее омического сопротивления помощью мостика Витстона. Затем по данным ее градуировочной кривой определяют индукцию исследуемого поля.

2) **Определение коэффициента рассеяния в электрических машинах.** Под коэффициентом рассеяния принято разуметь отношение магнитного потока Φ_m , порождаемого в индукторах машины, к магнитному потоку Φ_a , пронизывающему якорь машины или ее станину Φ_{st} (рис. 379). Соответственно этому коэффициент рассеяния на якорь

$$\sigma = \frac{\Phi_m}{\Phi_a} = \frac{\Phi_a + \Phi_p}{\Phi_a},$$

где Φ_p — та часть потока индукторов, которая замыкается через воздух, не пронизывая якоря. Аналогично коэффициент рассеяния на станину

$$\sigma_1 = \frac{\Phi_m}{2\Phi_{st}} = \frac{2\Phi_{st} + 2\Phi'_p}{2\Phi_{st}},$$

где Φ'_p — та часть потока индукторов, которая не пронизывает сечения станины. В выражении для σ_1 перед обозначениями потоков Φ_{st} поставлен

множитель 2 потому, что весь поток в станине разветвляется по двум параллельным путям, а измеряют обычно какую-либо одну лишь его половину.

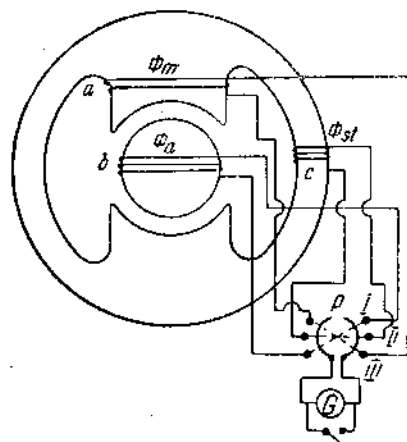


Рис. 379.

Для измерения коэффициента рассеяния на индуктор, якорь и станину наматывают вспомогательные обмотки a , b и c из нескольких витков изолированного проводника, концы которых подводят к переключателю P на 3 направления; последний соединяют с баллистическим гальванометром G или флюксметром.

Задавшись затем в обмотке возбуждения машины (на рис. не показана) нормальным током возбуждения, размыкают его цепь и отсчитывают показание α_m гальванометра при расположении рычага переключателя P на контактах III. После этого повторяют опыт при последовательных положениях переключателя на контактах II и I и при неизменной силе тока возбуждения машины, отмечая углы α_c и α_a отклонения гальванометра.

Полученные углы отклонения равны

$$\alpha_m = C \cdot \Phi_m n_a; \alpha_c = C \cdot \Phi_{st} n_c \text{ и } \alpha_a = C \cdot \Phi_a n_b,$$

где n_a , n_c и n_b — числа витков обмоток a , b и c .

Тогда

$$\sigma = \frac{\Phi_m}{\Phi_a} = \frac{\alpha_m n_b}{\alpha_a n_a}$$

и

$$\sigma_1 = \frac{\Phi_m}{2\Phi_{st}} = \frac{\alpha_m \cdot n_c}{2\alpha_c \cdot n_a}.$$

Если в задачу опыта входит установление зависимости σ и ϵ , от степени намагничивания машины, то опыт повторяют для различных значений тока возбуждения и полученную зависимость представляют графически.

Вместо баллистического гальванометра удобнее воспользоваться флюксометром, который менее подвержен влиянию железной массы машины и не требует поэтому большого удаления от нее, что при работе с гальванометром необходимо.

§ 63. Способы исследования магнитных свойств металлов.

1. Общие теоретические замечания. Для оценки магнитных свойств металлов наибольшее значение имеют кривые их намагничивания, позволяющие выяснить такие характерные для данного материала величины, как коэффициент μ магнитной проницаемости и его зависимость от допущенной нами в данном материале индукции; величину остаточного намагничивания B_r и коэрцитивной силы H_c , а также величину потерь энергии на гистерезис.

В технике для построения кривых намагничивания, т. е. для опытного выяснения зависимости $B=f(H)$, пользуются описанными выше методами баллистическим, электродинамическим, с висмутовой спиралью (значительно реже), а также методом магнитного отрыва (чаще других).

В тех случаях, когда исследуемому материалу в работе предстоит подвергаться процессу быстрого перемагничивания, как например, материалу сердечников электромагнитных механизмов, намагничивающая обмотка которых питается переменным током повышенной частоты, — надо иметь в виду, что у него распределение магнитной индукции по сечению металла будет иным, нежели при медленном перемагничивании. Это сказывается на величинах, характеризующих магнитные свойства испытуемого материала, и приводит к необходимости применять особые методы для получения кривых намагничивания. Последние кривые носят наименование динамических в отличие от статических кривых, определяемых перечисленными выше способами.

Исследования ряда экспериментаторов (Юинга, Ллойда, Рауланда, Столетова и др.) показали, что как магнитная проницаемость, так и магнитная индукция в данном металле и при одной и той же величине намагничивающей силы, могут иметь бесчисленный ряд значений. Все зависит от того, как и в какой постепенности производится намагничивание. Если

испытываемый металл впервые подвергается намагничению или перед опытом был совершенно размагничен, то по мере увеличения намагничивающей силы магнитная индукция растет сперва очень быстро и почти пропорционально H , а затем вблизи насыщения медленно, как на рис. 380. Кривая, построенная по данным подобного опыта, где H выражается в эрстедах, или чаще, в намагничивающих ампер-витках, вычисляемых по формуле

$$H = \frac{0,4 \pi n \cdot I}{l} = KI,$$

носит название основной кривой намагничения. На этой кривой выделяются две характерные точки M и N ; первая — точка перегиба, отвечающая наибольшему значению магнитной проницаемости, а вторая — колену кривой или началу насыщения. Основная кривая намагничения

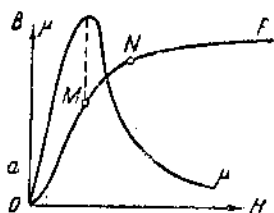


Рис. 380.

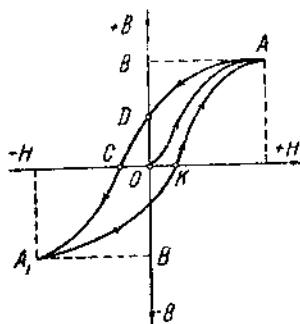


Рис. 381.

представляет интерес, главным образом, потому, что по ее данным можно легко вычертить и кривую коэффициента магнитной проницаемости как $\mu = \frac{B}{H} = f(H)$, ибо только для этой кривой и имеет место зависимость $B = \mu H$. По кривой магнитной проницаемости находят также значение начальной магнитной проницаемости, для чего эту кривую продолжают до пересечения с осью ординат (экстраполируют) при $H = 0$ (см. точку a на рис. 380).

Если намагниченный образец подвергнуть нескольким повторным круговым циклам перемагничивания в пределах от $+H$ до $-H$, то в результате подобного опыта получается как известно, замкнутая кривая намагничения, называемая циклической кривой (см. кривую $ADCA_1$, KA на рис. 381).

На ней отмечаются две характерные точки. Точка D , ордината которой равна $OD = B_r$, определяет величину остаточной

индукции B , в испытуемом материале, и точка C , абсцисса которой $OC = H_c$, определяет величину коэрцитивной силы, т. е. величину той размагничивающей силы, которая необходима, чтобы совершенно размагнитить образец.

Если опыт получения циклической кривой проводится при замкнутой магнитной цепи, например, как было описано выше — методом ярма или тора, то остаточное намагничение B_r принято называть истинной остаточной индукцией. Если во время опыта магнитная цепь образца разомкнута, то получается значение, так называемой кажущейся остаточной индукции B_r^1 . Последняя зависит от B_r и H_c , а также от формы и размеров образца, и только она, по существу, характеризует металл, если из него предполагается изготавливать в дальнейшем постоянные магниты.

а) Основную кривую намагничения можно снять двояким способом: 1) постепенно увеличивая намагничивающую силу H , при этом отнюдь не возвращаясь к уже пройденным ее значениям и определяя хотя бы по баллистическому методу соответствующие значения B , или 2) производя ряд циклических перемагничений образца в различных, постепенно увеличивающихся пределах $\pm H$, т. е. снимая ряд циклических, как на рис. 382, кривых. Соединив затем вершины всех полученных кривых, мы тем самым вычертим и основную кривую намагничения.

б) Циклическую кривую также можно снять двумя способами.

Способ Рауланда сводится к тому, что, задавшись максимальным значением намагничивающей силы, отвечающим, например, вершине A на рис. 382, снижают ее до некоторого значения $+H_1$, и измеряют соответствующую ей индукцию B , т. е. находят точку a кривой. Затем вновь уменьшают H и определяют точку b кривой и т. д.

Способу этому присущ тот недостаток, что всякая ошибка в определении одного какого-либо из промежуточных значений B суммируется при определении всех остальных значений индукции в пределах всей кривой.

Способ Юинга дает более точные результаты, но зато он и более кропотлив. Задавшись по предыдущему значением

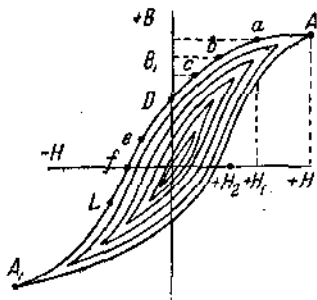


Рис. 382.

$+H_{\max}$, коммутируют несколько раз намагничивающий ток, т. е. совершают несколько повторных перемагничиваний образца в пределах от $+H_{\max}$ через $-H_{\max}$ и вновь до $+H_{\max}$ (между точками $A-A_1$ и A на рис. 383) и завершают этот процесс быстрым уменьшением намагничивающей силы до некоторого значения H_1 , которому отвечает определенное значение индукции B_1 . Если опыт ведут по баллистическому методу, то гальванометр учитывает при этом то число силовых линий Φ_a , которое исчезает благодаря уменьшению намагничивающих ампер-витков. По величине оставшегося магнитного

потока, равного $\Phi' = \Phi_{\max} - \Phi_a$, не трудно определить и индукцию $B_1 = B_{\max} - B_a$, а зная ее и отвечающую ей намагничивающую силу B , определяют и координаты точки 1 кривой намагничивания. Затем восстанавливают намагничивающую силу до прежнего значения $+H_{\max}$ и повторно перемагничивают образец в пределах $\pm H_{\max}$. После этого, быстро уменьшив намагничивание до H_2 , снимают показание гальванометра и определяют координаты точки 2 кривой и т. д. Таким образом, каждая точка кривой получается в результате изменения B и H от их максимальных значений

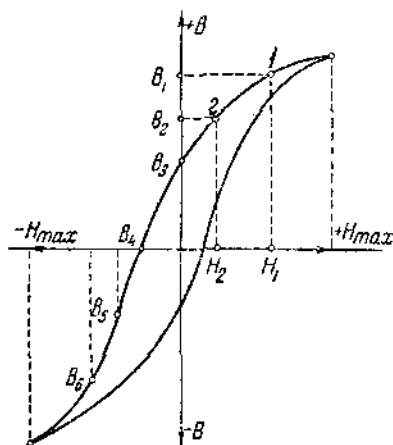


Рис. 383.

и после предварительной подготовки цикла между точками A , A_1 и A .

Вообще необходимо отметить, что устойчивое магнитное состояние металлов обеспечивается предварительным и неоднократным их перемагничиванием в пределах выбранных нами значений $\pm H$, ибо в противном случае, в процессе опыта легко перейти с одной циклической кривой на соседнюю, что исказит результаты опыта. На рис. 384 приведены как основные, так и циклические кривые для различных металлов, снятые для одних и тех же максимальных значений намагничивающей силы.

Сопоставляя эти кривые, мы видим, что сталь намагничивается слабее и медленнее железа, и остаточное намагничивание у нее меньше. Этот вывод как будто противоречит установив-

шему представлению о том, что для изготовления постоянных магнитов необходимо применять сталь, а не железо. Однако, это лишь кажущееся противоречие, ибо кривые показывают, что коэрцитивная сила у стали значительно больше, чем у железа, а это и представляется особенно важным для постоянных магнитов.

§ 64. Примеры исследования магнитных свойств металлов.

1) Опытное получение кривых намагничивания.

Выше в § 60, при рассмотрении различных способов практического применения баллистического метода отмечалось, что наиболее точные результаты можно получить, придавая испытуемому материалу форму тора. В этом случае, и при надлежащей конструкции самого тора, можно достигнуть практически равномерного распределения силовых линий поля по сечению испытуемого материала.

Кроме того, благодаря замкнутости тора, у него отсутствуют переходные магнитные сопротивления, неизбежные во всех тех случаях, когда испытуемый материал берется в виде прямолинейного бруска, замыкаемого массивным железным ярмом (способ магнитного ярма). Наличие стыков между бруском и ярмом приводит к неизбежности затраты некоторой части намагничивающей силы на преодоление переходных магнитных сопротивлений.

Необходимость учета этой затраты при точных измерениях послужила основанием к разработке специальных способов опытного получения кривых намагничивания. В основу их положены нижеследующие соображения. Пусть l , q , μ и S будут: длина, сечение, магнитная проницаемость и магнитное сопротивление бруска из испытуемого нами материала; l_1 , q_1 , μ_1 и S_1 — те же величины для воздушных промежутков между бруском и ярмом и, наконец, l_2 , q_2 , μ_2 и S_2 — те же величины для самого ярма. Тогда для данной степени намагничивания и допуская

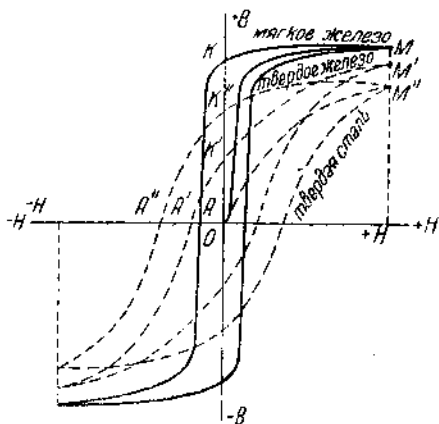


Рис. 381.

постоянство всех магнитных сопротивлений, мы можем написать, что магнитодвижущая сила равна

$$0,4\pi \cdot n \cdot I = \Phi \frac{l}{\mu \cdot q} + \Phi \frac{l_1}{\mu_1 q_1} + \Phi \frac{l_2}{\mu_2 q_2}$$

или

$$H' = \frac{0,4\pi \cdot n \cdot I}{l} = H + \frac{\Phi}{l} \cdot \frac{l_1}{\mu_1 q_1} + \frac{\Phi}{l} \cdot \frac{l_2}{\mu_2 q_2} = \\ = H + H \left(\frac{\mu \cdot q}{l} \cdot \frac{l_1}{\mu_1 q_1} + \frac{\mu \cdot q}{l} \cdot \frac{l_2}{\mu_2 q_2} \right) = H + H\varepsilon,$$

где ε = выражению, заключенному в скобках и представляющему не что иное, как $\frac{S_1 + S_2}{S}$.

Величина ε , при соответствующей конструкции ярма и стыков меньше единицы и по мере увеличения индукции становится все меньше. Поэтому при технических измерениях, носящих приближенный характер, этой величиною пренебрегают, допуская, что напряжение H магнитного поля в стержне численно равно напряжению H' поля намагничивающей катушки, т. е. что $H = H' = \frac{0,4\pi \cdot n \cdot I}{l}$.

Подобное допущение равносильно предположению, что вся магнитодвижущая сила $0,4\pi \cdot n \cdot I$ расходуется исключительно на проведение магнитного потока через испытуемый стержень, что отвечало бы действительности в том лишь случае, если бы ни ярмо, ни стыки между ним и испытуемым бруском не порождали никакого магнитного сопротивления. Так как магнитные сопротивления этих частей магнитопровода не могут быть равны нулю, то при точных измерениях необходимо пользоваться выражением $H' = H + H\varepsilon$.

Для выяснения вопроса о причинах, влияющих на величину ошибки, допускаемой нами в случае пренебрежения членом $H\varepsilon$, — преобразуем выражение для H' в виде

$$H' = H + H\varepsilon = H + \frac{S_1 + S_2}{S} H = H + \frac{S_1 + S_2}{S} \cdot \frac{B}{\mu} = H + \\ + \frac{1}{\mu} \cdot \frac{S_1 + S_2}{S} B = H + K \cdot B,$$

или

$$\Delta H = H' - H = K \cdot B.$$

Последнее выражение показывает, что наличие в магнитопроводе ярма и стыков между ним и испытуемым бруском как бы порождает некую размагничивающую силу, равную ΔH . Последняя зависит от магнитной проницаемости стержня, степени его намагничения и относительной величины магнитных сопротивлений отдельных частей магнитопровода.

Для уменьшения коэффициента K , очевидно, необходимо уменьшать сечение и увеличивать длину стержня (увеличится S), увеличивать сечение и уменьшать длину ярма и стыков (уменьшится $S_1 + S_2$) и наконец, подобрать для ярма материал с возможно большей магнитной проницаемостью.

Если мы выполним все эти условия, но допустим, что $H = H'$, то все же сделаем ошибку, которая сведется к следующему. Пусть для некоторой степени H намагничения стержня найдено опытным путем значение индукции в нем, равное B . Согласно нашему допущению, этой индукции соответствует напряженность поля $H' = \frac{0,4 \pi n \cdot I}{l}$, в то время как фактически оно равно

$$H = H' - KB = \frac{0,4 \pi n \cdot I}{l} - K \cdot B.$$

На кривой намагничения (рис. 385) это выразится тем, что некая точка a на кривой намагничения, отображающая магнитное состояние стержня в данный момент, будет иметь координаты B' и H' вместо B и H , т. е. будет перенесена вправо и параллельно оси абсцисс на отрезок $a' - a = H' - H = KB$. Все остальные точки опытной кривой намагничивания, очевидно, также сместятся, почему вся эта кривая расположится ниже истинной кривой намагничения, и тем ниже, чем больше коэффициент K . Описанное смещение опытной кривой относительно истинной кривой намагничения, которая получилась бы при отсутствии переходных магнитных сопротивлений, носит наименование сдвига кривой. На практике опытным путем определяют кривую сдвига различных материалов, для чего снимают их опытную кривую намагничения по способу ярма. Затем образцам того же материала придают форму, указанную в § 60 (эллипсоида вращения) и вновь снимают

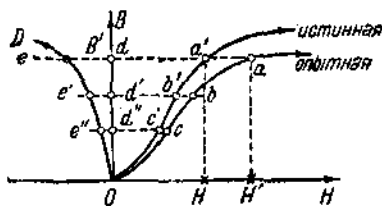


Рис. 385.

кривую намагничения. В первом случае получают смещенную кривую, а во втором—истинную (рис. 385). Проведя ряд линий параллельных оси абсцисс и отложив от оси OB влево отрезки $ed=a'a$, $e'd'=b'b$, $e''d''=c'c$, получим ряд точек e , e' , e'' и т. д., определяющих собою кривую сдвига OD для данного материала и, очевидно, того, именно прибора, помощью которого снималась опытная кривая намагничения.

Кривые сдвига в одном и том же приборе для различных материалов не одинаковы, но для материалов однородных

разница между ними столь ничтожна, что для практических целей достаточно иметь три кривые сдвига для более или менее однородных сортов железа, стали и чугуна.

Кривые сдвига подчас имеют весьма причудливый характер. Пользование ими сводится к следующему (см. рис. 385).

Пусть при испытании данного материала найдено некоторое значение магнитной индукции, равное $B' = od$.

Мы должны его отложить от точки H' по вертикали. Получится точка a , координаты которой и определяют индукцию B' . Но так как мы делаем допущение, что $H = H'$, то нам надо отложить абсциссу OH' не от начала координат (точки O), а от точки e кривой сдвига. Тогда конец абсциссы $OH' = ea'$ отметит точку a' , отвечающую истинным координатам найденной нами индукции B' . Подобным же способом строятся и все остальные точки истинной кривой намагничения.

2) Практическое получение кривых намагничения может быть осуществлено тремя принципиально различными способами, а именно: электродинамическим способом при помощи аппарата Кепселя, способом отрыва и способом Юинга.

а) Электродинамический способ Кепселя. Аппарат Кепселя представляет собою массивное полукруглое ярмо MM (рис. 386) из мягкого железа с цилиндрической вырезкой, в которой на оси помещается подвижная гальванометрическая рамка A , объемлющая железный, неподвижно

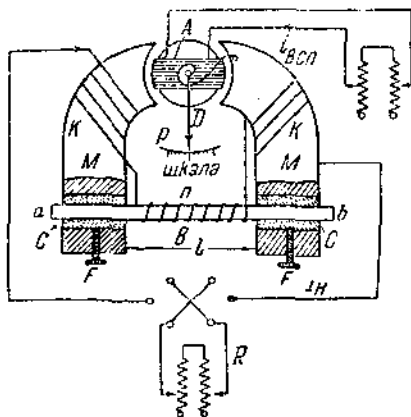


Рис. 386-а.

закрепленный цилиндр *D*. В свободных концах ярма имеются отверстия, через которые в прибор вводится стержень *ab* из испытуемого материала, где он зажимается особыми вклады-

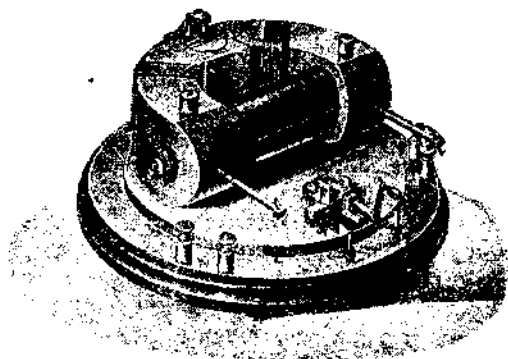


Рис. 386-б. Внутренний вид аппарата Кепселя.

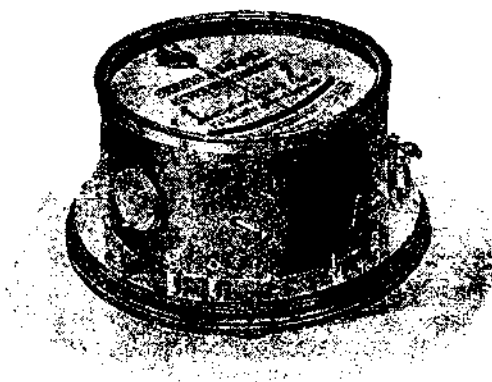


Рис. 386-в. Внешний вид аппарата Кепселя.

шами *C*, *C* и зажимными винтами *F*. Стержень продевается сквозь намагничивающую катушку *B*.

Прибор снабжается еще двумя так называемыми компенсирующими катушками *KK*, навитыми на ярмо в направлении обратном виткам намагничивающей обмотки и обтекаемыми намагничивающим током I_k . Число витков этих катушек подбирается таким, чтобы при вынутах из прибора исследуемом

стержне поле намагничивающей катушки B полностью уравнивалось полем компенсирующих катушек. При соблюдении этого условия отклонение подвижной системы прибора будет обязано своим происхождением одному только полю в испытуемом стержне, т. е. будет пропорционально индукции в последнем.

В нерабочем состоянии прибора, когда ни в гальванометрической рамке, ни в намагничивающей катушке нет тока, рамка удерживается в своем исходном положении на нуле шкалы прибора помощью скрепленных с ее осью спиральных пружинок. Если замкнуть намагничивающий ток, то силовой поток Φ , возникший в исследуемом стержне, распространится по яруму и пройдет через междужелезное пространство, где расположена гальванометрическая рамка.

Если пропустить по обмоткам последней некоторый вспомогательный ток i_s , то рамка отклонится на угол, пропорциональный потоку Φ и силе тока i_s , т. е. $C \cdot \alpha = \Phi i_s = Bq \cdot i_s$, где C — постоянная прибора, а q — площадь сечения испытуемого стержня в кв. сантиметрах. Если же поддерживать постоянной силу вспомогательного тока, то углы отклонения рамки будут прямо пропорциональны индукциям B в стержне. Это позволяет нанести на шкале прибора эмпирические значения индукций для определенного сечения исследуемых стержней, а также определить постоянную самого прибора, вводя в него стержень, кривая намагничивания которого точно известна.

Постоянная прибора, обычно отмечается на его шкале. Однако, чтобы удобнее было пользоваться прибором, его желательно устроить так, чтобы градуировка шкалы отвечала значениям индукций в стержнях из различного материала и различных сечений. Достигается это следующим путем: коль скоро отклонения рамки при одной и той же индукции в стержне должны быть одинаковы независимо от площади его сечения, сила вспомогательного тока в рамке, очевидно, должна быть для этого подобрана обратно пропорциональной сечению стержня, т. е.

$$i_s = \frac{\text{постоян. прибора}}{\text{пл. сечен. стержня}} = \frac{C}{q_{\text{см}^2}}.$$

При выполнении этого условия угол отклонения рамки прибора, равный

$$\alpha = \frac{i_s \Phi}{C} = \frac{C}{q} \cdot \frac{\Phi}{C} = \frac{\Phi}{q} = B,$$

будет пропорционален индукции. Другими словами, силу вспомогательного тока каждый раз надо подсчитывать, исходя из площади сечения испытуемого стержня по формуле

$$i_s = \frac{C}{q},$$

где C — постоянная прибора.

Для получения с помощью этого прибора кривых намагничивания испытуемых металлов необходимо для каждого значения подсчитывать по формуле $\frac{0,4\pi \cdot n \cdot I_n}{l}$, соответствующее ей значение намагничивающей силы H . Для упрощения этих

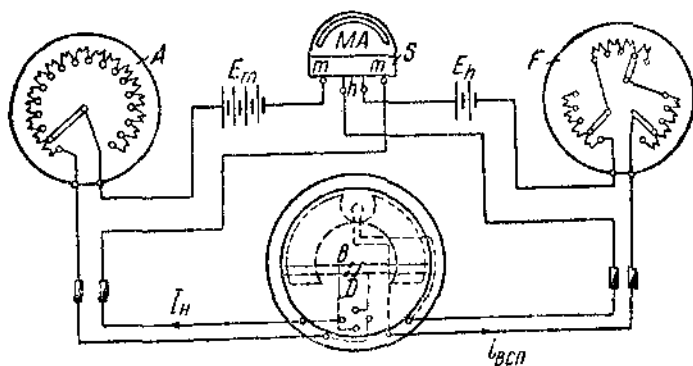


Рис. 387.

вычислений в аппарате Кепселя взято число витков намагничивающей катушки $n = 1000$, длина пути потока в испытуемом стержне $l = 4\pi = 12,56$ см. Тогда

$$H = \frac{4\pi}{10} \cdot \frac{I_n \cdot 1000}{4\pi} = 100 \cdot I_n,$$

где I_n — намагничивающая сила тока в амперах.

К аппарату прилагаются кривые сдвига, помощью которых можно значительно снизить ошибки, обусловленные влиянием переходных сопротивлений.

Аппарат Кепселя в исполнении фирмы Сименс монтируется на общей доске (рис. 386-а — схема, б — внутренний и в — внешний вид).

Буквою A на ней обозначен однорычажный реостат с 24 секциями, включенный в цепь намагничивающей катушки прибора. Сопротивления секций этого реостата подобраны с таким расчетом, чтобы при испытаниях получалось достаточное число точек, наиболее рельефно характеризующих вид кривой намагничивания. В качестве источника E_m , питающего намагничивающую цепь, надо брать 4-вольтовую аккумуляторную батарею, при каковых условиях можно получить $H = 150$ CGS.

В той же цепи находятся: переключатель D , позволяющий коммутировать направление намагничивающего тока I_n и 10-омный миллиамперметр MA с комбинированным шунтом S ,

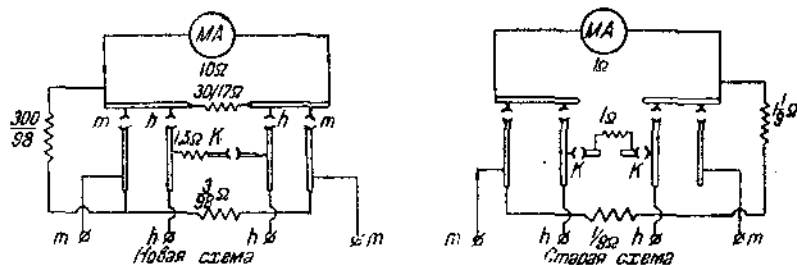


Рис. 388.

к зажимам m и m которого должна быть присоединена цепь намагничивающего тока. Цепь тока вспомогательного питается батареей E_h из трех сухих элементов (или 1—2 аккумуляторов) и содержит регулировочный 3-рычажный реостат F , позволяющий весьма тщательно отрегулировать силу тока. Последняя намеряется тем же миллиамперметром, если к зажимам h того же комбинированного шунта подведены провода этой цепи (рис. 388).

Комбинированный шунт позволяет использовать один и тот же 10-омный миллиамперметр для измерения как намагничивающего, так и вспомогательного токов. Вычислив до начала опыта силу вспомогательного тока по формуле $i_{всп} = \frac{C}{q_{ст}^2}$ или по прилагаемой к прибору таблице, вставляют штепселя в гнезда h и h комбинированного шунта и регулируют силу этого тока реостатом F . Постоянная миллиамперметра в этом случае равна 0,0002 А, а максимальный предел измерения им 0,03 А.

Сила вспомогательного тока при последующем снятии кривых намагничивания должна оставаться неизменной, что позво-

ают использовать тот же прибор и для измерения силы намагничивающего тока. Это достигается вставлением штепселя в гнездо шунта, помеченное буквою K и переносом штепселя из гнезд h и h в гнезда m и m . При этом цепь вспомогательного тока не прерывается, а остается замкнутой и при этом на сопротивление (1,5 ом) равновеликое тому сопротивлению, которое было в цепи вспомогательного тока до перевода штепселей в гнезда m и m .

Постоянная прибора в этом случае равна 0,01 А, а предел измерения им силы намагничивающего тока увеличивается до 1,5 А, чему соответствует $H_{\max} = 150$ CGS.

Если силу намагничивающего тока потребуется поднять выше 1,5 А, что необходимо при испытании твердых сортов стали, то вынимают штепсель из гнезда m , и тогда постоянная прибора станет равной 0,03 А, а предел измерения возрастет до 4,5 А, что будет соответствовать $H_{\max} = 450$ CGS.

К аппаратам Кепселя более старого типа прилагается одноомный миллиамперметр с несколько иным подбором величины сопротивлений отдельных частей комбинированного шунта (старая схема на рис. 388).

Перед работой на пермеамetre Кепселя необходимо ориентировать его относительно поля земли, дабы исключить влияние этого поля на показания прибора, а также удалить от него магнитные и железные массы, в том числе и миллиамперметр. Ориентировка достигается введением в цепь гальванометрической рамки источника E_k и таким размещением прибора, чтобы его стрелка указывала на 0 шкалы. Для предварительной ориентировки можно пользоваться стрелкой, начерченной на шкале прибора; она должна совпадать с направлением $S-N$ или $N-S$ поля земли. Некоторая неточность в ориентировке прибора может быть устранена, если исследовать оба возможных направления намагничивания, что, вообще говоря, желательно делать всегда, чтобы устранить влияние неравномерностей строения материала на вид его кривой намагничивания. В этом последнем случае кривая строится по данным для B , вычисленным как среднее арифметическое из парных наблюдений.

После ориентировки в прибор вставляется испытуемый стержень; последний готовится круглого (до 8 мм) или квадратного (5 мм) сечения и такой длины (около 27 см), чтобы концы его не выступали из ярма; последнее необходимо в целях уменьшения рассеяния. При испытаниях листового железа берут полоски шириною в 5 мм и собирают из них

пакет, который вкладывается в прибор так, чтобы поверхность полосок занимала горизонтальное положение.

Площадь сечения стержней определяется при помощи калибра (по результатам нескольких промеров вдоль длины стержня) или подсчитывается по весу стержня или его объему, если известен удельный вес материала.

Зажав пробный стержень в приборе, необходимо убедиться, не был ли стержень предварительно намагничен. Для этого замыкают цепь вспомогательного тока, и если вслед за этим наблюдается отклонение стрелки пермеаметра, то стержень необходимо размагнитить. Для этого замыкают цепь намагничивающего тока и коммутируют его по направлению (при помощи переключателя D), уменьшая в то же время его силу до минимума, для чего переводят рычаг реостата A по направлению часовой стрелки. Перемагничивание производят до тех пор, пока при разомкнутом переключателе D (рукоятка на 0): стрелка прибора не укажет $B=0$ или, по крайней мере, не расположится вблизи 0 шкалы.

Только после этого можно приступить к испытанию стержня, которое производится в таком порядке:

а) Проверяют силу вспомогательного тока и, если нужно, регулируют ее при помощи реостата F .

б) Переключатель D ставят в нулевое положение, при котором цепь намагничивающего тока разомкнута.

в) Рукоятку однорычажного реостата переводят на контакт 24 (максимальное сопротивление).

г) Миллиамперметр вводят в цепь намагничивающего тока, не размыкая цепи тока вспомогательного.

д) Рукоятку переключателя D ставят в правое положение (+) и отсчитывают показание стрелки прибора (первый отсчет для построения основной кривой намагничения).

е) Переводят затем рукоятку однорычажного реостата последовательно на контакты 23, 22, 21 и т. д. и отсчитывают одновременно ряд значений B и H (по показаниям пермеаметра и миллиамперметра).

Значения B и H , необходимые для построения циклической кривой, получают подобным же образом, начиная с $H_{\max}$, достигнутого при первом основном намагничении. Для этого рукоятку однорычажного реостата переводят с кнопки на кнопку, но в обратном направлении, и отсчитывают соответствующие значения B и H . Дойдя до кнопки 24, размыкают цепь намагничивающего тока, переводя для этого переключатель D в нулевое положение. Вслед за этим удобно прове-

рить, не изменилась ли сила вспомогательного тока, для чего вводят в цепь этого тока миллиамперметр (вынуть штепселя из гнезд между пластинами m и m , вставить их в гнезда между пластинами h и h , а затем вынуть штепсель из гнезда K). Если вспомогательный ток изменился, то опыт необходимо начать вновь, озабочившись подысканием источника E_h с как можно более постоянной э.д.с.

Проверив вспомогательный ток и вновь введя миллиамперметр в цепь намагничивающего тока, ставят переключатель D в левое положение и производят, как и раньше, ряд наблюдений, но уже при постепенно возрастающей силе тока (обратного направления).

Получив значения для $-B_{\max}$ и $-H_{\max}$ (равное по абсолютной величине $+H$), уменьшают намагничивающий ток до нуля, переводя для этого, как и раньше, рычаг реостата последовательно с одной кнопки на соседнюю. Разомкнув после этого цепь намагничивающего тока и проверив постоянство силы вспомогательного тока, переводят рукоятку переключателя D вновь в правое положение и определяют данные для построения последней части восходящей кривой цикла.

Для получения более точных результатов рекомендуется перед отсчетом показаний, необходимых для построения циклической кривой, несколько раз описать кривую данного цикла полностью между точками, соответствующими $+H_{\max}$ и $-H_{\max}$. Это достигается предварительным и повторным коммутированием тока при помощи переключателя D в пределах $+H_{\max}$ до $-H_{\max}$ и обратно. Во время всего опыта намагничивающий ток отнюдь не должен прерываться или возвращаться к уже пройденным значениям (конечно, в пределах каждой четвертой части циклической кривой). Построив по данным опыта кривую цикла в общепринятом масштабе (обычно для $H=1$ эрстед $=1$ мм и для $B=100$ гауссов $=1-2$ мм) и спланиметрировав площадь петли в см^2 , нетрудно вычислить по нижеприведенным формулам работу, затрачиваемую на гистерезис, а также коэффициент Штейнметца (см. параграф 65).

Для более удобного снятия кривых намагничивания на шкале прибора указаны положительные (+) и отрицательные (—) значения B ; подобные же знаки поставлены и на переключателе D , а поэтому всегда можно собрать схему так, чтобы + индукции совпадал с положительным направлением поля. Это достигается соответствующим соединением проводов с зажимами прибора, обозначенными буквами m и h .

Описанному аппарату присущи следующие недостатки. При выводе основных соотношений между намагничивающей силой и значениями индукции в испытуемом образце не принимались во внимание переходные магнитные сопротивления между образцом, вкладышами и ярмом. Кроме того не учитывалось намагничение самого ярма, рассеяние, размагничивающее влияние отдельных частей магнитопровода аппарата и, наконец, влияние компенсационных обмоток. Все это обуславливает сравнительно небольшую точность результатов (обычно не выше 6—8%).

Точность может быть повышена до 4—5%, если в результаты опыта ввести поправки, пользуясь кривыми среза (сдвига).

С чисто практической точки зрения, аппарат Кепселя также мало удовлетворителен, ибо он рассчитан на испытание образцов столь малого сечения, какое обычно в готовых изделиях не употребляется. Между тем магнитные свойства металла, особенно подвергающегося термической обработке, зависят от площади сечения. Эти недостатки учтены в недавно появившемся приборе фирмы Гартман и Браун, построенном на том же принципе, что и аппарат Кепселя, но отличающемся от него следующим: испытуемый образец длиной 100 мм при относительно больших пределах сечения, до 3 см², намагничивается до насыщения при помощи специального соленоида и затем, будучи вложен внутрь намагничивающей катушки прибора, вместе с нею вставляется в прибор. Если вслед за этим через обмотку гальванометрической рамки (такой же, как у аппарата Кепселя) пропустить вспомогательный ток, то рамка отклонится на некоторый угол, пропорциональный остаточному намагничению образца. Для последующего определения величины размагничивающей (коэрцитивной) силы, через обмотку намагничивающей катушки пропускают ток такого направления, чтобы образец размагничивался. Постепенно увеличивая силу размагничивающего тока, доводят его до величины, при которой стрелка прибора, скрепленная с гальванометрической рамкой, не установится на нулевом делении шкалы прибора. Сила размагничивающего тока, умноженная на коэффициент, зависящий от данных прибора, дает непосредственно величину коэрцитивной силы H_c .

К прибору прилагаются кривые среза, имеющие вид прямой линии с углом наклона к оси индукций, зависящим только от сечения образца, а не от материала, из коего последний изготовлен.

Наконец, в самое последнее время фирма Бош изготовила новый прибор, дающий значительно более точные результаты (до 1,5% а при благоприятных условиях даже до 0,5%). Идея его устройства вкратце сводится к следующему. Как известно, намагничивающее поле катушки, внутри которой находится образец, располагается параллельно длине последнего и имеет как в самом образце, так и в прилегающем к нему слое воздуха одинаковую величину. Поэтому если снаружи и вблизи

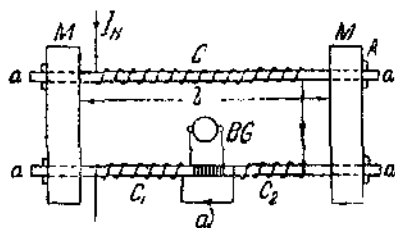


Рис. 389-а.

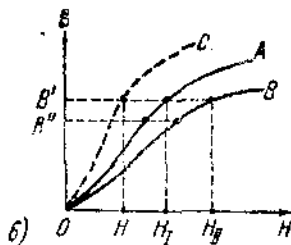


Рис. 389-б.

образца, вложенного внутрь намагничивающей катушки прибора (подобного прибору Кепселя), подвесить маленькую магнитную стрелку, то последняя при наличии намагничивающего поля расположится своей осью вдоль оси образца. Если же намагничивающую силу снизить до нуля, то магнитная стрелка установится своей осью перпендикулярно оси образца, и в то же время стрелка прибора, скрепленная с гальванометрической рамкой, укажет по шкале величину остаточной индукции в образце. Прибор позволяет снимать кривые намагничивания, а также испытывать постоянные магниты и по данным заводской лаборатории завода Бош дает весьма большую точность (порядка 0,2—0,3%).

б) Способ Юнига. Прибор, предложенный Юнигом (рис. 389-а), состоит из двух массивных брусков MM из мягкого железа, через отверстия в которых пропускаются два одинаковых по размерам стержня $a-a$ из испытуемого материала. Стержни эти, при посредстве особых вкладышей, зажимаются в отверстиях брусков. На них предварительно надеваются 3 намагничивающих катушки C , C_1 и C_2 , из коих первая имеет в 2 раза большее число витков, чем каждая из последних.

Прибор вводят в цепь намагничивающего тока, силу его регулируют и, как описано в § 64, снимают опытным путем основную (или циклическую) кривую намагничивания.

До начала опыта испытуемые образцы надо размагнитить, пропуская, например, по намагничивающим обмоткам уменьшающийся по силе переменный ток. Затем снимают катушку C , взамен ее надевают катушку C_1 , сдвигают бруски MM на половину длины стержней $a-a$ (дабы число витков обмотки на 1 лог. см длины стержней оставалось неизменным) и вновь снимают кривую намагничения.

Намагничивающие ампер-витки в этом приборе служат двойкой цели: во-первых, образованию потока в исследуемых стержнях и брусках и, во-вторых, преодолению переходных магнитных сопротивлений между ними.

Пусть для создания в стержнях определенной индукции B мы в первом случае затратили намагничивающую силу

$$H_1 = \frac{0,4 \pi \cdot n \cdot 2 \cdot I}{2l},$$

а во втором

$$H_{II} = \frac{0,4 \pi n \cdot I}{l},$$

где l — длина пути силовых линий в стержнях. Если положить, что переходные магнитные сопротивления в обоих этих случаях одинаковы по абсолютной своей величине, то все же их относительное влияние во втором случае больше, нежели в первом, благодаря меньшей длине магнитопровода.

Отсюда явствует, что для получения одной и той же индукции B' (рис. 389-б) во втором случае приходится затратить относительно большую намагничивающую силу $H_{II} > H_1$.

Другими словами, опытная кривая намагничения для второго случая OB располагается вся ниже кривой OA для первого случая. Истинная же кривая намагничения OC , т. е. кривая для случая отсутствия переходных магнитных сопротивлений, располагается, очевидно, выше опытной кривой OA , и притом настолько же выше, насколько кривая OA выше кривой OB (конечно, если магнитные переходные сопротивления в обоих случаях одинаковы по своей абсолютной величине).

Таким образом, для получения точек, отвечающих истинной кривой намагничения, надо для каждого значения индукции (B' , B'' и т. д.), вычесть из абсцисс кривой OB абсциссы кривой OA .

Для упрощения подсчета напряженности поля намагничивающих катушек последние конструируются так, чтобы

$l = 4\pi$ см при n — витках во всех трех катушках, и $l' = 2\pi$ см при $\frac{n}{2}$ витках в двух коротких катушках. Тогда

$$H_1 = \frac{0,4\pi \cdot 2 \cdot n \cdot I}{2l} = \frac{0,4\pi \cdot 2 \cdot n \cdot I}{4\pi \cdot 2} = \\ = \frac{4\pi \cdot 2 \cdot n \cdot I}{2 \cdot 4\pi 10} = \frac{n \cdot I}{10}$$

и

$$H_{II} = \frac{0,4\pi \frac{n}{2} \cdot I}{l'} = \frac{4\pi \cdot n \cdot I}{10 \cdot 2\pi \cdot 2} = \frac{n \cdot I}{10}.$$

В качестве гальванометра удобно воспользоваться флюксометром, проградуировав его предварительно на магнитный поток, как это было описано выше.

в) Отрывной пермеаметр Томсона. Измерение индукции может быть осуществлено также путем измерения того отрывного усилия, которое надо затратить, чтобы испытуемый намагниченный образец ab оторвать от некоторой железной поверхности MM (рис. 390, где схематически представлен один из применяемых для этой цели приборов).

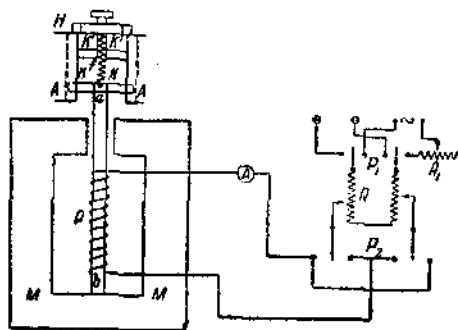


Рис. 390.

Нижний отполированный конец b испытуемого образца ab прикасается к отполированной поверхности массивной железной рамы M . Верхний конец бруска снабжен приливами (ползунками) kk , которые в момент отрыва бруска от рамы могут скользить внутри пазов упора A .

Отрывание образца от рамы происходит под влиянием пружины f , соединенной с крутильной головкой H ; последняя снабжена указателем, передвигающимся по шкале прибора, на которой наносятся величины натяжения пружины. Сила притяжения бруска обуславливается, как известно, величиной индукции B в нем, создаваемой намагничивающей катушкой P , и зависит от площади сечения s .

Она может быть выражена через

$$F = \frac{B^2 \cdot s}{8\pi} \text{ дин,}$$

если s дано в квадратных сантиметрах.

Допустим, что отрывное усилие выражается некоторым весом p в граммах; тогда

$$F = 981 p,$$

$$B = \sqrt{\frac{8\pi \cdot p \cdot 981}{s}} \dots \dots \dots (A)$$

Зная число витков n и длину l намагничивающей катушки, имеем

$$H = \frac{0,4\pi \cdot n \cdot I}{l},$$

но так как

$$B = \mu \cdot H,$$

то

$$F = \frac{\mu^2 H^2 \cdot s}{8\pi},$$

откуда

$$\mu = \sqrt{\frac{8\pi \cdot p \cdot 981}{H^2 \cdot s}} \dots \dots \dots (B)$$

Таким образом, прибор позволяет определить не только индукцию B , но и магнитную проницаемость μ .

Вычислив по данным прибора постоянные коэффициенты, входящие в выражения (A) и (B) и обозначив их через C_1 и C_2 , получим

$$B = C_1 \sqrt{p} \dots \dots \dots (A)$$

$$\mu = C_2 \frac{\sqrt{p}}{1} \dots \dots \dots (B)$$

Для определения истинных значений μ , отвечающих определенным значениям B , необходимо, очевидно, измерить отрывные усилия, соответствующие совершенно определенным значениям B , т. е. соответствующие точкам основной кривой намагничения, для каковой только и имеет место выражение

$$B = \mu H.$$

Действительно, если бы мы определяли μ для точек e , h исходящей ветви цикла, изображенного на рис. 391, то получили бы

$$\text{для точки } e \dots \mu = \frac{B}{H} = \frac{B}{0} = \infty$$

$$\text{для точки } h \dots \mu = \frac{B}{H} = \frac{0}{H} = 0.$$

Поэтому необходимо предварительно путем измерения отрывных усилий определить основную кривую $Oabc$ намагничивания, а затем уже, и только для определенных точек ae , вычислить значения магнитной проницаемости. Основную же кривую намагничивания надо снимать, начиная с небольших значений намагничивания и кончая максимальным, и определяя для каждого из них величину отрывного усилия. При этом необходимо иметь в виду, что после каждого отрывания индукция в исследуемом образце не исчезает нацело, и последующее намагничение заставит образец уже отчасти намагниченным. Отрывные усилия при этих условиях уже не отвечают основной кривой намагничивания, а какой то другой кривой, занимающей промежуточное положение между кривыми $Oabc$ и ceh .

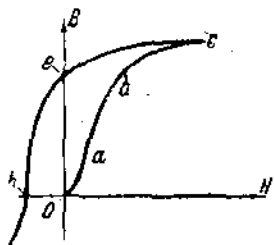


Рис. 391.

Отсюда явствует, что испытуемый образец перед каждой новой пробой отрывного усилия должен быть предварительно размагничен, и притом по методу циклического размагничения, что на практике можно выполнить двояким способом:

- 1) уменьшая постепенно силу намагничивающего тока и для каждого его значения коммутируя направление тока при помощи реостата и переключателя, или же
- 2) присоединяя намагничивающуюся цепь к источнику переменного тока и уменьшая постепенно его силу.

В обоих случаях площадь, ограниченная циклической кривой, по мере уменьшения силы тока уменьшается, благодаря чему уменьшается и остаточное намагничение.

г) Прибор Бруггера состоит (рис. 392) из двух основных частей: а) прибора для намагничивания испытуемых образцов с приспособлением для регулировки силы намагничивающего тока, и б) мостика для измерения сопротивления

висмутовой спирали, т. е. определения H и B с дополнительным приспособлением для быстрого введения поправки на температуру во время опыта (если последняя отличается от 20°C).

Первая часть прибора состоит из массивного ярма M из мягкого железа с прорезями для вставления в них испытуемого образца в виде двух стержней a , а цилиндрической

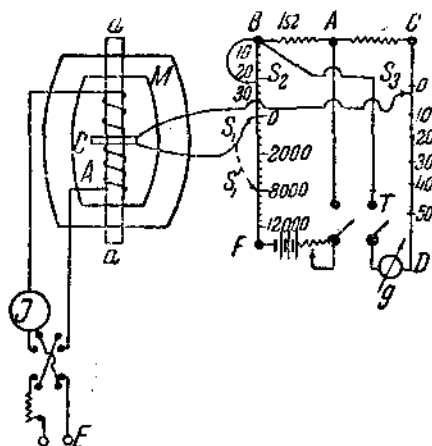


Рис. 392.

формы, между торцами которых размещается висмутовая спираль C , и намагничивающей катушки A , питаемой через коммутатор от источника тока E . В цепи последнего находятся регулировочный реостат, рубильник и амперметр I .

Вторая часть прибора представляет собою мостик Витстона, плечи которого образованы калиброванными проволоками CD и BF , сопротивлением $AB = 1 \Omega$ и висмутовой спиралью C .

Все составные части прибора смонтированы на общей доске.

Висмутовая спираль при посредстве подвижных контактов S_1 и S_2 вводится в схему мостика как четвертое (неизвестное) плечо. Под проволокой BF расположена шкала с двумя группами делений: от 10 до 30 и от 0 до 12000.

Когда контакт S_1 стоит на 0 шкалы, а S_2 — на делении 20 (температура градуировки висмутовой спирали), то часть BS_1 проволоки имеет сопротивление в 1 ом.

Сопротивление плеча AS_2 есть величина переменная в зависимости от положения контакта S_2 и для равновесия мостика (при указанных выше положениях подвижных контактов S_1 на 0 и S_2 на 20) величина этого сопротивления равна

$$r_0 = \frac{r_t}{1 + 0,014(t - t_0)},$$

где r_0 — сопротивление висмутовой спирали при $t_0 = 20^\circ\text{C}$ (температура ее градуировки), t — температура во время опыта.

На шкале 0 — 12000 нанесены деления, соответствующие значениям магнитной индукции в испытуемых стержнях. Прибор

читается током от батареи в 8 вольт. Работа на приборе сводится к следующему: определение температуры t висмутовой спирали; установка мостика соответственно найденной температуре; исследование образцов.

а) Определение температуры. Образец вынимают из ярма M , контакт S_1 ставят на O шкалы, контакт S_2 — на деление 20, замыкают ключ T и, передвигая контакт S_3 , добиваются равновесия мостика. Искомая температура t отсчитывается по шкале CD .

б) Установка мостика соответственно найденной температуре t . Контакт S_1 оставляют на O шкалы, контакт S_2 устанавливают соответственно найденной температуре спирали, а контакт S_3 перемещают вдоль калиброванной проволоки до тех пор, пока мостик вновь не уравнивается. Тогда сопротивление отрезка $S_1 - S_2$ проволоки будет равно величине

$$1 + 0,014(t - t_0),$$

а сопротивление плеча AS_2 будет определяться из выражения

$$r_0 = \frac{r_t}{1 + 0,014(t - t_0)}.$$

γ) Исследование образца. Испытуемые стержни надо предварительно размагнитить. Затем их вставляют в отверстия ярма до отказа (осторожно, чтобы не испортить весьма хрупкую висмутовую спираль) и прижимают особыми пружинами (на рисунке не показанными).

Замкнув цепь тока в намагничивающей катушке, мы тем самым создаем некоторой величины магнитное поле, под влиянием которого сопротивление спирали изменяется, и равновесие мостика нарушается. Для восстановления равновесия передвигают, на сколько потребуется, контакт S_1 вправо от O шкалы и в момент равновесия мостика отсчитывают величину индукции B в стержнях непосредственно по шкале OF , а напряженность поля H по шкале амперметра.

Если в момент равновесия контакт S_1 пришлось передвинуть в положение S_1' , то сопротивление отрезка $O - S_1'$ калиброванной проволоки соответствует относительному изменению сопротивления спирали и определяется выражением

$$Z = \frac{R_1 - R_0}{R_0} \{ 1 + 0,014(t - t_0) \}.$$

Увеличивая постепенно силу намагничивающего тока и каждый раз уравнивая мостик, можно получить ряд значений для I , B и H . По этим данным нетрудно построить как основную, так и циклическую кривые намагничения, а также кривую изменения коэффициента магнитной проницаемости.

Снимая кривые намагничения, необходимо изменять силу намагничивающего тока в одном направлении, не возвращаясь к уже пройденным его значениям.

Перед испытанием каждого нового образца (в случае массовых испытаний) надо делать проверку температуры спирали.

К прибору прилагаются кривые „сдвига“ для учета той части намагничивающей силы, которая расходуется на преодоление переходных магнитных сопротивлений. При мало ответственных измерениях этими кривыми обычно не пользуются, так как поперечное сечение испытуемых образцов в приборе составляет меньше 10% поперечного сечения ярма.

§ 65. Определение потерь в магнитных материалах.

1) Потери на гистерезис. Площадь циклической кривой намагничения позволяет вычислить потерю энергии в эргах на гистерезис в одном куб. см испытуемого металла за один полный цикл его перемагничивания.

Зависимость эта выражается формулой

$$W_{\text{эрг}} = \frac{1}{4\pi} \int_{-B_{\text{max}}}^{+B_{\text{max}}} H \cdot dB, \dots \dots \dots (\text{См. приложение 1})$$

где

$$\int_{-B_{\text{max}}}^{+B_{\text{max}}} H \cdot dB$$

есть площадь в кв. см, ограниченная циклической кривой и умноженная на числовой коэффициент, зависящий от масштаба ее абсцисс и ординат. Например, при вычерчивании циклической кривой нами для абсцисс принят масштаб 1 см = μ_1 эрстедов, а для ординат 1 см = μ_2 гауссов. Тогда

затраченная на один цикл перемагничивания одного куб. см металла энергия в эргах равна

$$W = \frac{1}{4\pi} \int_{-B_{\max}}^{+B_{\max}} H \cdot dB = \frac{1}{4\pi} S \cdot n_1 \cdot n_2,$$

где S — площадь циклической кривой в кв. сантиметрах.

Пример. Опытная кривая цикла вычерчена в таком масштабе, что 1000 гауссов магнитной индукции и 10 эрстед напряжения поля соответствуют 1 см. Площадь циклической кривой, после проверки ее помощью планиметра, оказалась равной $S = 36,04$ кв. см. Найти потерю энергии на перемагничивание одного куб. см металла за один цикл.

$$\begin{aligned} \text{Решение. } W &= \frac{1}{4\pi} \int_{-B_{\max}}^{+B_{\max}} H \cdot dB = \frac{1}{4\pi} \cdot S \cdot n_1 n_2 = \\ &= \frac{1}{12,56} \cdot 36,04 \cdot 1000 \cdot 10 = \approx 28700 \text{ эргов.} \end{aligned}$$

В результате ряда попыток выявить аналитически потерю энергии на гистерезис было предложено несколько эмпирических формул. Из них наибольшим распространением пользуется формула Штейнметца, дающая удовлетворительные результаты для индукций от 8000 до 24000 гаусс.

Она учитывает потерю энергии в эргах за одно перемагничивание 1 куб. см данного материала в зависимости от максимального значения индукции, допущенной во время опыта и выражается так

$$W = \eta B_{\max}^{1,6} \text{ эрг,}$$

где η — так называемый коэффициент Штейнметца, зависящий от сорта и способа обработки материала и колеблющийся между значениями 0,0010 — 0,039 (См. приложение II).

Мощность в ваттах, расходуемая в V куб. см материала, при частоте перемагничивания f раз в секунду, вычисляется по формуле

$$P = \eta \cdot f \cdot B_{\max}^{1,6} \cdot V \cdot 10^{-7} \text{ ватт.}$$

Если, как это часто требуется, потери определяются не на единицу объема, а на килограмм веса данного материала, то предыдущая формула принимает вид

$$P_{kg} = \frac{\eta \cdot B_{\max}^{1,6}}{\delta \cdot 10^4} \text{ ватт,}$$

где δ — удельный вес материала, равный для железа и стали 7,77.

Тогда
$$P = \frac{\eta \cdot B_{\max}^{1,6}}{7,77 \cdot 10^4} \text{ ватт} \dots (\text{См. прилож. III})$$

Пример. Найти для приведенного в предыдущем примере сорта железа потерю энергии при перемагничивании 1 кг его веса за 50 полных циклов и коэффициент Штейнметца, если $B_{\max} = 15000$ гауссов.

Решение. 1 кг железа занимает объем в $\frac{1000}{7,77} = 128,7$ куб. см, следовательно,

$$A = 28700 \cdot 50 \cdot 128,7 = 18,5 \cdot 10^7 \text{ аргов}$$

$$\eta = \frac{28700}{15000^{1,6}} = 0,006.$$

Примечание. В пункте IV приложения приведена таблица, характеризующая магнитные свойства различных сортов железа и стали.

2) Потери в железе и их определение. При динамическом перемагничивании железа в цепях переменного тока потеря энергии обуславливается не только потерями на гистерезис, но также и потерями на токи Фуко. Совокупность их называют „потерями в железе“ и определяют не по площади циклической кривой намагничивания, поскольку последняя позволяет вычислять только потери на гистерезис, а иными способами.

Из них наиболее простым является метод ваттметра, позволяющий определить сумму потерь на гистерезис и токи Фуко, а затем их разделить графическим способом. Для приближенного суждения о потерях только на гистерезис служат особые приборы, называемые гистерезисометрами.

а) Метод ваттметра для измерения потерь в железе основан на непосредственном измерении мощности, расходуемой на перемагничивание железа; опыт выполняется по схеме рис. 393, где B — испытуемый образец в виде четырех пакетов из листового материала, сложенных в притык с навитой

на него намагничивающей обмоткой; P —ваттметр, V —вольтметр, A —амперметр, источник переменного тока и F —частотометр.

Вся мощность, учитываемая ваттметром, складывается из мощности, затрачиваемой на потери в железе и мощности, расходуемой на нагрев тонких обмоток ваттметра и вольтметра, а также намагничивающей обмотки, т. е.

$$P = P_{\text{ж}} + \frac{U^2}{r_V} + \frac{U^2}{r_P} + I^2 R$$

или

$$P_{\text{ж}} = P - \left(\frac{U^2}{r_V} + \frac{U^2}{r_P} + I^2 R \right),$$

где r_V , r_P и R — сопротивления обмоток вольтметра, тонкой обмотки ваттметра и намагничивающей обмотки прибора.

Определяемую этим путем мощность на гистерезис и токи Фуко принято относить к 1 кг веса испытуемого материала при данной частоте f намагничивающего тока и различных значениях магнитной индукции в материале. Для этого задаются значениями B (в пределах от 6000 до 16000) и f (в пределах от 20 до 60) и подсчитывают то действующее напряжение U , которое необходимо подвести к зажимам a и b прибора, дабы получить индукцию обусловленной величины.

Величина этого действующего напряжения подсчитывается по формуле

$$U = \alpha 4 f n B S \cdot 10^8 \text{ вольт,}$$

где α —коэффициент формы кривой переменного тока, выражающий зависимость между величинами действующего U и среднего $U_{\text{ср}}$ напряжений, равный для синусоидального тока

$$\alpha = \frac{U}{U_{\text{ср}}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,117 \dots \text{ (См. приложение V).}$$

Произведя опыт для различных значений B и f , вычисляют соответствующие им величины потерь в железе и строят кривые (рис. 394).

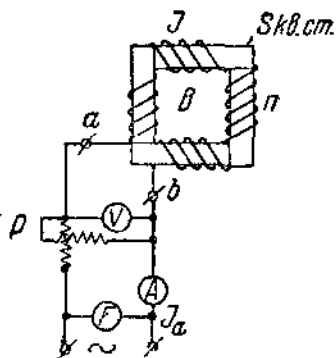


Рис. 393.

б) **Разделение потерь.** Попутно с определением суммы потерь в железе нетрудно их разделить и на составляющие, т. е., на потери P_r вследствие гистерезиса и на потери P_ϕ вследствие токов Фуко.

По исследованиям Штейнметца потери эти могут быть представлены как

$$P_r = \eta \cdot f \cdot B_{\max}^{1,6} V \cdot 10^{-7} \text{ ватт}$$

$$P_\phi = \sigma \cdot \frac{V}{\rho} (\Delta f B_{\max})^2 10^{-7} \text{ ватт.}$$

Здесь f — частота тока; V — объем материала в куб. см, Δ — толщина материала в мм; ρ — удельное сопротивление (для железа $\cong 0,13$), а η и σ коэффициенты Штейнметца, характеризующие материал с точки зрения потерь в нем на гистерезис и токи Фуко. Значения η даны в приложении, а σ колеблется в пределах от $0,2 \cdot 10^{-6}$ до $0,3 \cdot 10^{-5}$.

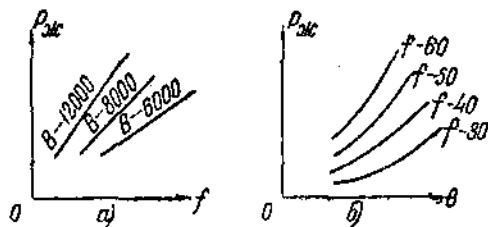


Рис. 394.

Если через α обозначим потери на гистерезис за один цикл намагничивания, а через β — потери на токи Фуко за один период, то

$$\frac{P_N}{f} = \frac{P_r + P_\phi}{f} = \eta B_{\max}^{1,6} \cdot V \cdot 10^{-7} + \sigma f \cdot \Delta^2 B_{\max}^2 V \cdot 10^{-7} = \alpha + \beta \cdot f.$$

Таким образом, суммарные потери в железе, отнесенные к одному периоду намагничивающего тока, и как функция частоты f тока, представятся на графике рис. 395-а в виде прямой а б.

Проведя из точки а прямую ас параллельную оси абсцисс, мы разделим ее ординату любой точки прямой а б на составляющие

$$\frac{P_r}{f} \text{ и } \frac{P_\phi}{f}.$$

Отрезок Oa , отсекаемый наклонной прямой на оси ординат, даст потери на гистерезис при данном B на один цикл перемагничивания, т. е. величину α . Для подсчета тех же потерь при заданной частоте перемагничивания, например, f , надо увеличить α в f раз, т. е. $P_r = \alpha f$.

Определив таким способом сумму потерь $P_r + P_\phi$ и вычтя из нее P_r , мы получим потери на токи Фуко как $P_\phi = P_{r\phi} - P_r$. По полученным данным нетрудно вычислить, а затем и построить кривые потерь в отдельности, как это изображено на графике рис. 395-6.

Практическое применение метода ваттметра осуществляется на аппарате Эпштейна и сводится к следующему.

Из испытуемого листового железа нарезаются полоски длиной 50 см, шириною 3 см, из них составляются 4 па-

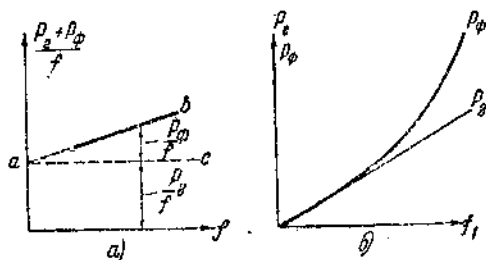


Рис. 395.

кета с прослойками из тонкой японской бумаги между смежными пластинками. Пакеты обвиваются изоляционной лентой, вставляются в гильзы с навитой на них намагничивающей обмоткой и вкладываются в раму прибора, где и зажимаются особыми вкладышами. Обмотки всех четырех намагничивающих катушек соединяются так, чтобы намагничивание всех пакетов было согласным.

Прибор снабжен преобразователем, допускающим широкую регулировку числа периодов и напряжения переменного тока, от которого питаются намагничивающие обмотки. Схема опыта представлена на рис. 393, а внешний вид прибора—на рис. 396.

Самый опыт ведут, как описано выше, задавшись предварительно несколькими значениями индукции B (обычно в пределах от 6000 до 14000) и частоты тока f (в пределах от 20 до 60) и вычислив по формуле $U = \alpha 4 \cdot f \cdot N \cdot B \cdot S \cdot 10^{-8}$ те действующие значения напряжения на зажимах прибора, которые необходимы для получения намагничивающих токов, достаточных для создания в образце заданных индукций

$$B = \frac{\Phi}{S}.$$

Регулируя затем возбуждение машины и число оборотов ее якоря, снимают одновременно показания с ваттметра, амперметра и вольтметра и вычисляют сумму потерь в железе на один килограмм его веса G , т. е.

$$\frac{P_{\text{ж}}}{G} = \frac{P_{\text{с}} + P_{\text{ф}}}{G}.$$

По этим данным строят кривые, как на черт. 394, а затем графически делают эти суммарные потери на составляющие, т. е. на потери от гистерезиса и от токов Фуко.

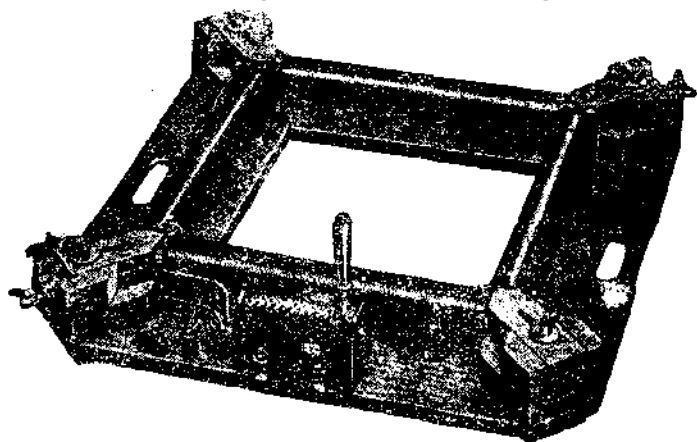


Рис. 396. Прибор Эпштейна.

Более современные типы аппаратов системы Эпштейна снабжаются не одной, а двумя намагничивающими обмотками: толстой R и тонкой r (рис. 397) с одинаковым числом витков. Эта система обладает тем преимуществом, что вольтметровая обмотка ваттметра и вольтметр подключаются к зажимам тонкой намагничивающей катушки, почему потери на нагрев

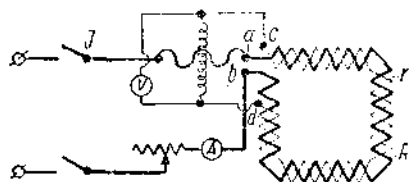


Рис. 397.

первичной намагничивающей обмотки автоматически исключаются. Действительно, при равенстве числа витков в обеих намагничивающих обмотках и ничтожно малом падении напряжения в тонкой намагничивающей обмотке (включенной только на вольт-

метр и тонкую обмотку ваттметра), можно положить, что индуктируемая в ней э.д.с. E равна той противоэлектродвижущей силе, которая возникает в толстой намагничивающей обмотке, подключенной к напряжению U , т.е. $E = U - I_z$, где z — полное сопротивление толстой намагничивающей обмотки.

Так как при этой схеме напряжение на зажимах вольтметровой обмотки ваттметра равно, не U , а E , то ваттметр учитывает мощность меньшую, нежели при работе по схеме 393, на величину

$$(U - E) I \cdot \cos \varphi = e \cdot I \cos \varphi,$$

где e — падению напряжения в толстой намагничивающей обмотке. Но так как $e \cdot \cos \varphi = I \cdot R$, то $(U - E) I \cdot \cos \varphi = I^2 R$ и, следовательно, ваттметр

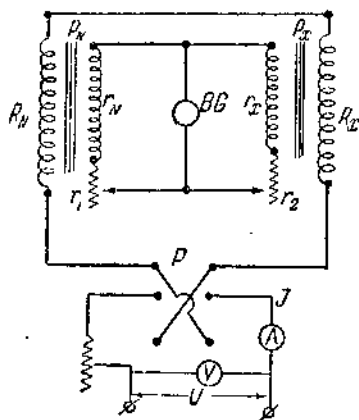


Рис. 398-а.

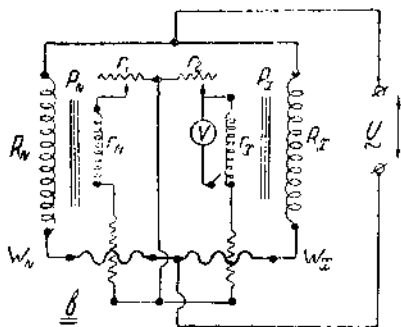


Рис. 398-б.

при работе по схеме рис. 397 не учитывает мощности, расходуемой в толстой намагничивающей обмотке прибора.

Если толстая и тонкая намагничивающие обмотки имеют разное число витков, соответственно n_J и n_V , то показания ваттметра надо приводить к числу витков толстой обмотки, т.е. умножать их на отношение $\frac{n_J}{n_V}$.

γ) Дифференциальный метод. Наконец, в самые последние годы в практику вошел дифференциальный аппарат Эпштейна, весьма удобный при массовых испытаниях железа на потери.

Он состоит из двух аппаратов Эпштейна с двумя намагничивающими обмотками на каждом (схема и внешний вид на рис. 398).

В одном аппарате заключаются четыре пакета P_N нормального (эталонированного) железа, а в другом пакеты P_X из испытуемого железа (обозначения обмоток: R_N, R_X, r_N, r_X — сечений пакетов E_N, E_X). Последовательно с тонкими намагничивающими обмотками r_N и r_X включены регулировочные сопротивления r_1 и r_2 .

Определение индукции B_X на этом аппарате сводится к следующему: в момент коммутирования переключа-



Рис. 398-в. Общий вид установки дифференциального прибора Эпштейна.

телем P намагничивающего тока I (после предварительного подсчета и установления величины напряжения U цепи) в тонких обмотках прибора индуктируются э.д.с. Если эти последние не равны друг другу, то гальванометр BG даст некоторой величины баллистическое отклонение α . Тогда регулируют сопротивление r_2 так, чтобы при повторном коммутировании намагничивающего тока гальванометр не давал никакого отклонения. Если число витков обмоток на обоих приборах одинаково, то, исходя из пропорциональности между индуктируе-

мыми а.д.с. и магнитными потоками в пакетах, мы можем написать:

$$\frac{E_N}{E_X} = \frac{B_N \cdot F_N}{B_X \cdot F_X} = \frac{r_1}{r_2},$$

где B_N и B_X — магнитные индукции, а F_N и F_X — сечения пакетов.

Отсюда

$$B_X = \frac{B_N \cdot r_2}{r_1} \cdot \frac{F_N}{F_X}$$

а если $F_N = F_X$, то

$$B_X = B_N \cdot \frac{r_2}{r_1}.$$

Поскольку железо нормального пакета эталонировано заранее, искомое B_X определяется непосредственно по величине отношения $\frac{r_2}{r_1}$. Установка сконструирована так, что отсчет силы намагничивающего тока по амперметру дает непосредственно величину намагничивающих ампер-витков на погонный см длины испытуемого пакета, а отсчет по калиброванному реостату r_X прямо указывает величину B_X .

Определение потерь в железе осуществляется на том же аппарате по методу ваттметра. Последний представляет собою по существу два ваттметра, соединенные дифференциально в одном приборе. Схема включения аппарата показана на рис. 398-б, где приняты обозначения рис. 398-а, а буквами W_N и W_X отмечены две системы дифференциального ваттметра, учитывающие порознь потери в пакетах P_N и P_X . Если эти потери одинаковы, а сопротивления r_1 и r_2 равны друг другу, то дифференциальный ваттметр никакого отклонения не дает.

При равенстве сопротивлений r_1 и r_2 и наличии отклонения стрелки ваттметра потери в нормальном и пробном пакетах, очевидно, не равны. Тогда изменяют отношения $\frac{r_1}{r_2}$ так, чтобы ваттметр не давал отклонения, увеличивая одно из сопротивлений r_1 или r_2 , смотря по тому, какая из систем ваттметра, W_X или W_N , действует сильнее.

В момент равновесия имеем

$$\frac{W_X}{W_N} = \frac{r_2}{r_1}$$

или

$$W_X = \frac{r_2}{r_1} W_N.$$

Если потери W_N в нормальной пробе известны, то нетрудно вычислить потери W_X в испытуемом образце железа.

В аппарате эти последние отсчитываются непосредственно по градуированному сопротивлению r_2 .

Величина потерь обычно определяется для индукций в 10000 и 15000 гауссов, для чего необходимо предварительно подсчитать величину того напряжения U , которое должно быть подведено к зажимам аппарата.

Метод Эпштейна является наиболее простым и точным, а поэтому в заводской практике пользуются почти исключительно им.

3) Технический гистерезисометр.

Для быстрого и приближенного определения потерь энергии на перемагничивание в технике пользуются особыми приборами, называемыми гистерезисометрами. Подобного рода прибор фирмы Эллот представлен на рис. 399.

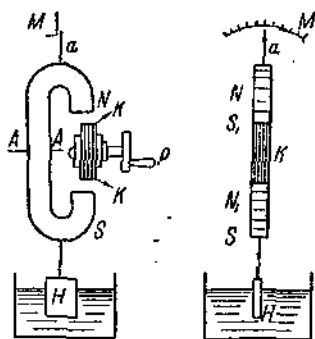


Рис. 399.

В междуполюсном пространстве постоянного стального магнита NS , могущего вращаться вокруг горизонтальной оси AA , закрепляется в особом держателе пакет тонких пластинок исследуемого металла $K-K$. Держателю, вместе с пакетом, сообщается вращательное движение помощью рукоятки P .

При каждом обороте пакета, на вращение его приходится затрачивать, помимо работы на преодоление механического трения еще и работу W_r , расходуемую на перемагничивание металла пакета.

Последняя пропорциональна, как известно, произведению величины потери энергии на гистерезис в 1 см^3 металла за один цикл на объем металла в куб. см и на число перемагничиваний в 1 секунду, т. е.

$$D \cdot 2\pi \cdot \frac{n}{60} = W_r \cdot \frac{n}{60},$$

где D — вращающий момент, необходимый для образования энергии, расходуемой на гистерезис, а $\frac{n}{60}$ — число полных оборотов пакета в секунду.

Из последнего выражения следует, что $D = \frac{W_r}{2\pi}$, т. е. вра-

щающий момент не зависит от числа оборотов. Определяется же он по величине отклонения стального магнита, которое и отсчитывается при помощи указателя (стрелки a), передвигающегося вдоль шкалы M прибора. Стальной магнит при вращении пакета увлекается (опыт Араго) в одну сторону с последним и до тех пор, пока механический момент вращения, являющийся результатом смещения центра тяжести магнита, не уравнивает магнитного момента вращения. Для аperiodичности прибора магнит снабжается успокоителем H в виде пластинки, погруженной в масло. К прибору прилагаются эталонированные пакеты, а измерение потерь сводится к сравнению углов отклонения магнита от положения покоя при вращении в междуполюсном пространстве его пакетов из эталонированного и исследуемого металлов. Пакеты эти должны быть совершенно одинаковыми по размерам.

Магнитная индукция в междуполюсном пространстве магнита не велика (около 4000 гауссов) и несколько зависит от проницаемости материала. По данным, полученным от такого прибора, можно составить себе, конечно, только приблизительное суждение о качествах испытуемого материала.

§ 66. Понятие об исследовании постоянных магнитов.

Предварительное испытание магнитных свойств материала, предназначенного для изготовления постоянных магнитов, производится по одному из описанных выше способов, но по преимуществу при больших (до 500 гауссов) значениях намагничивающей силы. Кроме этого, исследуется степень устойчивости магнитных свойств материала во времени, а также характерная для магнитов величина $\frac{B \cdot H}{8\pi}$, получаемая из части намагничивающего цикла между значениями B , и H_c (см. приложение VI).

Испытание уже готовых магнитов сводится по преимуществу к определению их истинной B , и кажущейся B' , остаточных индукций, а также задерживающей силы H_c . Магнитные исследования материала, предназначенного для изготовления постоянных магнитов, еще не дают исчерпывающих данных для суждения о его качествах. Так, например, остаточная индукция магнита при разомкнутых полюсах его обычно меньше остаточной индукции того материала, из которого он изготовлен. Объясняется это, главным образом, явлением саморазмагничивания магнита, вследствие наличия свободных полюсов,

а также вследствие тех механических воздействий, которым подвергается магнит в процессе его изготовления.

Поэтому для исчерпывающего суждения о качествах магнита необходимо найти для него размагничивающую часть кривой гистерезисной петли (кривую B_r , K H_c на рис. 400).

По этой кривой, получаемой при испытании магнита в замкнутой магнитной цепи, нетрудно определить остаточную индукцию, коэрцитивную силу и, наконец, магнитную энергию одного кубического сантиметра в зазоре магнита.

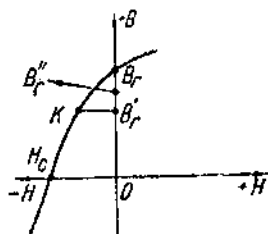


Рис. 400.

Однако, снятие гистерезисной кривой с готового магнита крайне затруднительно и возможно в том лишь случае, когда форма и размеры магнита позволяют надеть на него намагничивающие катушки, а также катушку для измерения напряжения его поля. Все это крайне осложняет опыт и доступно только для хорошо оборудованных магнитных лабораторий.

Поэтому в большинстве случаев практики не снимают размагничивающей части петли, а ограничиваются непосредственным измерением остаточной индукции, исследуют распределение магнитного потока вдоль магнита и определяют его полезный магнитный поток и магнитную энергию.

а) Для определения остаточной индукции надевают на ножки магнита намагничивающие катушки, включая их обмотки в цепь постоянного тока. В нейтральной зоне магнита на него надевают испытательную катушку, соединяемую с флюксметром и так сконструированную, чтобы ее можно было легко сдвигать с магнита. Полюса магнита замыкают посредством массивного железного бруска (якоря).

Намагнитив испытуемый магнит до насыщения, постепенно снижают до нуля намагничивающий ток и снимают намагничивающие катушки. Затем, включив флюксметр на испытательную катушку, быстро отрывают якорь и замечают отклонение α , флюксметра, которое, очевидно, пропорционально изменению магнитной индукции от B_r на рис. 400 до некоторого значения остаточной индукции B_r' при разомкнутой цепи испытуемого магнита, т. е.

$$\Delta B_r = \frac{C \cdot \alpha}{S \cdot n_2} = B_r - B_r'$$

где S — площадь сечения магнита в см^2 ,
 n_2 — число витков испытательной катушки и
 C — постоянная флюксметра.

После этого быстро сдергивают испытательную катушку с магнита и отсчитывают новое показание флюксметра, которое, очевидно, пропорционально остаточной индукции B' , магнита при разомкнутом состоянии последнего, т. е.

$$B' = \frac{C \cdot \alpha_r'}{S \cdot n_2}.$$

Тогда сумма $(\alpha_r + \alpha_r')$ показаний флюксметра, пропорциональная остаточной индукции B_r магнита в замкнутом его состоянии, определяется как]

$$B_r = \frac{C (\alpha_r + \alpha_r')}{S \cdot n_2} \dots \dots \dots (a)$$

Необходимо отметить, что вести опыт в обратном порядке, т. е. пытаться получить отклонение флюксметра пропорциональное разности $\Delta B_r = B_r - B'$, путем замыкания магнита якорем нельзя, так как в этом случае взамен точки B_r обычно получается некая промежуточная точка B'' .

Для первоначального намагничивания магнита удобно также воспользоваться переменным током, замыкая последний на особый трансформатор (понижительный), вторичная цепь коего состоит из одного коротко замкнутого витка, на который и надевается магнит. В момент выключения первичной цепи в коротко замкнутом витке возникает мгновенный ток большой силы, который и намагничивает испытуемый магнит.

б) Для выяснения характера распределения магнитного потока вдоль магнита удобнее всего воспользоваться флюксметром и соединенной с ним испытательной катушкой, надеваемой на магнит по его длине.

В момент сдергивания этой катушки с магнита флюксметр дает показание α , пропорциональное потоку Φ в том его сечении, с которого сдернута катушка, т. е. $\Phi = C\alpha$, а индукция в этом сечении равна

$$B = \frac{C \cdot \alpha}{S \cdot n_2} \dots \dots \dots (б)$$

Этот опыт интересен, главным образом, в видах определения коэффициента утечки магнита, под коим разумеют отношение потока в нейтральной зоне магнита к потоку в воздушном зазоре.

в) Полезный поток магнита определяют, измерив его в воздушном зазоре между полюсами или на конце ножки магнита.

Самое измерение производится помощью флюксметра с испытательной катушкой. Зная сечение зазора и измерив магнитный поток, вычисляют напряженность H_a в зазоре.

Тогда магнитная энергия в одном куб. см воздушного зазора равна

$$W_a = \frac{H_a^2}{8\pi} \dots \dots \dots (c)$$

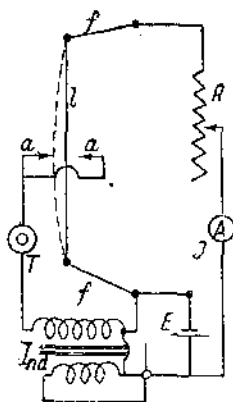


Рис. 401.

г) Для быстрого, и вместе с тем весьма приближенного, измерения величины магнитного потока в пространстве магнита некоторыми фирмами строятся специальные приборы, действие коих основано на том же принципе, что и в аппарате Кепселя. Сам прибор имеет гальванометрическую рамку с обмоткой, через которую пропускается определенной силы ток от внешнего источника. Рамка эта объемлется приставными полюсными на-

конечниками различных размеров, дабы к ним можно было плотно прижимать ножки испытуемого магнита. Когда это сделано, то рамка прибора отклоняется. По углу отклонения связанной с нею стрелки и градуировочному графику (прилагаемому к прибору) определяют искомый магнитный поток магнита. Прибору этому присущ тот основной недостаток, что в нем наблюдается рассеяние потока, не учитываемое в конечном результате измерения искомого магнитного потока.

д) Для выяснения характера распределения потока в узких воздушных зазорах, например, между полюсными наконечниками и цилиндром в приборах магнитоэлектрической системы как с качественной, так и с количественной стороны применяются особые приборы. Идея одного из них, предложенного Шротером, состоит в следующем. В магнитном поле, напряженность H которого исследуется, помещается (как на рис. 401) тонкая плоская ленточка l из серебра, оттягиваемая пружинками $f-f$. Регулируя реостатом R силу тока в цепи ленточки, достигают того, что последняя в силу электромагнитного взаимодействия отклоняется и касается одного из металлических закрепленных неподвижно кон-

тактов $a-a$. В момент этого соприкосновения в телефоне, подключенном к вторичной обмотке индукционной катушки I_{nd} , будет слышен звук. Если расстояние от ленточки в ее спокойном положении и до контактов $a-a$ неизменно, то сила F , необходимая для отклонения ленточки до соприкосновения ее с контактом, постоянна. Электромагнитная же сила $F_{\Delta K}$, под влиянием которой ленточка перемещается, как показано на схеме, определяется как $K = C \cdot I \cdot H$, где C — постоянная прибора, I — сила тока в цепи ленточки и H — напряженность исследуемого поля, силовые линии которого должны быть нормальны к плоскости рисунка.

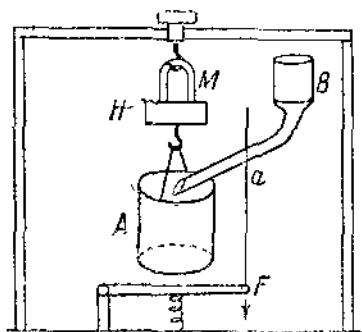


Рис. 402.

Так как $F = K$, то $H = \frac{k}{c \cdot i}$

или, что то же, H обратно пропорционально силе тока. Это позволяет отградуировать амперметр A непосредственно в единицах напряженности поля.

Индукционная катушка применяется в схеме с той целью, чтобы заменить недостаточно надежный механический контакт между ленточкой и контактами $a-a$, контактом через посредство электрической искры, возникающей между ними при достаточном их сближении.

е) Для измерения подъемной силы магнита применяют устройство, изображенное на рис. 402. Здесь M — испытуемый магнит, H — якорь замыкающий его полюса с подвешенным к нему сосудом A ; B — коленчатый патрубок с насыпанной в нем дробью; F — рычаг, управляющий защелкой a . При пересыпании дробь из патрубка в сосуд наступает момент, когда последний вместе с ярмом отрывается от магнита и падает на рычаг, одновременно с чем защелка a приостанавливает дальнейшее высыпание дробь. По весу сосуда с высыпавшейся в него дробью судят о подъемной силе испытуемого магнита.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ XI.

1. Что является задачей магнитных измерений?
2. В чем заключается принцип баллистического метода измерения напряженности поля?
3. Почему эталонный соленоид должен по своей длине намного превышать длину индукционной катушки?

4. Почему при градуировке гальванометра на магнитный поток в его цепи должна находиться испытательная катушка (или эквивалентное ей сопротивление)?

5. Поясните принцип действия флюксметра и надо ли при работе с ним перед каждым новым отсчетом его показаний устанавливать на нуль стрелку этого прибора?

6. Каков характер движения подвижной системы флюксметра?

7. Оказывает ли влияние на величину отброса подвижной системы гальванометра при магнитных измерениях скорость размыкания или коммутирования намагничивающего тока?

8. Что такое „кривые сдвиги“?

9. Какие способы применяются для опытного получения кривых намагничивания?

10. Что такое начальная магнитная проницаемость, истинная и кажущаяся остаточные индукции?

11. Какое основное правило регулировки намагничивающего тока надо соблюдать при опытным определении кривых намагничивания, и почему?

12. Какой из способов, Юинга или Раулянда, предпочтете для опытного получения циклической кривой намагничивания, и почему?

13. Что определяет собою площадь циклической кривой намагничивания?

14. В чем разница между статическими и динамическими кривыми намагничивания?

15. В чем заключается принцип метода ваттметра для определения потерь на перемагничивание?

16. В чем заключается принцип метода графического разделения потерь в железе на их составляющие?

17. В чем заключается принцип определения коэффициента рассеяния в электрических машинах?

18. Почему опытная кривая намагничивания не совпадает с истинной?

19. Как пользоваться кривыми сдвигами?

20. Для чего в приборе Кепселя имеются компенсационные обмотки?

21. Каким способом в приборе Кепселя осуществляется возможность испытания образцов различного сечения?

22. Изложите принцип метода Юинга для исключения ошибок из-за переходных магнитных сопротивлений.

23. В чем преимущество аппарата Эпштейна с двойными намагничивающими обмотками?

24. Поясните принцип дифференциального прибора Эпштейна.

25. Можно ли по циклической кривой намагничивания построить кривую коэффициента магнитной проницаемости?

ПРИЛОЖЕНИЯ К ГЛАВЕ XI.

I.

1. Для доказательства этой зависимости представим себе тор из исследуемого материала, сечением S см², длиной в l см с равномерно навитой намагничивающей обмоткой из n витков.

Приложив к концам обмотки некоторое напряжение U , мы создаем в ней ток I , под влиянием которого порождается некий магнитный поток $\Phi = B \cdot S$, пронизывающий испытуемый материал. Если мы изменим силу тока на di , то это приведет к изменению потока на $d\Phi$, вследствие чего в витках намагничивающей обмотки возникнет индуктированная э.д.с., рав-

ная — $n \cdot \frac{d\Phi}{dt}$.

Таким образом, мгновенному значению силы тока i в рассматриваемой нами цепи будет соответствовать следующий баланс напряжений:

$$U = i R + n \frac{d\Phi}{dt}.$$

Умножив обе части этого уравнения на i , мы получим баланс мощностей, отдаваемой источником и расходуемой в цепи, а именно,

$$Ui = i^2 R + n i \frac{d\Phi}{dt},$$

или

$$Ui = i^2 R + n i S \frac{dB}{dt}.$$

Заменяя в последнем выражении $n i$ через $\frac{IH}{4\pi}$ (ибо $H = \frac{4\pi n i}{l}$) и умножая обе части на dt , имеем окончательно:

$$U i dt = i^2 R dt + \frac{IS}{4\pi} H dB,$$

где первый член есть элементарная работа, отдаваемая источником, второй — элементарная работа на тепло Джоуля в обмотке и третий — элементарная работа на изменение магнитного состояния во всем объеме материала от BS до $(B + dB) S$.

За один цикл перемагничивания расход энергии на каждый куб. см материала выразится как

$$A = \frac{1}{4\pi} \int_{-B_{\max}}^{+B_{\max}} H \cdot dB \text{ эргов.}$$

Этот определенный интеграл не может быть вычислен аналитически, поскольку нам неизвестна функциональная зависимость $B = f(H)$, но он

может быть определен графически. Действительно, $\int_{-B_{\max}}^{+B_{\max}} H dB$ есть площадь,

ограниченная циклической кривой, умноженная на масштабный коэффициент, принятый нами для B и H при построении этой кривой.

II.

Значения коэффициента Штейнметца (η)

М а т е р и а л	От	До
Железо и листов. сталь	0,0012	0,0055
Трансф. листовое железо	0,0010	0,0012
" " стали	0,0011	—
Обычное листовое железо	0,0025	0,008
Чугун	0,0110	0,016
Мягкая литая сталь	0,0032	0,012
Твердая " "	—	0,028
Кованая сталь	0,015	0,025
Никель	0,013	0,039
Кобальт	0,010	0,012

III.

Значения $B^{1,6} \times 10^{-3}$ для различных значений B .

$B; B^{1,6} \cdot 10^{-3}$	$B; B^{1,6} \cdot 10^{-3}$	$B; B^{1,6} \cdot 10^{-3}$	$B; B^{1,6} \cdot 10^{-3}$
500 — 20,8	6000 — 1111	11 000 — 2925	16 000 — 5329
1000 — 63,1	7000 — 1420	12 000 — 3363	17 000 — 5870
2000 — 191,3	8000 — 1758	13 000 — 3821	18 000 — 6434
3000 — 365,9	9000 — 2122	14 000 — 4303	19 000 — 7017
4000 — 530,0	10 000 — 2511	15 000 — 4807	20 000 — 7613

IV.

Характеристика различных сортов железа и стали.

М а т е р и а л	$B_{\max}$	B_r	H_c	$\mu_{\max}$	μ_0	Потери в ваттах
Железо электролит (не отожженное)	21 630	7800	0,47	7800	250	0,00068
Литое железо (не отожженное)	16 420	5100	11,4	240	69,4	0,0114
Литое железо (отожженное)	16 750	5300	4,6	620	176	0,0044
Кованое железо	18 370	9000	1,65	—	—	—
Сталь (не закал)	19 820	13 000	16,7	375	72,8	0,0150
Сталь (закал)	17 800	7460	52,4	110	43,2	0,0337
Динамосталь (не отожженная)	21 420	10 600	1,46	4200	400	0,00157
Динамосталь (дважды отожженная)	21 420	11 050	0,37	14 000	320	0,00051
Пермаллой (сплав никеля и железа)	—	5500	0,05	87 000	1 2000	—

V.

Строго говоря, напряжение у зажимов a и b прибора складывается из двух составляющих (диаграмма 403): напряжения $U = AB = I_a R$ на преодоление активного сопротивления обмотки R прибора и напряжения $EO = \alpha \cdot 4 \cdot f \cdot n \cdot B S \cdot 10^{-8}$ вольт, уравновешивающего в.д.с. самоиндукции E . Сила тока I_a , отмечаемого амперметром, в свою очередь больше силы намагничивающего тока I на величину сил токов, ответвляющихся через тонкие обмотки ваттметра и вольтметра.

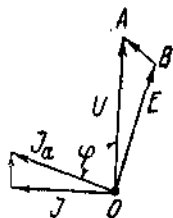


Рис. 403.

Однако, так как сопротивление R намагничивающей обмотки невелико, то, в первом приближении можно положить, что $U \cong E$ и не вводить поправок.

Как известно для синусоидальной формы кривой напряжений имеем

$$U = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}} \cdot U_{\text{ср}} = \frac{2}{\pi} U_{\max}$$

$$\frac{U}{U_{\text{ср}}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,117.$$

VI.

Конечная работа, затрачиваемая на установление в единице объема намагничиваемого нами материала магнитного потока, характеризуемого величинами B и H_0 равна

$$A = \frac{1}{4\pi} \int_0^B H dB.$$

Если при этом

$$\mu = \frac{B}{H} = \text{const},$$

то

$$A = \frac{\mu}{4\pi} \int_0^H H dH = \frac{\mu H^2}{8\pi} = \frac{B \cdot H}{8\pi}.$$

ПЕРЕЧЕНЬ ЛИТЕРАТУРЫ,

которой пользовался автор.

1. R. Mayer. Elektrotechnische Messkunde, 1912.
2. A. Lowy. Electrical measurements, 1917.
3. А. Линкер. Электротехнич. измерения, 1929.
4. G. Keipath. Die Technik der elektr. Messgeräte, 1922.
5. K. Gruhn. Elektrot. Messinstrumente, 1923.
6. G. Jahn. Messungen an elektr. Maschinen, 1925.
7. В. Базилевич. Электротехнич. измерения и приборы, 1929.
8. В. Ермаков. Основы электрометрии, 1927.
9. М. Шателен и Н. Пономарев. Пособие к лабораторн. занятиям по электрическим измерениям, 1931.
10. К. Грун. Лабораторные измерения по электротехнике, 1930—32.
11. СЭТ. Справочная книга для электротехников 1923.
12. Свирский Е. Основы теории и практики вл. измерений, 1927.
13. Черданцева З. В. Электрические измерения, 1932.
14. W. Skirl. Tech. Leistungsmes. 1932.

О Г Л А В Л Е Н И Е.

Предисловие ко 2-му изданию	Стр. 3
Из предисловия к 1-му изданию	5

ОТДЕЛ ПЕРВЫЙ.

Электрические единицы и их эталоны. Вспомогательная аппаратура, применяемая при электрических измерениях. Системы электроизмерительных приборов. . . .

Г Л А В А 1.

Электрические единицы и их эталоны.

§ 1. Практическая система электрических единиц.	7
§ 2. Эталоны электрических и магнитных единиц.	9
Этадоны сопротивлений и магнитины.	11
Этадоны электродвижущей силы.	19
Этадоны силы тока	21
Этадоны взаимной индукции	21
Этадоны емкостей.	22
Этадоны магнитного потока.	25
Контрольные вопросы к главе 1-й.	25
Приложение к главе I.	26

Г Л А В А II.

Вспомогательная аппаратура.

§ 3. Источники электрической энергии, реостаты, переключатели, коммутаторы и ключи.	27

Г Л А В А III.

Системы технических электроизмерительных приборов.

§ 4. Общие замечания об электроизмерительных приборах и их классификация	36
§ 5. Общие требования к приборам и общие детали их устройства.	
§ 6. Общие свойства приборов: точность показаний, чувствительность и коэффициент качества, собственное потребление энергии, влияние внешних факторов.	43
§ 7. Приборы магнито-электрической системы.	49
Принцип действия.	49
Общее представление о конструкции.	52
Источники погрешностей.	56
Свойства и область применения.	57
Расширение пределов измерения.	57

	Стр.
§ 8. Приборы электродинамической системы.	65
Принцип действия.	66
Общее представление о конструкции.	71
Схемы включения электродинамометров в цепь и способы расширения их пределов измерения.	76
Источник погрешностей.	79
Свойства и область применения.	80
§ 9. Приборы электромагнитной системы.	81
Принцип действия.	81
Общее представление о конструкции.	83
Схемы включения электромагнитных приборов в цепь и способы расширения их пределов измерения (измерительные трансформаторы).	86
Источники погрешностей.	95
Свойства и область применения.	95
§ 10. Приборы тепловой системы.	96
Принцип действия.	96
Общие детали конструкции.	98
Свойства и область применения.	102
§ 11. Понятие о термомприборах.	103
Принцип действия.	103
Конструкция и схемы включения.	105
Свойства.	107
§ 12. Приборы индукционной системы.	107
Принцип действия.	107
Основные детали конструкции.	111
Свойства и область применения.	113
§ 13. Приборы электростатической системы.	115
Принцип действия.	115
Основные детали конструкции.	116
Свойства и область применения.	118
§ 14. Понятие о катодных вольтметрах.	119
§ 15. Понятие о детекторных приборах.	120
§ 16. Регистрирующие или самопишущие приборы.	123
Контрольные вопросы к главе III.	125

Г Л А В А IV.

Приборы высокой чувствительности.

§ 17. Назначение, принцип действия и основы теории приборов высокой чувствительности.	129
Назначение.	129
Принцип действия и основы теории гальванометров магнито-электрической системы.	130
Особенности работы баллистических гальванометров.	142
Основные детали конструкции.	149
Выбор гальванометра.	155
§ 18. Понятие о гальванометрах других систем и типов.	155
Гальванометры с подвижной магнитной системой.	155
Гальванометры электродинамической системы.	160
Термогальванометры.	160

Струнные гальванометры.	160
Вибрационные гальванометры.	161
Дифференциальные гальванометры.	161
Электрометры.	163
Контрольные вопросы к главе IV.	165

ГЛАВА V.

Градуйровка и выверка электроизмерительных приборов.

§ 19. Градуйровка и выверка измерительных приборов.	166
Общие замечания.	166
Способы градуировки амперметров и вольтметров.	167
§ 20. Исследование зеркальных гальванометров.	172
Общие замечания.	172
Исследование гальванометра.	173
Контрольные вопросы к главе V.	181
Приложение к 1 отделу.	182

ОТДЕЛ ВТОРОЙ.

Основы методики электрических измерений.

ГЛАВА VI.

Классификация методов измерения. Ошибки и вычисление результатов.

§ 21. Классификация методов измерения.	188
§ 22. Понятие об ошибках измерений и способах вычисления результатов.	189
§ 23. Производство наблюдений и обработка результатов.	196
Контрольные вопросы к главе VI.	197

ГЛАВА VII.

Методы и приборы для измерения силы тока, напряжений электродвижущих сил и количества электричества.

§ 24. Измерение силы тока.	198
§ 25. Непосредственные способы измерения силы тока.	199
§ 26. Некоторые частные случаи измерения силы тока.	201
§ 27. Косвенные способы измерения силы тока.	203
§ 28. Измерение напряжений и э.д.с.	206
§ 29. Непосредственные способы измерения напряжений.	207
§ 30. Косвенные способы измерения напряжений и э.д.с.	208
§ 31. Типы компенсаторов.	212
Компенсатор по схеме германской палаты мер и весов.	212
Компенсатор системы Рака.	217
" " Бруггера.	221
" " Франка.	224
" " Лидса и Нортрупа.	225
Компенсатор Баччини.	226
Технические компенсаторы.	227

	Стр.
§ 32. Некоторые частные случаи измерения напряжений и э.д.с.	228
Измерение напряжений переменного тока.	228
Измерение э.д.с. поляризации.	228
Измерение напряжений на зажимах источника.	229
Измерение весьма малых напряжений.	229
Измерение э.д.с. элементов и аккумуляторов.	233
§ 33. Понятие об измерении напряжений и э.д.с. переменного тока по методу компенсации.	231
§ 34. Приборы для наблюдения и записи формы кривых тока и напряжения.	234
§ 35. Измерение количества электричества.	238
Контрольные вопросы к главе VII.	241
Приложения к главе VII.	242

Г Л А В А VIII.

Методы и приборы для измерения сопротивлений.

§ 36. Методика измерения сопротивлений.	245
§ 37. Измерения сопротивлений средней величины.	246
Метод амперметра и вольтметра.	246
Метод замещения.	248
Нулевые методы (Метод мостика Витстона, метод дифференциального гальванометра и компенсационный метод)	251
§ 38. Измерение весьма малых сопротивлений	272
Общие замечания	272
Метод ординарного мостика	273
Способ Матиссена	275
Метод двойного мостика Томсона	276
Типы мостиков	279
§ 39. Измерения весьма больших сопротивлений	286
Общие замечания	286
Метод непосредственного измерения	287
Метод сравнения отклонений	287
Метод потери заряда	289
Особенности измерительных схем	291
§ 40. Некоторые частные случаи измерения сопротивлений	294
Сопротивление гальванометра	294
Внутреннее сопротивление элементов	294
Сопротивление электролитов	295
Сопротивление заземлений	296
Калибрование измерительных проволок	299
§ 41. Измерение сопротивления изоляции и нахождение места повреждения	300
§ 42. Специальные технические приборы для измерения сопротивлений изоляции	304
§ 43. Особенности измерения сопротивлений при переменном токе.	311
Контрольные вопросы к главе VIII	312
Приложения к главе VIII	314

ГЛАВА IX.

Методы и приборы для измерения электрической мощности, коэффициента мощности, числа периодов тока и электрической работы.

§ 44. Приборы для непосредственного измерения мощности — ваттметры	327
Общие замечания	327
Электродинамические ваттметры	327
Ферродинамические ваттметры	334
Индукционные ваттметры	334
Тепловые ваттметры	335
Реактивные ваттметры	336
Регистрирующие ваттметры	337
Суммирующие ваттметры	337
§ 45. Правила включения ваттметров для измерений	337
§ 46. Фазометры	340
§ 47. Приборы для измерения частоты тока — частотеры	343
§ 48. Непосредственные способы измерения мощности	346
В цепях постоянного и однофазного переменного тока	346
В цепях трехфазного переменного тока	346
§ 49. Косвенные методы измерения электрической мощности	353
§ 50. Приборы для измерения электрической работы	356
Общие замечания	356
Типы счетчиков электрической энергии (электродинамические, индукционные, магнитомоторные и специального типа)	357
§ 51. Проверка ваттметров, фазометров и счетчиков	366
Контрольные вопросы к главе IX	375
Приложения к главе IX	376

ГЛАВА X.

Методы и приборы для измерения емкостей и коэффициентов само- и взаимной индукций.

§ 52. Общие замечания относительно методики измерения емкостей и коэффициент само- и взаимной индукций	384
§ 53. Методы и приборы для измерения емкостей	388
Измерение емкостей на постоянном токе	388
Измерение емкостей на переменном токе. (Метод амперметра, вольтметра, ваттметра и частотметра. Метод трех вольтметров. Метод мостика Сотти. Метод мостика Зейбта)	393
Измерение емкости при высоком напряжении	399
§ 54. Общая теория мостика Витстона при переменном токе	400
§ 55. Измерение диэлектрической постоянной и угла потерь	403
Диэлектрическая постоянная	403
Угол потерь в конденсаторе (способы Вина, Нерста и Шеринга)	405
§ 56. Понятие о приборах для непосредственного измерения емкостей	409
§ 57. Измерение коэффициентов само- и взаимной индукций	411
Определение L по напряжению и силе тока	412

	Стр.
Определение L по методу трех вольтметров	413
Метод мостика (баллистический и сравнения в схеме мостика Витстона)	415
§ 58. Обобщение потери мостика Витстона на переменном токе для схем более сложного вида	423
Общие замечания	423
Типы сложных схем	426
Общее представление о мостиках Гиббе и Вагнера	428
Измерение коэффициентов взаимной индукции	429
Контрольные вопросы к главе X	430
Приложения к главе X.	431

ОТДЕЛ ТРЕТИЙ.

Основы методики магнитных измерений.

ГЛАВА XI.

Основы методики технических магнитных измерений.

§ 59. Общие замечания	437
§ 60. Способы и приборы для исследования магнитных полей, т. е. определение намагничивающей силы или напряжения поля	438
Индукционный или баллистический метод	438
§ 61. Способы измерения напряжения поля	446
Баллистический способ	446
Измерение напряжения поля по величине измерения электрического сопротивления металлов в магнитном поле	448
Измерение коэффициентов рассеяния	450
§ 62. Примеры исследования магнитных полей	450
Опытное получение кривых распределения полей в электрических машинах	450
Определение коэффициента рассеяния в электрических машинах	453
§ 63. Способы исследования магнитных свойств металлов	455
§ 64. Примеры исследования магнитных свойств металлов	459
Опытное получение кривых намагничивания	459
Практическое получение кривых намагничивания. Электродинамический способ Кейселя. Способ Юнга. Отрывной переметр Гомсона, прибор Бруггера	462
§ 65. Определение потерь в магнитных материалах	478
Потери на гистерезис	478
Потери в железе и их определение	480
Технический гистерезисометр	488
§ 66. Понятие об исследовании постоянных магнитов	489
Контрольные вопросы к главе XI	493
Приложения к главе XI	494
Перечень литературы	497

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

в книге Е. А. Свирского „Электротехнические измерения и приборы“.

Стр.	Строка	Напечатано	Следует читать
87	13 стр.	В пер ом	В атом
118	1 "	$\frac{C_C + C}{C}$	$\frac{C_p + C}{C}$
128	2 "	9,23	923
166	5 "	§ 22	§ 19
172	1 св.	§ 23	§ 20
186	3 "	$\frac{m}{2 \cdot D} = \frac{1}{6} \frac{m^3}{D^3}$	$\frac{m}{2D} = \frac{1}{6} \frac{m^3}{D^3}$
187	7 "	$= \frac{E_N}{R + (r_g + r) r_1} \cdot \frac{r_g + r + r_1}{r_g + r + r_1}$	$= \frac{E_N}{R + \frac{(r_g + r) r_1}{r_g + r + r_1}}$
196	10 "	§ 28	§ 23
250	19 "	$= I_X R_X$	$= I_X R_X$
250	17 св.	$= \frac{U_{ab}}{U_{cd}} = R_N$	$\frac{U_{ab}}{U_{cd}} \cdot R_N$
250	10 "	α_X	α_X
250	8 "	$\frac{R_X}{R_N}$	$\frac{R_X}{R_N}$
272	11 св.	$\frac{R_X}{10 \cdot R_N^a}$	$\frac{R_X}{10^a \cdot R_N}$
275	7 "	$1,003 \frac{V}{l} 10^3 \text{ мм}^2$	$1,003 \frac{V}{L} 10^3 \text{ мм}^2$
279	16 "	$= \frac{M}{L} \cdot R_X = \frac{P}{O} R_N$	$= \frac{M}{L} \cdot R_N = \frac{P}{O} \cdot R_N$
295	6 "	Манса	Манса
301	11 св.	§ 46	§ 39
301	8 "	$\left\{ \frac{a_2}{a_1} = 1 \right\}$	$\left\{ \frac{a_2}{a_1} - 1 \right\}$
306	13 "	$R^X =$	$R_X =$
306	8 "	в 4 ольта	3 вольта
328	5 св.	$li \cos \alpha =$	$li \cos \alpha =$
396	4 св.	$\frac{1}{a C_X}$	$\frac{1}{\omega C_X}$

Стр.	Строка	Напечатано	Следует читать
404	7 св.	$+ d_s d \varepsilon_b \}$	$+ d \varepsilon_b \}$
404	9 "	$\overline{(a-d) C_d + d \varepsilon_b}$	$\overline{(a-d) \varepsilon_d + d \varepsilon_b}$
407	18 "	$R_2 \left\{ \frac{1}{R} + \right.$	$\frac{1}{R_2} \left\{ \frac{1}{R} + \right.$
412	18 св.	$L = \frac{1}{\omega} \left(\frac{U}{I} \right)^2 - r^2$	$L = \frac{1}{\omega} \sqrt{\left(\frac{U}{I} \right)^2 - r^2}$
415	3 "	$= \frac{C_{\text{бэл.}} L}{I} \cdot R$	$= \frac{C_{\text{бэл.}} \alpha}{I} R$
417	3 "	$\operatorname{tg} \varphi =$	$\operatorname{tg} \varphi_1 =$
427	6 св.	(4)	(1)
433	10 "	$(L_1 + Z_3 + 2 M)$	$(L_1 + L_3 + 2 M)$
434	15 св.	$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_2}{R_4}$	$\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_4}$
438	3 "	(параграф 70)	(параграф 61)
444	8 "	$\int_0^q dq = 0,$	$\int_0^q dq = 0,$
449	17 "	приравнение	приращение
466	1 св.	Буквою A на ней	Буквою A (рис. 387) на ней
486	4 "	$E_N, E_X).$	$F_N, F_X).$