

а 25205

**С. В. ЗУДОВ**

**ЭЛЕКТРОДВИЖЕНИЕ  
И  
ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ  
МОРСКИХ СУДОВ**

ИЗДАТЕЛЬСТВО  
„МОРСКОЙ ТРАНСПОРТ“  
1940

Инж. С. В. ЗУДОВ

# ЭЛЕКТРОДВИЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ МОРСКИХ СУДОВ

УТВЕРЖДЕНО

УПРАВЛЕНИЕМ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ НКМФ  
В КАЧЕСТВЕ УЧЕБНИКА ДЛЯ ТЕХНИКУМОВ

1305604

ОБЯЗАТЕЛЬНО  
ЗАБРАТЬ

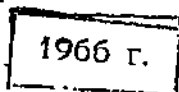
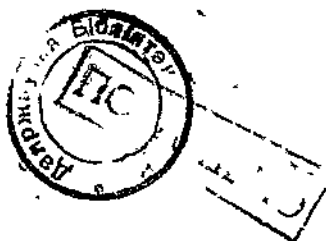
ПОЛУЧЕНО

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ  
БИБЛИОТЕКА

ИЗДАТЕЛЬСТВО  
«МОРСКОЙ ТРАНСПОРТ»  
ЛЕНИНГРАД 1940 МОСКВА

В настоящей работе автором дан обзор современного состояния электродвижения и электрооборудования судов в СССР и за границей, подробно описаны конструкции, изложена теория синхронной передачи трехфазным током, даны расчеты электропривода рулей, брашпилей и лебедок и описаны системы электрических сетей на судах.

Настоящая работа является учебником для слушателей морских техникумов и одновременно может служить практическим руководством для инженерно-технических работников морского флота и судовых механиков.



# ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

| Стр. | Строка    | Напечатано                                                                                                        | Должно быть                                                                                                       | По чьей вине |
|------|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 132  | 19 сверху | включения                                                                                                         | выключения                                                                                                        | редактора    |
| 174  | 4 снизу   | $-(\alpha_{\max} - \alpha_1) \frac{\sqrt{M_{\text{ст}} - M_{\max}} - \sqrt{M_{\text{ст}} - M_0}}{M_{\max} - M_0}$ | $-(\alpha_{\max} - \alpha_1) \frac{\sqrt{M_{\text{ст}} - M_{\max}} - \sqrt{M_{\text{ст}} - M_0}}{M_{\max} - M_0}$ | автора       |
| 183  | 9 снизу   | $n_{\max} = n_0 \sqrt{\frac{M_0}{M_{\max}}}$                                                                      | $n_{\max} = n_0 \sqrt[3]{\frac{M_0}{M_{\max}}}$                                                                   | редактора    |
| 195  | 19 сверху | датчика A                                                                                                         | датчика D                                                                                                         |              |

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Современные условия эксплуатации судов предъявляют требования наибольшего внедрения энергетической вооруженности различных механизмов, связанных с процессами обслуживания судов как во время рейсов, так и при стоянке в портах.

Энерговооруженность судна должна базироваться на максимуме бесперебойности, скорости действия и высокой надежности отдельных, особенно ответственных, элементов оборудования. В то же время необходимость широкого внедрения энергии на судне сталкивается с требованием использования для этого генерирующих агрегатов с высокой отдачей, сосредоточивая их на коммерческих судах по возможности в одном месте. Разбросанность энергетических потребителей по судну требует также надежной, удобной и выгодной передачи энергии в тесных условиях судовых помещений.

Успешное и выгодное разрешение отмеченных условий и требований судового энергоснабжения осуществляется на современных судах путем использования электричества, этого наиболее идеального вида энергии.

В силу технических удобств и экономических преимуществ электричество нашло применение почти на всех эксплуатируемых морских судах для обслуживания разнообразных электродвигателей у так называемых вспомогательных механизмов.

На части же современных морских судов применение электричества внедрено до предела, т. е. включая и обслуживание гребных электродвигателей. Такие суда получили название электроходов, а процесс приведения судна в движение путем использования электродвигателя называется электродвижением.

Поскольку условия электродвижения специфичны и неразрывно связаны с особенностями работы гребных винтов, этих почти единственных современных движителей, то использование электричества для целей электродвижения является большой, обособленной, частью судового электрооборудования. Поэтому книга разбита на две части: часть I — электродвижение судов и часть II — электрооборудование судов.

Отсутствие систематизированной литературы, отражающей современные достижения в области электродвижения судов, заставило более подробно остановиться и осветить этот весьма интересный и сложный отдел оборудования судов.

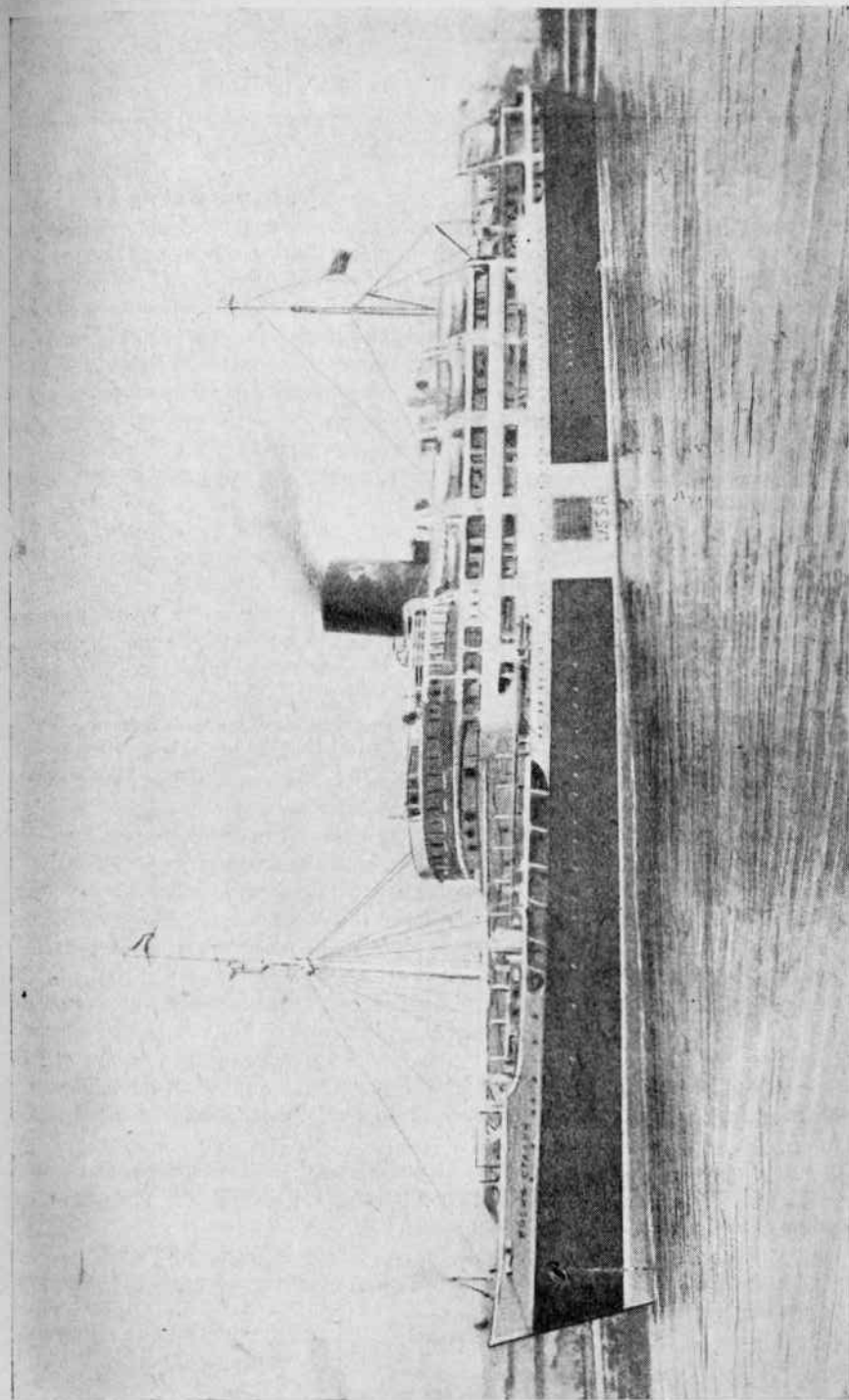
Этот пробел тем более нуждается в освещении, что наш коммерческий флот пополнился первоклассными турбо-электроходами, вступившими в эксплуатацию в 1940 г.

Достижения зарубежной техники применительно к осуществлению дизель-электроходов на переменном токе также нашли отражение в предлагаемом вниманию читателей труде.

Автор за все сделанные ему указания со стороны читателей будет весьма благодарен и просит читателей направлять свои замечания по адресу: Ленинград, 22, Карповка 19, кв. 6.

С. Зудов

1940 г.



Турбо-электроход «Иосиф Сталин» постройки 1940 г.

# ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

## ЭЛЕКТРОДВИЖЕНИЕ

### Глава I

#### ОБЩИЙ ОБЗОР

#### § 1. Введение

Электродвижение судов является самой старинной по идее целью применения электричества для механических приводов. В то же время практическое промышленное осуществление этой идеи является сравнительно новым видом оборудования, находящимся еще в не вполне законченном техническом развитии.

Такая медленность внедрения идеи электродвижения судов, которая охватывает целое столетие с момента ее зарождения (в 1838 г.) и до момента первого эксплуатационного применения переменного тока на современных больших судах, оборудованных дизельными установками (1937 г.), объясняется, с одной стороны, теми трудностями, которым должен удовлетворять электропривод гребных винтов, и, с другой стороны, недооценкой многих преимуществ, которые дает электропривод гребного винта и выясняющихся только после тщательного и всестороннего анализа.

Если судовая электротехника вообще отстает от широты разнообразия использования электричества на берегу, то отрасль электродвижения судов — в особенности. Косвенным подтверждением этому может служить то обстоятельство, что даже литература по судовой электротехнике довольно ограничена, а особенно по вопросам электродвижения судов. Всю литературу у нас и за границей можно свести к единицам систематизированных трудов. Что касается издания периодической специальной литературы по вопросам электродвижения судов, то таковая вообще отсутствует, и освещение вопросов, связанных с этой областью техники, разбросано по многим разнообразным журналам.

Поскольку в области электродвижения судов приходится иметь дело с работой судовых движителей и, в первую очередь, с гребными винтами (а работа последних изучается, главным образом, экспериментально), то и научная база, подводимая под рациональное решение вопросов электродвижения судов, также должна базироваться в первую очередь на экспериментальных данных и на систематизированных эксплуатационных материалах.

Последним обстоятельством, как увидим дальше, и объясняется скачкообразный ход развития внедрения электродвижения в область судостроения. Так, после первых широко поставленных сравнительных американских опытов, проводившихся перед началом и во время первой мировой войны, значительное развитие электродвижения судов отмечается только после окончания войны.

Это относится в первую очередь к Америке, где получили применение электроходы с турбо-электрическим приводом.

За последнее время, с преобладанием строительства теплоходов, начинается второй период широкого развития и внедрения дизель-электроходов, если этому не воспрепятствует вторая вспыхнувшая мировая война.

Частичное подтверждение начавшегося развития коммерческого строительства дизель-электроходов можно видеть в современных строительных программах судостроения коммерческого флота Германии, где впервые и сразу же широко начали строительство дизель-электроходов после получения положительных эксплуатационных результатов на первом большом дизель-электроходном судне.

## § 2. Ход развития и современное состояние электродвижения судов

Проблема электродвижения судов, т. е. применения электродвигателей для целей привода судовых движителей, впервые зародилась в России 100 лет назад. При этом интересно отметить, что проблема электродвижения судов была и первым опытом практического применения только что сконструированного электродвигателя.

Первый «электроход» был построен для реки Невы в Петербурге в 1839 г. будущим известным акад. Якоби. Этот «электроход» представлял собой лодку, снабженную электродвигателем в 1 л. с., который получал питание от 69 элементов типа Грове. Лодка — «электроход» вмещала 14 пассажиров и могла двигаться по Неве со скоростью около 4 км в час против течения.

Таким образом как первая идея осуществления электропривода, т. е. применения электричества для механического обслуживания, так и первая идея использования электропривода для целей электродвижения судов нашли зарождение и осуществление в России.

За границей применение электричества для целей движения судов появилось только 20 лет спустя, и первые заграничные «электроходы» также представляли электромоторные лодки и электроходные катера, предназначенные для увеселительных и рекламных целей.

Начало промышленного применения электричества для целей движения судов можно отнести к 1903 г., когда опять впервые в России были построены для Волги и Каспия два дизель-электрических судна, из них одно нефтеналивное судно под названием «Сармат» водоизмещением 1100 т.

Это судно было оборудовано тремя дизель-генераторами мощностью по 360 л. с., которые питали три электродвигателя, непосредственно соединенные с тремя гребными валами. Установка была осуществлена на постоянном токе, с централизованным управлением на ходовом мостике. Судно развивало скорость до 8 узлов.

Последовавшее за этим десятилетие можно отнести к периоду теоретических исследований и конструктивных разработок, закончившихся в 1913 г. большим экспериментом, проделанным в США над тремя однотипными угольщиками для выявления сравнительного экономического

эффекта и преимущества электродвижения по сравнению с непосредственным или редукторным приводом.

Основные данные угольщиков, подвергавшихся сравнению, следующие:

| Наименование судна                                      | „Циклоп“                           | „Нептун“                     | „Юпитер“        |
|---------------------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------|-----------------|
| Водоизмещение в т . . . . .                             | 20 000                             | 20 000                       | 20 000          |
| Грузоподъемность в т . . . . .                          | 12 000                             | 12 000                       | 12 000          |
| Скорость судна в узлах . . . . .                        | 14                                 | 14                           | 14              |
| Тип главных машин                                       | Паровые машины тройного расширения | Турбины с зубчатой передачей | Турбогенераторы |
| Число главных машин . . . . .                           | 2                                  | 2                            | 1               |
| Число оборотов главной машины в минуту . . . . .        | 88                                 | 1250                         | 2000            |
| Число гребных винтов . . . . .                          | 2                                  | 2                            | 2               |
| Число оборотов гребного винта в минуту . . . . .        | 88                                 | 135                          | 110             |
| Передаточное число . . . . .                            | 1:1                                | 9,3:1                        | 18,1:1          |
| Вес приводных машин в т . . . . .                       | 280                                | —                            | 156             |
| Скорость судна при ходовых испытаниях в узлах . . . . . | 14,6                               | 13,9                         | 14,78           |
| Расход пара на 1 л. с. в час в кг. . . . .              | 6,35                               | —                            | 5,08            |
| Суммарная мощность на гребных валах в л. с. . . . .     | 6700 н. л. с.                      | —                            | 6300            |

Согласно приведенным данным следует, что установка на «Циклопе» тяжелее, примерно, на 80% установки «Юпитера», а расход пара больше, примерно, на 25%.

Что касается непосредственного использования турбин для привода гребных винтов на «Нептуне», то вследствие нереверсивности турбин и большого числа их оборотов эта установка требовала специальных передаточно-реверсирующих устройств, что вызвало увеличение веса турбинной установки «Нептуна» по сравнению с турбинной установкой «Юпитера». Кроме того, на «Юпитере» была использована более быстроходная турбина, что также дало преимущество в отношении веса турбины и обеспечивало меньший удельный расход пара.

Этот сравнительный эксперимент выявил преимущества судна с применением электропривода для гребного винта по сравнению с приводом от паровых двигателей.

После этого длительного и в большом масштабе проведенного сравнительного эксплуатационного опыта американцы начали широко внедрять применение электродвижения как для судов торгового флота, так и для судов военного флота.

По данным General Electric Co, в одной только Америке за десятилетие, с 1916 по 1927 г., было построено и находилось в постройке 118 электроходов с общей мощностью на гребных валах свыше 700 000 л. с.

В качестве первичных двигателей на этих электроходах применялись как паровые, так и дизельные установки. Из общего количества электроходов, построенных в Америке за указанное десятилетие, большинство судов было оборудовано General Electric Co.

На 29 электроходах, оборудованных этой компанией, в качестве первичных двигателей были использованы паровые турбины с суммарной мощностью в 566 250 л. с.

Первое применение на электроходах дизелей в качестве первичных двигателей в Америке относится к 1919 г. За время с 1919 по 1927 г. General Electric Co было оборудовано 38 дизель-электроходов с общей установленной мощностью в 33 800 л. с.

Мощность на гребных валах дизель-электроходов, построенных до 1927 г., была сравнительно невелика, и отдельная мощность для товаро-пассажирских судов, как наиболее мощных дизель-электроходов, не выходила из пределов 2500 л. с., а средняя мощность выражалась всего только в 890 л. с.

В отношении турбо-электроходов, построенных за период с 1916 по 1927 г., можно отметить, что единичная мощность на гребных валах этого типа коммерческих судов, как, например, у товаро-пассажирского электрохода «California», достигает 17 000 л. с. На судах же американского военного флота мощность турбо-электроходов, отнесенная к гребным валам, для отдельных судов поднимается даже до 180 000 л. с., как, например, на авианосцах «Lenxington» и «Saratoga», законченных постройкой в 1927 г.

Интересно познакомиться с развитием общего строительства турбо-электроходов по годам за четверть столетия, начиная с 1908 г. по 1932 г. включительно. Данные, не претендующие на полноту охвата, сводятся в табл. 1.

Таблица 1

| Год постройки | Количество построенных турбо-электроходов |                 | Суммарная мощность на гребных валах в л. с. |                 | Наибольшая мощность в л. с. на гребных валах построенного за данный год судна |
|---------------|-------------------------------------------|-----------------|---------------------------------------------|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------|
|               | за год                                    | всего с 1908 г. | за год                                      | всего с 1908 г. |                                                                               |
| 1908          | 5                                         | 5               | 3 600                                       | 3 600           | 1 120                                                                         |
| 1913          | 1                                         | 6               | 5 400                                       | 9 000           | 5 400                                                                         |
| 1916          | 1                                         | 7               | 900                                         | 9 900           | 900                                                                           |
| 1918          | 6                                         | 13              | 42 650                                      | 52 550          | 31 200                                                                        |
| 1919          | 6                                         | 19              | 12 950                                      | 65 500          | 3 000                                                                         |
| 1920          | 7                                         | 26              | 50 450                                      | 115 950         | 33 500                                                                        |
| 1921          | 11                                        | 37              | 106 400                                     | 222 350         | 28 000                                                                        |
| 1922          | 5                                         | 42              | 21 750                                      | 244 100         | 8 000                                                                         |
| 1923          | 5                                         | 47              | 34 800                                      | 278 900         | 28 000                                                                        |
| 1924          | 3                                         | 50              | 6 400                                       | 285 300         | 2 200                                                                         |
| 1925          | 3                                         | 53              | 10 100                                      | 295 400         | 4 800                                                                         |
| 1926          | 1                                         | 54              | 3 000                                       | 298 400         | 3 000                                                                         |
| 1927          | 4                                         | 58              | 364 500                                     | 662 900         | 180 000                                                                       |
| 1928          | 8                                         | 66              | 63 300                                      | 726 200         | 17 000                                                                        |
| 1929          | 6                                         | 72              | 40 000                                      | 766 200         | 17 000                                                                        |
| 1930          | 12                                        | 84              | 77 460                                      | 843 660         | 16 000                                                                        |
| 1931          | 13                                        | 97              | 210 200                                     | 1 053 860       | 28 000                                                                        |
| 1932          | 3                                         | 100             | 359 000                                     | 1 412 860       | 180 000                                                                       |

Из приведенной табл. 1 видно, что быстрое развитие строительства турбо-электроходов началось с момента окончания первой мировой войны.

Средняя мощность построенных за этот период турбо-электроходов составляет 14 129 л. с. на гребных валах.

Среди коммерческих турбо-электроходов, построенных за этот промежуток времени, можно указать на следующие как более мощные и характерные суда:

1. «*California*»; судно вступило в эксплуатацию в начале 1928 г. Водоизмещение 30 250 т. Скорость хода максимальная 18 узлов; скорость хода коммерческая 16,5 узла. Число гребных винтов 2.

Судно оборудовано:

а) Турбо-генераторы трехфазного тока — 2 шт. мощностью по 5250 квт при  $V = 3700$  в,  $n = 2540$  об/мин., максимальной мощностью 6600 квт при  $V = 4000$  в,  $n = 2880$  об/мин.

б) Гребные электродвигатели синхронные — 2 шт. мощностью по 6750 л. с. при  $V = 3700$  в,  $n = 110$  об/мин., максимальной мощностью 8500 л. с. при  $V = 4000$  в,  $n = 120$  об/мин.

2. «*Vice Roy of India*»; судно вступило в эксплуатацию в 1929 г. Водоизмещение 25 000 т, длина судна 186,6 м, ширина судна 23,2 м, осадка 8,6 м, скорость хода 19 узлов, число гребных винтов — 2.

Судно оборудовано:

а) Турбогенераторы трехфазного тока — 2 шт. мощностью по 9000 квт при  $V = 4800$  в,  $n = 2700$  об/мин.

б) Гребные электродвигатели синхронные — 2 шт. мощностью по 9000 л. с. при  $V = 4800$  в,  $n = 135$  об/мин.

3. «*President Hoover*»; судно вступило в эксплуатацию в 1931 г. Водоизмещение 33 450 т, длина судна 199,4 м, ширина судна 24,7 м, скорость хода 20 узлов, число гребных винтов — 2.

Судно оборудовано:

а) Турбогенераторы трехфазного тока, 44,3 герц — 2 шт. мощностью по 10 000 квт, при  $V = 4810$  в,  $n = 2660$  об/мин.

б) Гребные электродвигатели синхронные — 2 шт. мощностью по 13 250 л. с. при  $V = 4810$  в,  $n = 133$  об/мин.

4. «*Monarch of Bermuda*»; судно построено в 1931 г. Водоизмещение 28 000 т, длина 167,4 м, ширина 23,3 м, осадка 8,0 м, скорость хода 19,5 узла, число гребных винтов 4.

Судно оборудовано:

а) Турбогенераторы трехфазного тока, 50 герц — 2 шт. мощностью по 7500 квт, при  $V = 3000$  в,  $n = 3000$  об/мин.

б) Гребные электродвигатели синхронные — 4 шт. мощностью по 4750 л. с. при  $V = 3000$  в,  $n = 150$  об/мин.

Кроме того, можно назвать следующие мощные коммерческие турбо-электроходы, построенные в Америке и Европе до 1935 г.: «*Talamanca*», «*Segovia*», «*Antigua*», «*Quirigua*», «*Chiriqui*», «*Veragua*» — каждый мощностью по 10 000 л. с.; «*Santa-Clara*» — мощностью 12 600 л. с.; «*Oriente*» — мощностью 16 000 л. с.; «*Virginia*», «*Pensilvania*» — мощностью по 17 000 л. с.; «*President Coolidge*» — мощностью 26 500 л. с.; «*Strafhnaver*» и «*Strathaird*» — мощностью по 28 000 л. с.

Из сооруженных коммерческих электроходов за последнее время можно отметить как наиболее мощные и интересные следующие



1. Два однотипных товаро-пассажирских турбо-электрохода «Scharnhorst» и «Potsdam». Мощность каждого из этих электроходов равна 26 000 л. с. и позволяет развивать скорость до 21 узла.

Первый турбо-электроход, водоизмещением в 26 000 т, имеет длину 186 м и предназначен для линии Европа—Дальний Восток.

Электрогребная установка оборудована берлинской фирмой «AEG». «Scharnhorst» вступил в эксплуатацию в мае 1935 г.

Второй турбо-электроход «Potsdam» оборудован фирмой «Siemens-Schuckert», вступил в эксплуатацию в январе 1936 г. и применяет напряжение 6600 в.

2. Самый большой коммерческий турбо-электроход «Normandie», вступил в эксплуатацию в 1935 г. и предназначен для линии Европа—Америка (Гавр—Нью-Йорк).

Основные данные этого первоклассного товаро-пассажирского лайнера-электрохода следующие:

|                                                   |                 |
|---------------------------------------------------|-----------------|
| Вся длина судна . . . . .                         | 313,75 м        |
| Ширина по главной палубе . . . . .                | 35,9 "          |
| Высота до прогулочной палубы . . . . .            | 28,0 "          |
| Осадка с грузом . . . . .                         | 11,16 "         |
| Водоизмещение . . . . .                           | 80 000 т        |
| Мощность на гребных валах . . . . .               | 160 000 л. с.   |
| Эксплуатационная скорость . . . . .               | 28,5—29,0 узлов |
| Средняя скорость при ходовых испытаниях . . . . . | 31,33 узла      |
| Число пассажиров . . . . .                        | 1972 чел.       |
| Число команды . . . . .                           | 1345 "          |
| Число гребных винтов . . . . .                    | 4               |

На турбо-электроходе «Нормандия» установлены четыре турбо-альтернатора мощностью по 30 100 квт и четыре гребных синхронных электродвигателя мощностью по 40 000 л. с. Ток трехфазный, напряжением 5500 в, частотой 81 герц.

Число оборотов альтернаторов 2430 в мин.

Число оборотов гребных электродвигателей 243 в мин.

Электрооборудование гребной установки выполнены фирмой «Ais-Thom. Belfort».

Если мы видим, что в отношении турбо-электроходов их строительство распространилось на первоклассные лайнеры, среди которых имеется одно из наиболее мощных существующих судов, то до последнего времени строительство дизель-электроходов было сравнительно ограничено как в отношении класса судов, так, главным образом, и в отношении их величины и мощности из-за отсутствия возможности применять на электроходах с дизельными установками переменный ток.

Возможность применения переменного тока на электроходах имеет большие преимущества и выгоды по сравнению с электроходами на постоянном токе особенно вследствие более высокого коэффициента полезного действия электрических машин переменного тока, их большей простоты, а следовательно, и надежности работы, легкости обслуживания, а также и в отношении их веса, габаритов и стоимости.

В качестве примера можно указать на преимущества применения переменного тока для электрогребных установок в отношении коэффи-

коэффициента полезного действия главных электрических машин по сравнению с установками постоянного тока.

Табл. 2 дает сравнительное сопоставление гарантированных по договорам и полученных при эксплуатации к. п. д. электрических генераторов и гребных электродвигателей постоянного и переменного тока.

Таблица 2

| Род тока   | Наименование и тип электроходов                         | Электрические генераторы |                         |                  | Гребные электродвигатели   |                       |                  | Общий к. п. д. электр. машин в проц. | Примечание              |
|------------|---------------------------------------------------------|--------------------------|-------------------------|------------------|----------------------------|-----------------------|------------------|--------------------------------------|-------------------------|
|            |                                                         | единичная мощность в кет | число оборотов в минуту | к. п. д. в проц. | единичная мощность в л. с. | число оборотов в мин. | к. п. д. в проц. |                                      |                         |
| Постоянный | „Труд“ и „Пролетарий“, дизель-электроходы . . . . .     | 2400                     | 350                     | 94               | 3000                       | 144                   | 92               | 86,5                                 | По договору             |
| Переменный | „Wuppertal“ дизель-электроход . . . . .                 | 1900                     | 250                     | 96,5             | 5500                       | 125                   | 97,3             | 93,8                                 | При эксплуатации        |
|            | „И. Сталин“ и „В. Молотов“, турбо-электроходы . . . . . | 4500                     | 3150                    | 96,85            | 5900                       | 225                   | 97,45            | 94,0                                 | При испытании на заводе |
|            | „Vice Roy of India“ турбо-электроход . . . . .          | 9000                     | 3110                    | 96,65            | 8500                       | 109                   | 97,49            | 94,0                                 | При эксплуатации        |

Общий к. п. д. главных электрических машин переменного тока приведенных гребных установок превышает в среднем на 7,5% к. п. д. электрических машин постоянного тока.

При установках переменного тока к. п. д. обслуживающих электродвигателей и электродвигателей общих вспомогательных механизмов будет также выше по сравнению с к. п. д. электродвигателей обслуживающих и электродвигателей общих вспомогательных механизмов в установках постоянного тока. Вследствие этого полный к. п. д. электрической части гребных установок переменного тока будет еще выше по сравнению с приведенным превышением в 7,5%.

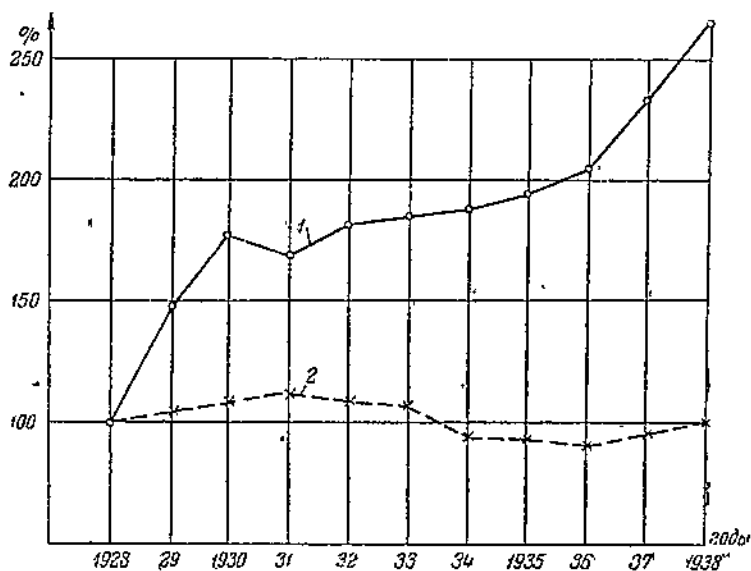
В отношении первичных двигателей экономические преимущества принадлежат дизелям по сравнению с другими тепловыми двигателями, применяемыми на судах, т. е. по сравнению с паровыми машинами и турбинами.

Коэффициент полезного действия дизелей можно считать в среднем 35%, тогда как к. п. д. паровых турбин всего только 22—25%, а к. п. д. паровых машин и того ниже.

Наиболее характерным подтверждением экономического преимущества применения дизелей на судах для гребных установок по сравнению с паровыми двигателями является развитие германского судостроения за последнее десятилетие как страны передовой техники и заново создающей свой флот и за последнее время по своей программе коммерческого судостроения занимающей второе место в мире.

График сравнительного развития судостроения в Германии за последнее десятилетие представлена фиг. 1 (1 — развитие строительства теплоходов, 2 — паровых судов).

Из графика (фиг. 1) видно, что строительство паровых судов в Германии за последнее десятилетие остается почти неизменным, а строи-



Фиг. 1.

тельство теплоходов за это время возросло в ней более чем в два с половиной раза.

Интересно при этом отметить замечку, помещенную в журнале «The Motor Ship» за 1939 г., согласно которой 75% строящихся в Европе судов будет оборудовано дизелями.

Из этого мы видим, какое внимание и место отводится строительству теплоходов как судов, имеющих экономическое преимущество перед паровыми судами, благодаря применению дизелей как более экономичных двигателей. Поэтому естественно, что конкурентоспособность строительства современных электроходов также должна была исходить из возможности использования дизелей в качестве первичных двигателей для электроходов.

Полезно проследить динамику постройки за последнее время коммерческих электроходов в Соединенных Штатах Северной Америки как одной из передовых стран в техническом отношении, на основании сведений, приведенных в табл. 3.

Таблица 3

ДАННЫЕ ПОСТРОЕННЫХ В США ЗА 1937 И 1938 ГГ. КОММЕРЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОХОДОВ  
И ВСЕХ САМОХОДНЫХ КОММЕРЧЕСКИХ СУДОВ (ВМЕСТИМОСТЬЮ 100 Т И ВЫШЕ)  
ЗА ЭТОТ ЖЕ ПЕРИОД.

| Год  | № по пор. | Тип судов                            | Количество | Скорость в узлах | Вместимость в т | Мощность в л. с. | Суммарные мощности построенных судов в л. с. |
|------|-----------|--------------------------------------|------------|------------------|-----------------|------------------|----------------------------------------------|
| 1937 | I.        | Теплоходы .....                      | —          | —                | —               | —                | 42 515                                       |
|      |           | В том числе дизель-электроходы ..... | 5          | —                | —               | —                | 4 100                                        |
|      | 1         | Землечерпалки .....                  | 2          | 10               | 3 974           | 1000             | 2 000                                        |
|      | 2         | Паромы .....                         | 1          | 12               | 703             | 650              | 650                                          |
|      | 3         | " .....                              | 1          | 12               | 750             | 700              | 700                                          |
|      | 4         | Рудовозы .....                       | 1          | 13               | 700             | 750              | 750                                          |
|      | II.       | Паровые суда .....                   | —          | —                | —               | —                | 47 650                                       |
|      |           | В том числе турбо-электроходы .....  |            |                  | Не построено    |                  |                                              |
| 1938 | I.        | Теплоходы .....                      | —          | —                | —               | —                | 44 070                                       |
|      |           | В том числе дизель-электроходы ..... | 7          | —                | —               | —                | 9 650                                        |
|      | 1         | Пожарные суда .....                  | 2          | 16               | 300             | 2000             | 4 000                                        |
|      | 2         | Рудовозы .....                       | 1          | 13               | 700             | 1650             | 1 650                                        |
|      | 3         | Правительственные катера .....       | 2          | 12               | 310             | 1000             | 2 000                                        |
|      | 4         | Буксиры .....                        | 2          | 12               | 158             | 1000             | 2 000                                        |
|      | II.       | Паровые суда .....                   | —          | —                | —               | —                | 88 300                                       |
|      |           | В том числе турбо-электроходы .....  | 3          | —                | —               | —                | 15 700                                       |
|      | 1         | Танкеры .....                        | 2          | 13,25            | 11 400          | 5600             | 11 200                                       |
|      | 2         | Землечерпалки .....                  | 1          | 13,4             | 9 100           | 4500             | 4 500                                        |

На основании приведенной табл. 3 имеем:

Для 1937 г.:

а) Мощность построенных электроходов в 1937 г. составляет от общей мощности всех построенных в США коммерческих судов за этот же год:

$$\frac{4100}{90\,165} \cdot 100 = 4,55\%.$$

б) Но так как в 1937 г. турбо-электроходов построено не было, то правильнее будет определять процент построенных дизель-электроходов только по отношению к построенным теплоходам, т. е.

$$\frac{4100 \cdot 100}{42\,515} = 9,6\%.$$

Для 1938 г.:

а) Суммарная мощность построенных электроходов за 1938 г. составляет от общей мощности всех построенных в США коммерческих судов за этот же год:

$$\frac{15\,700 + 9\,650}{88\,300 + 44\,070} \cdot 100 = 19,1\%.$$

б) Отдельно процентное отношение построенных турбо-электроходов ко всем построенным в 1938 г. коммерческим судам с паровыми установками составляет:

$$\frac{15\,700}{88\,300} \cdot 100 = 17,8\%.$$

в) То же для дизель-электроходов по отношению ко всем построенным в 1938 г. теплоходам:

$$\frac{9650}{44\,070} \cdot 100 = 21,8\%.$$

Что касается ближайших перспектив строительства электроходов в США, то, по имеющимся данным на январь 1939 г., портфель заказов американских судостроительных заводов включал следующее процентное соотношение ведущегося строительства электроходов (учтены суда вместимостью 100 т и выше):

1. По турбо-электроходам:

$$\frac{14\,500}{149\,330} \cdot 100 = 9,7\%.$$

2. По дизель-электроходам:

$$\frac{3\,000}{25\,870} \cdot 100 = 11,6\%.$$

Средний процент строительства электроходов:

$$\frac{17\,500}{175\,170} \cdot 100 \cong 10\%.$$

На основании табл. 3 и выведенных из этой таблицы данных процентного соотношения построенных электроходов ко всем построенным в США судам за два указанных года, а также и последующих перспектив, заключаем, что строительству электроходов и в частности строительству дизель-электроходов в Америке уделяется довольно значительное внимание и за последнее время. При этом нужно заметить, что строительство дизель-электроходов в США ограничивается сравнительно мелкими и маломощными судами, и то, главным образом, техническими судами.

До последнего времени строительство дизель-электроходов ограничено как в отношении класса судов, так, главным образом, и в отношении их величины, а следовательно, и мощности гребных установок, что видно на примере Америки. Это ограничение является следствием отсутствия возможности применять на мощных электроходах с дизельными агрегатами переменный ток, так как на этих электроходах в силу техно-экономических условий требуется параллельная работа генерирующих агрегатов для питания мощных гребных электродвигателей. Невозможность параллельной работы генерирующих дизель-агрегатов переменного тока в судовых условиях объясняется необходимостью одновременного управления изменением числа оборотов

у всех параллельно работающих дизель-альтернаторов, питающих гребной электродвигатель, и необходимостью обеспечения сохранения синхронной работы альтернаторов за время реверсирования гребного электродвигателя, когда переключение последнего производится при снятом возбуждении питающих агрегатов.

Только за последнее время в Германии удалось технически разрешить задачу использования дизельных агрегатов переменного тока, работающих параллельно для питания мощных гребных электродвигателей.

В Германии был построен в 1936 г. первый крупный дизель-электроход «Wuppertal», применявший параллельную работу дизель-агрегатов переменного тока для питания гребного электродвигателя.

Основные данные этого дизель-электрохода, построенного по заказу крупнейшей германской пароходной компании «Hamburg American Line», следующие:

|                           |            |
|---------------------------|------------|
| Водоизмещение.....        | 16 500 т   |
| Длина.....                | 151,8 м    |
| Ширина.....               | 18,7 "     |
| Осадка.....               | 7,95 "     |
| Скорость хода.....        | 16,0 узлов |
| Число гребных винтов..... | 1          |

Судно оборудовано:

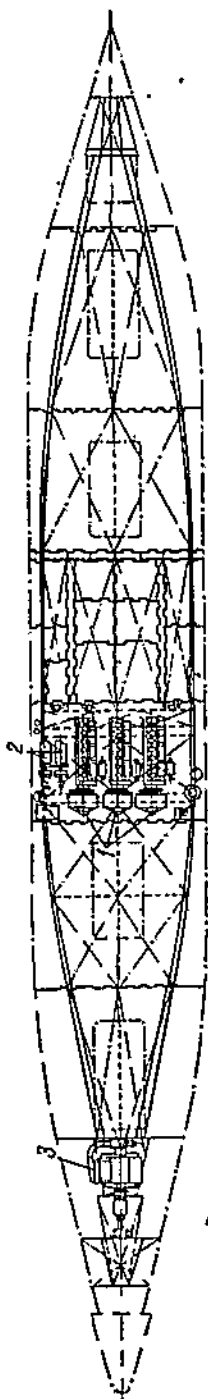
а) Дизель-альтернаторы трехфазного тока — 3 шт. мощностью по 1900 ква при  $V = 2200$  в,  $n = 250$  об/мин.

б) Гребные электродвигатели: главный — синхронный мощностью 5000 ква и вспомогательный — асинхронный — 900 л. с.; оба электродвигателя сидят на одном валу. «Wuppertal» вступил в эксплуатацию в 1937 г.

План размещения главных агрегатов электрогребной установки дизель-электрохода «Wuppertal» приведен на фиг. 2.

После пробных и первых рейсов дизель-электрохода «Wuppertal», давших весьма положительные результаты, фирма «Hamburg American Line» заказала еще 9 дизель-электроходов.

В 1937 г. для этой пароходной компании построен и вступил в эксплуатацию в 1938 г. самый большой в настоящее время дизель-электроход «Patria».



Фиг. 2.

1 — три главных дизель-альтернатора; 2 — два вспомогательных дизель-альтернатора; 3 — гребной электродвигатель.

Основные данные дизель-электрохода «Patria» следующие:

|                           |          |
|---------------------------|----------|
| Водоизмещение.....        | 20 000 т |
| Длина.....                | 187,15 м |
| Ширина.....               | 22,5 "   |
| Осадка.....               | 7,8 "    |
| Скорость хода.....        | 17 узлов |
| Число гребных винтов..... | 2        |

Судно оборудовано:

- а) Дизель-альтернаторы трехфазного, тока — 6 шт. мощностью по 2100 ква при  $V = 3300$  в,  $n = 250$  об/мин.  
 б) Гребные электродвигатели синхронные — 2 шт. мощностью по 7500 л. с.,  $n = 110$  об/мин.

В начале 1938 г. в Германии находилось в строительстве четыре больших дизель-электрохода, из них 2 пассажирских и 2 грузовых. Данные по этим дизель-электроходам приведены в табл. 4.

Таблица 4

| № по пор. | Тип судна                               | Тоннаж | Установ-<br>ленная<br>мощность<br>в л. с. | Скорость<br>в<br>узлах | Число<br>генери-<br>рую-<br>щих ал-<br>тернаторов | Число оборотов в<br>минуту     |                                   |
|-----------|-----------------------------------------|--------|-------------------------------------------|------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
|           |                                         |        |                                           |                        |                                                   | генери-<br>рующего<br>агрегата | гребного<br>электро-<br>двигателя |
| 1         | Пассажирский дизель-<br>электроход..... | 25 000 | 12 420                                    | 15,5—16                | 6                                                 | 235                            | 117                               |
| 2         | То же.....                              | 16 000 | 18 000                                    | 17                     | 6                                                 | 250                            | —                                 |
| 3         | Грузовой дизель-элек-<br>троход.....    | 9 500  | 7 800                                     | 16                     | 3                                                 | 250                            | 125                               |
| 4         | То же.....                              | 8 000  | 14 400                                    | —                      | 4                                                 | —                              | —                                 |
|           |                                         | 58 500 | 52 620                                    | —                      | —                                                 | —                              | —                                 |

Суммарная мощность четырех строящихся в 1938 г. в Германии больших дизель-электроходов равна 52 620 л. с., что составляет  $\frac{52\,620 \cdot 100}{245\,000} = 21,4\%$  от средней годовой мощности теплоходов, построенных в Германии за два предшествующих года.

По тоннажу процент строящихся в Германии в 1938 г. больших коммерческих дизель-электроходов соответственно составляет  $\frac{58\,500}{319\,325} \cdot 100 = 18,4\%$ .

Помимо технических трудностей, удовлетворительно разрешенных за последнее время в Германии при использовании дизель-генераторов переменного тока для гребных установок, внедрению электродвижения судов препятствует существующее весьма распространенное до настоящего времени среди кораблестроительных инженеров мнение, что вообще применение электродвижения судов приводит:

1. К большей стоимости оборудования.
2. Увеличению веса установки.
3. К снижению к. п. д. гребной установки по сравнению с теплоходами, а следовательно и увеличению расхода горючего и вызывает:

1. Опасность выключения гребной установки.

2. Трудности для технического персонала при работе машин.

В малой обоснованности подобных априорных общих взглядов можно убедиться, если обратиться к примеру сравнительного технико-экономического подсчета, произведенного для судна с оборудованной в одном случае гребной установкой с непосредственным приводом гребного вала от дизелей как наиболее распространенным видом теплоходных установок, а в другом случае — к установке дизель-электрохода.

Сравнение произведено для 2-винтового пассажирского лайнера грузоподъемностью 23 000 т и мощностью 24 000 л. с.

Первый вариант — теплоходный, с непосредственным приводом гребного вала.

Второй вариант — дизель-электроходный на переменном токе.

По первому варианту предусматривалось следующее оборудование:

1. Дизельная установка с машинами типа «Sulzer Bros» мощностью  $2 \times 12\,000$  л. с. для непосредственного привода гребных винтов при 100 об/мин.

2. Вспомогательные дизель-генераторы  $5 \times 700$  квт.

3. Распределительный щит постоянного тока.

4. Четыре продувочных вентилятора с электроприводами.

5. Утилизационные котлы на отходящих газах.

6. Глушители.

7. Топливные отсеки.

По второму варианту предусматривалось следующее оборудование:

1. Гребные синхронные электродвигатели мощностью  $2 \times 12\,000$  л. с. с числом оборотов 100 в минуту.

2. Альтернаторы трехфазного тока мощностью по  $5 \times 4185$  квт,  $n = 225$  об/мин., приводятся непосредственно от дизелей.

3. Пульт управления и распределительное устройство переменного тока.

4. Дизеля типа «Sulzer Bros» мощностью  $5 \times 5700$  л. с.,  $n = 225$  об/мин.

5. Установка двух преобразователей в виде мотор-генераторов для обслуживания возбуждения гребной установки.

6. Мотор-генераторная установка мощностью  $3 \times 500$  квт.

7. Распределительное устройство постоянного тока.

8. Утилизационные котлы на отходящих газах.

9. Глушитель.

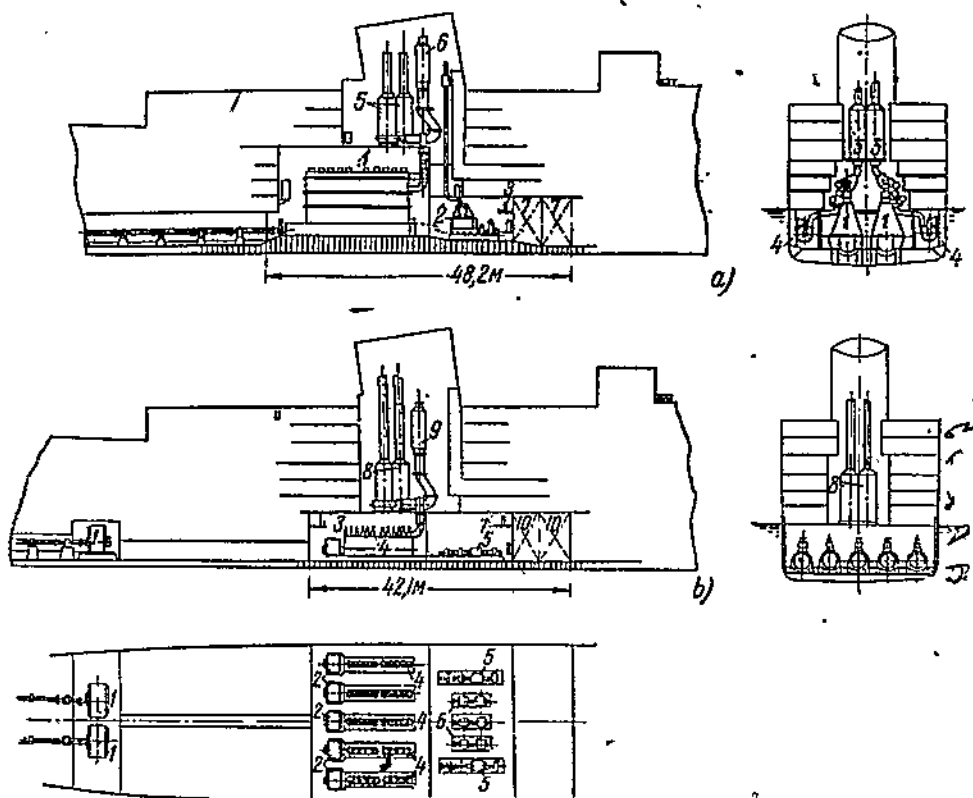
10. Топливные отсеки.

Мощность дизель-альтернаторов  $5 \times 4185$  квт достаточна для питания гребных электродвигателей и электродвигателей вспомогательных механизмов, среди которых также получают питание два мотор-генератора, предназначенные для возбуждения главных альтернаторов и гребных электродвигателей, и три мотор-генератора мощностью по 500 квт, напряжением 220 в, предназначенные для питания потребителей, не связанных с работой главных машин.

Размещение оборудования по обоим вариантам представлено на прилагаемых эскизах (фиг. 3).

Сравнительные данные стоимости и весов теплоходного и дизель-электроходного вариантов приводятся ниже, причем дополнительное машинное оборудование, одинаковое для обоих вариантов, не приводится.

На основании приведенных подсчетов видим, что стоимость обоих вариантов практически одинакова.



Фиг. 3. а — теплоходный вариант; б — дизель-электроходный вариант на переменном токе.

Вес оборудования дизель-электрохода меньше веса оборудования теплохода на 691 т, или, примерно, на 50%. Кроме того, на основании приведенных эскизов объем машинного отделения по второму варианту меньше объема машинного отделения по первому варианту, примерно, на 4100 м<sup>3</sup>, при этом не учтена дополнительная кубатура от тоннеля гребного вала за счет меньшей длины последнего при дизель-электроходном варианте.

Для выяснения вопроса о расходах горючего прежде всего обратимся к значениям полного к. п. д. электрогребной установки при различных режимах ее работы.

Полный к. п. д. электрогребной установки включает потери в альтернаторах и гребных электродвигателях, расходы электроэнергии на

## Первый — теплоходный вариант

## Второй — дизель-электроходный вариант

## а) Стоимость в фунтах стерлингов

1. Дизеля  $2 \times 12\,000$  л. с.,  
 $n=100$  об/мин., вместе  
 с дополнительным обо-  
 рудованием . . . . . 195 000

2. Вспомогательная элек-  
 тростанция  $5 \times 700$  квт,  
 $300$  об/мин.,  $220$  в  
 напряжением . . . . . 38 700

3. Дополнительная стои-  
 мость трех компрес-  
 соров производитель-  
 ностью около  $8,5$   
 $\text{м}^3/\text{мин.}$ , давлением око-  
 ло  $20$  атм., по сравне-  
 нию с меньшими ком-  
 прессорами второго ва-  
 рианта . . . . . 1500

Дополнительная стои-  
 мость более длинных  
 и более тяжелых греб-  
 ных валов по сравне-  
 нию со вторым ва-  
 риантом ( $49$  ф. с.  $\times 81$   
 плюс стоимость фунда-  
 мента и подшипников к  
 ним) около . . . . . 4500

Всего по первому ва-  
 рианту . . . . . 239 700 ф. с.

## б) Веса в тоннах

1. Дизеля  $2 \times 12\,000$  л. с. с  
 дополнительным обо-  
 рудованием . . . . . 1720 т

2. Вспомогательная электро-  
 станция  $5 \times 700$  квт . . . . . 265

3. Дополнительный гребной  
 вал длиной  $51$  м, диа-  
 метром  $50$  см с фун-  
 даментами и подшип-  
 никами, по сравнению  
 со вторым вариантом . . . . . 100

Всего по первому ва-  
 рианту . . . . . 2085 т

1. Дизеля  $5 \times 5700$  л. с.,  
 $n=225$  об/мин.,  
 вместе с дополни-  
 тельным оборудо-  
 ванием . . . . . 154 000

2. Стоимость электрообо-  
 рудования, состоя-  
 щего из альтерна-  
 торов  $5 \times 4185$  квт,  
 гребных электро-  
 двигателей  $2 \times 12\,000$   
 л. с. распределе-  
 тельного устрой-  
 ства, пульта управ-  
 ления, кабелей воз-  
 душных охладите-  
 лей и т. д. и мо-  
 тор-генераторов . . . . . 85 500

Всего по второму ва-  
 рианту . . . . . 239 500 ф. с.

1. Дизеля  $5 \times 5700$  л. с.  
 с дополнительным  
 оборудованием . . . . . 940

2. Гребные электродви-  
 гатели  $2 \times 12\,000$  л. с. . . . . 172

3. Альтернаторы  
 $5 \times 4185$  квт . . . . . 155

4. Мотор-генераторы . . . . . 60

5. Распределительное  
 устройство, возбу-  
 дители вентиляции,  
 кабели и т. д. . . . .

Всего по второму ва-  
 рианту . . . . . 1394 т



возбуждение и вентиляцию, в кабелях и распределительном устройстве, т. е. учитывает все потери от дизелей до гребного вала.

Изменения к. п. д. электрической части гребной установки приведены в табл. 5 в зависимости от количества работающих дизель-агрегатов.

Таблица 5

| Количество работающих дизель-агрегатов . . . . .                    | 5      | 4      | 3      | 2    |
|---------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|------|
| Мощность на гребных валах в л. с. . . . .                           | 24 000 | 17 300 | 11 300 | 5750 |
| Число оборотов гребных винтов в минуту . . . . .                    | 100    | 90     | 78     | 64   |
| Полный к. п. д. электрической части гребной установки в % . . . . . | 91,7   | 92,0   | 90,6   | 88,9 |

Как видно из приведенной таблицы, к. п. д. изменяется сравнительно незначительно и, при снижении мощности установки до 24% от полной, к. п. д. уменьшается всего только на 2,8%.

При полном и экономическом ходе среднее значение к. п. д. электрической части гребной установки можно принять равным 91,5%, чему соответствуют потери в 8,5%.

Эти потери электрической части гребной установки электрохода в 8,5%, по сравнению с теплоходом, имеющим непосредственный привод от дизеля подлежат следующему исправлению.

1. Вследствие большего веса машинного оборудования теплохода, по сравнению с дизель-электроходом, на 691 т мощность на гребных валах последнего, по сравнению с теплоходом, при той же скорости судна может быть снижена, примерно, на 2,5%, а следовательно, будет снижен и расход горючего.

2. При сниженных скоростях теплохода, что при эксплуатации должно иметь место, среднее индикаторное давление дизелей должно падать, что повлечет ухудшение к. п. д. дизелей по сравнению с к. п. д. их при полной нагрузке, а следовательно, и увеличение расхода горючего дизелями на силу-час.

Для ориентировочной оценки расхода горючего, в зависимости от неполной загрузки дизелей, будем полагать, что 30% времени теплоход будет работать со сниженной скоростью на 10% против полной скорости. При этом мощность, требуемая от гребных двигателей, снизится, примерно, до 73% полной мощности.

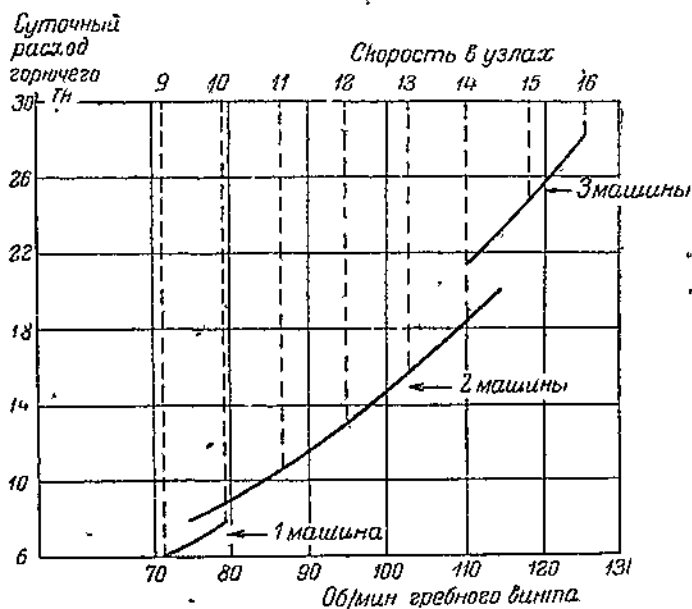
Обращаясь к кривым, выражающим расход горючего в зависимости от количества работающих дизелей и степени их загрузки, полученным по эксплуатационным данным дизель-электрохода «Wipertal» и приводимым на фиг. 4.

На основании приведенных кривых видно, что при загрузке трех дизелей, примерно, в 70% их полной мощности потребляемый ими расход горючего превышает расход горючего двух дизелей при полной их загрузке на

$$\frac{23-20}{20} \cdot 100 = 15\%.$$

Следовательно, средний расход горючего на теплоходе, отнесенный ко всей продолжительности его эксплуатации, благодаря неполной,  $\sim 70\%$ , загрузке дизелей в течение  $30\%$  эксплуатационного времени, увеличится по сравнению с расходом горючего при полной скорости судна на  $15 \cdot 0,3 = 4,5\%$ .

Таким образом расход горючего на дизель-электроходе, по сравнению с аналогичным ему теплоходом, несмотря на дополнительные потери в  $8,5\%$  электрической части первого, с учетом только двух



Фиг. 4. Кривые расхода горючего при работе одного, двух и трех главных дизель-генераторов электрохода „Wuppertal“ в зависимости от скорости гребного винта.

приведенных факторов, будет превышать расход горючего на теплоходе, примерно, на

$$8,5 - (2,5 + 4,5) = 1,5\%.$$

При остановке части дизель-агрегатов на дизель-электроходе, что осуществляется при неполной загрузке гребных электродвигателей, полностью экономится смазка неработающих дизелей, что не имеет места на теплоходе.

При более тщательном и полном учете других мелких факторов, как то: условия работы дизелей при штормовой погоде, при маневрировании, возможности использования электроэнергии главных генераторов для вспомогательных целей и т. п. можно полагать, что расход на горючее и смазку как на теплоходах, так и на дизель-электроходах для одинаковых судов и работающих в аналогичных условиях будет одинаковым.

Для завершения экономического сравнения теплоходов с дизель-электроходами обратимся к эксплуатационным расходам по содержанию обслуживающего персонала.

Табл. 6 дает представление о штате команды машинного отделения в зависимости от различного рода гребных установок.

Таблица 6

Штаты машинных команд для судов с различного рода гребными установками

| Наименование судов              | „Wuppertal“       | „Ruhr“                                     | „Duisburg“ | „Rurmark“                                  | „Bitterfeld“                               | „Bochum“                             |
|---------------------------------|-------------------|--------------------------------------------|------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------|
| Тип машин                       | Дизель-электроход | 2 дизеля с приводом, типа Вулкан, на 1 вал | 2 дизеля   | Турбозубчатый привод с нефтяным отоплением | Турбозубчатый привод с угольным отоплением | Паровая машина с угольным отоплением |
| Мощность в л. с. . . . .        | 9800              | 4100                                       | 5100       | 6300                                       | 6300                                       | 5000                                 |
| Инженеры . . . . .              | 5                 | 5                                          | 5          | 4                                          | 4                                          | 4                                    |
| Электрики . . . . .             | 1                 | 1                                          | 1          | 1                                          | 1                                          | —                                    |
| Помощники . . . . .             | 4                 | 4                                          | 4          | 2                                          | 3                                          | 2                                    |
| Смазчики и т. п. . . . .        | 2                 | 2                                          | 1          | 2                                          | 2                                          | 2                                    |
| Кочегары или уборщики . . . . . | 5                 | 5                                          | 6          | 6                                          | 15                                         | 12                                   |
| Помощники кочегаров . . . . .   | —                 | —                                          | —          | 4                                          | 12                                         | 6                                    |
| Мальчики . . . . .              | 2                 | 1                                          | 1          | 1                                          | 2                                          | 1                                    |
| Итого . . . . .                 | 19                | 18                                         | 18         | 20                                         | 39                                         | 27                                   |

На основании табл. 6 можно считать, что эксплуатационные расходы по содержанию машинной команды для дизель-электроходов и теплоходов одинаковой мощности также одинаковы. В приведенной таблице штат машинной команды на дизель-электроходе «Wuppertal» превышает всего на 1 человека штат теплоходов «Ruhr» и «Duisburg», но мощность дизель-электрохода, в среднем, превышает в два раза мощность каждого из этих теплоходов.

Что касается опасений частых выключений гребной установки и трудностей технического персонала по обслуживанию электрических машин при работе, то лучшим доказательством необоснованности этих взглядов является тот факт, что по возвращении дизель-электрохода «Wuppertal» после первого рейса в Австралию из трех инженеров-электриков был оставлен только один, так как электротехнической работы на судне очень мало и два инженера-электрика оказались совершенно излишними. С другой стороны, это свидетельствует о полной надежности работы электрической части установки на электроходе.

Для сравнения варианта теплохода, применяющего быстроходные дизеля с зубчатой передачей на вал, с дизель-электроходами можно заметить, что на основании данных, полученных Hamburg American Line для судов по 6500 т и мощностью по 6000 л. с., весовые

соотношения установок на этих судах, примерно, одинаковы. Стоимость теплохода с зубчатой передачей дешевле, примерно, на 3% общей стоимости (100 000 марок). Но эта выгода настолько незначительна, что, по мнению Hamburg American Line, дополнительные потери в зубчатых передачах и те неудобства и несовершенства, которые имеет зубчатая передача перед электроприводом, не оправдают этой кажущейся на первый взгляд выгоды, и поэтому фирма Hamburg American Line, базируясь на своем эксплуатационном опыте, предпочла заказать дизель-электроходы.

Из приведенного анализа, дающего технико-экономическое сравнение между теплоходами и дизель-электроходами на переменном токе, можно заключить, что при более детальном и всестороннем рассмотрении и учете как главных, так и второстепенных положений и условий стоимость первоначальных затрат на оборудование и эксплуатационные расходы для обоих типов судов практически можно считать одинаковой.

В отношении веса установки и объема помещений, отводимых для размещения оборудования, преимущество остается за дизель-электроходами.

Более легкий вес оборудования дизель-электрохода позволяет увеличить полезную грузоподъемность судна, что при дополнительном объеме освобождающихся при этом помещений на судне позволит увеличить его доходность в течение всего времени эксплуатации. Если при этом принять во внимание большую живучесть гребной установки дизель-электрохода, благодаря большому количеству генерирующих агрегатов, и большую надежность работы гребных электродвигателей по сравнению с дизелями, то экономические выгоды для одинаковых судов окажутся не на стороне теплоходов.

Электрогребные установки на переменном токе были бы особенно пригодны для судов мощного типа с одним гребным винтом. Так, например, по отзывам специалистов, судно мощностью в 8000 л. с., оборудованное одним гребным винтом, будет иметь больший к. п. д. гребной установки по крайней мере на 7% перед судном, оборудованным двумя гребными винтами.

В случае одновинтовой гребной установки дизель-электроход будет иметь техническое преимущество перед таким же одновинтовым теплоходом, благодаря обеспеченности бесперебойной работы генерирующей части и сравнительно большой надежности работы гребного электродвигателя переменного тока.

Таким образом дизель-электроходы могут быть вполне конкурентоспособными с теплоходами как наиболее экономичными современными судами.

Только как подтверждение этому и может служить отмеченный выше большой процент строящихся за последнее время дизель-электроходов в Германии, а также и тот факт, что наиболее крупная германская пароходная компания Hamburg American Line после удачного опыта эксплуатации первого крупного дизель-электрохода «Wupperthal» заказала немедленно еще девять дизель-электроходов.

На основании приведенного историко-статистического обзора можно прийти к следующим выводам.

1. Область электродвижения судов к настоящему моменту вышла из стадии экспериментирования и начинает находить приложение ко всем видам судов коммерческого флота, включая и первоклассные лайнеры как парового, так и дизельного типа.

2. Для судов технического и вспомогательного флота электродвижение имеет преимущества, так как, во-первых, энергия требуется не только для целей движения судна, но также и для его производственных процессов, а во-вторых, эти суда требуют большой маневренности, с широким диапазоном изменения скорости движения. На этих судах применение системы электродвижения находит экономическое и техническое преимущества. Подтверждение этому можно видеть в табл. 3 построенных и строящихся за последнее время в Америке судов технического назначения, где на долю землечерпалок, пожарных судов, паромов, буксиров, служебных катеров, рудовозов и танкеров, применяющих электродвижение, в среднем приходится свыше 10% мощности на валах от мощности всего коммерческого судостроения в Америке. Это позволяет предполагать, что если не все суда подобного типа строятся с электродвижением, то большинство из них в Америке строится как электроходы.

3. Современное судостроение, которое в Европе к началу 1939 г. на 75% переключилось на строительство теплоходов, также начинает находить выгоды в применении системы электродвижения и в коммерческих товаро-пассажирских судах с дизелями, чему подтверждением может служить вышеуказанное строительство дизель-электроходов в Германии как одной из передовых стран современного судостроения.

В заключение можно отметить следующие основные преимущества, которые выявились при более детальном и широком наблюдении над судами с электродвижением.

1. Отсутствие ограничений (в отношении числа оборотов и нереверсивности) в применении первичных двигателей для судов с электродвижением, вследствие чего имеется возможность использовать различный, включая и береговой, а не только специальный судовой тип машин в качестве первичных двигателей. Это обстоятельство может давать дополнительные экономические преимущества, особенно при оборудовании судов во время большого спроса на тоннаж и трудности получения специальных машин, что позволяет быстрее вводить суда в эксплуатацию.

Примером этому может служить замена износившихся дизелей на судне «Vogtland».

2. Возможность использования гребных винтов и первичных двигателей с наивысшими к. п. д.

3. Отсутствие разбега гребного винта при его оголении, благодаря большим маховым моментам гребной установки.

4. Легкость, гибкость и сравнительная быстрота маневренности. Реверсирование винта требует операций с электрическими выключателями, не прибегая при этом к изменению направления вращения первичных двигателей.

5. В штормовую погоду возможность наиболее выгодного соотношения между моментом и числом оборотов. Благодаря лучшему исполь-

зованию гребной установки электроходов в штормовую погоду суда с электродвижением имеют большую скорость по сравнению с судами, имеющими привод гребного винта непосредственно от первичного двигателя или при наличии механической передачи.

6. На электроходах, при использовании многоагрегатной силовой установки, имеется возможность производить ремонт генерирующих машин во время рейса, что сводит на-нет простой судна в порту из-за ремонта этих агрегатов.

Так, например, танкер «Брунsvик» при трансатлантических рейсах свыше одного года ни разу не простаивал в порту дольше времени, потребного для грузовых операций, так как во время плавания производили на ходу выемку поршней и чистку каждого из четырех дизелей.

7. Возможность использования мощности главных агрегатов для вспомогательных целей, благодаря чему отпадает необходимость в установке дополнительных первичных двигателей для вспомогательных нужд, за исключением аварийного агрегата или агрегатов, несущих нагрузку в порту.

Подобная установка применена на одном из последних электроходов — «Patria».

8. Возможность отключения части генерирующих агрегатов при уменьшенном ходе судна, что дает возможность получения наибольшего к. п. д. генерирующей установки при распределении частичной мощности, потребляемой гребными винтами, между генерирующими агрегатами, с возможно наибольшей их загрузкой.

9. Большая гарантия против остановки в море, благодаря наличию многих генерирующих агрегатов, что обеспечивает бесперебойную работу гребных винтов. Гребные электродвигатели переменного тока являются надежными механизмами.

10. Наиболее выгодные условия для размещения на судне генерирующей станции и гребных электродвигателей; последние можно размещать непосредственно в корме, что укорачивает гребные валы и улучшает их эксплуатацию.<sup>1</sup>

11. Вибрации от скручивания и неуравновешенности гребных винтов не отзываются вредно на первичных двигателях. Возможность применения сравнительно точных электроизмерительных (включая самопишущие) приборов позволяет непрерывно определять и контролировать расходующую мощность в течение всего времени.

12. Соответствующий подбор и размещение генерирующих агрегатов дает возможность иметь выгоды в отношении объема машинного помещения и веса установки, что обеспечивает больший объем свободных помещений на судне и дает возможность соответственно увеличить грузоподъемность судна.

13. Принимая во внимание детально все условия эксплуатации судна, преимущество получается на стороне электроходов, включая иногда и экономию горючего, особенно перед судами с паровыми установками.

<sup>1</sup> Пример размещения главных машин электрогребной установки можно видеть на фиг. 2.

## ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ТРЕБОВАНИЯ ЭЛЕКТРОГРЕБНЫХ УСТАНОВОК

### § 3. Род тока и величина напряжения, применяемые на электроходах, и классификация последних

Для целей электродвижения судов первоначально применялся постоянный ток, так как общее развитие судового электрооборудования шло по линии применения постоянного тока, который преимущественно применяется и до сих пор на судах для вспомогательного электрооборудования.

На первых судах с применением электродвижения, а также и на судах, оборудованных дизелями в качестве первичных двигателей (например, по системе Del Proposto), имели место до недавнего прошлого гребные установки только на постоянном токе.

Незначительные мощности первых гребных электроустановок на постоянном токе, а также и требование сравнительно незначительной продолжительности их работы давали удовлетворительные результаты при их эксплуатации.

По мере общего развития судостроения, требующего больших мощностей на гребных валах для длинных по расстоянию и непрерывно-продолжительных рейсов, осуществление электродвижения на постоянном токе не могло дать удовлетворительных результатов из-за несовершенства существующих машин постоянного тока. Машин постоянного тока имеют следующие недостатки по сравнению с машинами переменного тока:

1. Меньшая надежность, особенно при длительно-непрерывной работе, и затруднительность обслуживания машин постоянного тока вследствие наличия у них сложной и ответственной части, какой является коммутационное устройство, состоящее из вращающегося коллектора и трущихся по нему неподвижных щеток.

2. Меньший к. п. д. при одинаковых скоростях и мощностях.

3. Ограниченность их единичной мощности, главным образом из-за коммутационных условий, что нередко требует применения машин с двойным якорем, вследствие чего к. п. д. еще больше ухудшается.

4. Большая стоимость машин постоянного тока против машин переменного тока, при одинаковых мощностях и скорости.

5. Большие их габариты и вес, что имеет немаловажное значение в судовых условиях.

Несмотря на то, что электрические машины постоянного тока обладают основным техническим преимуществом перед машинами переменного тока, а именно, возможностью легкого осуществления плавного и широкого диапазона регулировки числа оборотов, что для судовых гребных электродвигателей является необходимым условием, все же они в мощных гребных установках оказались неконкурентоспособными по сравнению с машинами переменного тока в силу вышеперечисленных их недостатков.

Основное требование для электрогребных двигателей — это возможность получения широкого диапазона плавной регулировки числа оборотов гребного винта. В судовых установках переменного тока это легко может быть достигнуто только за счет изменения частоты тока, подводимого к электродвигателю. До последнего времени возможность широкой регулировки частоты переменного тока на больших установках являлась принадлежностью турбоэлектрических гребных установок, позволяющих снижать частоту до 20—25% от нормальной. В настоящее время возможность снижения частоты, примерно, до 35—40% от нормальной также достигнута и для крупных дизель-электроходных установок, требующих параллельной работы генераторов. Таким образом основное техническое требование — возможность широкой и плавной регулировки числа оборотов гребного электродвигателя — разрешено для современных судовых установок полностью, включая и дизель-электроходы.

Что касается необходимости получения больших единичных мощностей от агрегатов электрогребной установки при рациональном решении вопроса электрооборудования крупных современных электроходов, где требуются значительные единичные мощности и, как мы видим на примере осуществленного электрохода «Нормандия», где мощность на одном гребном валу может достигать 40 000 л. с. (29 400 квт), то в этом отношении техническая возможность применения мощных агрегатов остается всецело за машинами переменного тока и использование агрегатов на постоянном токе явилось бы технически невозможным. Для подтверждения этого положения рассмотрим более подробно вопрос о предельных мощностях машин постоянного тока.

На основании конструктивной практики электромашиностроительных заводов и американских данных для машин постоянного тока обычно принимают:

а) отношение диаметра коллектора  $D_k$  к диаметру якоря  $D_a$  равным  $\frac{D_k}{D_a} = 0,6$ ;

б) окружную скорость коллектора при этом берут обычно не более  $v_k = 18$  м/сек., а для быстроходных машин, как, например, турбогенераторы, окружную скорость на коллекторе доводят максимум до 36 м/сек.

Окружная скорость якоря машины при вышеуказанном соотношении диаметров соответственно будет:

$$v_a = 30 \text{ м/сек. до } v_{a \max} = 60 \text{ м/сек.}$$

(последняя — для турбогенераторов).

Располагая этими конструктивно-целесообразными данными, перейдем к нахождению выражения мощности  $P$  для машин постоянного тока в зависимости от их диаметра якоря, с последующим переходом к выражению мощности машин  $P$  через окружную скорость  $v_a$  их якоря.

Мощность машины постоянного тока выражается:

$$P = V I_a \text{ вт.}$$

Выражая величину напряжения машины  $V$  через среднее значение разности потенциалов  $e_{\text{ср}}$  между двумя смежными коллекторными пластинами, имеем:

$$V = \frac{K}{2p} e_{\text{ср}},$$

где  $K$  — общее число коллекторных пластин,

$2p$  — число полюсов машины,

$e_{\text{ср}}$  — разность потенциалов между двумя смежными коллекторными пластинами, которая для больших машин, имеющих компенсационную обмотку, берется обычно не более 20 в.

Силу тока в якоре машины  $I_a$  выразим через силу тока  $i_a$  в отдельной параллельной ветви якоря:

$$I_a = 2ai_a = 2pi_a$$

(для машин с петлевой обмоткой).

Найденные выражения  $V$  и  $I_a$  подставляем в выражение мощности  $P$ :

$$P = \frac{K}{2p} e_{\text{ср}} \cdot 2pi_a = K \cdot e_{\text{ср}} \cdot i_a.$$

Принимаем во внимание, что для стержневой обмотки, которая применяется в мощных машинах, число коллекторных пластин равно

$$K = \frac{N}{2},$$

где  $N$  — число проводников якоря,

Имеем:

$$P = e_{\text{ср}} \cdot \frac{Ni_a}{2}.$$

Общее число ампервитков обмотки якоря, равное  $Ni_a$ , можно выразить через линейную нагрузку якоря  $AS$  (т. е. число амперпроводов, приходящееся на 1 см окружности якоря):

$$Ni_a = \pi D_a AS.$$

Выражение мощности машины, таким образом, можно соответственно изменить и представить в зависимости от диаметра ее якоря:

$$P = e_{\text{ср}} \frac{Ni_a}{2} = \frac{\pi}{2} e_{\text{ср}} D_a AS.$$

Значение линейной электрической нагрузки якоря не является величиной постоянной, а находится в зависимости от диаметра якоря  $D_a$  или от связанной с диаметром якоря его окружной скорости  $v_a$ .

Для машин большой мощности, согласно данным Trettin'a (Треттина), линейную электрическую нагрузку якоря можно выразить следующей эмпирической формулой:

$$AS = 411 \cdot \frac{25 + v_a}{10 + v_a},$$

где  $v_a$  — окружная скорость якоря — берется в м/сек.

В выражении мощности  $P$  заменяем диаметр якоря  $D_a$  через его окружную скорость, которая найдется по уравнению:

$$v_a = \frac{\pi D_a n}{60},$$

откуда

$$D_a = \frac{60 v_a}{\pi n},$$

где  $n$  — число оборотов электрической машины в 1 мин.

Мощность  $P$  выразится:

$$P = \frac{\pi}{2} c_{cp} D_a AS = \frac{\pi}{2} c_{cp} \frac{60 v_a}{\pi n} AS = 30 \frac{c_{cp} v_a}{n} AS.$$

В этом уравнении  $P$  выражено в ваттах, а  $v_a$  в см/сек., так как  $AS$  относится к 1 см окружности якоря.

Для выражения мощности машины в киловаттах, при окружной скорости ее якоря  $v_a$  в м/сек., выражение для мощности  $P$  представится уравнением:

$$P = 30 \frac{c_{cp} v_a}{n} AS \frac{100}{1000} = 3 \frac{c_{cp} v_a}{n} AS \text{ кВт.}$$

Заменяя  $AS$  выражением по формуле Треттина, окончательно имеем:

$$P = 3 \cdot 411 \cdot \frac{c_{cp} v_a}{n} \cdot \frac{25 + v_a}{10 + v_a} = 1233 \frac{c_{cp} v_a}{n} \cdot \frac{25 + v_a}{10 + v_a} \text{ кВт.}$$

Из полученного выражения мощности  $P$  машин постоянного тока заключаем, что при постоянном значении окружной скорости якоря  $v_a$  с увеличением числа оборотов якоря машины  $n$  ее предельная мощность падает, а с уменьшением оборотов якоря машины  $n$  ее предельная мощность увеличивается.

Поэтому возможность использования для генераторов в качестве первичных двигателей быстроходных машин, к которым относятся, например, паровые турбины как наиболее компактные и экономичные паровые двигатели, будет ограничена предельно допустимой мощностью генераторов постоянного тока.

Так, например, для турбогенераторов с числом оборотов  $n = 1000$  об/мин. предельно допустимая мощность агрегата при  $v_{a \max} = 60$  м/сек. будет всего только:

$$P_{\text{пред.}} = 1233 \frac{20 \cdot 60}{1000} \cdot \frac{25 + 60}{10 + 60} = 1800 \text{ кВт.}$$

Для более быстроходных, непосредственно-спаренных, турбо-генераторов предельная мощность будет еще меньше. Для увеличения предельной мощности генераторов их обороты необходимо снизить, что для турбо-генераторов требует введения редукционных передач.

Таким образом единичная мощность агрегатов постоянного тока весьма ограничена и не годится для современных больших электроходов, требующих мощных генерирующих электростанций, оборудуемых и мощными агрегатами.

Подводя итог о возможности применения того или иного рода тока для целей электродвижения судов, заключаем, что в настоящее время допустим как постоянный, так и переменный ток.

Преобладающую область применения того или другого рода тока на электроходах можно охарактеризовать следующими особенностями.

I. Область применения постоянного тока. Вследствие большей легкости, быстроты и простоты осуществления реверсирования и регулировки числа оборотов гребных электродвигателей, не связанных с изменением числа оборотов первичных двигателей, постоянный ток применим, главным образом, на сравнительно небольших и маломощных судах, имеющих дело с частой маневренностью, а также и на судах, где требуется иметь повышенные моменты при сниженных оборотах, без увеличения потребной мощности.

На этих сравнительно небольших судах применение постоянного тока имеет большие преимущества. К подобной серии судов относятся, главным образом, суда портового и местного обслуживания, а также и некоторые технические суда специального назначения. К электроходам на постоянном токе в первую очередь можно отнести следующую категорию судов: буксиры, паромы, пожарно-спасательные суда, ледоколы, землечерпалки, суда местного транспорта и другие подобные суда с ограниченным плаванием и частыми остановками.

II. Область применения переменного тока.

1. Для электроходов с мощными электроустановками, требующих и мощных единичных агрегатов, применим только переменный ток.

2. Для всех электроходов, имеющих дело с большими и длительными переходами, как, например, лайнеры, преимущества остаются за переменным током вследствие большей надежности и экономичности эксплуатации.

Для целей электродвижения судов применяется трехфазный переменный ток как наиболее технически совершенный и выгодный в отношении осуществления легкости пуска, большого значения  $\cos \varphi$ , меньшего веса, а следовательно габаритов и стоимости машин трехфазного тока по сравнению с машинами однофазного и двухфазного тока. Пусковые и распределительные устройства для систем однофазного и двухфазного тока более сложны по сравнению с системами трехфазного тока. Кабельная сеть для трехфазного тока легче на 25% по сравнению с кабельной сетью для однофазного и двухфазного тока. Поэтому на коммерческих электроходах и нашла применение система трехфазного тока.

Разобрав вопрос о роде и системе тока, применяемого для целей электродвижения судов, перейдем к вопросу о напряжениях.

Коммутационные условия машин постоянного тока обуславливают не только предельные мощности этих машин, но также весьма ограничивают и допустимые напряжения для установок постоянного тока.

Так, по правилам Английского классификационного общества Ллойда, для электрогребных установок постоянного тока допускается:

а) Для установок мощностью не свыше 15 000 л. с. на гребном валу нормальное рабочее напряжение в любой части системы не должно превышать 600 в по отношению к земле.

Напряжение, относящееся к одному якору машины, не должно превышать 1000 в.

б) Превышение указанных напряжений допускается с особого разрешения.

По правилам электрооборудования морских стальных судов Регистра СССР для электродвижения на постоянном токе допускаются следующие напряжения, приведенные в табл. 7.

Таблица 7

| Мощность на каждом гребном валу в квт | Напряжение на коллекторе (верхний предел) в вольтах |                  | Мощность на каждом гребном валу в квт | Напряжение на коллекторе (верхний предел) в вольтах |                  |
|---------------------------------------|-----------------------------------------------------|------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------------------|------------------|
|                                       | генератора                                          | электродвигателя |                                       | генератора                                          | электродвигателя |
| 0—500                                 | 230                                                 | 220              | 3000—5000                             | 780                                                 | 1000             |
| 500—1500                              | 460                                                 | 440              | 5000 и выше                           | 1050                                                | 1000             |
| 1500—3000                             | 550                                                 | 750              |                                       |                                                     |                  |

Примечание. В особых случаях с согласия Регистра СССР от указанных напряжений генераторов и электродвигателей могут быть допущены отступления.

Напряжения электрогребных установок переменного тока имеют более высокий предел по сравнению с установками постоянного тока.

Значения напряжений, применяемых на судах для целей электродвижения, гораздо ниже напряжений переменного тока, встречающегося на береговых установках.

Это объясняется тем, что в условиях судна, где расстояние от генератора до электродвигателя измеряется максимум сотней метров, выбор величины напряжения диктуется исключительно передаваемой мощностью, чтобы избежать больших сечений кабелей. С другой стороны, металлическое окружение, которое повсюду встречается на судне, а также и более повышенные условия влажности увеличивают опасность обслуживания электроустановок на судах и требуют более повышенных качеств изоляции, способной противостоять влаге и сырости, которые имеют место на судах.

Пределы применяемого высокого напряжения на судах поэтому снижают даже по сравнению с теми напряжениями, на которые выполняются отдельные альтернаторы береговых установок. Последние нередко выполняются на 15 000 в и даже более, тогда как на рассмотренных уже ранее гребных установках электроходов переменного тока мы видели, что наибольшее напряжение было допущено на турбо-электроходе «Potsdam», которое достигает 6600 в.

Применение на судах машин высокого напряжения на время длительного их бездействия требует устройства специальных грелок, которые препятствовали бы воздействию сырости на изоляцию машин. Поэтому для судовых установок нет смысла брать напряжения, которые бы были предельными или близки к предельным, допускаемым современным электромашиностроением, тем более, что одно из ос-

новых требований для судовых машин — уменьшение их веса и габаритов — при предельных напряжениях почти не снижается, а стоимость машин возрастает.

В силу этого для электрогребных установок переменного тока экономически и технически целесообразным является напряжение, практически приемлемые пределы которого, как мы видели, для коммерческих судов не превышают 6600 в и величина применяемого напряжения зависит от мощности отдельных агрегатов.

Классификационные общества для электрогребных установок переменного тока рекомендуют и допускают следующие величины напряжений.

1. По правилам электрооборудования морских стальных судов Регистра СССР, изд. 1936 г., допустимые напряжения даны в табл. 8.

Таблица 8

Допустимые напряжения для установок трехфазного тока

| Мощность на гребных валах в квт | Напряжение генераторов в в | Мощность на гребных валах в квт | Напряжение генераторов в в |
|---------------------------------|----------------------------|---------------------------------|----------------------------|
| 0—1000                          | 525                        | 2 500—15 000                    | 3150                       |
| 1000—2500                       | 1050                       | 15 000 и выше                   | 6300                       |

2. По правилам Английского Ллойда для электродвижения судов допускается:

а) Нормальное рабочее напряжение для установок мощностью не свыше 15 000 л. с. на гребном валу не должно превышать следующих пределов: линейное напряжение 3500 в, по отношению к земле 2020 в.

б) Для более мощных установок применение более высокого напряжения возможно с особого разрешения.

Для выявления признаков, по которым целесообразнее производить классификацию современных коммерческих электроходов, обратимся к приведенному выше краткому историческому обзору развития электрогребных установок.

Первоначальные гребные установки, применявшиеся только на постоянном токе, естественно, могли отличаться между собой прежде всего:

а) по роду первичных генерирующих двигателей;

б) по назначению гребных электродвигателей, т. е. для постоянного обслуживания судна или для временного обслуживания, когда, в последнем случае, от электрогребной установки требовалась работа при измененном числе оборотов гребного винта или при производстве реверсов, с чем первичные двигатели, непосредственно обслуживающие гребные валы, не допускавшие реверса, не могли справиться (например, одно-роторные паровые турбины и дизеля ранних выпусков).

На таких судах гребные электродвигатели являлись только вспомогательным средством, необходимым, главным образом, для придания

широкой маневренности судну. Примером такого вспомогательного назначения электродвигателей для гребных целей могут служить первые электрогребные установки по системе Del-Proposto.

С введением переменного тока и в период его освоения, когда применялся довольно разнообразный тип оборудования, гребные электроустановки различались между собой по роду и системе тока, а также и системам оборудования. Кроме того, систематизировали и по другим более мелким особенностям электрогребных установок, которые в период первоначального внедрения и освоения принципа электродвижения судов также давали возможность различать между собой электрогребные установки, как, например, тип гребных электродвигателей, способ соединения их с гребным валом и даже самое количество электрических агрегатов.

В настоящее время подобное многообразное деление электрогребных установок утратило свою силу вследствие большей однотипности применяемого оборудования, а также и вследствие большей освоенности применения электрогребных установок.

В отношении специального деления электрогребных установок по признаку основного или вспомогательного их назначения нет необходимости классифицировать коммерческие электроходы, так как этот признак не является характерным с точки зрения электрооборудования гребных установок, а следовательно, и технических особенностей машин, и может быть только частной особенностью электрохода применительно к наиболее экономическому решению отдельного вопроса в связи с индивидуальным назначением судна.

Как мы видели выше, для коммерческих судов наиболее характерными признаками электрогребных установок в настоящее время могут служить род тока и вид первичных двигателей, а именно, электроходы на постоянном и переменном токе с использованием турбин или дизелей в качестве первичных двигателей.

Род первичного двигателя, который до последнего времени также мог служить основной характерной отличительной особенностью электроходов, частично утратил свое значение, так как мы видели, что как турбо-электроходы, так и дизель-электроходы могут применять постоянный и переменный ток.

Что касается рода тока, то, благодаря особенностям электрических машин, по нему можно скорее и безошибочнее определить назначение электрохода, а именно, для больших коммерческих судов целесообразнее и выгоднее применять теперь электродвижение на переменном токе независимо от первичных двигателей.

На постоянном токе, как было отмечено, могут применяться преимущественно электроходы с ограниченным районом плавания и суда специального и технического назначения.

Поскольку для современных электроходов в качестве первичных двигателей служат преимущественно паровые турбины и дизеля, которые характеризуют собой основные элементы оборудования самоходных судов в целом, и поскольку электродвижение на переменном токе с использованием дизелей в качестве первичных двигателей начинает находить широкое распространение, включая большие современные дизель-электроходные лайнеры, то в дальнейшем будем при-

держиваться классификации электроходов как по признаку первичных двигателей, так и по роду тока.

Следовательно, электроходы будем разделять на:

а) турбо-электроходы и

б) дизель-электроходы

с подразделением тех и других на электроходы постоянного и переменного тока.

Более детальная классификация электроходов по другим более, мелким особенностям отпадает, так как тип применяемого электрооборудования на современных коммерческих электроходах, как увидим ниже, сравнительно однообразен, и всякую особенность, например, по признаку электрических машин, можно отнести к частной особенности данного проекта и судна.

#### § 4. Определение мощности гребных электродвигателей

Мощность, развиваемая гребными электродвигателями на судне, должна преодолевать:

а) Полезную мощность гребного винта, идущую на создание упорного давления.

Американцы эту полезную мощность гребного винта называют толкающей мощностью гребного винта (thrust horsepower). Полезная мощность винта расходуется непосредственно на преодоление сопротивлений, возникающих при движении судна.

б) Потери, связанные с работой гребного винта в воде при его вращении, которые учитываются к. п. д. винта.

в) Потери, возникающие при вращении гребного вала от трения в подшипниках, дейдвудной трубе, в водонепроницаемых сальниках и в других элементах гребного вала, между электродвигателями и гребным винтом. Все эти потери учитываются к. п. д. гребного вала.

г) Дополнительные потери, связанные с выступающими частями в воде корпуса судна.

Дополнительные потери, связанные с выступающими частями судна, возникают от действия удара воды о выступающие части, а также и вследствие образования водоворотов от выступлений частей таких, как рули, кронштейны, выкружки гребных валов, скуловые кили, дейдвуды и т. п. Эти потери учитываются коэффициентом  $K_1$ . Кроме того, дополнительные потери происходят от неровностей обшивки судна, как, например, швы, накладки, заклепочные головки и шероховатость от оборжавления, которые учитываются коэффициентом  $K_2$ . Сопротивление от давления встречного ветра на корпус учитываем коэффициентом  $K_3$ . Давление от встречного ветра на корпус при расчетах обычно берется при свежести ветра 3 балла по шкале Бофорта, чему соответствует средняя скорость ветра в 4,5 м/сек.

Все эти дополнительные потери, связанные с выступающими частями судна, шероховатостями и давлением ветра, учтены одним общим коэффициентом  $K$ , большим единицы:

$$K = 1 + (K_1 + K_2 + K_3).$$

Таким образом мощность, потребная на валах гребных электродвигателей, которую обозначим  $P_{\text{гр. эл.-дв.}}$ , можно определить по следующей формуле:

$$P_{\text{гр. эл.-дв.}} = \frac{KP_d}{\eta_d \eta_v} \text{ л. с.},$$

где:  $P_{\text{гр. эл.-дв.}}$  — эффективная мощность электродвигателей;

$K$  — коэффициент, учитывающий дополнительные потери от выступающих частей, шероховатости и сопротивление от давления ветра;

$P_d$  — мощность, создающая упорное или толкающее давление гребного винта;

$\eta_d$  — к. п. д. гребного винта (движителя);

$\eta_v$  — к. п. д. гребного вала.

Чтобы определить эффективную мощность гребных электродвигателей, необходимо располагать значениями правой части приведенного уравнения.

Для определения мощности движителя  $P_d$ , идущей на создание упорного давления, воспользуемся кривой, которая выражает зависимость между удельным давлением  $f$  в кг, отнесенным к тонне водоизмещения судна, и водоизмещением последнего. Удельное давление  $f$  находится в обратной зависимости от водоизмещения судна, т. е. с возрастанием водоизмещения судна требуемое давление, отнесенное к 1 т водоизмещения, при одинаковой скорости судов, падает. Приводимая ниже кривая зависимости удельного давления от водоизмещения судов построена по американским данным, полученным на основании большого количества построенных современных судов самых разнообразных размеров и скоростей.

Приводимая кривая (фиг. 5) дает значение удельного давления  $f_{20}$  в кг на тонну для судов водоизмещением от 500 до 30 000 т при скорости судна в 20 узлов.

Так как удельное давление зависит от скорости хода судна  $v_x$  во второй степени, то для определения удельного давления при любой другой скорости, отличной от скорости  $v_{20} = 20$  узлов, можно воспользоваться переходной формулой:

$$f_x = f_{20} \left( \frac{v_x}{v_{20}} \right)^2,$$

где  $f_x$  — удельное давление при требуемой скорости судна;

$f_{20}$  — удельное давление при скорости судна в 20 узлов, которое берется по приведенной кривой;

$v_x$  — данная скорость движения судна в узлах;

$v_{20}$  — скорость движения судна, равная 20 узлам.

Располагая заданным водоизмещением судна  $D$  тонн и удельным давлением  $f_{20}$ , определяемым из кривой и пересчитанным по приведенной формуле в соответствии с заданной скоростью судна, можем определить и требуемое упорное давление, развиваемое винтом, т. е.

$$F = f_x D = f_{20} \left( \frac{v_x}{v_{20}} \right)^2 D \text{ кг.}$$

Зная упорное давление  $F$  и скорость движения судна  $v_x$ , можем определить и полезную мощность гребного винта по формуле:

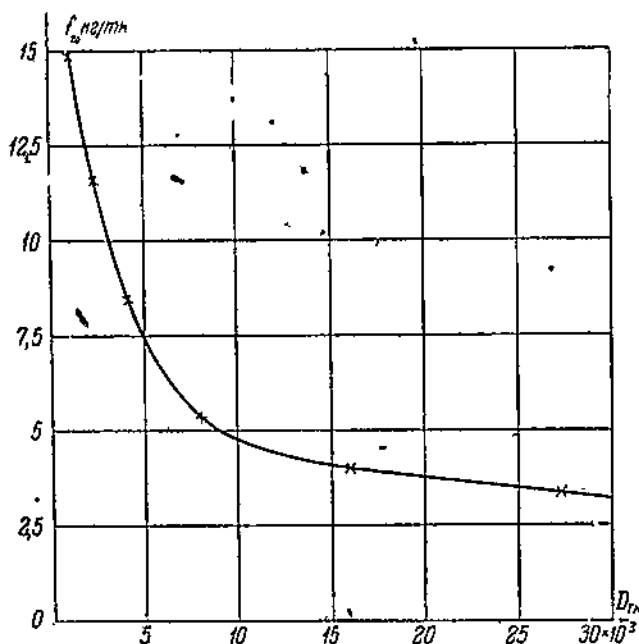
$$P_d = Fv_x = 1850 f_{20} \left( \frac{v_x}{v_{20}} \right)^2 v_x D \text{ кгм/сек.},$$

или

$$P_d = \frac{f_{20} D v_x^3 \cdot 1850}{3600 \cdot 75 \cdot 20^2} \text{ л. с.},$$

и в окончательном виде

$$P_d = \frac{f_{20} D v_x^3}{58200} \text{ л. с.}$$



Фиг. 5. Кривая значений удельного давления  $f_{20}$  в зависимости от водоизмещения судна  $D$  при скорости движения в 20 узлов ( $v_{20}$ ).

В этой формуле  $f_{20}$  берется по приведенной кривой в зависимости от водоизмещения судна.

$D$  — заданное водоизмещение судна в тоннах.

Значения к. п. д. гребного винта  $\eta_d$  можно для предварительных подсчетов брать в пределах:

а) для низких скоростей судна (до 12 узлов):

$$\eta_d = \text{от } 0,57 \text{ до } 0,62;$$

б) для повышенных скоростей судна:

$$\eta_d = \text{от } 0,63 \text{ до } 0,69.$$

Потери от трения при вращении гребного вала вследствие большею частью незначительной его длины сравнительно невелики и можно учитывать значением

$$\eta_a = 0,95 \text{ до } 0,98.$$

Что касается дополнительных потерь от выступающих частей корпуса, шероховатости и давления ветра, то значение коэффициента

$$K = 1 + (K_1 + K_2 + K_3),$$

учитывающего эти потери, можно определить как сумму отдельных слагающих.

Значение  $K_1$ , по данным Дайсона (Dyson), зависит от отношения скорости хода судна  $v_x$  в узлах к  $\sqrt{L}$ , где  $L$  — длина судна в метрах между перпендикулярами.

Значение  $K_1$  дано в табл. 9.

Таблица 9

| При<br>$\frac{v_x}{\sqrt{L}}$ | 0,8   | 0,9   | 1,0   | 1,1   | 1,2   | 1,3   | 1,4   |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Одновинтовое судно . . . . .  | 0,084 | 0,071 | 0,062 | 0,057 | 0,054 | 0,053 | 0,051 |
| Двухвинтовое судно . . . . .  | 0,167 | 0,142 | 0,124 | 0,114 | 0,108 | 0,105 | 0,102 |
| При<br>$\frac{v_x}{\sqrt{L}}$ | 1,5   | 1,6   | 1,7   | 1,8   | 1,9   | 2,0   |       |
| Одновинтовое судно . . . . .  | 0,051 | 0,050 | 0,050 | 0,050 | 0,050 | 0,050 |       |
| Двухвинтовое судно . . . . .  | 0,101 | 0,100 | 0,100 | 0,100 | 0,100 | 0,100 |       |

Значение  $K_2$  для нормальных судов с хорошо окрашенной подводной поверхностью можно считать: для сварных корпусов  $K_2 = 0,01$ , для клепаных —  $K_2 = 0,02$ .

Значение  $K_3$  для встречного ветра в 3 балла, в зависимости от типа судна, приведено в табл. 10.

Таблица 10

| Тип судна                      | Значение $K_3$ , учитывающего дополнительное сопротивление от ветра |
|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Нефтеналивное . . . . .        | 0,01—0,03                                                           |
| Грузовое . . . . .             | 0,02—0,04                                                           |
| Грузо-пассажирское . . . . .   | 0,03—0,05                                                           |
| Почтово-пассажирское . . . . . | 0,04—0,06                                                           |
| Лесовозы . . . . .             | 0,03—0,07                                                           |



Проверяя мощность указанного выше электрохода по формуле адмиралтейских коэффициентов, беря значение  $K_a = 325$ , имеем:

$$P_{\text{гр. эл.-дв.}} = \frac{8630^2 \cdot 20^3}{325} = 10\,300 \text{ л. с.}$$

## § 5. Основные требования, предъявляемые к гребным электродвигателям, и способы регулирования числа их оборотов

Первое основное требование, предъявляемое к гребным электродвигателям, — это возможность осуществления широкой регулировки числа оборотов гребного винта, позволяющая соответственно изменять и скорость движения судна. Изменение скорости движения судна необходимо за все время его эксплуатации и особенно при отходе и подходе судна в портах, при движении в узких проливах и каналах, при встречных курсах, для движения в тумане, при съёмке с якоря и т. п. Условия регулировки числа оборотов гребного электродвигателя должны быть надежны и экономичны, так как требования к изменению скорости движения судна являются неограниченными в течение всего срока его службы.

Движение судна при измененной скорости может носить длительный характер. Поэтому регулирование скорости гребных электродвигателей должно быть наиболее совершенным.

Второе основное требование к гребным электродвигателям, распространяющееся также на все время эксплуатации судна, это возможность производства переднего и заднего хода судна, что связано с необходимостью реверсирования гребного винта, т. е. изменением направления вращения гребного вала, а следовательно, и гребного электродвигателя, вал которого, как правило, всегда непосредственно и жестко соединяется с валом гребного винта.

Кроме простого производства процесса реверсирования гребного электродвигателя, последний при реверсировании должен удовлетворять также и возможности создания необходимого активного вращающего момента на валу электродвигателя, обеспечивающего необходимость быстрого торможения гребного винта, изменения направления его вращения и увеличения числа оборотов в обратном направлении, включительно до нормальных оборотов винта при измененном направлении движения судна. Чем быстрее совершается процесс реверсирования, тем судно обладает большей маневренностью и, следовательно, подвергается меньшим опасностям повреждений и даже гибели. Быстро маневрирующее судно представляет также меньшую опасность и для других судов.

Так как современное судостроение достигает огромных размеров в отношении выполнения отдельных единиц, к которым в первую очередь относятся так называемые лайнеры (к последним также принадлежит и первый классный электроход «Нормандия» водоизмещением около 80 000 т), а скорость движения современных судов выражается десятками узлов (в частности, предельная скорость «Нормандии» несколько выше 30 узлов, или  $55\frac{1}{2}$  км/час), то быстрое изменение направления движения судов требует напряженной работы

гребных электродвигателей при их реверсировании. Единичные мощности гребных электродвигателей на лайнерах достигают тысяч и десятков тысяч л. с.; например, мощность каждого гребного электродвигателя «Нормандии» равна 40 000 л. с. при силе тока

$$I = \frac{40\,000 \cdot 736}{\sqrt{3} \cdot 5500 \cdot 0,976} = 3170 \text{ а.}$$

Обеспечение надежного и быстрого производства реверса мощных гребных электродвигателей, при силах тока, достигающих тысяч ампер в главной цепи, требует особенного внимания для удовлетворительного разрешения этого ответственного момента работы гребных установок.

Чтобы более детально разобраться с работой гребных электродвигателей в условиях, удовлетворяющих первому основному требованию эксплуатации судна, т. е. в условиях измененной установившейся скорости хода судна, обратимся к выражениям мощности и моментов в этих условиях.

Зависимость между мощностью и моментом дается уравнением:

$$P = \omega M \text{ кгм/сек.}$$

или

$$P = \frac{2\pi n M}{60 \cdot 75} = \frac{n M}{716,2} \text{ л. с.} = \frac{n M}{K} \text{ л. с.,}$$

где:  $n$  — число оборотов двигателя в минуту;

$M$  — вращающий момент в кгм.

На основании выше разобранных формул (глава II, § 4) мощность гребных электродвигателей изменяется в третьей степени от скорости судна, т. е.,

$$P_{\text{гр. эл.-дв.}} = P_x = \frac{D^{3/2}}{K_a} v_x^3 = C \cdot v_x^3,$$

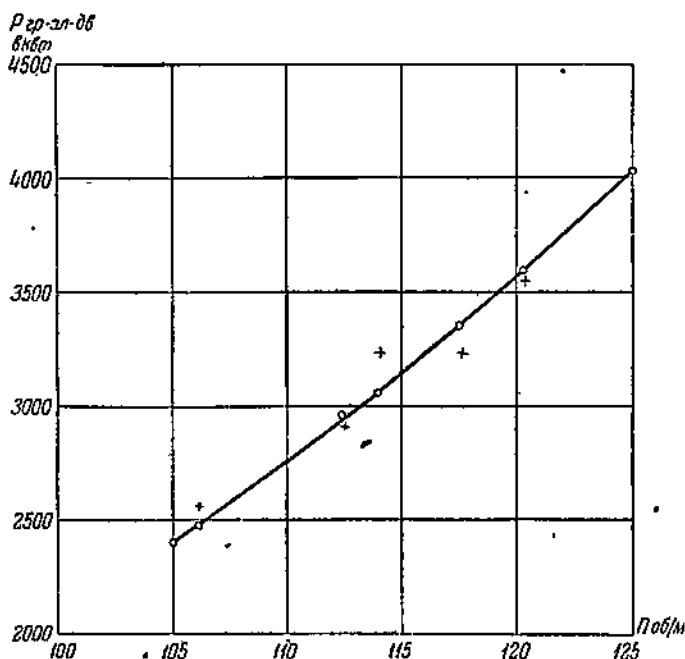
где для данного судна постоянное значение  $\frac{D^{3/2}}{K_a}$  заменено через  $C$ .

Изменение мощности, развиваемой гребными электродвигателями при разных скоростях вращения, в среднем можно считать пропорциональным третьей степени изменения числа оборотов гребного винта. Подтверждением этой зависимости может служить приводимая ниже кривая, построенная на основании данных, полученных при эксплуатации дизель-электрохода «Wuppertal» за время совершения им рейсов из Европы в Австралию и обратно. Замеры величин производились со всей тщательностью, что гарантировалось проверкой измерительных инструментов в начале и конце эксплуатационного опыта. Полученные при этом цифровые данные мощностей электродвигателей, развиваемых на гребном валу в зависимости от числа оборотов винта, приведены в табл. 12.

На основании данных, приведенных в табл. 12, нанесены точки и построена кривая средних значений, выражающая кубическую зависимость мощности, потребляемой на гребном валу установки, от числа оборотов двигателей.

| № испытания |                                                                       | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1           | Обороты гребного электродвигателя в минуту . . . . .                  | 105,1 | 106,2 | 112,6 | 114,0 | 117,6 | 120,4 | 125,2 |
| 2           | Мощность, потребляемая электродвигателем в квт . . . . .              | 2440  | 2640  | 3000  | 3270  | 3310  | 3650  | 4160  |
| 3           | Потери гребного электродвигателя в квт . . . . .                      | 71    | 76    | 83    | 88    | 90    | 98    | 110   |
| 4           | Мощность, отдаваемая электродвигателем на гребной вал в квт . . . . . | 2369  | 2564  | 2917  | 3182  | 3220  | 3552  | 4050  |

Отклонение точек от построенной идеальной кривой кубической зависимости объясняется различным состоянием моря во время измерений за длительные переходы судна.



Фиг. 6. Кривая кубической зависимости мощности от числа оборотов гребного вала  $P \propto n^3$ .

В силу приведенной кривой (фиг. 6) средних значений, отношения мощностей гребного электродвигателя при различных оборотах можно выразить:

$$\frac{P_x}{P_n} = \left( \frac{n_x}{n_n} \right)^3,$$

$$P_x = P_n \left( \frac{n_x}{n_n} \right)^3,$$

жущей силы в якоре электродвигателя, это станет аналогичным усле-  
вию торможения электродвигателя противотоком, и сила тока  
в якоре, равная в этих условиях

$$I_a = \frac{V + E_n}{R},$$

может достигать недопустимых значений.

Равным образом и изменение числа оборотов гребного электро-  
двигателя по сравнению с нормальными оборотами производить не-  
удобно и неэкономично за счет изменения его магнитного потока  $\Phi$ ,  
так как условия эксплуатации судна требуют снижения числа оборотов  
электродвигателя против нормальных оборотов.

Изменение напряжения  $V$ , подводимого к электродвигателю, дает  
возможность, с одной стороны, производить регулирование числа обо-  
ротов гребного электродвигателя в широких пределах в сторону сни-  
жения, а также позволяет легко осуществлять и реверс электродви-  
гателя с обеспечением больших вращающих моментов в обратном  
направлении, не выходя при этом из допустимых пределов тока, при  
условии сохранения постоянного магнитного потока  $\Phi$  у гребного  
электродвигателя.

Регулирование напряжения  $V$ , подводимого к гребному электро-  
двигателю, при тех больших значениях сил тока, которые потребляют  
гребные электродвигатели, рациональнее и выгоднее производить  
у генератора, питающего электродвигатель.

Необходимость широкой регулировки напряжения у питающего  
генератора как в одном направлении для изменения числа оборотов  
гребного двигателя, так и в обоих направлениях — для обеспечения  
работы электродвигателя в условиях реверсирования — легче всего до-  
стигаются применением соединений гребного электродвигателя с пи-  
тающим его генератором по системе Вард-Леонарда.

Система Вард-Леонарда позволяет производить в широких пределах  
изменение числа оборотов и реверс гребного электродвигателя без  
разрыва цепи главного тока, что также имеет большое значение для  
электрогребных установок, так как нормальная сила тока в этих  
установках может достигать нескольких тысяч ампер, а при быстром  
торможении и реверсировании электродвигателя сила тока главной  
цепи будет превышать в несколько раз нормальное значение силы тока.  
Система Вард-Леонарда гарантирует также и длительную экономич-  
ную работу гребного электродвигателя при любых его оборотах.

В условиях применения постоянного тока для электрогребных  
установок система Вард-Леонарда является более гибкой в смысле  
регулирования оборотов, технически совершенной и экономически  
выгодной по сравнению с другими способами электрических соедине-  
ний, особенно при частой и широкой маневренности судна. Вследствие  
этого электрогребные установки постоянного тока почти исключи-  
тельно и оборудуются по системе Вард-Леонарда.

В дальнейшем рассмотрим электрогребную установку постоянного  
тока, оборудованную по системе Вард-Леонарда.

Для простоты ограничимся рассмотрением системы Вард-Леонарда  
с применением чисто шунтовых электродвигателей. Для этих электро-

двигателей, получающих независимое возбуждение, будем считать магнитный поток постоянным, т. е.

$$\Phi = \text{const.}$$

Беря характеристическое уравнение

$$n = \frac{V - I_a R}{K \Phi},$$

видим, что при постоянном коэффициенте  $K$  и при постоянном магнитном потоке  $\Phi$  знаменатель можно заменить через постоянный коэффициент  $C$ .

Для изменения  $n$ , следовательно, необходимо менять только значение числителя, что легко и достигается при изменении возбуждения генератора, но с изменением  $n$  необходимо иметь и измененный момент гребного электродвигателя, значение которого, как выше было установлено, находится по уравнению:

$$M_x = M_n \left( \frac{n_x}{n_n} \right)^2.$$

Выражение вращающего момента для электродвигателей постоянного тока имеет вид:

$$M = K' \Phi I_a,$$

где для шунтового электродвигателя  $K' \Phi = \text{const.}$  Следовательно, значение вращающего момента гребного электродвигателя прямо пропорционально  $I_a$ , т. е. силе тока в якоре.

Возвращаясь к выражению отношения моментов, имеем:

$$\frac{M_x}{M_n} = \frac{I_{ax}}{I_{an}} = \left( \frac{n_x}{n_n} \right)^2.$$

Для измененного числа оборотов гребного электродвигателя постоянного тока можем написать:

$$n_x = \frac{V_x - I_{ax} R_a}{C} = \frac{V_x - I_{an} \left( \frac{n_x}{n_n} \right)^2 R_a}{C}.$$

Для нормального числа оборотов имеем:

$$n_n = \frac{V_n - I_{an} R_a}{C}.$$

Чтобы найти значение напряжения  $V_x$ , которое необходимо подвести к зажимам гребного электродвигателя при изменении числа его оборотов от нормального значения  $n_n$  до  $n_x$ , возьмем отношение написанных выше уравнений.

Из этого отношения путем преобразований определим интересующее нас значение  $V_x$ :

$$\frac{n_x}{n_n} = \frac{V_x - I_{an} \left( \frac{n_x}{n_n} \right)^2 R_a}{V_n - I_{an} R_a},$$

$$n_x (V_n - I_{an} R_a) = n_n \left[ V_x - I_{an} \left( \frac{n_x}{n_n} \right)^2 R_a \right],$$

откуда получаем выражение:

$$V_x = \frac{n_x}{n_n} \left[ V_n - I_{ав} R_a \left( 1 - \frac{n_x}{n_n} \right) \right].$$

Множитель  $I_{ав} R_a$  величина незначительная по сравнению с подводимым напряжением, так как  $R_a$  мало. Кроме того, отмечая, что отношение  $\frac{n_x}{n_n}$  при снижении числа оборотов гребного вала всегда будет меньше единицы и что выражение  $\left( 1 - \frac{n_x}{n_n} \right)$  также будет меньше единицы, так как  $\frac{n_x}{n_n}$  положительно, то в выражении  $V_x$  последним двучленом можно пренебречь и принять, с достаточной для практики степенью точности, что

$$V_x \cong \frac{n_x}{n_n} V_n.$$

Из полученного выражения для  $V_x$  заключаем, что в гребных установках постоянного тока, оборудованных по системе Вард-Леонарда (с шунтовым гребным электродвигателем), при снижении числа оборотов гребного электродвигателя необходимо и достаточно напряжение  $V_x$ , подводимое к электродвигателю, снизить по сравнению с напряжением  $V_n$  при нормальных оборотах электродвигателя пропорционально отношению сниженных оборотов к нормальным оборотам электродвигателя.

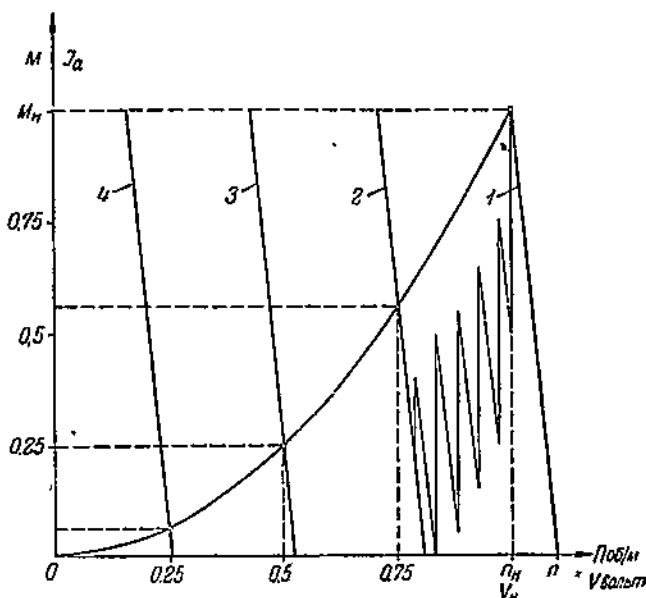
Пользуясь найденной зависимостью изменения напряжения, подводимого к гребному электродвигателю, и изменением вращающего момента гребного вала в соответствии с изменением оборотов последнего, можно графически определить местоположение механических характеристик для любого сниженного числа оборотов гребного электродвигателя по отношению к механической характеристике нормального режима электродвигателя. Найденное графически местоположение механических характеристик, отвечающее требуемому числу оборотов, позволит определить и число ступеней регулировочного реостата при заданной величине изменения силы тока в цепи якоря электродвигателя.

Располагая основной механической характеристикой электродвигателя гребной установки, в части изменения числа его оборотов от нормального при полной нагрузке до оборотов при холостом ходе, и принимая механическую характеристику шунтового электродвигателя на этом участке за прямую, а также имея в виду, что при различных напряжениях механические характеристики будут параллельны основной механической характеристике, можем построить график семейства механических характеристик для различных заданных оборотов гребного электродвигателя.

На прилагаемом графике (фиг. 7) нанесено семейство механических характеристик для широкого изменения чисел оборотов гребного электродвигателя.

Для простоты построения графика масштабы числа оборотов и напряжения, точно так же вращающего момента и силы тока электродвигателя — совмещены.

На основании графика и заданной величины колебаний тока в главной цепи электродвигателя, не превосходящей, допустим, 50% нормального значения силы тока, определено графически и число ступеней (6 ступеней) регулировочного реостата при снижении числа оборотов электродвигателя от 100 до 75% нормальных оборотов.



Фиг. 7. График семейства механических характеристик шунтового гребного электродвигателя применительно к работе винта заторможенного судна:

- 1 — для работы электродвигателя при нормальных оборотах  $n_H$  и нормальном моменте  $M_H$ ,  
 2 — то же при 75%  $n_H$  и соответственно пониженном моменте,  
 3 — то же при 50%  $n_H$  и соответственно пониженном моменте,  
 4 — то же при 25%  $n_H$  и соответственно пониженном моменте,  
 $n_{xx}$  — число оборотов холостого хода электродвигателя при нормальном возбуждении.

Таким образом с помощью найденных уравнений:

а) для изменения вращающего момента гребного винта:

$$\frac{M_x}{M_H} = \left( \frac{n_x}{n_H} \right)^2,$$

и б) для изменения напряжения, подводимого к гребному электродвигателю, в зависимости от его оборотов,

$$V_x = V_H \frac{n_x}{n_H},$$

имеем возможность по заданной основной механической характеристике электродвигателя построить его механические характеристики для

режима работы шунтового гребного электродвигателя при любом интересующем числе оборотов гребного винта.

Теперь перейдем к электрогребным установкам переменного тока и определим условия, предъявляемые к этим установкам в отношении рационального способа использования применительно к первому основному требованию электроходов.

Для выяснения вопроса о регулировании числа оборотов гребных электродвигателей переменного тока разберем два случая:

- а) гребные установки с синхронными электродвигателями;
- б) гребные установки с асинхронными электродвигателями.

Как известно, синхронные электродвигатели обладают строгим соответствием числа оборотов по отношению к частоте питающего их переменного тока. Если число пар полюсов ротора синхронного электродвигателя обозначим через  $p$ , число его оборотов через  $n$ /об/мин. и частоту подводимого к электродвигателю переменного тока через  $f$ , то известна следующая зависимость между числом оборотов и частотой:

$$\frac{pn}{60} = f,$$

откуда

$$n = \frac{60f}{p}.$$

Следовательно, число оборотов синхронного электродвигателя можно регулировать или за счет изменения  $f$ , т. е. частоты подводимого тока, или за счет изменения  $p$  — числа пар полюсов электродвигателя. Регулирование числа оборотов изменением  $p$  весьма неудобно, так как требует специальных конструкций электродвигателя, допускающих переключение числа полюсов и, кроме того, регулирование числа оборотов гребного электродвигателя этим способом будет носить не плавный, а ступенчатый характер, с большими интервалами, что для судовых гребных установок, особенно для производства широкого маневрирования, является неприемлемым. При регулировании на ходу числа оборотов электродвигателя путем переключения обмоток он может выйти из синхронизма, что потребует дополнительных операций по введению электродвигателя в синхронизм. Поэтому остается только один удовлетворительный способ регулировки числа оборотов синхронных электродвигателей за счет изменения частоты  $f$  подводимого тока. Этот способ регулировки числа оборотов для электрогребных судовых установок является вполне допустимым, так как питание гребных электродвигателей производится от самостоятельных агрегатов, предназначенных для их обслуживания, а сами агрегаты находятся вблизи и приключены к общему с электродвигателями пульта управления.

Поэтому гребные установки, оборудованные синхронными электродвигателями, должны получать электроэнергию от альтернаторов, первичные двигатели которых могут допускать плавную регулировку с широким пределом изменения числа оборотов.

Электрогребные установки переменного тока, применяющие асинхронные электродвигатели, в отношении регулировки их числа обо-

роторов находятся в менее ограниченных условиях, чем установки с синхронными электродвигателями.

Для разрешения вопроса о регулировании числа оборотов асинхронных электродвигателей выведем уравнение, дающее выражение числа их оборотов в зависимости от частоты питающего тока, от числа полюсов электродвигателя и от скольжения ротора.

Обозначая частоту переменного тока, подводимого к асинхронному электродвигателю, через  $f_1$ , число пар полюсов электродвигателя через  $p$ , число оборотов ротора асинхронного электродвигателя через  $n_2$ , а скольжение ротора через  $S$ , — для синхронного числа оборотов  $n_1$ , равного скорости вращения магнитного поля статора, можем написать:

$$n_1 = \frac{60f_1}{p},$$

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = 1 - \frac{n_2}{n_1},$$

$$S = 1 - \frac{n_2 p}{60f_1},$$

откуда

$$n_2 = \frac{60f_1}{p} (1 - S).$$

Но скольжение  $S$ , как увидим далее, при опрокидывающем моменте электродвигателя можно заменить через выражение, зависящее от сопротивления  $r_2$  цепи обмотки ротора асинхронного электродвигателя, а именно:

$$S = \frac{r_2}{2\pi f_1 L_2}.$$

При увеличении сопротивления  $r_2$  величина скольжения  $S$  будет возрастать и кривая механической характеристики асинхронного электродвигателя на участке устойчивой работы двигателя будет становиться более пологой, благодаря чему и скольжение  $S$ , отвечающее заданному моменту, также будет увеличиваться. Увеличение  $S$  повлечет уменьшение оборотов ротора электродвигателя  $n_2$ .

Изменением активного сопротивления цепи обмотки ротора, которое практически возможно только в сторону увеличения, можно достигать снижения оборотов асинхронных электродвигателей против нормального, что и требуется при снижении скорости хода судна.

Обращаясь к написанному выражению числа оборотов асинхронного электродвигателя, заключаем, что изменение числа его оборотов  $n_2$  можно производить или изменением частоты  $f_1$  подводимого тока, или изменением числа пар полюсов  $p$  у электродвигателя и, кроме того, путем изменения  $S$ , что достигается изменением активного сопротивления  $r_2$  цепи обмотки ротора.

Метод регулировки числа оборотов асинхронных электродвигателей путем введения сопротивления реостата в цепь обмотки ротора грешных электродвигателей почти не находит применения, так как условия работы при сниженной скорости потребовали бы непроизводительной затраты электроэнергии в регулировочном реостате, что при длительной работе становится экономически неприемлемым.

Кроме того, регулировочные реостаты при больших мощностях гребных электродвигателей получаются громоздкие, что для судовых условий является весьма нежелательными как в отношении веса, так и габаритов.

На судах с небольшой сравнительно мощностью гребных электродвигателей иногда прибегают к использованию реостатов в цепи ротора для производства быстрого пуска и маневрирования, как, например, это осуществлено на товаро-пассажирском турбоэлектроходе «Wulst Castle» постройки 1918 г.

Второй способ регулировки числа оборотов путем переключения обмоток для изменения числа пар полюсов  $p$  хотя для асинхронных электродвигателей более приемлем, но он также весьма редко применяется на коммерческих электроходах.

Наиболее экономичным, простым и совершенным является способ регулировки числа оборотов асинхронных гребных электродвигателей путем изменения частоты  $f_1$  подводимого тока. Изменение частоты  $f_1$  требует изменения числа оборотов первичного двигателя, как и при установках с синхронными гребными электродвигателями. Следовательно, в электрогребных установках переменного тока необходимо генерирующие агрегаты снабжать первичными двигателями, позволяющими широкую и плавную регулировку числа их оборотов.

Современные первичные судовые двигатели как паротурбины, так и дизеля обладают быстрой, плавной регулировкой числа оборотов, с широким диапазоном их изменения. Поэтому на новейших коммерческих гребных установках переменного тока регулировку числа оборотов электродвигателей и осуществляют за счет изменения частоты подводимого тока.

Для сопоставления потребного вращающего момента гребной установки с максимальным или опрокидывающим моментом гребного электродвигателя ограничимся рассмотрением наиболее простого случая электрогребной установки переменного тока с асинхронными электродвигателями при обычном способе регулировки числа их оборотов путем изменения частоты подводимого тока.

При режимах работы гребной установки в условиях пониженной скорости судна, т. е. с числом оборотов ниже нормального, гребной электродвигатель будет иметь больший запас опрокидывающего момента по отношению к потребному вращающему моменту.

По выше найденной зависимости вращающего момента гребного винта от числа оборотов

$$\frac{M_x}{M_n} = \left( \frac{n_x}{n_n} \right)^2$$

видно, что с уменьшением числа оборотов гребного винта и соответственно скорости судна момент сопротивления винта уменьшается, в то время как значение опрокидывающего момента гребного электродвигателя остается почти без изменения, так как <sup>1</sup>

$$M_{\text{max эл.-дв}} = \frac{mpK_2 W_2^2 E_1^2}{8\pi^2 K_1 W_1^2 L_2 f_1^2},$$

<sup>1</sup> Значение величин, входящих в представленное выражение максимального или опрокидывающего момента асинхронного электродвигателя, и вывод полученного уравнения будут приведены ниже, в § 8.

а с уменьшением числа оборотов электродвигателя за счет уменьшения частоты  $f_1$  подводимого тока, что достигается уменьшением числа оборотов питающего альтернатора, происходит одновременное и одинаковое снижение питающей гребной электродвигатель электродвижущей силы  $E_1$  и частоты тока  $f_1$  при остальных, почти неизменных, величинах.

Таким образом первое основное условие, требующееся при эксплуатации судна для изменения скорости его хода, с обеспечением соответствующего момента вращения гребного вала, легко и удовлетворительно разрешается при применении на судах в качестве гребных двигателей как электродвигателей постоянного тока, так и электродвигателей переменного тока.

### Глава III

## РЕВЕРСИРОВАНИЕ

### § 6. Реверсирование гребных винтов

Чтобы выяснить требования, предъявляемые к гребным электродвигателям при реверсе, обратимся к кривым изменения тормозного момента гребного винта, который необходимо преодолеть вращающему моменту гребного электродвигателя.

На прилагаемом графике (фиг. 8) кривых по оси абсцисс отложены вправо от начала координат положительные числа оборотов, т. е. обороты, отвечающие одному заданному направлению вращения гребного винта (допустим, по часовой стрелке, если смотреть на винт со стороны вала), а влево — отрицательные числа оборотов, т. е. обороты гребного винта в обратном (против часовой стрелки) направлении. По оси ординат отложены значения тормозного момента гребного винта. Вверх от начала координат отложены положительные значения тормозных моментов, т. е. значения моментов, отвечающие положительному направлению вращения гребного винта, а отрицательные тормозные моменты отложены вниз от оси абсцисс.

Если судно затормозить (например, упереть в стенку и расчалить), а гребной винт заставить работать, то изменение тормозного момента гребного винта в зависимости от числа оборотов и направления вращения винта представится симметричной кривой для вращения винта в обоих направлениях (см. на приведенном графике кривую 1 для скорости судна  $v_0 = 0$ ).

Если судно движется под действием вращения гребного винта и поступательное движение судна сохранить постоянным (например, путем буксировки судна), независимо от замедления вращения гребного винта, его остановки и вращения в обратном направлении, или, как говорят, сохранить неизменной скорость поступательного движения винта, при измененной вращательной его скорости, то кривая изменения тормозного момента гребного винта в зависимости от числа его оборотов и направления вращения уже не будет представлять симметричную кривую, как при отсутствии движения судна, а будет

нию гребного винта со скоростью  $v_{10} = 10$  узлов; кривая 3 относится к поступательному движению гребного винта со скоростью  $v_{15} = 15$  узлов и кривая 4 относится к поступательному движению гребного винта со скоростью  $v_{20} = 20$  узлов.

Из сопоставления семейства этих кривых, построенных на основании испытания модели гребного винта американского линейного корабля «Delaware», работающего в условиях отсутствия кавитации, заключаем:

1. При данном числе оборотов гребного винта значение его тормозного момента увеличивается с уменьшением поступательной скорости судна, что может иметь место, например, при увеличении воза у буксирных судов, увеличении встречного сопротивления судна в штормовую погоду или при работе гребного винта пришвартованного судна.

2. С увеличением поступательной скорости гребного винта величина отрицательного тормозного момента гребного винта как по абсолютному, так и по относительному значению (для какого-либо взятого  $n = \text{const.}$ ) возрастает. Это значит, что при чем большей поступательной скорости судна осуществляется реверс, тем больший отрицательный тормозной момент гребного винта (т. е. поддерживающий имеющееся направление вращения гребного винта) необходимо будет преодолеть гребному электродвигателю при осуществлении реверса.

Так, например, из приведенных кривых упомянутой модели гребного винта при поступательной скорости судна в 20 узлов, при  $n_{II} \cong 157$  об/мин. отношение максимального значения отрицательного тормозного момента (т. е. вращательного) к нормальному тормозному моменту:

$$\frac{M_{\text{вращ.}}}{M_{\text{торм. норм.}}} = 54\%$$

а отношение числа оборотов свободно вращающегося гребного винта, вследствие поступательного движения судна (т. е. при  $M = 0$ ), к нормальному числу оборотов составит:

$$\frac{n_0}{n_{II}} = \frac{103}{157} \cdot 100 = 66\%$$

При поступательной скорости судна в 15 узлов соответственно имеем:

а) отношение моментов:

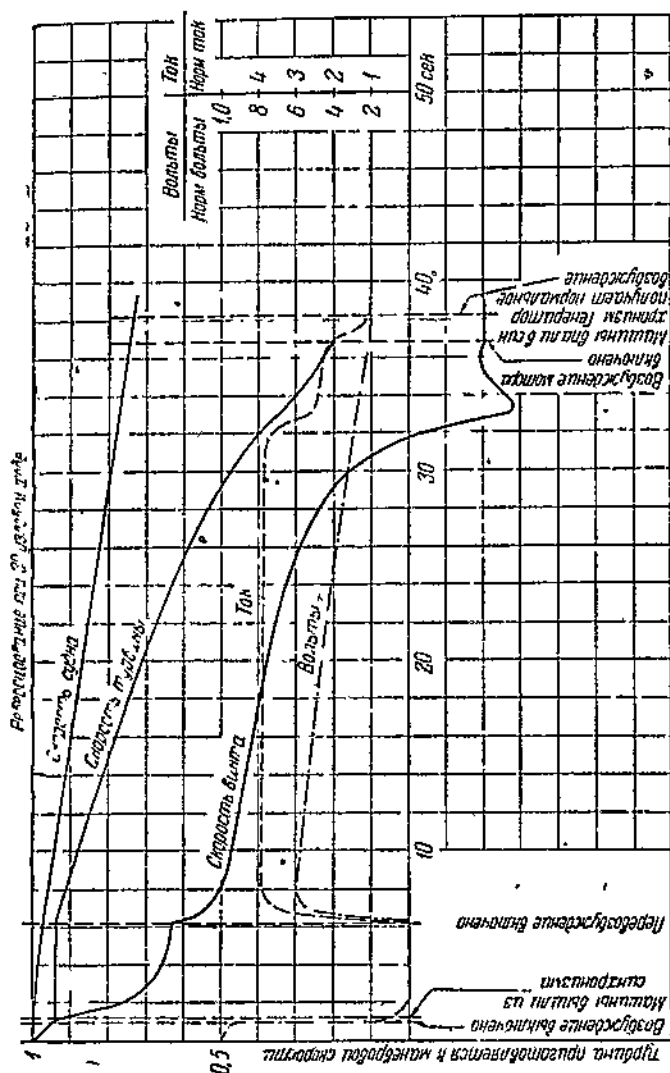
$$\frac{M_{\text{вращ.}}}{M_{\text{торм. норм.}}} = \frac{30}{100} \cdot 100 = 30\%;$$

б) отношение чисел оборотов

$$\frac{n_0}{n_{II}} = \frac{75 \cdot 100}{157} = 56\%$$

При производстве реверса, после выключения гребных электродвигателей, хотя судно и лишается движущей силы, но вследствие инерции оно продолжает поступательно двигаться вперед. Инерционная скорость движения судна тем меньше будет отличаться от устано-

вившейся поступательной скорости, при которой производится реверс, чем меньше будет время, требуемое для реверсирования гребного электродвигателя. Так, например, по приводимому расчетному графику реверсирования турбо-электроходов голландской постройки



фиг. 9.

(фиг. 9) время, требуемое для переключений на пульте управления, связанных с реверсированием гребного синхронного электродвигателя, равно, примерно, 6 сек.

За это время скорость судна упадет всего, примерно, на 3%. При начале вращения гребного винта в обратном направлении, что по расчету произойдет, примерно, через 32 сек., инерционная поступательная скорость судна составит около 80% полной скорости движения

судна. Таким образом при расчете реверса можно исходить из кривой тормозного момента, отвечающей скорости движения судна, при которой производится реверс. Пользование этой кривой обеспечит некоторый запас в сторону фактического ускорения реверсирования гребного винта. Чем большим вращающим моментом будет располагать гребной электродвигатель после его переключения на реверс, тем скорее осуществится реверс гребного винта.

Из приводимого графика реверсирования турбо-электроходов голландской постройки видно, что скорость свободного вращения винта (при  $M=0$ ) составляет  $\sim 64\%$  от  $n_{\text{норм}}$ . При преодолении гребным электродвигателем максимального отрицательного тормозного момента гребного винта инерционная скорость судна будет составлять, примерно,  $95\%$  от максимальной скорости хода судна.

Разобрав характер изменения тормозного момента гребного винта при его реверсировании, перейдем к условиям работы гребных электродвигателей, которые позволяли бы обеспечить наиболее быстрое осуществление реверса гребного винта.

Предварительно заметим, что в процессе производства реверса приходится иметь дело с динамическими условиями, т. е. помимо наличия тормозных и вращающих моментов необходимо учитывать также и влияние дополнительных усилий, идущих на преодоление инерции вращающихся масс гребного, электродвигателя, гребного винта с валом и массой воды, увлекаемой вращающимся гребным винтом, или, другими словами, необходимо учитывать влияние динамических сопротивлений.

Для решения вопроса реверсирования гребных винтов электроходов приходится исходить из основного уравнения Даламбера для неустановившегося вращательного движения, известного из теории электропривода, а именно:

$$M_{\text{эл.-дв.}} = M_s + M_d,$$

где:  $M_{\text{эл.-дв.}}$  — вращающий момент гребного электродвигателя,  
 $M_s$  — статический момент сопротивлений или тормозной момент гребного винта при установившемся движении, значение которого для условий реверсирования выражается обычно вышеразобранном графиком гребного винта;  
 $M_d$  — момент динамических сопротивлений, идущий на изменение скорости вращающихся масс при реверсировании. Значение  $M_d$  находится по выражению:

$$M_d = J \frac{d\omega}{dt},$$

где:  $J$  — момент инерции вращающихся масс,  
 $\omega$  — угловая скорость вращающихся масс,  
 $\frac{d\omega}{dt}$  — угловое ускорение вращающихся масс.

Обычно выражение момента динамических сопротивлений дается через маховой момент, т. е.

$$M_d = \frac{GD^2 d\omega}{4g dt} = \frac{GD^2 2 \cdot \pi dn}{4g \cdot 60 dt} = \frac{GD^2 dn}{375 dt} \text{ КГМ.}$$

В последнем выражении:

- $GD^2$  — маховой момент, выраженный в  $\text{кгм}^2$ ,  
 $G$  — вес вращающейся массы в  $\text{кг}$ ,  
 $D$  — диаметр инерции вращающейся массы в  $\text{м}$ ,  
 $dn$  — изменение числа оборотов за время  $dt$ ,  
 $g$  — ускорение силы тяжести в  $\text{м/сек}^2$ .

Для условий реверсирования гребного электродвигателя учитывается не только маховой момент ротора электродвигателя, но также и маховые моменты вращающихся элементов, связанных с гребным электродвигателем, а именно: маховой момент гребного вала и фланцевых соединений, гребного винта, а также вращающейся массы воды, увлекаемой гребным винтом.

Следовательно, в уравнении

$$M_d = M_{\text{эл. дв.}} - M_{\text{торм.}} = \frac{GD^2 dn}{375 dt} \text{ кгм}$$

нужно брать значение приведенного махового момента, отнесенного к валу электродвигателя.

Значение приведенного махового момента находится по известной формуле:

$$GD_{\text{пр}}^2 = GD_{\text{эл.-дв.}}^2 + G_1 D_1^2 \frac{\omega_1^2}{\omega_{\text{эл.-дв.}}^2} + G_2 D_2^2 \frac{\omega_2^2}{\omega_{\text{эл.-дв.}}^2} + G_3 D_3^2 \frac{\omega_3^2}{\omega_{\text{эл.-дв.}}^2} + \dots$$

где:  $GD_{\text{эл.-дв.}}^2$  — маховой момент гребного электродвигателя,

$G_1 D_1^2$ ;  $G_2 D_2^2$ ;  $G_3 D_3^2$  и т. д. — маховые моменты вращающихся частей, связанных с вращением якоря гребного электродвигателя,  
 $\omega_{\text{эл.-дв.}}$ ;  $\omega_1$ ;  $\omega_2$ ;  $\omega_3$  и т. д. — соответственно угловые скорости вращающихся элементов.

## § 7. Рассмотрение типовых схем и разбор вопроса реверсирования гребных установок постоянного тока

Согласно практике осуществления электрогребных судовых установок на постоянном токе фирма Броун-Бовери электрические схемы соединения этих установок разделяет на следующие четыре основных типа:

1. Установки, работающие при постоянстве напряжения. Типовая схема соединений подобных установок приведена на фиг. 10.

2. Установки, работающие при постоянной или же регулируемой (поддерживаемой в заданных пределах) силе тока. Типовую схему соединений этой установки см. на фиг. 11.

3. Установки по системе Вард-Леонарда, работающие с переменным напряжением и силой тока; схема электрических соединений типовой гребной установки Броун-Бовери по системе Вард-Леонарда представлена на фиг. 12).

4. Установки, работающие с возможностью поддержания постоянства заданной мощности. Типовая схема электрического соединения такой установки дана на фиг. 13.

Основной особенностью приведенных типовых схем является наличие соответствующих быстродействующих регуляторов, выполнение которых положительно разрешено фирмой Броун-Бовери.





Реверс достигается изменением направления тока в якоре электродвигателя посредством переключателя  $P-II$ .

Применение и использование реостата в цепи главного тока невыгодно отличает подобные установки как в отношении тяжеловесности, громоздкости и дороговизны регулировочной аппаратуры, а также неэкономичности и грубой регулировки при пользовании реостатом  $R$ . Поэтому электрогребные установки с применением реостата в цепи главного тока практически допустимы только для мощностей сравнительно незначительных.

В отношении разгона гребной установки при оголении винта эти установки дают незначительное увеличение числа оборотов.

Одним из основных преимуществ этих установок является возможность совместного использования главных генераторов как для электродвижения, так и для посторонней нагрузки, включая и возможности самовозбуждения (особенно при небольших мощностях).

Установки с постоянством напряжения там, где назначение электродвижения является не основным, а вспомогательным условием работы судна. К таким судам относятся пловучие краны, пловучие доки, мастерские и т. п. суда с возможностью самоперемещения.

Электрогребные установки второго типа, т. е. работающие

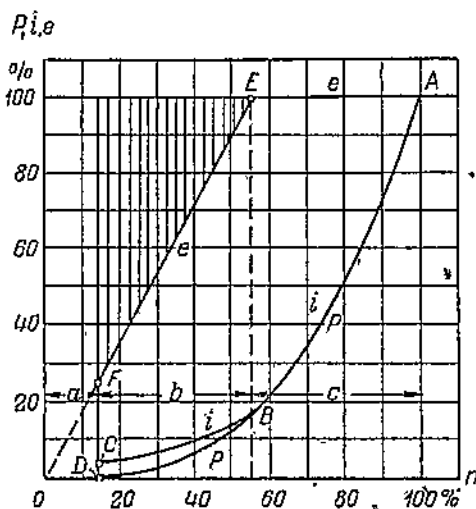
или при постоянстве силы тока или с автоматическим изменением силы тока в заданных пределах, имеют график изменения основных кривых в зависимости от  $n$ , представленный на фиг. 15.

При установке регулятора  $BPT$  на постоянство силы тока  $i = \text{const.}$  напряжение и мощность в зависимости от  $n$  изменяются соответственно кривой  $Pe$ . (см. график, средняя кривая). При установке регулятора на убывающий ток  $i'$  или возрастающий ток  $i''$  напряжение изменяется соответственно кривым  $e'$  и  $e''$ , представленным на графике.

Регулирование числа оборотов  $n$  и реверс осуществляются помощью потенциометра  $P_2$  в цепи возбуждения гребного электродвигателя.

Возможно точное (мелкоступенчатое) регулирование в обоих направлениях, без разрыва цепи главного тока. Регулирование при частичной нагрузке невыгодно, особенно при установке на  $i = \text{const.}$  (так как потери  $I^2R = \text{const.}$ ); более выгодна регулировка при установке на  $i'$ .

При оголении винта происходит значительное увеличение числа оборотов электродвигателя, что вредно отзывается на машинной установке и корпусе судна. Постоянство или ограничение силы тока предохра-

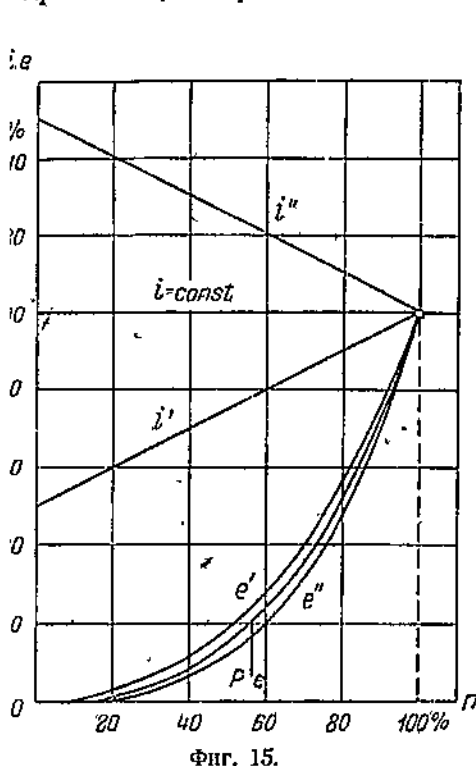


Фиг. 14.

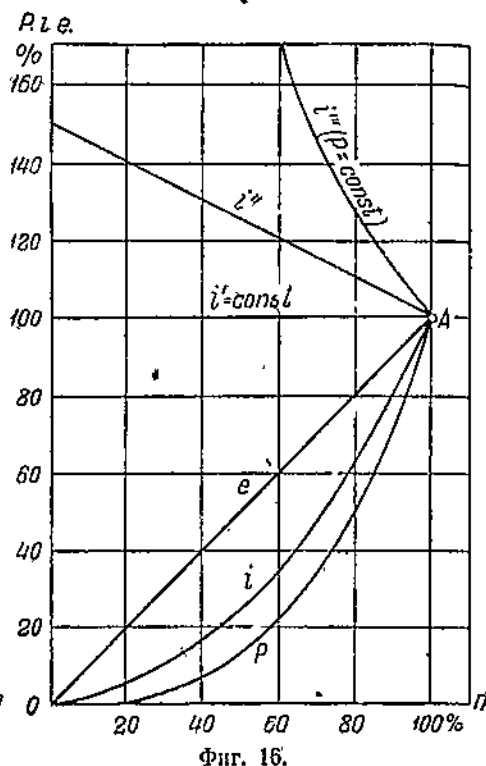
няет установку от перегрузок, что особенно важно для производства быстрого маневрирования.

Выполнение электродвижения по схеме с постоянством или ограниченной силой тока применяется для специальных целей, как, например, это выполнено для минного заградителя «Olav Tryggvason». Для обычных морских товаро-пассажирских судов, требующих длительной работы на пониженных мощностях, эта схема не экономична.

Установки по системе Вард-Леонарда могут работать с переменным напряжением и током, что и представлено на графике (фиг. 16) кривыми  $e$ ,  $i$  и  $p$ .



Фиг. 15.



Фиг. 16.

При применении в системе Вард-Леонарда быстродействующих регуляторов с постоянным (кривая  $i' = \text{const.}$ ) или ограниченно-нарастающим (кривая  $i''$ ) значением силы тока соответственно можно изменять и ход кривой мощности. Например, для обеспечения постоянства мощности гребного электродвигателя в пределах изменения числа оборотов от 60 до 100%, регулятор тока должен обеспечить изменение силы тока по кривой  $i''$ .

Регулировка числа оборотов и реверсирование гребного электродвигателя осуществляются с помощью потенциометра  $\Pi_{ВГ}$ ; аппаратура для регулировки проста, компактна и дешева; способ регулировки и работа установки при пониженных мощностях наиболее экономичны по сравнению с первыми двумя вышеразобранными схемами.

При оголении винта увеличение числа оборотов гребного электродвигателя незначительно.

Благодаря всем перечисленным положительным качествам система Вард-Леонарда является нормальной схемой электрогребных установок постоянного тока, в силу чего и находит самое широкое применение, особенно на морских товаро-пассажирских судах.

К последнему, четвертому, типу относятся электрогребные установки, работающие с постоянной мощностью, при изменяющемся сопротивлении движению судна.

Зависимость основных кривых при изменении скорости винта приведена на графике фиг. 17.

Кривая  $P$  относится к мощности гребного винта при свободном ходе судна; кривая  $P'$  — при ходе судна с возом (буксиром) или при движении судна во льдах; кривые  $i$ ,  $e$  и  $i'$ ,  $e'$  — соответственное изменение силы тока и напряжения.

При снабжении установки регулятором постоянства тяговой мощности ход кривой мощности  $P'$  из точки  $B$  не возрастает до точки  $C$ , а остается постоянным, в пределах отрезка  $AB$ , за счет воздействия  $BPM$  на увеличение возбуждения гребного электродвигателя. Таким образом регулятор постоянства мощности предохраняет установку от недопустимых перегрузок.

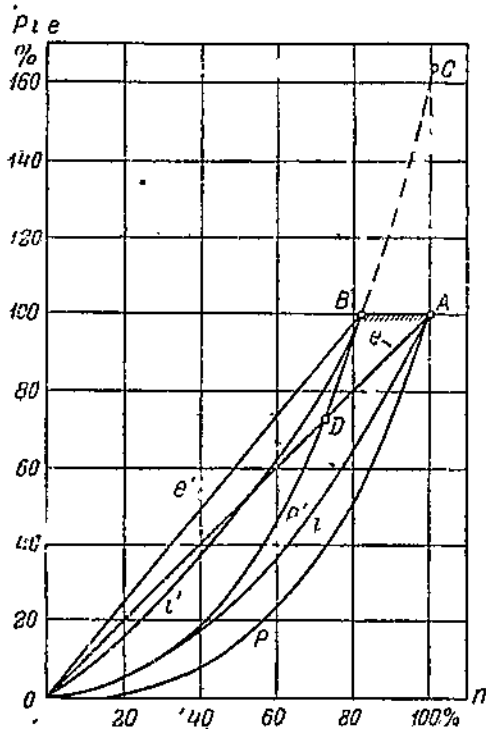
Регулирование скорости и реверс достигаются помощью потенциометра  $П_{вг}$ , с экономическим эффектом, равноценным со схемами Вард-Леонарда.

Разбег винта при его оголении незначителен.

Схемы с регулятором постоянства предельной мощности находят применение для буксирных судов и судов, предназначенных для плавания в ледовых условиях.

Рассмотренные типовые схемы, за исключением первой, помимо главных генераторов требуют установки вспомогательных генераторов и независимого возбуждения главных генераторов.

Схема Вард-Леонарда, как было указано, является нормальной схемой электрогребных установок постоянного тока для самоходных



Фиг. 17.

товаро-пассажирских морских судов, остальные же схемы применяются для судов специального назначения.

Поэтому дальнейшее, более детальное, рассмотрение вопроса реверсирования электрогребных установок постоянного тока и ограничим схемами по системе Вард-Леонарда.

Рассмотрение вопроса о реверсировании гребных установок на постоянном токе произведем графо-аналитическим методом.

Ввиду сложности вопроса реверсирования гребных установок в нижеприводимом методе примем практически допустимые упрощения в приложении к наиболее простому случаю электрогребной установки на постоянном токе, оборудованной по системе Вард-Леонарда, с использованием шунтового гребного электродвигателя и с шунтовым генератором, питающим гребной электродвигатель.

Для обеспечения решения вопроса о реверсировании примем следующие упрощения.

1. Падение напряжения в обмотке якоря гребного электродвигателя будем считать в линейной зависимости от силы тока нагрузки электродвигателя, т. е. влиянием реакции якоря пренебрегаем и считаем, что магнитный поток электродвигателя постоянен,  $\Phi = \text{const.}$ , а следовательно, и  $E_n$  — противозлектродвижущая сила электродвигателя будет зависеть только от изменения числа оборотов электродвигателя, т. е.

$$E_n = kn.$$

Поэтому падение напряжения в якоре электродвигателя  $I_a R_a$  представится наклонной прямой линией, что в пределах нормальной нагрузки электродвигателя можно считать практически допустимым.

Уравнение прямой падения напряжения в якоре электродвигателя напишется в виде

$$I_a R_a = V - E_n = V - kn,$$

откуда

$$kn = V - I_a R_a.$$

2. Потерями холостого хода пренебрегаем, т. е. считаем, что при холостом ходе электродвигателя  $I_a = 0$ ;  $V = E_n$ . Следовательно, при  $V = 0$  прямая падения напряжения в якоре электродвигателя пройдет через начало координат системы ( $I_a$ ,  $n$ ).

3. При реверсировании гребного винта будем принимать одинаковое значение мгновенного изменения тока нагрузки, а следовательно, и изменения вращающего момента электродвигателя для отдельных участков при ступенчатой регулировке напряжения генератора, т. е. принимаем:

$$\Delta I_a = \text{const. и } \Delta M_d = (M_{\text{эл-дв.}} - M_{\text{торм.}})_{\text{мгн.}} = \text{const.}$$

4. Принимаем во внимание для шунтового электродвигателя при  $\Phi = \text{const.}$ , линейную зависимость выражения вращающего момента от тока нагрузки, т. е.

$$M = K_1 \Phi I_a = C I_a.$$

Значения масштабов для моментов и токов нагрузки берем с переходным коэффициентом  $C$ , чтобы иметь совмещенные точки для данных значений  $M$  и  $I_a$ .

Приняв вышеуказанные допущения, механическую характеристику шунтового электродвигателя, т. е.  $M = f(n)$ , а при  $\Phi = \text{const.}$  и  $I_a = f(n)$ , можно представить следующим графиком семейства прямых, представленным на фиг. 18, для различных значений подводящего к электродвигателю напряжения.

Прямая  $V_0$ , проходящая через начало координат, разбивает работу реверсируемого электродвигателя на следующие режимы. Отрезки прямых:  $V_1, V_2, V_3$  и т. д., лежащие в квадранте I, представляют механические характеристики чисто электродвигательного режима, т. е.

$$V > E_n \text{ и } +I_a = \frac{V - E_n}{R_a}.$$

При вращении электродвигателя в одном направлении число оборотов электродвигателя  $n$  лежит в пределах от 0 до  $n$  холостого хода. Отрезки прямых:  $-V_1, -V_2, -V_3$  и т. д., лежащие в квадранте III, представляют также механические характеристики работы электродвигателя после реверса, т. е. с вращением электродвигателя в обратном направлении:

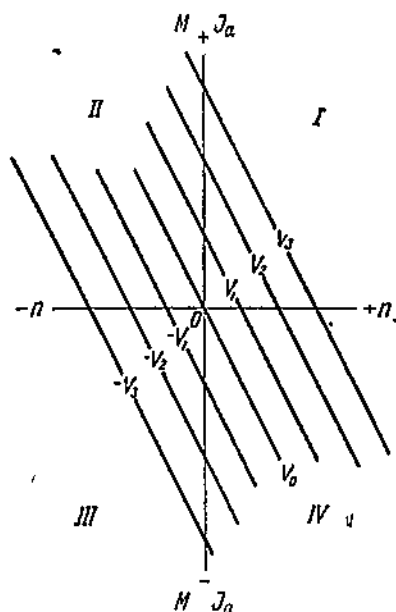
$$-I_a = \frac{-V + E_n}{R_a}$$

(при абсолютном значении  $V > E_n$ ); число оборотов  $n$  электродвигателя лежит в пределах от 0 до  $-n$  холостого хода.

Отрезки прямых:  $V_1, V_2, V_3$  и т. д., лежащие в квадранте IV, и отрезки прямых:  $-V_1, -V_2, -V_3$  и т. д., лежащие в квадранте II, относятся к режимам работы электродвигателя в качестве генератора, когда число оборотов электродвигателя будет превышать по абсолютному значению число оборотов холостого его хода (тормозной режим электродвигателя с рекуперацией).

Точки, взятые на этих отрезках, соответственно выражают для прямого хода:  $-I_a = \frac{V - E_n}{R_a}$ , так как  $E_n > V$ , для обратного хода:  $+I_a = \frac{-V + E_n}{R_a}$ , так как  $E_n > V$  по абсолютному значению.

Электродвигатель, работая на этих отрезках, посылает ток обратного направления в сеть, включая и питающие его генераторы; последние переходят на электродвигательный режим, что при шун-



Фиг. 18. Механическая характеристика шунтового электродвигателя при различном напряжении ( $V = \text{var}$ ).

Товых генераторах сопровождается сохранением вращения их в том же направлении. Вследствие этого генерирующий агрегат будет быстро повышать свои обороты.

Повышение числа оборотов особенно опасно для тихоходных агрегатов, не обладающих большими маховыми моментами, где при заданном допустимом проценте повышения числа оборотов абсолютное изменение числа оборотов незначительно. К таким агрегатам можно отнести дизель-генераторы, которые находят широкое применение на электроходах постоянного тока.

Отрезки прямых:  $V_1, V_2, V_3$  и т. д., лежащие в квадранте II, и отрезки прямых:  $V_1, V_2, V_3$  и т. д., лежащие в квадранте IV, относятся к режиму работы электродвигателя, аналогичному режиму торможения электродвигателя противотоком, так как для этих отрезков имеем измененное направление вращения электродвигателя и значение сил токов в цепи электродвигателя будет для отрезков  $V_1, V_2, V_3$  и т. д.:

$$+I_a = \frac{V + E_n}{R_a},$$

для отрезков  $-V_1, -V_2, -V_3$  и т. д.:

$$-I_a = \frac{-V - E_n}{R_a}.$$

Располагая графическим изображением изменения тормозного момента гребного винта и упрощенными механическими характеристиками реверсируемого шунтового электродвигателя, можно перейти к определению условий реверсирования электрогребной установки.

Для более наглядного определения условий реверсирования электрогребной установки сопоставим кривую тормозного момента гребного винта (нагрузочную кривую) с прямыми механической характеристики гребного электродвигателя (фиг. 19).

Для определения угла  $\alpha$  наклона прямых механической характеристики гребного электродвигателя в условиях реверсирования по отношению к оси абсцисс (к оси  $n$ ) достаточно знать нормальное число оборотов гребного электродвигателя ( $n_n$ ), число его оборотов при холостом ходе ( $n_{хх}$ ) и нормальный вращающий момент ( $M_n$ ). Значение угла  $\alpha$  найдется из выражения:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{M_n}{n_{хх} - n_n}.$$

Нормальное число оборотов гребного электродвигателя  $n_n$  задается требованиями гребного винта. Нормальный вращающий момент  $M_n$  легко определить по уравнению:

$$M_n = \frac{716,2 P_n}{n_n} \text{ кгм},$$

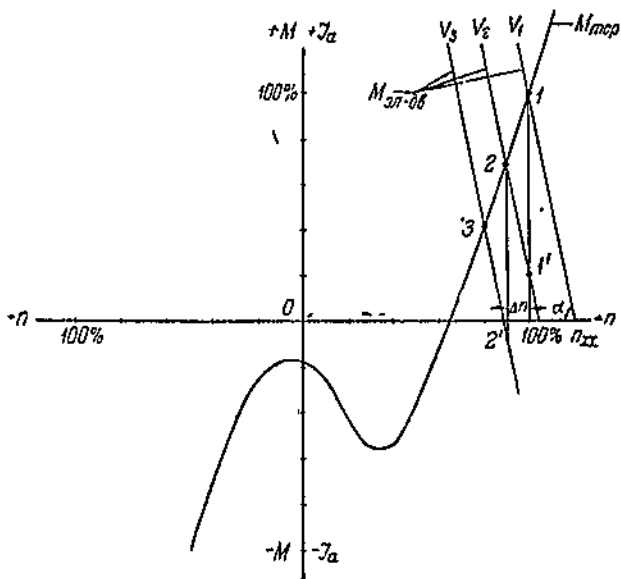
где  $P_n$  — нормальная мощность гребного электродвигателя в л. с. Определение нормальной мощности электродвигателя было указано в § 4.

Для определения числа оборотов холостого хода гребного электродвигателя можно исходить из условий мгновенной его разгрузки и анализа явлений, возникающих при этом.

Пользуясь вышеприведенным уравнением для числа оборотов

$$n = \frac{V - I_a R_a}{K},$$

закключаем, что число оборотов при холостом ходе возрастает, во-первых, вследствие разгрузки электродвигателя, так как  $I_a R_a = 0$ . Для больших реверсивных электродвигателей увеличение числа их оборотов вследствие разгрузки обычно бывает (2—4)% от  $n_n$ .



Фиг. 19.

Вторая причина увеличения числа оборотов при разгрузке электродвигателя — это возрастание напряжения  $V$ , подводимого к электродвигателю из-за повышения напряжения на клеммах питающего генератора. Для современных крупных генераторов с независимым возбуждением повышение напряжения на клеммах можно считать в пределах (3—5)% от  $V_n$ .

При мгновенной полной разгрузке генератора допустимое увеличение числа оборотов первичного двигателя, согласно правилам Регистра СССР, не должно превосходить 6%, а по правилам Английского Ллойда 7%, благодаря чему увеличение напряжения генератора также может возрастать еще на 6—7%.

Таким образом увеличение числа оборотов гребного электродвигателя вследствие мгновенной его разгрузки может достигать от 11 до 16%, т. е.  $n_{хх} = (1,11 \div 1,16)n_n$ , следовательно,

$$\alpha = \arctg \left[ \frac{M_n}{(0,11 \div 0,16) n_n} \right].$$

При производстве реверса прежде всего необходимо силу тока якорной цепи гребной установки ограничить величиной, не опасной для машин. Если бы напряжение, подводимое к электродвигателю, путем воздействия на возбуждение генератора сразу снизить до нуля, то в замкнутой цепи гребной установки под действием противоэлектродвижущей силы —  $E_n$ , поддерживаемой за счет приведенного махового момента гребной установки, сила тока в якоре электродвигателя достигла бы опасных пределов:

$$-I_a = \frac{0 - E_n}{R_a}.$$

Поэтому мгновенное снижение напряжения до нуля недопустимо.

Необходимо постепенное, обычно ступенчатое, снижение напряжения, подводимого к электродвигателю.

При мгновенном снижении силы тока в якоре в заранее заданных пределах происходит как бы мгновенный перевод электродвигателя на другую его механическую характеристику, в части соответствующих режимов работы машины, а именно: при  $I_a > 0$  электродвигатель работает на электродвигательной части механической характеристики, при  $I_a < 0$  работа его происходит уже на генераторном участке характеристики.

Мгновенное снижение силы тока в якоре гребного электродвигателя при переходе с одной ступени на другую отражается и на работе генерирующего агрегата, а именно, как отмечалось выше, при мгновенном снижении силы тока в якоре электродвигателя в пределах квадранта I, т. е. в пределах  $I_a > 0$ , происходит соответственно мгновенный сброс нагрузки с генератора, вследствие чего первичный двигатель генерирующего агрегата начинает увеличивать число оборотов или, как говорят, двигатель идет в разгон.

В случае же изменения силы тока в якоре электродвигателя с мгновенным переходом из квадранта I в квадрант IV происходит и изменение направления тока в цепи якореи, что сопровождается превращением гребного электродвигателя в генератор, а генератор питающего агрегата становится электродвигателем с сохранением того же направления вращения.

Поэтому условия разгона первичного двигателя в этом случае еще больше возрастают.

Во избежание резких и вредных толчков на первичный двигатель гребной установки степень изменения силы тока в гребном электродвигателе при переводе его с одной механической характеристики на другую должна быть увязана с допустимыми условиями изменения нагрузки и оборотов у генерирующего агрегата.

По правилам классификационных обществ обычно ограничивается значение увеличения числа оборотов первичного двигателя в зависимости от характера его разгрузки.

Поэтому для дизельных агрегатов постоянного тока требуется установка быстродействующих регуляторов горючего, чтобы скорость вращения дизелей при внезапном сбросе полной нагрузки превышала нормальную скорость вращения не больше чем в пределах, указанных выше.

Кроме того, по правилам Английского Ллойда для дизельных агрегатов допускается повышение оборотов в  $3\frac{1}{2}\%$  при постепенном изменении нагрузки. Мгновенное изменение силы тока в якоре гребного электродвигателя сопровождается соответствующим мгновенным изменением его вращающего момента.

При мгновенном изменении вращающего момента гребного электродвигателя число оборотов электродвигателя начинает снижаться или увеличиваться в зависимости от того, происходит ли уменьшение или увеличение силы тока в якоре. Но изменение числа оборотов электродвигателя будет происходить не мгновенно, а постепенно, вследствие необходимости преодоления инерционных (динамических) сопротивлений вращающихся масс. Время, потребное для изменения числа оборотов гребной установки в пределах одной ступени от значения  $n_1$  до  $n_2$ , зависит от величины приведенного махового момента  $GD^2_{прив.}$  и от величины мгновенного изменения силы тока в якоре гребного электродвигателя или, что то же, от вращающего момента электродвигателя.

Для одной ступени изменения напряжения, подводимого к электродвигателю, имеем:

$$\Delta M_d = (M_{эл.-дв.} - M_{торм.})_{мгн.} = \frac{GD^2_{пр.} dn}{375 dt};$$

так как принимается

$$\Delta M_d = \text{const.},$$

имеем

$$\Delta M_d dt = \frac{GD^2_{пр.} dn}{375},$$

$$\Delta M_d \int_{t_1}^{t_2} dt = \frac{GD^2_{пр.}}{375} \int_{n_1}^{n_2} dn,$$

$$\Delta M_d (t_2 - t_1) = \frac{GD^2_{пр.}}{375} (n_2 - n_1),$$

или

$$t_2 - t_1 = \frac{GD^2_{пр.} (n_2 - n_1)}{375 (M_{эл.-дв.} - M_{торм.})_{мгн.}};$$

заменяя  $t_2 - t_1$  для одной ступени через  $\Delta t$  и  $n_2 - n_1$  — через  $\Delta n$  и обращаясь к графику (фиг. 19, стр. 65), можем написать:

$$M_{торм.} = M_{эл.-дв.} = C I_{a_1} \text{ для точки } 1,$$

$$M_{эл.-дв.} = C I_{a_1'} \text{ для точки } 1'.$$

Полученное уравнение можем представить в таком виде:

$$\Delta t = \frac{GD^2_{пр.} \Delta n}{375 C [I_{a_1'} - I_{a_1}]}.$$

Время  $\Delta t$ , потребное для изменения числа оборотов гребного электродвигателя от  $n_1$  до  $n_2$ , т. е. на  $\Delta n$ , за счет мгновенного изменения соответствующей силы тока в якоре в пределах от значения

$I_{a1}$  до  $I_{a1}'$ , будет прямо пропорционально приведенному маховому моменту  $GD_{пр.}^2$  гребной установки и обратно пропорционально величине изменения силы тока в якоре ( $I_{a1}' - I_{a1}$ ).

Вследствие изменения числа оборотов гребного электродвигателя на  $\Delta n$  происходит и соответствующее изменение против э. д. с.  $E_n$  электродвигателя. Благодаря этому сила тока в якоре автоматически меняется.

Если мы обратимся к вышеприведенному графику (фиг. 19), совмещающему кривые тормозного момента гребного винта и прямые механической характеристики гребного шунтового электродвигателя, то на основании изложенного можем сделать следующие выводы.

В точке 1 имеем установившийся режим, т. е.  $M_{торм.} = M_{эл.-дв.}$ , чему соответствует сила тока в якоре  $I_{a1}$ , и число оборотов якоря электродвигателя  $n_1$ , при величине напряжения, подводимого к электродвигателю  $V_1$ .

При мгновенном уменьшении напряжения, подводимого к электродвигателю с  $V_1$  до  $V_2$ , происходит и соответственное мгновенное уменьшение силы тока в якоре электродвигателя с величины

$$I_{a1} = \frac{V_1 - E_{n1}}{R_a}$$

до

$$I_{a1}' = \frac{V_2 - E_{n1}}{R_a},$$

чему и будет соответствовать новый вращающий момент электродвигателя  $M_{a1}'_{эл.-дв.}$ .

За счет избыточного тормозного момента гребной электродвигатель будет сбавлять число оборотов. Снижение числа оборотов будет сопровождаться одновременным снижением и  $E_{n1}'$  до  $E_{n2}$ , а следовательно, и увеличением силы тока в якоре до

$$I_{a2} = \frac{V_2 - E_{n2}}{R_a}$$

по сравнению с  $I_{a1}'$  и последующим увеличением вращающего момента электродвигателя.

Это изменение числа оборотов с одновременным изменением силы тока в якоре электродвигателя и его вращающего момента будет происходить по соответствующей прямой механической характеристики электродвигателя. Снижение оборотов при одновременном нарастании момента будет продолжаться до тех пор, пока прямая механической характеристики, проведенная из точки 1', не пересечет кривую тормозного момента гребного винта в точке 2, в которой и будем иметь новый установившийся режим гребной установки.

Полное время реверса можно представить как сумму времени отдельных промежутков  $\Delta t$ , в течение которых происходит изменение числа оборотов гребного электродвигателя на величину  $\Delta n$ , соответствующую одной ступени изменения величины напряжения, подводимого к электродвигателю.

Принимая постоянство величины мгновенного изменения силы тока в якоре, т. е.  $I_{a1}' - I_{a1} = \text{const.}$ , на всех ступенях регулировки на-

пряжения, а изменение числа оборотов в пределах реверса полагаем от  $n_1$  до  $-n_k$ , время реверса в пределах этого изменения числа оборотов найдем как сумму отдельных промежутков  $\Delta t$ , т. е.

$$t_{\text{рев.}} = \sum \Delta t = \frac{GD_{\text{пр.}}^2 \sum \Delta n}{C \cdot 375 (I_{a1}' - I_{a1})} = \frac{GD_{\text{пр.}}^2 (-n_k - n_1)}{C \cdot 375 (I_{a1}' - I_{a1})} = \\ = \frac{GD_{\text{пр.}}^2 (n_1 + n_k)}{C \cdot 375 (I_{a1}' - I_{a1})} = \frac{GD_{\text{пр.}}^2 (n_1 + n_k)}{375 \Delta M}.$$

На основании полученного вывода определим время реверсирования гребного шунтового электродвигателя при следующих исходных данных:

1. Мощность гребного электродвигателя  $P_n = 3250$  л. с.
2. Нормальное число оборотов электродвигателя  $n_n = 160$  об/мин.
3. Вращающий момент электродвигателя  $M_{\text{эл.-дв.}} = 15$  тм.
4. Приведенный маховой момент гребной установки (т. е. суммарный маховой момент электродвигателя, гребного винта с валом и увлекаемой им водой) примем:  $GD_{\text{пр.}}^2 = 100$  тм<sup>2</sup>.

Определим время реверса, при условии, что:

а) генерирующим агрегатом допускается мгновенное изменение силы тока в 50% от  $I_n$ ; мгновенное изменение вращающего момента электродвигателя составит 50% от  $M_n$ , т. е.  $\Delta M = 0,5 M_n = 7,5$  тм.

б) Предельное значение допустимой силы тока в цепи якоря во время реверса по динамическим и термическим условиям не должно превышать двукратного значения номинальной силы тока. При двукратном значении силы тока в якоре вращающий момент электродвигателя можно принять равным двойному номинальному моменту, т. е.

$$M_{\text{пр.}} = 2M_n.$$

Для определения времени реверсирования наносим заданную кривую тормозного момента гребного винта и в этом же масштабе наносим и прямую механической характеристики электродвигателя, т. е.  $M = f(n)$  для вращения в обоих направлениях.

За кривую тормозного момента гребного винта берем кривую 4 по графику фиг. 8, соответствующую установившейся скорости поступательного движения в 20 узлов. Прямую механической характеристики наносим по двум точкам: при  $M_n = 15$  тм,  $n_n = 160$  об/мин. и при холостом ходе, т. е. при  $M = 0$ ; число оборотов электродвигателя при холостом ходе принимаем на 13% выше номинального, т. е.  $n_{\text{хх}} = 1,13 n_n = 181$  об/мин.

Совмещенные кривые тормозного момента гребного винта и механической характеристики электродвигателя представлены на графике фиг. 20.

Строим кривую изменения моментов гребного электродвигателя при реверсировании. Кривая реверсирования получится в виде ступенчатой кривой, построенной по данным мгновенного изменения момента гребного электродвигателя.

На основании построенного графика видно, что кривые тормозного момента и механической характеристики реверсированного



Время реверсирования на этом участке кривой получим на основании вышеприведенного уравнения:

$$t_{\text{рев. 1-го участка}} = \frac{GD_{\text{пр.}}^2 (n_A + n_C)}{375 \Delta M} = \frac{100 \cdot 243}{375 \cdot 7 \cdot 5} = 8,7 \text{ сек.}$$

Для второго участка кривой при изменении числа оборотов гребного электродвигателя от  $n_C$  до  $n_{B1}$ , т. е. на  $128 - 83 = 45$  об/мин. время реверсирования определим, исходя из значения  $\Delta M_{\text{ср.}} = 6,37$  т.

$$t_{\text{рев. 2-го участка}} = \frac{GD_{\text{пр.}}^2 (n_{B1} - n_C)}{375 \Delta M_{\text{ср.}}} = \frac{100 \cdot 45}{375 \cdot 6,37} = 1,9 \text{ сек.}$$

Время реверсирования гребного электродвигателя на участке  $AB_1$ , т. е. до перехода электродвигателя на механическую характеристику, обеспечивающую в дальнейшем автоматическое нарастание числа оборотов гребной установки до нормального значения оборотов, будет:

$$T_{\text{рев.}} = t_{\text{рев. 1}} + t_{\text{рев. 2}} = 8,7 + 1,9 = 10,6 \text{ сек.}$$

Этому времени реверсирования электродвигателя должно отвечать время перевода регулятора возбуждения генератора и соответственно значение сопротивлений его ступеней, чтобы режим реверсирования не выходил из заданных условий.

Для определения времени полного реверса, т. е. изменения числа оборотов от  $+n_n$  до  $-n_n$ , к полученному времени реверса в 10,6 сек. необходимо еще добавить время работы гребного электродвигателя на автоматической характеристике в пределах от  $B_1$  до  $A_1$ , где одновременно будет происходить нарастание числа оборотов электродвигателя и соответственное снижение его вращающего момента вследствие нарастания скорости судна до установившегося предела.

Величина этого промежутка времени будет зависеть от быстроты спадания величины тормозного момента гребного винта, которая, как мы видели, зависит от его поступательной скорости, а следовательно, и изменения скорости движения судна.

Разобрав электрогребную установку постоянного тока по одной из систем Вард-Леонарда, можем прийти к следующему заключению. Основные требования, предъявляемые к судовым гребным установкам, а именно, возможность широкой регулировки числа оборотов и легкость осуществления реверса, как видели на разобранном примере, легко и просто достигаются в этих системах установок при воздействии только на электрическую часть установки путем регулирования напряжения генератора, совершенно не затрагивая работы первичного двигателя генерирующего агрегата.

Что касается возможности создания необходимой величины вращающего момента, связанного с условиями производства быстрого торможения и реверсирования гребного винта, то при применении гребных электродвигателей постоянного тока имеется полная возможность в получении значительной величины требуемого вращающего момента. Величина этого вращающего момента должна ограничиваться только условиями механической и электрической прочности машин электрогребной установки.

## § 8. Реверсирование электрогребных установок на переменном токе

Для выяснения основных явлений, связанных с реверсированием электрогребных установок на переменном токе, достаточно ограничиться рассмотрением реверсирования применительно к асинхронным электродвигателям, так как реверсирование синхронных гребных электродвигателей протекает в условиях, связанных с асинхронным их запуском, путем использования для этой цели демпферной обмотки ротора.

Для наглядного выяснения требований, предъявляемых к асинхронным гребным электродвигателям при реверсе, сопоставим их механические характеристики с кривой тормозного момента гребного винта.

Для этого сначала обратимся к построению механических характеристик асинхронных электродвигателей и к выявлению их особенностей на основании выражения вращающего момента асинхронного электродвигателя.

Выражение вращающего момента асинхронного электродвигателя дается уравнением:

$$M_{\text{эл.-дв.}} = \frac{mpK_2w_2^2}{2\pi K_1w_1^2} \cdot \frac{E_1^2}{f_1} \cdot \frac{Sr_2}{r_2^2 + S^2x_2^2},$$

где:  $m$  — число фаз,

$p$  — число пар полюсов электродвигателя,

$K_1$  и  $K_2$  — обмоточные коэффициенты статора и ротора,

$w_1$  и  $w_2$  — число витков одной фазы статора и ротора,

$E_1$  — электродвижущая сила обмотки статора, которую практически можно считать равной подводимому к статору напряжению,

$f_1$  — частота тока в статоре электродвигателя или питающего электродвигатель переменного тока,

$S$  — скольжение ротора по отношению к вращающемуся магнитному потоку статора,

$r_2$  — ваттное, или активное, сопротивление цепи ротора,

$x_2$  — безваттное, или индуктивное, сопротивление фазы обмотки заторможенного ротора.

Величины  $m$ ,  $p$ ,  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $w_1$  и  $w_2$  зависят от конструктивных данных электродвигателя и для данного электродвигателя являются величинами постоянными. Поэтому выражение для вращающего момента электродвигателя можно упростить и представить так:

$$M_{\text{эл.-дв.}} = A \frac{E_1^2}{f_1} \cdot \frac{Sr_2}{r_2^2 + S^2x_2^2};$$

здесь

$$A = \frac{mpK_2w_2^2}{2\pi K_1w_1^2}$$

является постоянным коэффициентом, заменяющим отношение постоянных величин, обусловленных конструктивными данными электродвигателя.

Полученное выражение для вращающего момента показывает, что момент асинхронного электродвигателя пропорционален квадрату электродвижущей силы статора или, практически, что то же, второй степени подводимого к электродвигателю напряжения и обратно-пропорционален числу периодов питающего тока; кроме того, этот момент вращения зависит и от числа оборотов ротора электродвигателя, выраженного через скольжение  $S$ , а также и от сопротивления цепи ротора  $r_2$  и  $x_2$ .

Чтобы знать максимальную (опрокидывающую) величину вращающего момента электродвигателя и проанализировать зависимость момента электродвигателя от числа его оборотов, возьмем первую производную от момента по  $S$  и приравняем ее нулю:

$$\frac{dM}{dS} = \frac{d \left[ A \frac{E_1^2}{f_1} \cdot \frac{Sr_2}{r_2^2 + S^2 x_2^2} \right]}{dS} = 0.$$

Так как  $E_1$ ,  $f_1$  и  $r_2$  не зависят от скольжения, то для нахождения максимального момента можно принять их за неизменные величины и дифференциальное уравнение представится:

$$\begin{aligned} \frac{dM}{dS} &= \frac{d \left[ \frac{K}{S + S x_2^2} \right]}{dS} = \frac{K d \left[ \frac{r_2^2}{S} + S x_2^2 \right]^{-1}}{dS} = 0, \\ &\frac{K \left[ \frac{r_2^2}{S^2} - x_2^2 \right]}{\left[ \frac{r_2^2}{S} + S x_2^2 \right]^2} = 0. \end{aligned}$$

Выражение знаменателя, при практически конечных значениях  $r_2$ ,  $S$  и  $x_2$ , не может равняться бесконечности, а также и значение  $K$  не равно нулю. Поэтому в полученном уравнении только значение числителя

$$\left[ \frac{r_2^2}{S^2} - x_2^2 \right] = 0,$$

откуда

$$S = \frac{r_2}{x_2}.$$

Следовательно, наибольшая величина момента вращения асинхронного электродвигателя наступает при скольжении, равном отношению ваттного сопротивления цепи обмотки ротора к его безваттному сопротивлению, отнесенному к частоте переменного тока, питающего электродвигатель.

Для определения максимального значения вращающего момента в выражение момента подставим найденное значение:

$$M_{\max} = A \frac{E_1^2}{f_1} \cdot \frac{Sr_2}{r_2^2 + S^2 x_2^2} = A \frac{E_1^2}{f_1} \cdot \frac{r_2^2}{x_2 (r_2^2 + r_2^2)} = A \frac{E_1^2}{f_1} \cdot \frac{1}{2x_2}.$$

В найденное значение максимального момента подставляем вместо  $A$  его выражение и заменяем безваттное сопротивление  $x_2$  через выражение для индуктивного сопротивления фазы ротора, т. е.  $x_2 = 2\pi f_1 L_2$ , где  $L_2$  — коэффициент самоиндукции.

Окончательное выражение для максимального момента асинхронного электродвигателя будет иметь вид:

$$M_{\max \text{ эл.-дв.}} = \frac{mpK_2 w_2^2}{2\pi K_1 w_1^2} \cdot \frac{E_1^2}{f_1 \cdot 2 \cdot 2\pi f_1 L_2} = \frac{mpK_2 w_2^2 E_1^2}{8\pi^2 K_1 w_1^2 L_2 f_1^2}.$$

На основании приведенных уравнений для вращающего момента асинхронного электродвигателя и полученного выражения для скольжения можем сделать следующие выводы и построить характерные графики механической характеристики электродвигателя.

**Вывод 1.** Величина максимального или опрокидывающего момента асинхронного электродвигателя не зависит от ваттного сопротивления  $r_2$  цепи обмотки ротора и является величиной постоянной при  $x_2 = \text{const.}$

Изменение ваттного сопротивления  $r_2$  в цепи обмотки ротора при постоянном значении индуктивного сопротивления  $x_2$  будет влиять на величину скольжения  $S$ , отвечающего максимальному значению вращающего момента. Представим это графически.

Для простоты и удобства построим график механической характеристики асинхронного электродвигателя, дающий зависимость между вращающим моментом и скольжением, т. е.

$$M = f(S).$$

От скольжения  $S$  легко можно перейти и к оборотам ротора электродвигателя, пользуясь зависимостью

$$n_2 = n_1 (1 - S),$$

где  $n_2$  — число оборотов ротора асинхронного электродвигателя,  $n_1$  — синхронное число оборотов электродвигателя, отвечающее частоте  $f_1$  подводимого тока к электродвигателю и числу его полюсов  $p$ , т. е.

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p}.$$

Величину моментов для различных значений  $S$  будем выражать в долях максимального момента.

Для построения механической характеристики  $M = f(S)$  будем исходить из следующих четырех сопротивлений контура обмотки ротора: <sup>1</sup>

а) При полностью выведенном сопротивлении реостата  $R_2^I = 0$ . Соответственно скольжение, отвечающее максимальному вращающему моменту электродвигателя, принимаем  $S = 0,1$ .

б) При сопротивлении реостата

$$R_2 = R_2^{II} > R_2^I = 0.$$

Соответственно значение скольжения при максимальном вращающем моменте электродвигателя примем  $S = 0,2$ .

в) При сопротивлении реостата

$$R_2 = R_2^{III} > R_2^{II}.$$

<sup>1</sup> Под сопротивлением контура обмотки ротора понимается сопротивление самого ротора  $r_2$  плюс сопротивление приключенного к ротору реостата  $R_2$ .

Соответственно значение скольжения при максимальном вращающем моменте электродвигателя примем  $S=0,5$ .

г) При сопротивлении ристата

$$R_2 = R_2^{IV} > R_2^{III}.$$

Соответственно значение скольжения при максимальном вращающем моменте электродвигателя примем  $S=1,0$ .

Для полноты построения кривых изменения вращающего момента асинхронного электродвигателя в зависимости от скольжения в пределах теоретической возможности изменения скольжения, т. е. в пределах  $S$  от 0 до 2, возьмем еще, помимо указанных значений скольжения, дополнительные точки, соответственно:  $S=0,05$ ,  $S=1,5$  и  $S=2,0$ .

Для всех названных значений скольжения подсчитаны вращающие моменты электродвигателя в долях максимального вращающего момента  $M_{\max}$ .

Полученные значения моментов для различных сопротивлений цепи контура обмотки ротора, а именно:

$$R_2^{IV} + r_2 > R_2^{III} + r_2 > R_2^{II} + r_2 > R_2^I + r_2 > 0$$

в зависимости от вышеуказанных значений  $S$  сведены в табл. 13.

Таблица 13

Вычисленные значения вращающего момента асинхронного электродвигателя в зависимости от скольжения, при различных ваттных сопротивлениях цепи ротора

| Различные ваттные сопротивления контура ротора | Значение вращающего момента в долях $M_{\max}$ в зависимости от значения $S$ |          |         |         |         |         |         |         |
|------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                                                | $S=0$                                                                        | $S=0,05$ | $S=0,1$ | $S=0,2$ | $S=0,5$ | $S=1,0$ | $S=1,5$ | $S=2,0$ |
| $r_2 + R_2^I = r_2$                            | 0                                                                            | 0,8      | 1,0     | 0,8     | 0,385   | 0,198   | 0,133   | 0,1     |
| $r_2 + R_2^{II}$                               | 0                                                                            | 0,471    | 0,8     | 1,0     | 0,69    | 0,385   | 0,262   | 0,198   |
| $r_2 + R_2^{III}$                              | 0                                                                            | 0,198    | 0,385   | 0,69    | 1,0     | 0,8     | 0,6     | 0,473   |
| $r_2 + R_2^{IV}$                               | 0                                                                            | 0,1      | 0,198   | 0,384   | 0,8     | 1,0     | 0,922   | 0,8     |

По данным, приведенным в таблице, строим механические характеристики для различных ваттных сопротивлений цепи ротора (фиг. 21).

Кривая 1 для  $r_2 + R_2^I = 0,1x_2$

» 2 »  $r_2 + R_2^{II} = 0,2x_2$

» 3 »  $r_2 + R_2^{III} = 0,5x_2$

» 4 »  $r_2 + R_2^{IV} = 1,0x_2$

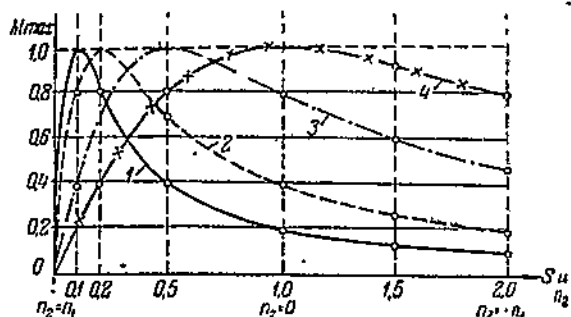
Из построенного графика семейства кривых заключаем, что с увеличением ваттного сопротивления в цепи ротора происходит смещение вершин кривых в сторону уменьшения числа оборотов электро-

двигателя, с нарастанием величины вращающего момента на спадающей (неустойчивой) части кривой для одних и тех же значений скольжения, а следовательно, и оборотов электродвигателя.

**Вывод 2.** При постоянстве частоты подводимого тока  $f_1 = \text{const.}$  значение максимального вращающего момента электродвигателя воз-

растает в квадратной зависимости от электродвижущей силы статора или практически от величины подводимого к электродвигателю напряжения, так как полученное выражение для максимального момента имеет вид:

$$M_{\text{max эл.-дв.}} = \frac{mpK_2 w_2^2}{8\pi^2 K_1 w_1^2 L_2} \cdot \frac{E_1^2}{f_1^2}.$$



Фиг. 21.

Положение вершины кривой механической характеристики по отношению к  $S$  будет неизменно. Графическое изображение механической характеристики электродвигателя для различных  $E_1$  примет следующий вид (фиг. 22).

Графическая зависимость вращающего момента от скольжения для различных значений подводимого к электродвигателю напряжения при

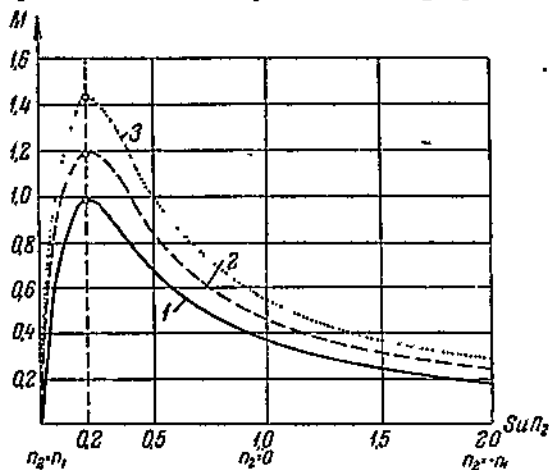
$$\frac{r_2}{x_2} = \text{const.} = 0,2.$$

Кривая 1— для нормального напряжения  $V_n$ , кривая 2— для напряжения  $1,1 V_n$ , кривая 3— для напряжения  $1,2 V_n$ .

Изменение подводимого к электродвигателю напряжения осуществляется путем изменения возбуждения питающего генератора при неизменном числе его оборотов.

Для увеличения вращающего момента гребного электродвигателя при реверсировании против номинального его значения дают перевозбуждение генератору, что приводит к увеличению напряжения, подводимого к электродвигателю.

**Вывод 3.** При изменении частоты  $f_1$  питающего тока величина максимального значения вращающего момента электродвигателя практически не меняется, так как изменение частоты, получаемое путем



Фиг. 22.

Изменение числа оборотов генератора, сопровождается и соответствующей переменной напряжением генератора, а следовательно, и электродвижущей силой  $E_1$  в обмотке статора электродвигателя.

Изменение частоты  $f_1$  вызывает смещение положения механической характеристики, и в частности ее максимума, по отношению к числу оборотов электродвигателя, так как значение числа оборотов электродвигателя  $n_2$  находится в линейной зависимости от частоты  $f_1$ :

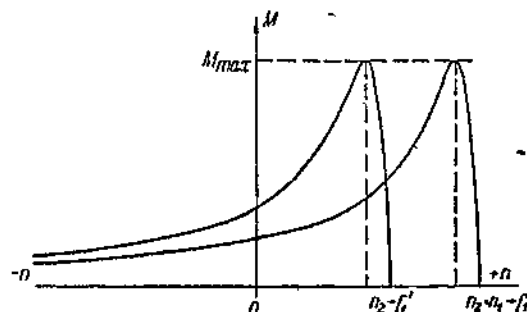
$$n_2 = \frac{60(1-S)}{p} f_1.$$

При постоянном значении  $r_2$  и  $x_2$  их отношение,

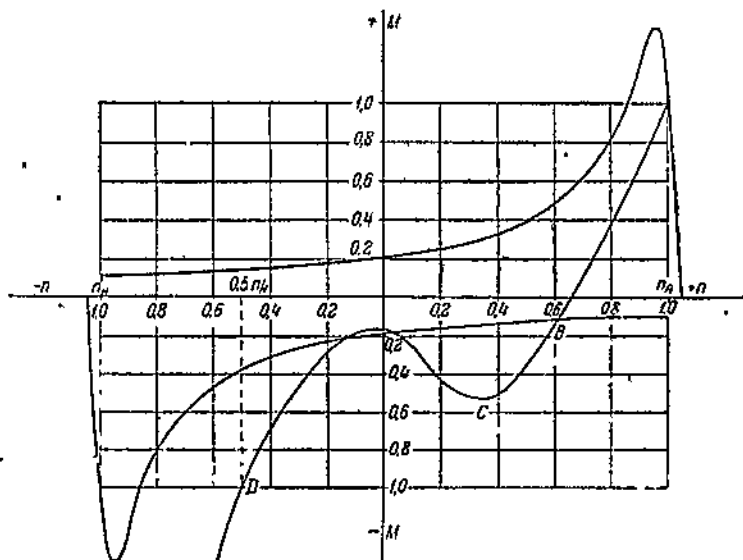
т. е. скольжение  $S = \frac{r_2}{x_2}$ ,

при максимальном вращающем моменте, также

будет величиной постоянной. Следовательно, с изменением  $f_1$  вращающий момент электродвигателя будет иметь максимальное значение



Фиг. 23.



Фиг. 24. График сопоставления кривой тормозного момента гребного винта с механической характеристикой асинхронного электродвигателя в условиях реверса.

ние при оборотах электродвигателя, прямо пропорциональных частоте подводимого тока.

Начальное положение механической характеристики, соответствующее  $M = 0$  при синхронном числе оборотов ротора, т. е. при  $n_2 = n_1$ , будет смещаться при изменении  $f_1$  так же, как и вершина максимума

механической характеристики, так как  $M_1$  находится в линейной зависимости от  $f_1$ .

Изменение механической характеристики асинхронного электродвигателя при изменении частоты подводимого тока изобразится графиком (фиг. 23).

Выяснив особенности механических характеристик асинхронных электродвигателей в зависимости от изменения их параметров  $r_2$ ,  $E_1$  и  $f_1$ , перейдем к разбору работы гребных электродвигателей переменного тока в условиях производства реверсирования. Для этого сопоставим кривую тормозного момента гребного винта с механическими характеристиками асинхронного электродвигателя, так как в условиях реверса, как отмечалось уже выше, и синхронный гребной электродвигатель работает, как асинхронный.

Кривая сопоставления тормозного момента гребного винта с кривыми механических характеристик гребного электродвигателя в условиях реверса даны на фиг. 24.

Степень перегрузочной способности гребных электродвигателей переменного тока, т. е. отношение максимального момента к нормальному вращающему моменту электродвигателя, обычно берется для

асинхронных электродвигателей  $\frac{M_{\max}}{M_{\text{норм.}}} = 2,25 \div 3$ , для синхронных

электродвигателей  $\frac{M_{\max}}{M_{\text{норм.}}} = 1,25 \div 1,4$ .

Из сопоставления на приведенном графике кривой тормозного момента гребного винта с кривой вращающего момента гребного электродвигателя после его реверса видим, что в точке В вращающий момент последнего достигает порядка 8—10% от максимального значения вращающего момента электродвигателя или, принимая во внимание вышеприведенные отношения между максимальными и нормальными моментами, отношение вращающего момента электродвигателя в точке В к его нормальному моменту в среднем соответственно выразится: для асинхронных электродвигателей  $\sim 25\%$  от  $M_{\text{норм.}}$ , для синхронных электродвигателей  $\sim 12\%$  от  $M_{\text{норм.}}$ .

При разборе общих положений реверсирования гребных электродвигателей в § 6 мы видели, что отрицательный тормозной (или, другими словами, вращательный) момент гребного винта для судна при скорости в 20 узлов может достигать свыше 50% нормального вращающего момента гребного электродвигателя, равного полному тормозному моменту гребного вала. Следовательно, вращающий момент гребного электродвигателя переменного тока после реверсирования становится явно недостаточным для преодоления противоположно направленного вращающего момента гребного винта, не достигая и одной четверти максимального значения последнего в случае применения синхронных электродвигателей. Вследствие этого процесс реверсирования гребного винта будет протекать весьма длительно, что идет в ущерб маневренным свойствам судна и является неприемлемым для нормальных условий его эксплуатации.

Кроме того, благодаря неактивному действию вращающего момента переключенного на реверс электродвигателя, последний выну-

будет длительное время работать при скольжении  $S$ , большем единицы.

Работа электродвигателя в этих условиях будет протекать при больших значениях тока, так как сила тока, индуцируемая в фазе ротора при вращении последнего, выражается формулой:

$$I_2 = \frac{E_{2s}}{Z_{2s}} = \frac{SE_2}{\sqrt{r_2^2 + (sx_2)^2}} = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{r_2}{S}\right)^2 + x_2^2}},$$

где:  $I_2$  — сила фазного тока в обмотке ротора,

$E_2$  — э. д. с., индуцированная в фазе неподвижного ротора.

Значение остальных величин было указано выше. Для постоянных значений  $E_2$ ,  $r_2$  и  $x_2$ , что имеет место при неизменной частоте питающего тока, сила тока в роторе будет тем больше нормальной силы тока, чем больше значение  $S$  по сравнению со скольжением при нормальной работе электродвигателя, когда скольжение  $S$  близко к нулю. Большие значения тока в электродвигателе при замедленном реверсировании вызовут недопустимый перегрев электродвигателя. Для избежания ненормально длительных условий реверсирования гребных установок, оборудованных электродвигателями переменного тока, приходится дополнительно прибегать к использованию способов, дающих возможность повышать при реверсировании вращающий момент гребного электродвигателя, особенно в пределах его скольжения, от  $S = 1,6$  до  $S = 0,6$  (по отношению к механической характеристике реверсированного электродвигателя), чему соответствует изменение числа оборотов электродвигателя, примерно от  $+n_2 = +0,60 n_n$  до  $-n_2 = -0,5 n_n$  (см. график сопоставления моментов на фиг. 24, соответственно точки  $B$ ,  $C$ ,  $D$ ).

Для ускорения процесса реверсирования гребного винта необходимо иметь повышенный вращающий момент у переключенного на реверс электродвигателя по сравнению с вращающим моментом, относящимся к нормальной его механической характеристике на участке от  $+0,6 n_n$  до  $-0,5 n_n$ . Ускоренное (активное) реверсирование гребного винта будет протекать в том случае, если кривая механической характеристики гребного электродвигателя будет иметь большие вращающие моменты по сравнению с моментами тормозной кривой гребного винта в точках  $B$ ,  $C$  и  $D$ .

Для достижения этого имеются три выше разобранных способа повышения вращающего момента гребного электродвигателя на участке  $BCD$ , а именно:

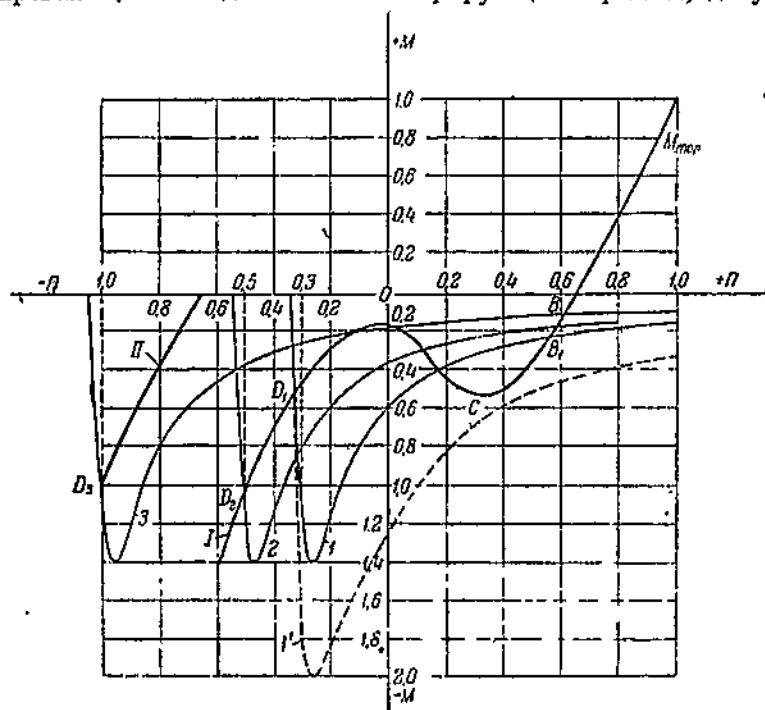
- а) первый способ — увеличение ваттного сопротивления в цепи ротора (фиг. 21),
- б) второй способ — повышение подводимого напряжения путем перевозбуждения питающего альтернатора (фиг. 22),
- в) третий способ — снижение частоты тока, подводимого к электродвигателю путем снижения числа оборотов у питающего альтернатора (фиг. 23).

Из трех перечисленных способов, дающих повышенный момент гребного электродвигателя при реверсировании, наиболее приемле-

мым, простым и достаточно эффективным будет являться комбинированный способ изменения положения кривой механической характеристики и увеличения вращающего момента гребного электродвигателя.

Это сочетание — изменения положения вращающего момента гребного электродвигателя с одновременным увеличением его — достигается путем снижения частоты питающего электродвигатель тока увеличением напряжения последнего за счет перевозбуждения альтернатора.

При применении этого способа, дающего возможность получить эффективный вращающий момент гребного электродвигателя при реверсировании, необходимо иметь генерирующие агрегаты, допускаю-



Фиг. 25. Кривые процесса реверсирования электрогребных установок на переменном токе.

щие широкую регулировку числа оборотов в сторону их снижения от нормальной скорости.

На современных электроходах переменного тока снижение числа оборотов у генерирующих агрегатов достигает при паротурбинных установках до 20% от нормального числа оборотов, на дизель-электроходах до 35—40% от нормального числа оборотов.

Ниже приводится график процесса реверсирования, обеспечивающий быстроту производства реверса гребной установки благодаря активному, т. е. преобладающему, действию вращающего момента электродвигателя над тормозным моментом гребного винта. Актив-

Ность действия вращающего момента гребного электродвигателя получается использованием вышеназванного комбинированного способа повышения вращающего момента электродвигателя (фиг. 25).

На приведенном графике жирной кривой представлена теоретическая кривая тормозного момента гребного винта при реверсировании и при неизменной поступательной скорости судна вперед (кривая  $I$ ). Тормозной момент, представленный отрезком жирной кривой  $II$ , соответствует работе гребного винта при движении судна с прежней поступательной скоростью, но в обратном направлении. Кривая  $3$  является механической характеристикой электродвигателя после переключения его на реверсивную работу, при нормальной частоте питающего тока. Но кривая  $3$  не является активной реверсирующей кривой, так как значения тормозного момента винта в точках  $C$ ,  $D_1$  и  $D_2$  значительно превосходят вращающие моменты электродвигателя, представленные кривой  $3$ .

Для создания более благоприятных условий реверсирования снижаем частоту подводимого тока, допустим, до 30% нормальной частоты. В этом случае механическая характеристика гребного электродвигателя (кривая  $I$ ) хотя и создает более благоприятные условия для реверсирования гребного винта (например, точка  $B$  переходит в точку  $B_1$  и сама кривая  $I$ , по сравнению с кривой  $3$ , занимает более выгодное положение по отношению к кривой тормозного момента гребного винта), но все же эта кривая не является активной реверсирующей кривой в точке  $C$ . Для повышения вращающего момента электродвигателя в условиях работы его при пониженной частоте прибегают к перевозбуждению альтернатора, что и вызывает увеличение электродвижущей силы  $E_1$  в статоре электродвигателя, а следовательно, и увеличение вращающего момента. Механическая характеристика электродвигателя при повышенном напряжении представлена на графике пунктирной кривой  $I'$ .

В этих условиях гребной электродвигатель имеет активную характеристику по отношению к кривой тормозного момента гребного винта, так как на всех участках, включая и точку  $C$  тормозной кривой, вращающий момент электродвигателя превосходит момент сопротивления винта. Эта активность вращающего момента обеспечивает быстроту производства реверса гребной установки.

После остановки гребного винта можно отказаться от повышенного напряжения, подводимого к электродвигателю, или, иначе говоря, от перевозбуждения альтернатора, так как дальнейший процесс увеличения скорости реверсированного электродвигателя может активно протекать при механической характеристике электродвигателя, изображенной кривой  $I$ . Эта механическая характеристика соответствует работе электродвигателя в условиях нормального возбуждения альтернатора, но при пониженных его оборотах. Число оборотов гребного электродвигателя, переключенного на реверс, под действием механических характеристик  $I'$  и  $I$ , будет постепенно возрастать до предельного значения, отвечающего ординате, опущенной из точки  $D_1$  на ось абсцисс.

Для дальнейшего увеличения числа оборотов гребной установки необходимо будет повышать частоту тока, питающего гребной электро-

двигатель, что достигается за счет увеличения числа оборотов первичного двигателя генерирующей установки.

Нарастание числа оборотов гребного винта после реверса, как видно из кривой 1, требует увеличенного вращающего момента гребного электродвигателя. При увеличении частоты переменного тока, подводимого к электродвигателю, механическая характеристика последнего из положения, изображенного кривой 1, переходит в положение, изображенное кривой 2, а последняя пересекает кривую тормозного момента винта в точке  $D_2$ .

Точка  $D_2$  имеет больший вращающий момент электродвигателя; этой точке соответствует и повышенное число оборотов гребного винта по сравнению с точкой  $D_1$ .

Для обеспечения устойчивой работы электрогребной установки при реверсировании необходимо, чтобы точки  $D$  лежали на устойчивой части кривых механической характеристики электродвигателя.

Дальнейшее увеличение числа оборотов гребного винта, осуществляемое путем увеличения оборотов первичного двигателя, необходимо производить таким образом, чтобы было обеспечено пересечение кривой тормозного момента с механической характеристикой электродвигателя, но в пределах устойчивой части последней.

По мере замедления поступательной скорости судна, его остановки и увеличения скорости в обратном направлении нижняя часть кривой тормозного момента постепенно будет изменяться, перемещаясь влево. Крайнее положение кривой тормозного момента гребного винта, изображено отрезком жирной кривой II, которая для простоты принята аналогичной верхней части кривой тормозного момента I, отвечающей поступательному движению судна вперед.

Установившийся тормозной режим работы электрогребной установки при полном заднем ходе судна изображен точкой  $D_3$ , являющейся пересечением кривой II тормозного момента с кривой 3 механической характеристики электродвигателя.

Производство реверса при комбинированном способе создания активного вращающего момента у гребных электродвигателей посредством снижения частоты питающего тока и перевозбуждения генератора вызывает значительное увеличение силы тока в обмотках машин, вследствие чего при медленных операциях по реверсированию имеется опасность недопустимого перегрева машин.

Поэтому, чтобы избежать недопустимых перегревов машин вследствие замедленности операций, возможных при реверсировании, в схеме электрической защиты установки предусматривают реле (с выдержкой времени), которое по истечении известного промежутка времени, допустимого для безопасного нагрева перевозбужденных машин, выключает возбуждение генераторов.<sup>1</sup>

Так как на коммерческих судах реверсирование с полного переднего хода практически почти не требуется, то в действительности условия реверсирования электрогребной установки облегчаются как

<sup>1</sup> Например, у турбо-электроходов голландской постройки при перевозбуждении сила тока достигает примерно 4-кратного значения нормальной величины, как это можно видеть на вышеприведенном расчетном графике реверсирования этих электроходов (фиг. 9).

в отношении быстроты протекания реверса, так и в отношении нагрева машин при реверсе.

Помимо рассмотренного комбинированного способа создания условий активного вращающего момента гребного электродвигателя при реверсировании имеется еще возможность получения активного вращающего момента также и путем введения дополнительного ваттного сопротивления в цепь ротора. В этом легко и наглядно можно убедиться, если кривую тормозного момента гребного винта сопоставить с семейством механических характеристик, приведенных на графике фиг. 21, который построен для одного и того же электродвигателя, только при различных значениях ваттного сопротивления цепи его ротора.

Для начального увеличения сопротивления цепи ротора и обеспечения последующей возможности постепенного уменьшения сопротивления этой цепи необходимо располагать дополнительным приспособлением к электродвигателю в форме реостата асинхронных электродвигателей, включаемого в цепь ротора. В этом случае работа гребного электродвигателя при реверсе будет протекать, как работа фазного электродвигателя с пусковым реостатом в цепи ротора. Так как мощность гребных электродвигателей довольно значительна и выражается сотнями и тысячами квт, а пусковой реостат в начале пуска должен поглощать почти всю энергию, подводимую к электродвигателю, и, кроме того, должен быть рассчитан на токопроводимость не ниже номинальной, то габариты пускового реостата получаются весьма значительные.

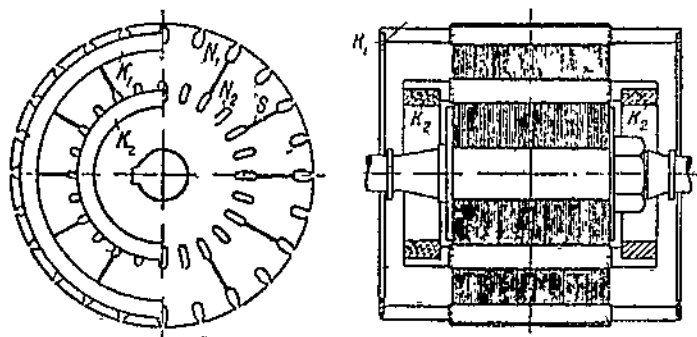
Подобные громоздкие пусковые приспособления вызывают дополнительную стоимость, связанную с их установкой, требуют значительных помещений для размещения реостатов, обладают значительным весом и, кроме того, вызывают непроизводительную затрату электроэнергии при пуске и маневрировании гребной установки. Помимо первоначальной стоимости и дополнительных расходов по эксплуатации в судовых условиях большое значение имеют габариты и вес установки. Применение гребных электродвигателей с пуско-регулирующими приспособлениями в виде реостатов в цепи ротора является поэтому нерентабельным и на современных больших электроходах не находит применения.

Из специальных асинхронных электродвигателей гребных установок применяются короткозамкнутые двигатели системы Бушера как обладающие большим начальным пусковым и реверсирующим моментом при ограниченном пусковом токе.

Двигатели системы Бушера относятся к типу короткозамкнутых асинхронных электродвигателей с двумя concentрично расположенными клетками. Стержни обеих клеток закладываются в пазы ротора. Последние соединены между собой узкой щелью, идущей на всю длину ротора. Внутренняя клетка состоит из массивных стержней красной меди, обладающих малым сопротивлением, а клетка, расположенная ближе к наружной поверхности, состоит из тонких стержней с относительно большим ваттным сопротивлением. Для этого внешнюю клетку выполняют, например, из нейзильбера как материала с большим удельным электрическим сопротивлением.

Стержни на обоих концах у каждой клетки, как обычно у короткозамкнутых электродвигателей, соединяются между собою отдельными кольцами, изготовленными из того же материала, что и стержни клеток (см. устройство ротора электродвигателя Бушера, фиг. 26).

Особенность работы двигателей системы Бушера заключается в следующем: в начале трогания магнитный поток, пронизывающий ротор, изменяется со скоростью, близкой к скорости вращения потока статора, вследствие чего частота тока в роторе велика и близка к частоте тока в статоре. Во внутренней клетке, при малом омическом ее сопротивлении и большом индуктивном сопротивлении, возникают сильно смещенные по фазе токи, благодаря чему магнитодвижущая сила внутренней обмотки стремится ослабить магнитные силовые линии вращающегося потока внутри ротора, как бы оттесняя их к внешней поверх-



Фиг. 26. Устройство ротора электродвигателя Бушера.

$N_1, N_2$  — пазы для заложения стержней наружной клетки,  $N_3, N_4$  — пазы для заложения стержней внутренней клетки,  $K_1, K_2$  — кольца, замыкающие пакоротно стержни наружной клетки,  $K_3, K_4$  — кольца, замыкающие пакоротно стержни внутренней клетки,  $s$  — узкие прорезы (исли в железе ротора).

ности ротора. Поэтому магнитные силовые линии от вращающегося поля статора при пуске в ход двигателя не заходят глубоко внутрь ротора, а остаются на поверхности его и сцепляются с внешней обмоткой ротора, обладающей большим ваттным сопротивлением.

По мере увеличения числа оборотов ротора частота тока в обмотке ротора снижается, а вместе с этим убывает и индуктивное сопротивление внутренней обмотки, вследствие чего сила тока в этой обмотке возрастает с одновременным увеличением и магнитного потока, пронизывающего ротор в этой части. В результате этого сцепление вращающегося магнитного потока с внутренней обмоткой ротора возрастает, увеличивая соответственно и вращающий момент электродвигателя за счет внутренней обмотки ротора.

Одновременно с нарастанием магнитного потока, пронизывающего внутреннюю обмотку, происходит ослабление магнитного потока на периферии ротора, а следовательно и ослабление сцепления вращающегося магнитного потока с внешней клеткой и снижение вращающего момента ротора за счет внешней обмотки.

Таким образом внешняя обмотка служит как бы «пусковой» обмоткой для развращения ротора, вращающий момент которой па-

дает по мере приближения электродвигателей к нормальной скорости, с одновременным нарастанием вращающего момента со стороны внутренней «рабочей» обмотки ротора. Результирующий момент вращения не будет являться точной суммой моментов вращения обеих обмоток, а будет несколько отличен. Результирующий вращающий момент электродвигателя Бушера можно представить графиком (фиг. 27).

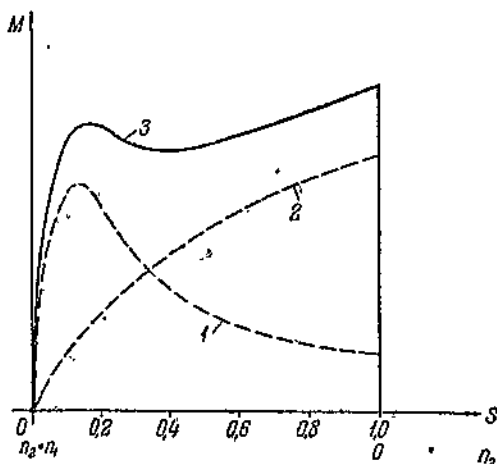
Из приведенного графика видно, что электродвигатель Бушера обладает большим вращающим моментом на всем протяжении механической характеристики, т. е. от начала пуска ( $S=1$ ) до нормального числа оборотов ( $S$ , близкое к 0). Кроме того, его механическая характеристика с большим вращающим моментом на всем протяжении изменения числа оборотов поддерживается автоматически, без всяких дополнительных приспособлений и операций, требующих внешнего воздействия, что облегчает условия эксплуатации электрогребных установок, оборудованных этими двигателями.

При применении электродвигателей системы Бушера, благодаря меньшим токам при трогании и развертывании, по сравнению с обычными асинхронными двигателями, отпадает опасность перегрева электрогребных установок в противоположность установкам, применяющим простые асинхронные электродвигатели или синхронные электродвигатели с демпферной обмоткой, используемой для асинхронного пуска. Подобная автоматичность электродвигателя Бушера, особенно ценная для производства реверса, ставит эти электродвигатели в весьма выгодные условия при маневрировании судна, когда требуется быстрота и надежность реверсирования гребного винта.

Обладая отмеченным преимуществом, электродвигатели Бушера имеют, однако, более низкий коэффициент мощности ( $\cos \varphi$ ) на 3—10% по сравнению с обычными асинхронными электродвигателями.

Габариты и вес электродвигателей Бушера больше по сравнению с обычными асинхронными электродвигателями, что для судовых условий имеет существенное значение, и, наконец, стоимость этих электродвигателей выше на 20—30% стоимости обычных электродвигателей.

Перечисленные отрицательные стороны электродвигателей Бушера лишают возможности широкого применения их, особенно на судах коммерческого флота,



Фиг. 27. Механическая характеристика асинхронного электродвигателя Бушера.

1 — характеристика рабочей обмотки, 2 — характеристика пусковой обмотки, 3 — результирующая характеристика вращающего момента электродвигателя.

На основании разобранных положений наиболее характерных возможных условий работы электрогребных установок переменного тока в отношении осуществления их реверса можно прийти к следующему заключению.

1. Способ комбинированного управления частотой питающего тока и его напряжения создает условия возможности получения активного вращающего момента гребного электродвигателя на всем протяжении процесса реверсирования гребного винта, что обеспечивает быстроту осуществления реверса, положительно разрешая, таким образом, второе основное требование, предъявляемое к электрогребным установкам переменного тока.

2. Осуществление комбинированного способа по созданию активного вращающего момента гребного электродвигателя при реверсе допустимо как для простых короткозамкнутых асинхронных электродвигателей, так и синхронных электродвигателей с демпферной обмоткой, позволяющей производить асинхронный запуск электродвигателя.

3. Реверсирование электрогребной установки при комбинированном методе изменения частоты и напряжения питающего тока не требует тяжелых и громоздких дополнительных приспособлений у электродвигателей, а ограничивается только:

а) устройством легких приспособлений, связанных с возможностью осуществления перевозбуждений альтернаторов для увеличения напряжения тока, подводимого к электродвигателю, и

б) применением у первичных двигателей устройств для широкой регулировки их оборотов. Это регулирующее устройство у первичных двигателей, как мы видели выше, необходимо также и для изменения числа оборотов гребной установки при разных скоростях движения судна.

Что касается условий реверсирования гребных установок с применением реостатов в цепи ротора электродвигателя, то установки подобного рода, как отмечалось выше, вследствие больших габаритов, веса и стоимости, так же как и установки с электродвигателями системы Бушера, на судах коммерческого флота почти не находят применения.<sup>1</sup>

Поэтому на современных электрогребных установках переменного тока реверсирование предпочитают осуществлять по способу комбинированного изменения частоты и напряжения тока, питающего электродвигатели.

В отношении типа гребных электродвигателей переменного тока можно заметить следующее:

а) Применение простых короткозамкнутых асинхронных электродвигателей выгодно как в отношении их первоначальной стоимости, так и в отношении простоты производства эксплуатационного обслуживания. Но эти двигатели обладают пониженным коэффициентом мощности по сравнению с синхронными электродвигателями. Значение коэффициента мощности ухудшается особенно при неполной загрузке

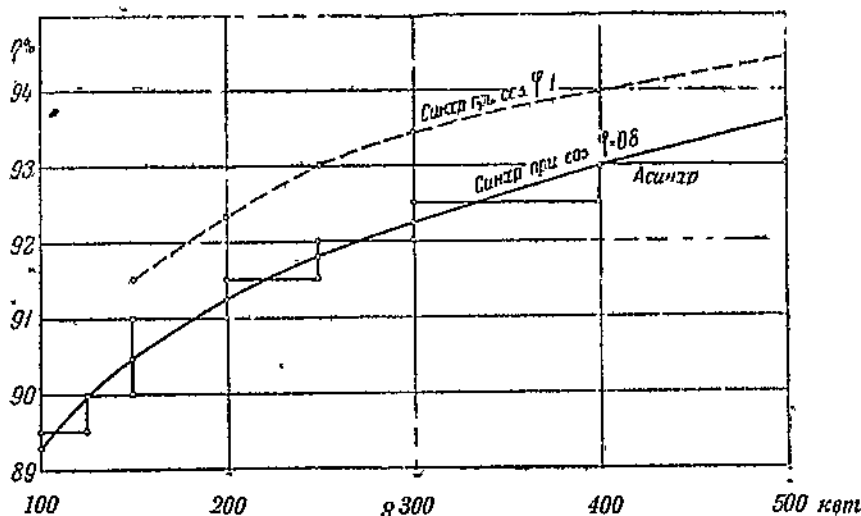
<sup>1</sup> За последнее время, как увидим ниже, в установках с синхронными гребными электродвигателями начинают применяться тормозные реостаты, вводимые в цепь обмотки статора электродвигателя, что обеспечивает почти мгновенную остановку электродвигателя и, таким образом, ускоряет процесс реверсирования.

электродвигателей, что может иметь место при пониженных скоростях движения судна. Ухудшение коэффициента мощности гребных электродвигателей отражается на альтернаторах в сторону увеличения их веса, габаритов и стоимости.

Синхронные же электродвигатели при всех условиях их эксплуатации могут работать при  $\cos \varphi = 1$  или близком к единице.

б) К. п. д. синхронных двигателей, работающих при полной нагрузке и коэффициенте мощности ( $\cos \varphi$ ), равном единице или близком к единице, примерно превышают на 1% к. п. д. асинхронных электродвигателей, аналогичных в отношении мощности и числа оборотов, или тех же синхронных электродвигателей, но работающих при  $\cos \varphi = 0,8$ .

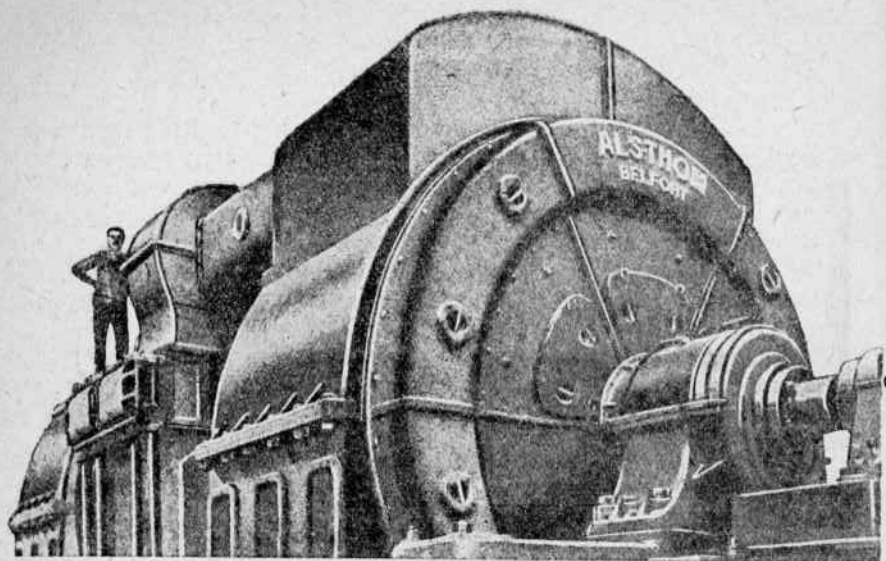
Подтверждение этому можно усмотреть на прилагаемом графике сравнения к. п. д. синхронных электродвигателей с к. п. д. асинхронных электродвигателей напряжением 3000 в на 600 об/мин. (фиг. 28).



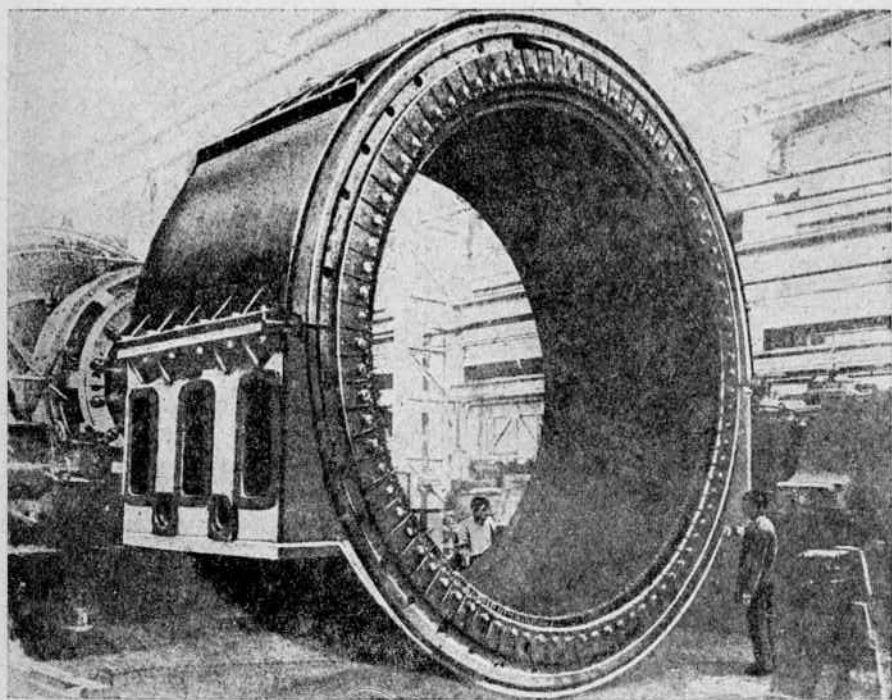
Фиг. 28. Сравнение к. п. д. синхронных двигателей с к. п. д. асинхронных двигателей 600 об/мин., 3000 в.

в) Ротор асинхронного электродвигателя, особенно с обмоткой в виде беличьей клетки, не состоит из отдельных составных частей, а является одним неразборным блоком, поэтому условия ремонта ротора, связанные с частичным его повреждением, требуют больших затрат и неудобств в связи с производством операций при тяжелом блоке.

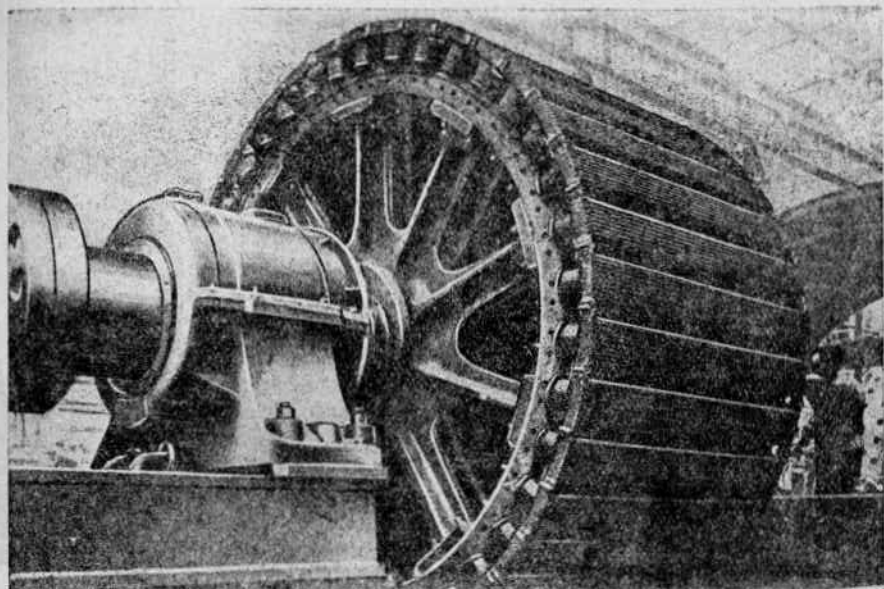
Вопрос о запасных частях, равно как и ремонт ротора для синхронных электродвигателей с явно выраженными полюсами, разрешается проще и дешевле, так как у этих электродвигателей можно ограничиться запасными частями и ремонтом отдельных полюсов вместо целого ротора у асинхронных электродвигателей. Вес последних может достигать нескольких десятков тонн, что потребует производи-



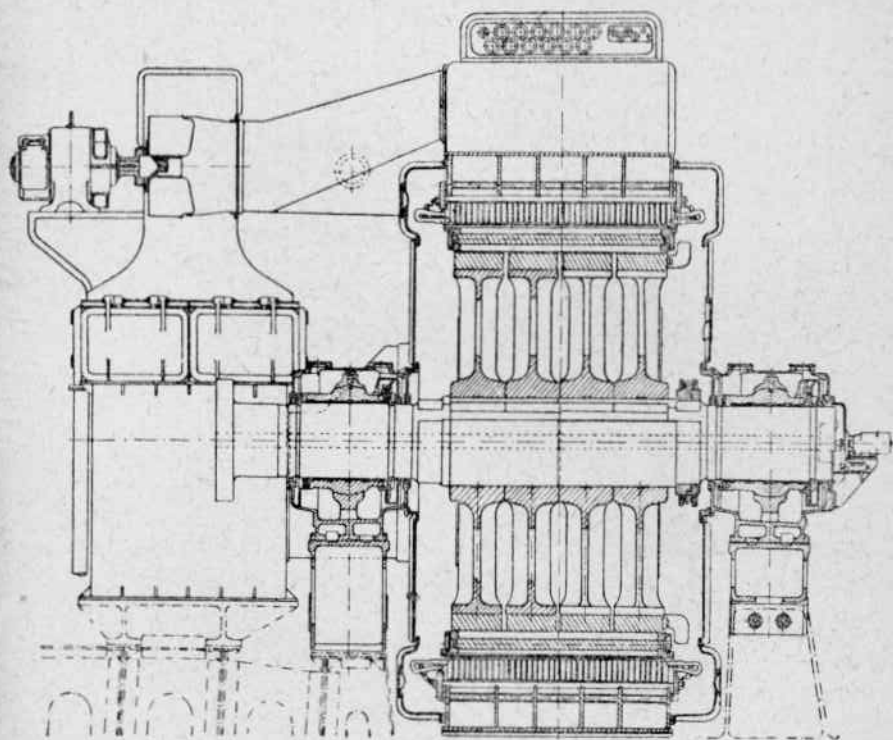
Фиг. 29. Два синхронных гребных электродвигателя турбо-электрохода „Normandie“ мощностью каждый по 40 000 л. с., трехфазного тока, 81 герц, 5500 в, 243 об/мин.; электродвигатели спарены для испытания.



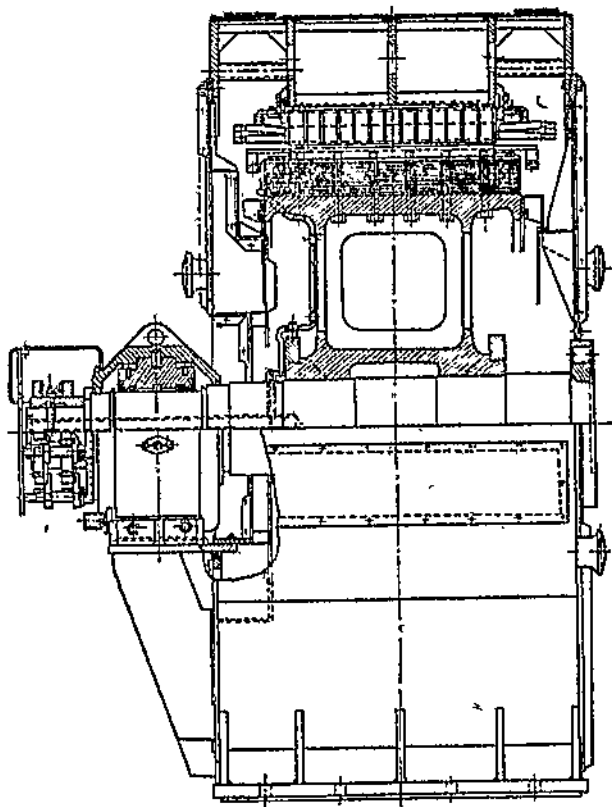
Фиг. 30. Статор синхронного гребного электродвигателя электрохода „Normandie“.



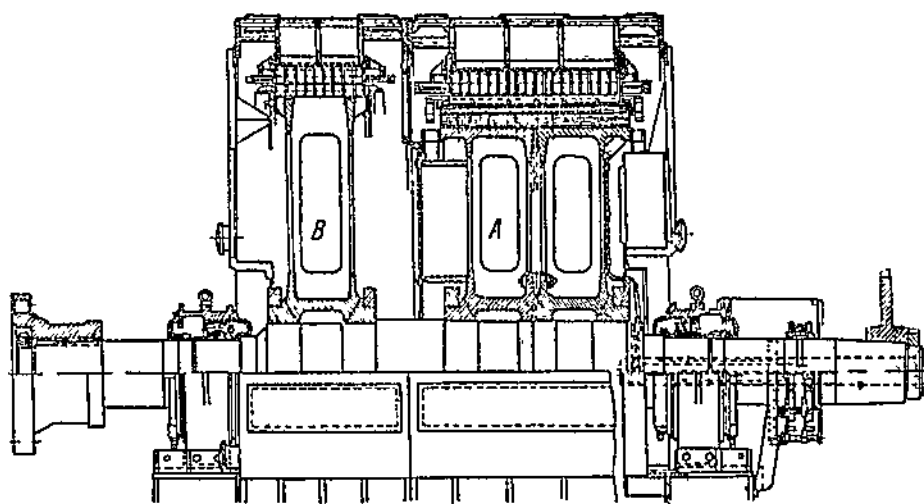
Фиг. 31. Ротор синхронного гребного электродвигателя электрохода „Normandie“.



Фиг. 32. Разрез синхронного гребного электродвигателя турбо-электрохода „Normandie“.



Фиг. 33. Разрез главного генератора дизель-электрохода „Wuppertal“.



Фиг. 34. Разрез гребного электродвигателя дизель-электрохода „Wuppertal“.

А — главный, синхронный, электродвигатель, В — вспомогательный, [асинхронный, электродвигатель,

тельной загрузки судна и дополнительного помещения для хранения запасного ротора.

г) Конструктивные особенности электродвигателей с большим междужелезным пространством у синхронных электродвигателей по сравнению с асинхронными электродвигателями также являются положительным преимуществом первых, так как большее междужелезное пространство менее опасно для проседания и задиранья ротора у синхронных электродвигателей.

В силу изложенного *современные электроходы и оборудуются преимущественно гребными синхронными электродвигателями*, что и можно было заметить при обзорном знакомстве с современными электроходами в § 2.

Общий вид синхронных гребных электродвигателей, которыми оборудован и первоклассный лайнер турбо-электроход «Нормандия», представлен на прилагаемых чертежах и фотографиях (фиг. 29—32).

Разрезы главных электрических машин гребной установки дизель-электрохода «Wuppertal» представлены на фиг. 33—34.

## § 9. Теория синхронной передачи применительно к гребным электроприводам

Рассматриваемые в этой главе вопросы синхронной передачи в условиях электрогребных установок относятся исключительно к блоку, состоящему из синхронного гребного электродвигателя и питающего его синхронного альтернатора. Под подобные условия подходят наиболее распространенный вид турбо-электрогребных установок и в частности наши турбо-электроходы. В установках, оборудованных двумя турбо-альтернаторами, с двумя гребными электродвигателями, излагаемый метод синхронной передачи применим при условии раздельной работы гребных установок.

Для упрощения рассмотрения вопроса будем пренебрегать омическим сопротивлением обеих синхронных машин блока, т. е. альтернатора и гребного электродвигателя, и, кроме того, примем, что машины имеют роторы с неявно выраженными полюсами.

Обозначаем:  $E_g$  — э. д. с. холостого хода альтернатора,

$E_m$  — э. д. с. холостого хода синхронного электродвигателя,

$V$  — напряжение на клеммах, которое для обеих машин считаем одинаковым, причем обычно  $E_g > V > E_m$ ,

$X_g$  и  $X_m$  — индуктивные сопротивления обмоток статора генератора и электродвигателя,

$I$  — сила тока статора альтернатора, равная силе тока статора гребного электродвигателя,

$\alpha$  — угол сдвига между  $E_g$  и  $E_m$ ,

$\varphi$  — угол сдвига между  $V$  и  $I$ .

В силу принятых положений и обозначений условия работы каждой фазы машин можно изобразить следующим треугольником напряжений, представленным на фиг. 35,

Вектор тока  $I$  будет перпендикулярен к вектору индуктивного падения напряжения  $jI(X_g + X_m)$  и последний опережает вектор тока на  $90^\circ$ .

Площадь  $F$  треугольника напряжений можно выразить:

$$F = \frac{1}{2} E_g E_m \sin \alpha = \frac{1}{2} I (X_g + X_m) V \cos \varphi.$$

Но произведение  $IV \cos \varphi$  представляет мощность одной фазы. Электрическую мощность, передаваемую альтернатором гребному электродвигателю при  $m$  фазах системы, можно представить:

$$N = m I V \cos \varphi = \frac{m E_g E_m \sin \alpha}{X_g + X_m}.$$

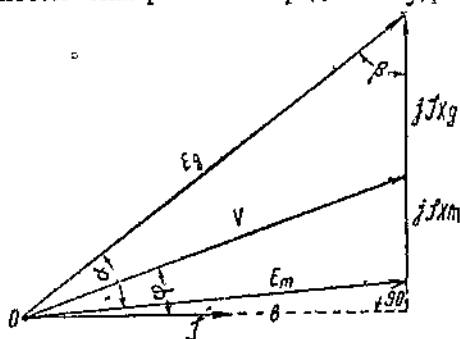
При неизменных значениях  $m$ ,  $E_g$ ,  $E_m$ ,  $X_g$  и  $X_m$  максимум мощности синхронной передачи будет при  $\alpha = 90^\circ$ , так как  $\sin \alpha = 1$ . Следовательно,

$$N_{\max} = \frac{m E_g E_m}{X_g + X_m}.$$

Отношение  $\frac{N_{\max}}{N} = \frac{1}{\sin \alpha}$  обозначим через  $u$  и назовем перегрузочной способностью синхронного привода.

Для определения выражения коэффициента мощности передачи ( $\cos \varphi$ ), а также напряжения на клеммах машин  $V$  и силы тока статоров  $I$  синхронной

передачи, в зависимости от заданных значений  $E_g$ ,  $E_m$ ,  $X_g$ ,  $X_m$  и  $\alpha^\circ$  воспользуемся известной тригонометрической зависимостью между параметрами треугольников, представленных на фиг. 35.



Фиг. 35.

$$I^2 (X_g + X_m)^2 = E_g^2 + E_m^2 - 2 E_g E_m \cos \alpha$$

$$I (X_g + X_m) = \sqrt{E_g^2 + E_m^2 - 2 E_g E_m \cos \alpha}$$

$$\cos \varphi = \frac{a}{V}; \quad b = E_g \sin \beta = \frac{E_g E_m \sin \alpha}{I (X_g + X_m)}$$

$$\sin \beta = \frac{E_m \sin \alpha}{I (X_g + X_m)}$$

$$V^2 = E_g^2 + I^2 X_g^2 - 2 E_g I X_g \cos \beta$$

$$E_m^2 = E_g^2 + I^2 (X_g + X_m)^2 - 2 E_g I (X_g + X_m) \cos \beta$$

$$\cos \beta = \frac{E_g^2 + I^2 (X_g + X_m)^2 - E_m^2}{2 E_g I (X_g + X_m)}$$

$$V^2 = E_g^2 + I^2 X_g^2 - \frac{2 E_g I X_g [E_g^2 + I^2 (X_g + X_m)^2 - E_m^2]}{2 E_g I (X_g + X_m)}$$

$$V = \sqrt{E_g^2 + I^2 X_g^2 - \frac{X_g [E_g^2 + I^2 (X_g + X_m)^2 - E_m^2]}{X_g + X_m}}$$

$$\cos \varphi = \frac{a}{V} = \frac{E_g E_m \sin \alpha}{I (X_g + X_m) \sqrt{E_g^2 + I^2 X_g^2 - \frac{X_g [E_g^2 + I^2 (X_g + X_m)^2 - E_m^2]}{X_g + X_m}}}$$

Деля числителя и знаменателя на  $E_g^2$ , заменяя  $I(X_g + X_m)$  через вышенайденное значение  $\sqrt{E_g^2 + E_m^2 - 2E_g E_m \cos \alpha}$  и обозначая отношение:

$$\frac{E_m}{E_g} = K,$$

а отношение

$$\frac{X_g}{X_g + X_m} = \xi$$

и, наконец, вводя замену

$1 - K \cos \alpha = \sqrt{(1 - K \cos \alpha)^2} = \sqrt{1 + K^2 - 2K \cos \alpha - K^2 \sin^2 \alpha}$ , после соответствующих преобразований получим выражение для  $\cos \varphi$  в следующем виде:

$$\cos \varphi =$$

$$\frac{K \sin \alpha}{\sqrt{1 + K^2 - 2K \cos \alpha - K^2 \sin^2 \alpha}}$$

Обозначая выражение  $1 + K^2 - 2K \cos \alpha$  через  $\sigma$ , окончательно получим:

$$\cos \varphi = \frac{K \sin \alpha}{\sqrt{\sigma} \sqrt{1 + \xi^2 \sigma - 2\xi \sqrt{\sigma - K^2 \sin^2 \alpha}}}.$$

Из ранее написанного выражения для  $V$ , вынося из-под радикала  $E_g$  и производя соответствующие подстановки и замены, получим выражение  $V$  в следующем виде:

$$V = E_g \sqrt{1 + \xi^2 (1 + K^2 - 2K \cos \alpha) - 2\xi \sqrt{1 + K^2 - 2K \cos \alpha - K^2 \sin^2 \alpha}} = E_g \sqrt{1 + \xi^2 \sigma - 2\xi \sqrt{\sigma - K^2 \sin^2 \alpha}}.$$

Точно так же и из ранее написанного выражения для  $I$  путем соответствующих преобразований окончательно получим выражение  $I$  в таком виде:

$$I = E_g \frac{\sqrt{1 + K^2 - 2K \cos \alpha}}{X_g + X_m} = E_g \frac{\sqrt{\sigma}}{X_g + X_m}.$$

В отношении коэффициента мощности ( $\cos \varphi$ ) передачи можем заметить, что наиболее выгодно работать при  $\cos \varphi = 1$ . Для поддержания постоянства  $\cos \varphi = 1$  на основании выше полученного его выражения для каждого значения угла сдвига  $\alpha$  необходимо брать соответствующее значение  $K$ , т. е. отношение при холостом ходе э. д. с.  $E_g$  и  $E_m$ , или же выгоднее сохранять постоянство  $K$ , если требуется при этом поддержание и постоянной перегрузочной способности синхронной передачи:

$$u = \frac{1}{\sin \alpha}.$$

При сохранении постоянства возбуждений синхронных машин напряжение на клеммах машин  $V$  и их ток  $I$  при изменении угла сдвига  $\alpha$  будут изменяться по уравнениям следующего вида:

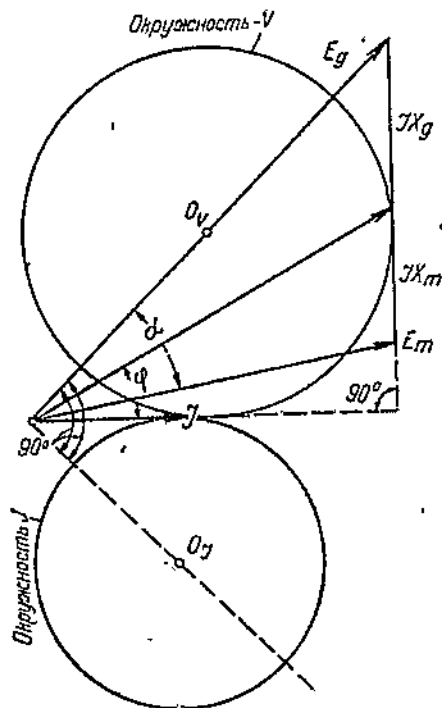
$$V = E_g \frac{K e^{-j\alpha} X_g + X_m}{X_m + X_g},$$

$$I = E_g \frac{1 - K e^{-j\alpha}}{j(X_m + X_g)}.$$

Изменение  $V$  и  $I$  в зависимости от угла сдвига  $\alpha$  между  $E_g$  и  $E_m$  графически можно представить круговыми диаграммами, приведенными на фиг. 36.

Построение круговых диаграмм напряжения  $V$  и тока  $I$  произведено следующим образом.

На векторе  $E_g$  или его продолжении берут точку  $O_v$  и из нее, как центра, проводят окружность через конечную точку вектора  $V$ , которая делит вектор  $I(X_g + X_m)$  в отношении  $X_g : X_m$ .



Исходной точкой вектора  $V$  является вершина угла  $\alpha$ , а вектор  $I(X_g + X_m)$  является прямой, соединяющей концы векторов  $E_g$  и  $E_m$ . Проведенная окружность и будет являться круговой диаграммой напряжения  $V$ .

Круговая диаграмма тока  $I$  представляет окружность с центром в точке  $O_I$ , находящимся на прямой, перпендикулярной к  $E_g$  в вершине угла  $\alpha$ . Окружность должна проходить через конец вектора тока  $I$ , проведенного из вершины угла  $\alpha$  и взятого в масштабе, пропорциональном силе тока  $I$ .

В частном случае, когда  $E_g$  и  $E_m$  одинаковой величины, круговые диаграммы напряжения и тока пересекаются прямоугольно, в вершине угла  $\alpha$ .

При постоянной перегрузочной способности

$$u = \frac{1}{\sin \alpha} = \text{const.}$$

Фиг. 36. Круговые диаграммы изменения  $V$  и  $I$ .

и постоянстве соотношения э. д. с. холостого хода

$$\frac{E_m}{E_g} = K = \text{const.}$$

с увеличением нагрузки машин  $N$  возрастают напряжение  $V$  и сила тока  $I$  пропорционально  $E_g$ , что легко проследить на основании приведенных выражений  $N$ ,  $V$  и  $I$ .

Момент, развиваемый синхронным электродвигателем, можно определить из следующего уравнения:

$$N = \frac{m E_g E_m \sin \alpha}{X_g + X_m} = 9,81 M_m \omega_m,$$

откуда

$$M_m = E_g^2 \frac{mK}{9,81 u \omega_m (X_g + X_m)} \text{ кгм.}$$

Согласно определению механической характеристики требуемый вращающий момент электродвигателя является какой-то функцией числа его оборотов, а следовательно, и частоты питающего тока, т. е.  $M = F(f)$ .

Постоянство перегрузочной способности:

$$u = E_g^2 \frac{mK}{9,81 \omega_m (X_g + X_m) F(f)}$$

и постоянство коэффициента мощности ( $\cos \varphi$ ) будут достигнуты, когда  $K$  остается постоянным и если выражение, зависящее от частоты  $f$ ,

т. е.  $\frac{E_g^2}{\omega_m (X_g + X_m) F(f)}$ , также постоянно.

Обращаясь к известным выражениям:

$$E_g = C_g j \Phi_g; \quad \omega_m = \frac{2\pi n_m}{60} = \frac{2\pi f}{p_m},$$

$$X_g + X_m = 2\pi f (L_g + L_m),$$

где:  $C_g$  — коэффициент пропорциональности,

$\Phi_g$  — магнитный поток генератора при холостом ходе,

$n_m$  — число оборотов синхронного электродвигателя,

$p_m$  — число пар полюсов синхронного электродвигателя,

$L_g$  и  $L_m$  — коэффициенты самоиндукции машин,

можем написать:

$$\frac{\Phi_g^2}{F(f)} = \text{const.}$$

Величина магнитного потока генератора  $\Phi_g$  должна быть пропорциональна квадратному корню вращающего момента электродвигателя, так как

$$M_m \equiv E_g^2 \equiv \Phi_g^2.$$

Ранее, в разделе «Основные требования, предъявляемые к гребным электродвигателям» (§ 5, гл. II), было установлено, что изменение вращающего момента гребного электродвигателя находится в квадратичной зависимости от изменения числа его оборотов, а следовательно, и частоты тока, питающего синхронный электродвигатель. Таким образом

$$M_m \equiv f^2.$$

Поэтому для сохранения постоянства перегрузочной способности передачи и для поддержания постоянства  $\cos \varphi$  магнитный поток генератора  $\Phi_g$  необходимо изменять в линейной зависимости от частоты  $f$ , т. е. поддерживать

$$\Phi_g' \equiv f.$$

Такая же зависимость изменения будет необходима и для магнитного потока гребного электродвигателя, а именно:

$$\Phi_m = f.$$

Напряжение на клеммах машин будет изменяться во второй степени от частоты:

$$V \equiv f^2.$$

Сила тока машин  $I$  будет изменяться в первой степени от частоты:

$$I \equiv f.$$

**Краткий вывод.** Перегрузочная способность электрогребной установки, состоящей из синхронного генератора и синхронного электродвигателя, при работе остается постоянной, если сохраняется постоянство угла сдвига  $\alpha$  между э. д. с. холостого хода машин. Коэффициент мощности установки ( $\cos \varphi$ ) также не меняется, если будет обеспечено постоянство соотношения величин э. д. с. холостого хода, т. е. постоянство  $K$ .

Вышеприведенные выражения уравнений для коэффициента мощности ( $\cos \varphi$ ), напряжения на клеммах  $V$  и силы тока машин  $I$  будут иметь свои значения в зависимости от заданных машинных постоянных, от угла сдвига  $\alpha$  и от соотношения э. д. с. холостого хода:

$$\frac{E_m}{E_g} = K.$$

При неизменном возбуждении машин напряжение на клеммах  $V$  и сила тока  $I$  машин определяются на основании круговых диаграмм (фиг. 36), если происходит изменение угла сдвига  $\alpha$  с передаваемой мощностью. Постоянная перегрузочная способность

$$u = \frac{1}{\sin \alpha}$$

и постоянный коэффициент мощности ( $\cos \varphi$ ) будут достигнуты, если поддерживать квадратичное изменение магнитного потока генератора, отвечающее холостому ходу, пропорциональным моменту вращения, т. е.

$$M_m \equiv \Phi_g^2.$$

Это дает при квадратичном увеличении момента вращения с частотой как линейное увеличение магнитного потока генератора при холостом ходе, так и силы тока машин и квадратичное увеличение напряжения на клеммах с увеличением частоты.

#### Глава IV

### ТЕХНИЧЕСКИЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ И ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОДВИЖЕНИЯ

#### § 10. Новые устройства дизель-электрических систем, используемые для гребных установок на переменном токе

Применение электрогребных установок на переменном токе нашло широкое внедрение, начиная с 1921 г., в результате удачных опытов, полученных на турбо-электроходах, оборудованных синхронными электродвигателями трехфазного тока с ясно выраженными полюсами.

Из всех электрических машин синхронные машины с ясно выраженными полюсами представляют один из наиболее крепких, надежных и легких типов машин, имеющих к тому же высокий к. п. д. На турбо-электроходах в настоящее время почти исключительно применяется этот тип синхронных электродвигателей.

Гребные синхронные электродвигатели и генераторы с ясно выраженными полюсами, благодаря их преимуществу, стремились использовать и на дизель-электроходах.

Использование дизель-генерирующих установок для электродвижения больших судов может дать преимущество перед теплоходами только в том случае, если каждый гребной электродвигатель будет обеспечен питанием от нескольких дизель-альтернаторов, а дизеля будут быстрогоходного типа.

Это обстоятельство требует параллельной работы генерирующих дизель-альтернаторов.

Возможность параллельной работы дизель-альтернаторов в условиях судовой гребной установки, требующей широкого изменения числа оборотов и производства быстрого реверса гребного электродвигателя, до последнего времени исключалась. Практически возможны были установки переменного тока только с одним дизель-агрегатом на отдельный гребной электродвигатель, чтобы удовлетворять производству быстрого реверса гребного винта. Но подробное решение вопроса использования дизелей для электрогребных установок переменного тока не могло дать эксплуатационных преимуществ и экономических выгод перед теплоходами, а поэтому не находило применения, особенно для больших электроходов.

Турбо-электроходы в противоположность дизель-электрогребным установкам не требуют параллельной работы альтернаторов, так как экономически более выгодно питать каждый гребной электродвигатель или даже несколько гребных электродвигателей от одного турбогенератора. Единичные мощности турбоальтернаторов, достигающие 50 000 квт и более в одном агрегате, не ставят препятствий этому.

Отсутствие до последнего времени технической возможности использовать параллельно работающие дизель-альтернаторы для удовлетворительного питания синхронных гребных электродвигателей является объяснением, почему при строительстве больших электроходов ограничивались использованием только турбинных установок.

Гребные электродвигатели переменного тока приключаются к питающим альтернаторам через переключатели, которые позволяют производить реверс электродвигателей.

Переключение гребных электродвигателей при реверсировании должно производиться без тока. Для этого на турбо-электроходах переключение электродвигателей на реверс производят при снятом возбуждении альтернаторов.

Если же гребной электродвигатель будет получать питание от двух или более альтернаторов, как это требуется на больших дизель-электроходах, то во время реверсирования электродвигателя альтернаторы, при выключенном возбуждении, выпадут из синхронизма, и дальнейшая немедленная параллельная их работа невозможна. Для того чтобы вновь питать от них переключенный на реверс гребной электродвигатель, потребовалось бы слишком много времени для введения в синхронную работу альтернаторов.

Трудность и продолжительность введения в синхронную работу альтернаторов будут возрастать с увеличением количества генераторов, питающих гребной электродвигатель.

Длительность операций по введению в синхронную работу альтернаторов гребной установки вызовет замедление производства реверсирования гребного винта, что ухудшит маневренность судна, и подобная электрогребная установка становится непригодной для судов.

Чтобы удовлетворить основным требованиям, предъявляемым к электрогребным установкам в отношении производства реверсирования, и были применены специальные устройства, которые позволили разрешать вопрос использования параллельно работающих дизель-альтернаторов для целей электродвижения судов.

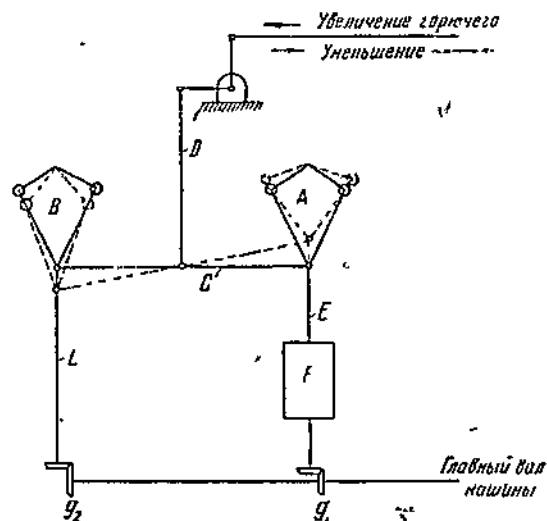
Таковыми устройствами являются:

а) применение у дизелей специальных регуляторов, позволяющих производить одновременное совместное управление скоростью не-

скольких дизель-агрегатов при параллельной их работе;

б) выполнение альтернаторов со специальным соединением обмоток, благодаря чему машины остаются в синхронизме все время, включая и момент переключения гребных электродвигателей на реверс при снятом с них напряжении.

Ввиду важности вопроса применения на электроходах переменного тока дизелей в качестве первичных двигателей генерирующих агрегатов, ознакомимся более подробно с глав-



Фиг. 37. Схема регулятора для управления скоростью дизеля.

ными принципами этих специальных устройств, которые и положены в основу современного электродвижения на первых крупных дизель-электроходах переменного тока.

Принятые на этих судах специальные регуляторы для агрегатов позволяют снижать число их оборотов до 30% от нормальной скорости.

Принцип действия специальных регуляторов управления скоростью нескольких дизелей изображен на прилагаемой схеме (фиг. 37).

Как видно из приведенной схемы, регулятор управления состоит из двух центробежных регуляторов.

Один центробежный регулятор А управляет изменением скорости дизеля.

Второй центробежный регулятор В поддерживает сохранение заданной скорости. В дальнейшем второй центробежный регулятор В будем называть регулятор-стабилизатор (pre-emergency governor).

Оба центробежных регулятора соединены между собой стержнем С с шарнирами.

Этот стержень  $C$  средним шарниром соединяется с вертикальной тягой  $D$ , которая вверх шарнирно соединяется с передачей, регулирующей подачу горючего в дизель.

Стержень  $C$  в крайних шарнирах соединен с обоими центробежными регуляторами.

Центробежный регулятор  $A$  приводится вертикальным валом  $E$ , который является и валом электродвигателя  $F$ , насаженным на вертикально расположенный ротор последнего.

Обмотка ротора этого электродвигателя, устройство которой аналогично с обмоткой ротора фазных электродвигателей, получает питание через кольца, насаженные на вал ротора, а провода от колец пропущены внутри вала  $E$ .

Ротор электродвигателя  $F$  расположен внутри вращающейся рамы (статора), которая не имеет никакой обмотки, но имеет внутренние пазы, играющие роль выступающих полюсов. Рама сделана из стальной поковки. Эта рама электродвигателя  $F$  имеет вертикальный вал, вместе с которым и получает вращение от конической зубчатой передачи  $g_1$ , соединенной с горизонтальным валом главной машины.

Питание электрическим током ротора электродвигателя  $F$  осуществляется помощью щеток, укрепленных на неподвижном кронштейне и скользящих по контактному кольцу, насаженному на вал  $E$ .

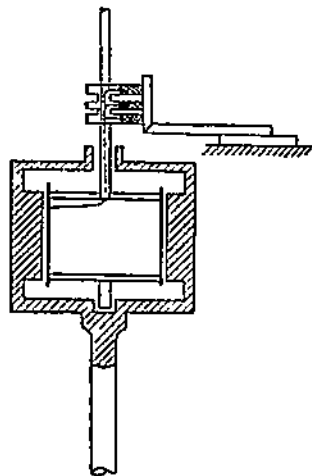
Таким образом центробежный регулятор  $A$  получает вращение от вала дизеля через коническую зубчатую передачу и последовательно с ней соединенный электродвигатель  $F$ .

Этот электродвигатель  $F$  можно назвать дополнительным электродвигателем (см. эскиз устройства дополнительного электродвигателя  $F$  центробежного регулятора  $A$  (фиг. 38)).

Второй центробежный регулятор-стабилизатор  $B$  с помощью вертикального вала  $L$  и зубчатой конической передачи  $g_2$  присоединен также к горизонтальному валу главной машины. Скорость вращения центробежного регулятора  $B$  превышает скорость вращения горизонтального вала главной машины, для чего передаточное число конического зацепления  $g_2$  берется большим единицы.

Центробежный регулятор  $A$  предназначен для вращения с постоянной установившейся скоростью, независимо от скорости вращения вала главной машины, т. е. дизеля.

Постоянная скорость вращения центробежного регулятора  $A$  выше скорости вращения вала главной машины. Эта скорость берется равной повышенной скорости регулятора  $B$  против нормальной скорости вращения вала главной машины. Избыточная скорость вращения центробежного регулятора  $A$  по сравнению со скоростью вращения



Фиг. 38. Детальное устройство дополнительного электродвигателя  $F$  для изменения скорости вращения центробежного регулятора  $A$ .

вала дизеля достигается за счет вращения ротора дополнительного электродвигателя  $F$  по отношению к его вращающейся раме.

Скорость вращения или, другими словами, число оборотов рамы дополнительного электродвигателя соответствует скорости вращения главного вала дизеля, т. е. передаточное число конического зацепления  $g_1$  равно единице.

Так, например, при 100% скорости вращения вала дизеля (допустим, 500 об/мин.) дополнительная скорость вращения центробежного регулятора  $A$  со стороны ротора дополнительного электродвигателя  $F$  составляет 50% от скорости вращения вала дизеля (т. е. 250 об/мин.). Следовательно, полная, или абсолютная, скорость вращения центробежного регулятора  $A$  в  $1\frac{1}{2}$  раза выше скорости вала дизеля (что составит 750 об/мин.). При 100% скорости вращения дизеля скорость вращения регулятора-стабилизатора  $B$  равна скорости вращения центробежного регулятора  $A$  (т. е. составляет тоже 750 об/мин.).

Скорость регулятора-стабилизатора  $B$  принимается также в  $1\frac{1}{2}$  раза больше по отношению к скорости вала дизеля, что достигается за счет конической передачи  $g_2$ , соединяющей вал регулятора  $B$  с валом дизеля и имеющей передаточное число вообще больше единицы, а в нашем примере равное полуторному отношению.

Если требуется понизить число оборотов дизеля, допустим, до 30% против нормального, то для этого заставляем ротор дополнительного электродвигателя  $F$  вращаться со скоростью 600 об/мин., тогда мгновенная абсолютная скорость вращения центробежного регулятора  $A$  составит 1100 об/мин.

Вследствие увеличения скорости вращения центробежного регулятора  $A$  его шары увеличат расхождение, и шарнирное соединение центробежного регулятора  $A$  со стержнем  $C$  будет подниматься вверх. Это движение вверх правого крайнего шарнира стержня  $C$  по отношению к мгновенно остающемуся неподвижным крайнему левому его шарниру вызывает смещение вверх и среднего шарнирного соединения стержня  $C$ , благодаря чему происходит смещение вверх вертикальной тяги  $D$ , которая воздействует на регулятор подачи горючего в сторону уменьшения.

Благодаря уменьшению подачи горючего мощность дизеля снизится. Падение мощности дизеля сопровождается уменьшением его оборотов. Снижение оборотов дизеля до 30% (т. е. до 150 об/мин.) вызовет и соответствующее уменьшение скорости вращения центробежных регуляторов, а именно, число оборотов регулятора  $A$  упадет до 750, т. е. достигнет своего нормального постоянного значения, а число оборотов регулятора-стабилизатора  $B$  снизится пропорционально числу оборотов дизеля (т. е. будет составлять  $150 \times 1,5 = 225$  об/мин.).

Регулятор управления при сниженной скорости дизеля до 30% займет положение, изображенное пунктирными линиями.

Пунктирная линия указывает, что средний шарнир стержня  $C$  при уменьшенной установившейся скорости дизеля остается, примерно, в том же положении, как и при нормальной скорости дизеля.

Это отвечает принципам регулировки подачи горючего применительно к специальной конструкции судовых дизелей, позволяющей

иметь возможно большую мощность при различных числах оборотов за счет сохранения почти постоянства расхода топлива, т. е. в пределах, близких к нормальному расходу.

Для увеличения числа оборотов дизеля достаточно уменьшить число оборотов дополнительного электродвигателя  $F$  регулятора управления. Так, например, если число оборотов дополнительного электродвигателя  $F$  с 600 об/мин. снизим до 400, то благодаря этому число оборотов главного двигателя с 150 об/мин. возрастет до 350 об/мин., при этом центробежный регулятор  $A$  будет опять вращаться с постоянным числом оборотов 750 об/мин. при установившейся скорости дизеля.

Изменение числа оборотов дополнительного электродвигателя регулятора управления производится помощью изменения частоты тока, подводимого к электродвигателю и получаемого от специального небольшого генератора переменного тока; последний приводится маленьким электродвигателем постоянного тока.

Приводной электродвигатель постоянного тока имеет широкую и плавную регулировку числа оборотов.

От этого небольшого мотор-генератора питаются все дополнительные электродвигатели регуляторов управления нескольких дизелей, соединенных в параллель, вследствие чего изменение числа оборотов электродвигателей регуляторов производится одновременно.

Благодаря синхронизму работы всех дополнительных электродвигателей  $F$ , питаемых от общего мотор-генератора, достигается почти одинаковый режим работы и регулировки числа оборотов всех дизелей, приводящих альтернаторы, соединенные в параллель для питания одного гребного электродвигателя.

Воздействие на изменение числа оборотов электродвигателя постоянного тока производит почти одновременное и одинаковое изменение частоты тока у дизель-альтернаторов, которые питают гребные электродвигатели.

Возможность осуществления переключений гребного электродвигателя на реверс при отсутствии тока, получаемого от нескольких параллельно работающих альтернаторов, без расстройств синхронной работы последних, достигается посредством следующих соединений обмоток альтернаторов.

Каждая фаза обмотки статора состоит из двух половин, соединенных последовательно, причем одни концы обмоток фаз соединены с выведенной нулевой точкой  $N$ ; противоположные концы у каждой фазы обмотки выведены в виде клемм  $A$ ,  $B$  и  $C$ , а от середины фазных обмоток выведены концы к зажимам  $A_1$ ,  $B_1$  и  $C_1$ .

Зажимы  $A$ ,  $B$  и  $C$  предназначены для соединения с общими сборными шинами, на которые подается электроэнергия, вырабатываемая альтернаторами.

Зажимы  $A_1$ ,  $B_1$  и  $C_1$  присоединяются к другим общим шинам, которые являются шинами синхронизации.

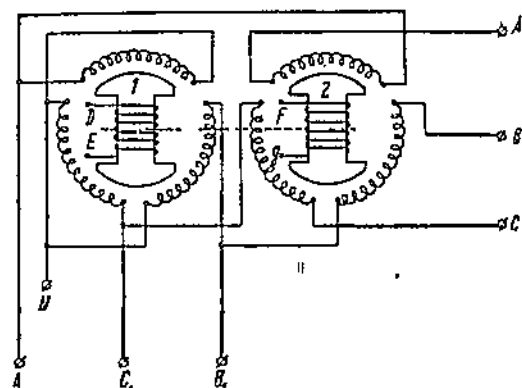
Ротор синхронного генератора, приводимого дизелем, выполняется с ясно выраженными полюсами, причем ротор состоит из двух половин, сидящих неподвижно на общем валу. Каждая половина ротора имеет самостоятельную обмотку. Эти обмотки обеспечивают точное электрическое соответствие в фазных обмотках статора таким образом, что

при одинаковом возбуждении обеих половин ротора по величине и по полярности фазное напряжение у зажимов  $A$ ,  $B$  и  $C$  равно двойному фазному напряжению по отношению к зажимам  $A_1$ ,  $B_1$  и  $C_1$ .

Если обе половины ротора будут возбуждены одинаково, но с противоположными полярностями, то очевидно, что фазное напряжение на зажимах  $A$ ,  $B$  и  $C$  будет равно нулю, а фазное напряжение на зажимах  $A_1$ ,  $B_1$  и  $C_1$  останется без изменения, т. е. будет равно половине нормального напряжения генератора.

На прилагаемом чертеже (фиг. 39) дана принципиальная схема соединений фазных обмоток статора и обмоток ротора альтернатора, применяемого для дизель-электроходов.

Зажимы  $A$ ,  $B$  и  $C$  через трехполюсные выключатели можно присоединять к общим сборным шинам отдачи  $ABC$ .



Фиг. 39. Схемы цепи возбуждения и соединений между двумя половинами фазных обмоток статора и обмоток ротора альтернатора трехфазного тока.

Клеммы  $A$ ,  $B$  и  $C$  присоединяются к шинам отдачи; клеммы  $A_1$ ,  $B_1$  и  $C_1$  присоединяются к шинам синхронизации;  $N$  — нулевой вывод альтернатора.

От шин отдачи  $ABC$  может получать питание гребной электродвигатель. Приключение гребного электродвигателя к сборным шинам альтернаторов производится с помощью переключателя, который позволяет производить реверс гребного электродвигателя.

Зажимы  $A_1$ ,  $B_1$  и  $C_1$  через трехполюсные выключатели могут приключаться к другим общим шинам  $A_1B_1C_1$ , которые служат для удержания альтернаторов в синхронизме при снятом напряжении с шин отдачи  $ABC$ .

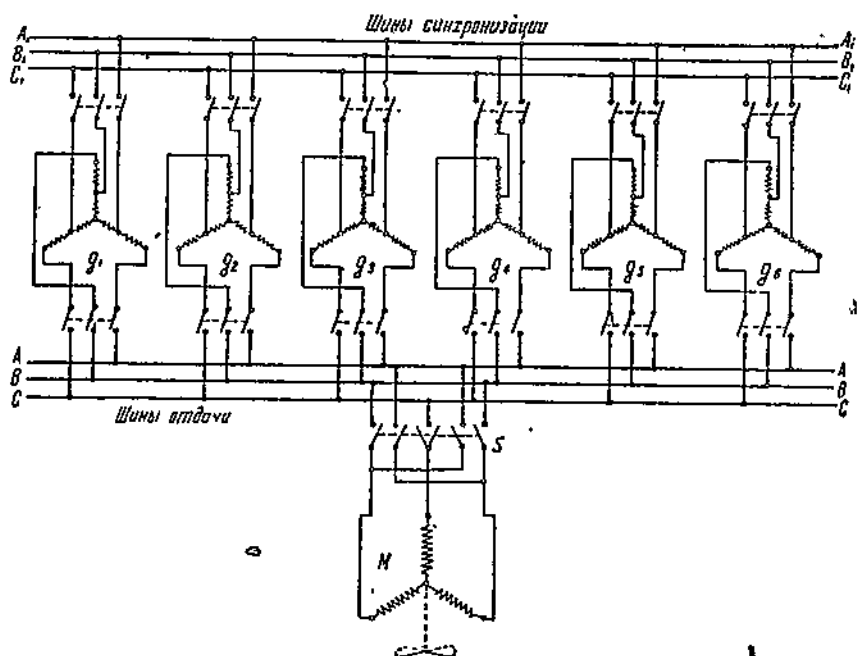
Принципиальная схема группы шести сдвоенных альтернаторов, приключенных на параллельную работу для питания гребного электродвигателя, представлена на прилагаемом чертеже (фиг. 40).

Для производства реверса гребного электродвигателя снимают с него возбуждение и меняют направление тока в обмотке одной половины ротора альтернатора, например, в обмотке 2 (см. схему на фиг. 39).

В результате этого напряжение на шинах отдачи  $ABC$  становится равным нулю и подача напряжения и тока к гребному электродвигателю прекращается. Помощью переключателя  $S$  производят пересоединение двух фаз обмотки электродвигателя, затем вновь меняют направление тока в одной половине обмотки возбуждения у альтернаторов (в обмотке 2), и гребной электродвигатель, переключенный на реверс, снова получает питание от сборных шин альтернаторов, работая вначале как асинхронный электродвигатель согласно общему положению реверсирования синхронных гребных электродвигателей.

Трехполюсные выключатели у альтернаторов служат для отключения неработающего альтернатора.

Управление скоростью гребного синхронного электродвигателя, как и у турбо-электроходов, производится за счет изменения частоты тока, питающего гребной электродвигатель, для чего и требуется одновременное изменение числа оборотов у всех работающих в параллель дизель-альтернаторов. Одновременное изменение числа оборотов у всех дизель-агрегатов достигается помощью вышеописанного регулятора управления, которым снабжается каждый дизель. Дополнительный электродвигатель регулятора управления электрически связывает каждый дизель-альтернатор с одним общим постом



Фиг. 40. Принципиальная схема подключения шести двояных альтернаторов, предназначенных для питания гребного электродвигателя.

На схеме представлены только обмотки переменного тока. Обмотки возбуждения не указаны.

$g_1 - g_6$  — двояные альтернаторы трехфазного тока,

$M$  — гребной электродвигатель,

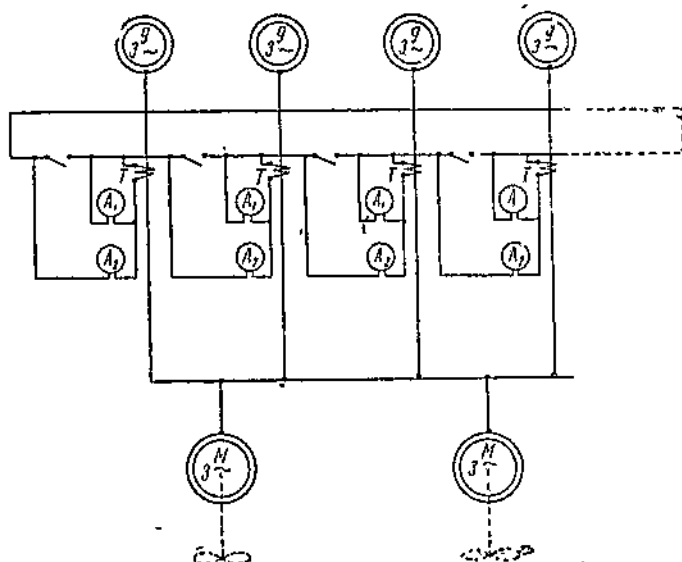
$S$  — переключатель для реверса.

управления, где расположен реостат, позволяющий изменять скорость электродвигателя постоянного тока у мотор-генератора. Управление реостатом вызывает изменение частоты тока, питающего все дополнительные электродвигатели регуляторов, управления дизелей.

Во время маневрирования, когда производится неоднократное и частое изменение режимов работы параллельно работающих дизель-альтернаторов, нельзя предполагать, что нагрузка всегда будет равномерно распределяться между всеми агрегатами и что все агрегаты окажутся активно несущими нагрузку.

Поэтому помимо контроля на пульте управления за работой параллельно приключенных альтернаторов предусматривается еще контроль за нагрузкой отдельных генерирующих агрегатов.

Этот контроль за нагрузкой отдельных генерирующих агрегатов осуществляется помощью амперметров, учитывающих нагрузку каждого альтернатора. Эти контролирующие амперметры размещены вблизи поста управления дизелями, что позволяет непосредственно машинисту принимать необходимые меры к выравниванию нагрузки между параллельно работающими дизель-агрегатами.



Фиг. 41. Схема включения контрольных амперметров, расположенных у поста управления дизелями.

- g — альтернаторы трехфазного тока,  
M — гребные электродвигатели,  
T — трансформаторы тока,  
A<sub>1</sub> — амперметр для контроля нагрузки соответствующего альтернатора,  
A<sub>2</sub> — амперметр средней нагрузки, приходящейся на альтернатор.

Подобный дополнительный контроль за нагрузкой дизель-альтернаторов, производимый непосредственно на посту управления дизелями, осуществляется по следующей принципиальной схеме (фиг. 41).

Благодаря вышеразобранному дополнительным устройствам, применяемым у дизель-альтернаторов, положительно разрешается вопрос использования дизелей для целей электродвижения на переменном токе, причем, как уже и отмечалось, дизель-электроходы имеют многие преимущества перед простыми теплоходами и в экономическом отношении они конкурентоспособны, как это практически и подтверждено, эксплуатационными данными первого дизель-электрохода «Wuppertal».

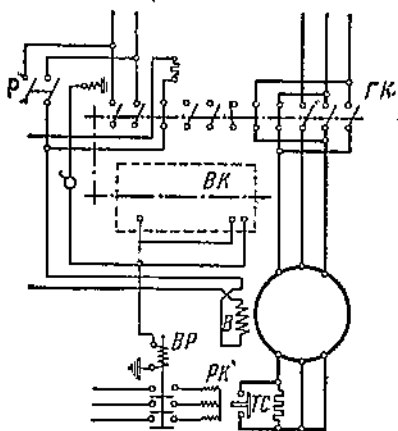
Небезынтересно также отметить электрическое торможение синхронных гребных электродвигателей, примененное впервые на

одном из последних дизель-электроходов — «Patria». Этот весьма эффективный способ торможения гребного электродвигателя позволяет сократить время реверсирования гребной установки до желаемых, практически допустимых, пределов.

Схема электрического торможения одного из гребных электродвигателей дизель-электрохода «Patria», в выполнении фирмы AEG, представлена на фиг. 42.

Динамическое торможение электродвигателя производят с помощью контроллера ГК, который ставят на положение «стоп». При этом обмотка статора электродвигателя отключается от высоковольтной питающей сети. В момент отключения обмотки статора электродвигателя от питающей сети происходит автоматическое замыкание вторичной цепи помощью вспомогательного контроллера ВК. Для этого последний имеет механическую связь с главным контроллером ГК. Замыкание вторичной цепи вызывает срабатывание вспомогательного реле ВР и реле-контактора РК. С помощью последнего в обмотку статора электродвигателя вводится тормозное сопротивление ТС. Это сопротивление во время работы электродвигателя шунтируется.

Обмотка возбуждения В гребного электродвигателя продолжает получать питание постоянным током с помощью рубильника Р. В этих условиях торможения гребной электродвигатель, возбужденный ротор которого под действием гребного вайта продолжает вращаться, становится генератором и его электроэнергия поглощается тормозным сопротивлением.



Фиг. 42.

Эффективность торможения гребного электродвигателя дизель-электрохода «Patria» велика: например, в течение 1 секунды электродвигатель может снизить число оборотов с 96 до 4 об/мин. Подобная быстрота торможения гребного электродвигателя вызвала бы сильное сотрясение корпуса судна и поэтому практически она неприемлема.

В обычных условиях эксплуатации время торможения необходимо увеличить до пределов, не вызывающих слишком значительных и вредных сотрясений корпуса судна.

Электрическое торможение гребных электродвигателей наилучшим способом обеспечивает быструю остановку винта и, кроме того, этот способ торможения имеет то преимущество, что при нем не происходит перегрев обмотки электродвигателя вследствие того, что тепловая энергия выделяется в тормозном сопротивлении. Отмеченные обстоятельства электрического торможения гребного электродвигателя весьма ценны для условий быстрых и многократных реверсов при эксплуатации судов.

## § 11. Разбор принципиальных схем электродвижения

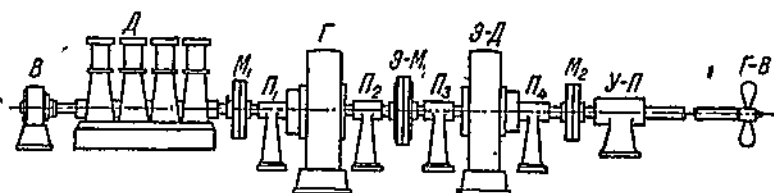
### А. Постоянный ток

**1. Система Дель-Пропосто.** К схемам гребных установок на постоянном токе прежде всего нужно отнести одну из старейших систем электродвижения — систему Дель-Пропосто.

В системе Дель-Пропосто применение электродвижения использовано как вспомогательное средство на теплоходах, имеющих нереверсивные дизеля.

Благодаря применению электропривода гребного винта основные требования по изменению скорости хода судна и реверсированию винта были разрешены наиболее полно и просто на судах с нереверсивными дизелями. В системе Дель-Пропосто электропривод гребного винта используется, таким образом, для маневрирования судна. Нормальная скорость движения судна вперед происходит при работе дизеля непосредственно на гребной вал винта.

В установках Дель-Пропосто, использующих электродвижение как вспомогательное средство для маневрирования судна и при спл.



Фиг. 43.

женной скорости его хода генератор и гребной электродвигатель располагают на общем валу с приводным дизелем. На этот вал общего дизель-электрического блока насаживается и гребной винт.

Простейшее расположение дизель-электрических машин в системе Дель-Пропосто представлено на фиг. 43.

Общий дизель-электрический блок системы Дель-Пропосто состоит из следующих частей:

- Д — двигатель дизеля,
- Г — генератор постоянного тока,
- Э-Д — гребной электродвигатель,
- В — возбуждатель,
- Э-М — электромагнитная муфта,
- М<sub>1</sub> и М<sub>2</sub> — фланцевые муфты для постоянного соединения,
- П<sub>1</sub>, П<sub>2</sub>, П<sub>3</sub> и П<sub>4</sub> — опорные рамные подшипники,
- У-П — упорный подшипник,
- Г-В — гребной винт.

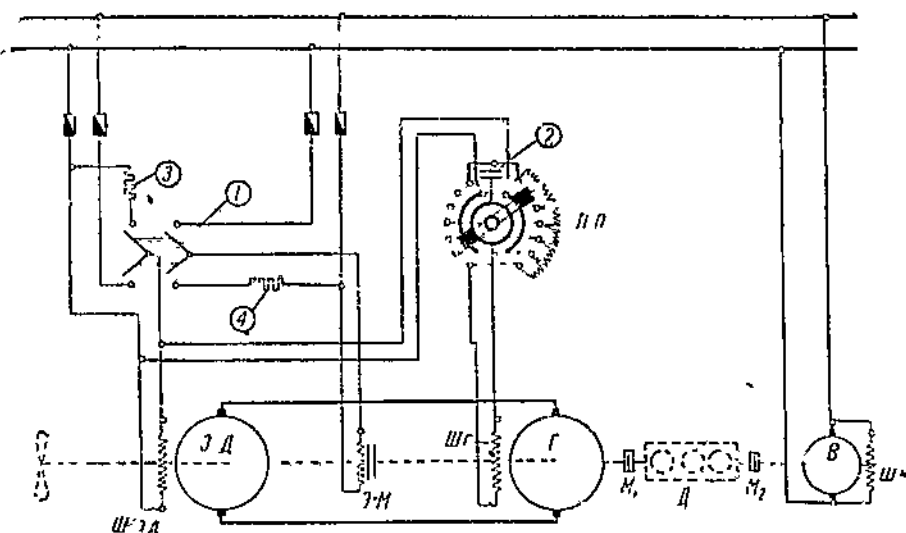
С помощью электромагнитной муфты Э-М имеется возможность дизель-генераторную часть системы быстро соединять или разъединять механически с валом гребного электродвигателя, к которому непосредственно присоединен вал гребного винта.

После расцепления электромагнитной муфты система Дель-Пропосто работает как дизель-электрогребная установка, т. е. электроэнергия,

вырабатываемая дизель-генератором, идет на питание гребного электродвигателя.

Благодаря только электрическому соединению между дизель-агрегатом и гребным электродвигателем режим работы последнего в отношении скорости и направления вращения становится автономным, т. е. независимым от скорости и направления вращения дизель-агрегата. Автономность работы гребного электродвигателя обеспечивает полностью требуемую в необходимых пределах работу гребного винта как при переднем, так и при заднем ходе судна.

При полном ходе судна вперед гребной винт приводится во вращение с помощью дизеля, при включенной электромагнитной муфте Э-М, которая производит механическое соединение вала дизель-



Фиг. 44. Принципиальная схема электрических соединений гребной установки по системе Дель-Пропосто.

генераторной части блока с валом гребного электродвигателя. В этих условиях гребной электродвигатель Э-Д и предназначенный для его питания генератор Г не принимают активного участия в работе, т. е. находятся электрически в выключенном состоянии. При этом происходит только вращение их якорей вхолостую, так как якоря являются соединительными звеньями между валом дизеля и валом гребного винта.

Для пояснения соединений и работы электрогребной части установки по системе Дель-Пропосто приводится принципиальная схема электрических соединений, представленная на фиг. 44.

Обозначения основных элементов схемы те же, что и на чертеже общего расположения агрегата.

Как видно из схемы, электрическая часть установки Дель-Пропосто выполнена по системе Ватт-Леонарда.

Принцип действия электрической части установки следующий: к общему валу дизель-гребного агрегата присоединен возбуждатель В,

представляющий шунтовой генератор с самовозбуждением, который питает сборные шины.

От сборных шин отходят два фидера, обслуживаемые одним общим двухполюсным переключателем 7.

Один фидер служит для питания катушки электромагнитной муфты Э-М, а второй фидер обслуживает независимое питание шунтовой обмотки Ш<sub>э-д</sub> гребного электродвигателя Э-Д, а также и независимое питание шунтовой обмотки Ш<sub>г</sub> главного генератора установки Г. Питание последней обмотки происходит через переключающий пост управления П-П.

При включении переключателя 7 на верхние контакты происходит отключение питания возбуждения как у гребного электродвигателя, так и у питающего его генератора Г. Шунтовая обмотка гребного электродвигателя при этом замыкается на разрядное сопротивление 3.

При положении переключателя 7 на верхних контактах электрическая часть гребной установки бездействует, так как возбуждение главных машин отсутствует. Одновременно с этим происходит питание обмотки электромагнитной муфты Э-М, вследствие чего эта муфта производит соединение общего вала и дизель имеет возможность непосредственно работать на гребной винт.

При включении переключателя 7 на нижние контакты происходит непосредственное приключение обмотки возбуждения Ш<sub>э-д</sub> гребного электродвигателя и подача напряжения на переключающий пост П-П; одновременно с этим питание катушки электромагнитной муфты Э-М прерывается, и обмотка катушки замыкается на разрядное сопротивление 4.

Положение переключателя 7 на нижних контактах производит выключение соединительной электромагнитной муфты Э-М, благодаря чему вал гребного винта отсоединяется от вала дизеля и дальнейшее активное вращение гребного винта может происходить только под действием гребного электродвигателя.

Гребной электродвигатель начинает работать, как только его якорь получит ток от генератора Г, при возбуждении последнего. Питание возбуждения генератора происходит через пост управления П-П, посредством которого и производится управление гребным электродвигателем как в отношении числа его оборотов, так и направления вращения, что легко проследить по схеме.

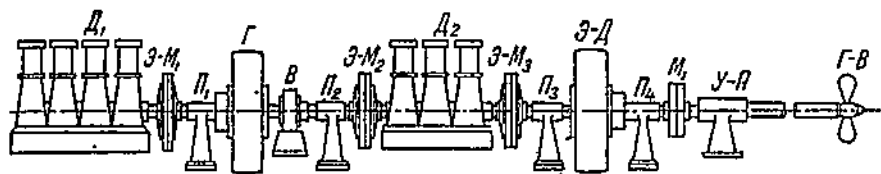
Контакты 2 переключающего поста управления П-П служат для приключения шунтовой обмотки Ш<sub>г</sub> на разрядное сопротивление при выключении или изменении направления магнитного потока генератора.

Иногда на гребных установках по системе Дель-Пропосто на каждом гребном валу располагаются по два дизеля, что повышает техническую надежность работы установки. Схемы электрических соединений подобных установок в основном ничем не отличаются от разобранный принципиальной схемы. Электромагнитные муфты Э-М<sub>1</sub> и Э-М<sub>2</sub> должны иметь раздельное питание от общих шин. Дизеля в этих установках располагаются по обе стороны генератора, что и можно видеть на прилагаемом чертеже (фиг. 45) схемы общего расположения гребного агрегата, имеющего по два дизеля на вал.

Гребные установки судов, выполненные по системе Дель-Пропосто, имеют следующие преимущества:

а) возможность использования на теплоходах нереверсивных дизелей, что имело громадное значение до выпуска специальных судовых дизелей, снабженных приспособлениями для производства реверса и широкой регулировки числа оборотов;

б) использование гребной установки при полном ходе судна с высоким к. п. д., так как при этом дополнительные потери за счет электрической части незначительны. Эти незначительные дополнительные потери при работе дизеля на гребной вал в системе Дель-Пропосто, по сравнению с чисто теплоходной установкой, складываются из потерь от увеличенного трения в подшипниках системы, благодаря большему весу вращающихся частей; из потерь от трения о воздух якоря генератора и якоря гребного электродвигателя, а также и соединительных муфт и, наконец, из расхода электроэнергии на питание электромагнитной муфты.



Фиг. 45.

Расход электроэнергии на питание соединительной электромагнитной муфты сравнительно мал, что можно видеть из табл. 14, характеризующей соединительные электромагнитные муфты завода «Вулкан».

Таблица 14

| Передаваемая мощность в л. с. | Число оборотов в мин. | Размеры муфты в м |              | Вес муфты в т | Мощность, расходуемая на возбуждение муфты, в квт |
|-------------------------------|-----------------------|-------------------|--------------|---------------|---------------------------------------------------|
|                               |                       | Диаметр           | Длина по оси |               |                                                   |
| 500                           | 200                   | 1,10              | 0,53         | 0,69          | 0,88                                              |
| 1000                          | 200                   | 1,15              | 0,61         | 1,58          | 1,10                                              |
| 1000                          | 150                   | 1,20              | 0,62         | 1,78          | 1,20                                              |

Все дополнительные потери от вращения якорей генератора и гребного электродвигателя при электрически выключенном их состоянии, вместе с потерями от трения о воздух соединительных муфт и расходом электроэнергии на питание электромагнитной муфты, можно считать не выше суммы механических потерь генератора и гребного электродвигателя.

Компенсация потерь от соединительных муфт достигается за счет отсутствия трения щеток машин о коллекторы, так как при работе дизеля непосредственно на гребной вал щетки поднимаются специально предусмотренными для этого маленькими электродвигателями.

Перечисленные дополнительные потери в условиях работы дизеля непосредственно на гребной винт в системе Дель-Пропосто, по сравнению с аналогичным чисто теплоходным вариантом, можно оценить в 2—3%.

в) Обеспечение широкой маневренности судна.

К недостаткам системы Дель-Пропосто можно отнести:

а) более высокую стоимость, больший вес и больший размер машинного помещения, по сравнению с теплоходами, так как в системах Дель-Пропосто, где дизель предназначается и для непосредственной работы на гребной винт, использование менее мощных и быстроходных дизелей, как это, например, имеет место на современных дизель-электроходах переменного тока, недопустимо;

б) более низкий к. п. д. при использовании электрогребной части установки Дель-Пропосто, оборудованной электрическими машинами постоянного тока, по сравнению с электрогребными установками на переменном токе.

Электрогребные установки по системе Дель-Пропосто являлись экономически выгодными, когда еще отсутствовали дизеля судового типа, так как эти установки позволяли использовать на судах реверсивный тип дизелей, которые как более совершенные первичные двигатели давали большие экономические преимущества по сравнению с паровыми установками.

С появлением судовых дизелей реверсивного типа технические преимущества системы Дель-Пропосто почти утратили свое значение, так как экономические преимущества остались за теплоходами.

Поэтому электрогребные установки по системе Дель-Пропосто за последнее время не выполняются. Эти системы могут оказаться более выгодными по сравнению с паровыми судами и технически более совершенными по сравнению с теплоходами, когда требуется от судна большая и частая маневренность с развитием повышенного вращающего момента при заклинивании винта (например, в судах ледокольного назначения), когда в то же время судно предназначается и для совершения длительных переходов в чистой воде.

В этих условиях установки Дель-Пропосто, использующие по два дизеля на каждом гребном валу, будут более надежными по сравнению с установками, имеющими по одному дизелю на каждом гребном валу.

Как уже отмечалось ранее, для электрогребных установок постоянного тока преимущественно применяются соединения электрических машин по схеме Вард-Леонарда, что мы и видели на рассмотренных установках по системе Дель-Пропосто.

Подобные соединения электрических машин наиболее распространены также и на установках, где электродвигатель является главным и постоянным средством для привода гребного винта.

Основные принципиальные схемы чисто электрогребных установок разобраны ниже.

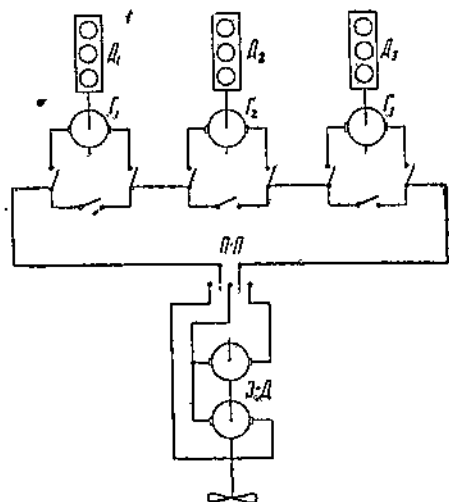
II. Установки с одним гребным электродвигателем и несколькими генерирующими агрегатами. Гребной электродвигатель в этих установках для обеспечения большей бесперебойности работы выполняется иногда со сдвоенным якорем. Все генерирующие агрегаты и

гребной электродвигатель соединяются последовательно. Количество подключенных генераторов изменяет напряжение, подводимое к электродвигателю, что позволяет производить работу электрогребной установки с оптимальным к. п. д. генераторов при различных скоростях хода судна.

Схема электрического соединения цепи главного тока трех генерирующих агрегатов с одним гребным электродвигателем, имеющим двойной якорь, представлена на фиг. 46.

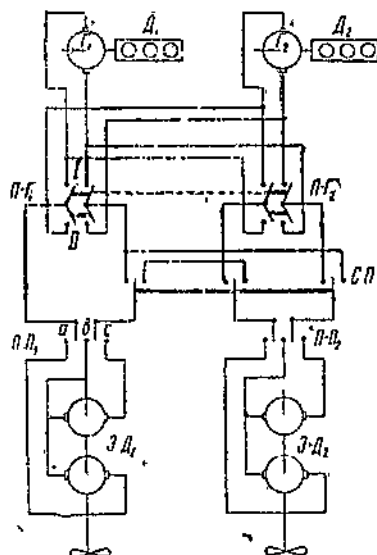
Число генерирующих агрегатов в этих установках бывает не менее двух.

Посредством переключающего поста П-П имеется возможность работать при последовательном соединении якорей гребного электро-



Фиг. 46.

Д — дизель, Г — генераторы, ЭД — гребной электродвигатель со двоянным якорем, П-П — переключающий пост электродвигателя.



Фиг. 47.

двигателя и отдельно каждым якорем. Генераторы можно подключить на работу в требуемом количестве посредством выключателей, как это видно на представленной схеме.

III. Установки с двумя гребными электродвигателями, нормально получающими питание каждый от своего генератора. Гребные электродвигатели в этих установках могут быть как одноякорные, так и двухъякорные; последние обеспечивают более надежную, в отношении бесперебойности, работу обоих гребных винтов, так как питание каждого гребного электродвигателя можно производить от любого из генераторов.

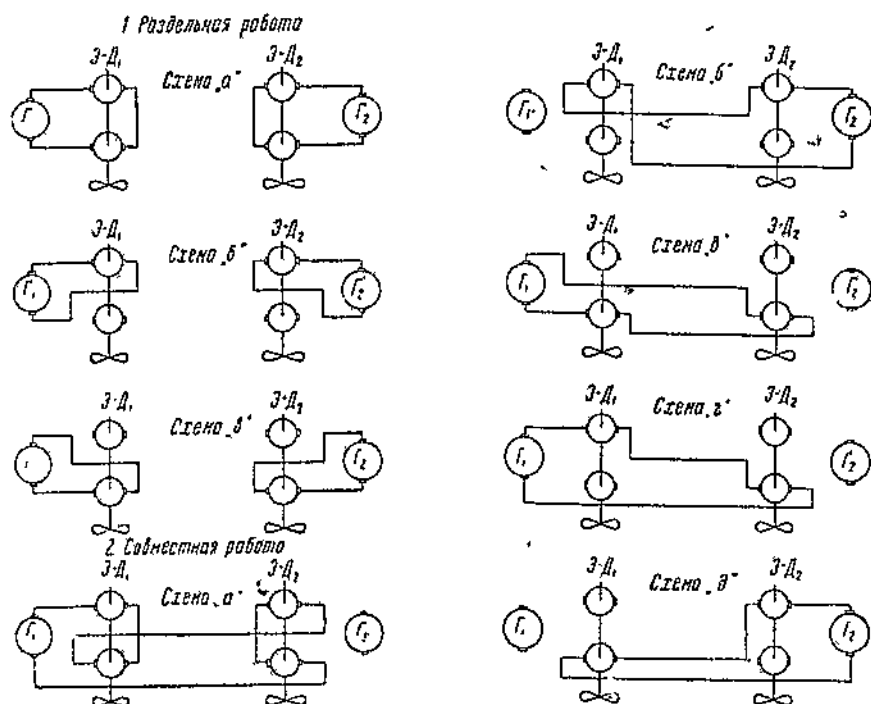
Принципиальная схема соединений цепи главного тока двух дизель-генераторов и двух гребных электродвигателей со двоянными якорями представлена на фиг. 47.

Приведенная принципиальная схема соединений позволяет производить следующие восемь основных переключений:

1. Раздельная работа каждого гребного электродвигателя, с питанием от своего генератора.

Для этого соединительный переключатель  $C-II$  должен быть включен на левые контакты.

При верхнем положении генераторных переключателей  $П-Г_1$  и  $П-Г_2$ , которые между собой механически заблокированы, каждый генератор питает соответственно свой гребной электродвигатель, т. е. от  $Г_1$  питается  $Э-Д_1$  и от  $Г_2$  питается  $Э-Д_2$ .



Фиг. 48.

С помощью переключающих постов  $П-П_1$  и  $П-П_2$  каждый гребной электродвигатель может работать:

а) при включении рубильников на клеммы  $a$  и  $c$  — генератор производит питание обоих якорей гребного электродвигателя, соединенных последовательно (фиг. 48, схема  $a$ );

б) при включении рубильников на клеммы  $b$  и  $c$  генератор производит питание только верхнего якоря гребного электродвигателя (фиг. 48, схема  $b$ );

в) при включении рубильников на клеммы  $a$  и  $b$  генератор производит питание только нижнего якоря гребного электродвигателя (фиг. 48, схема  $в$ ).

При раздельном питании гребных электродвигателей они могут работать согласованно, т. е. оба на передний или на задний ход; также можно заставить их работать и противоположно, т. е. один на передний,

а другой на задний ход или наоборот, что легко достигается путем соответствующих возбуждений генераторов.

2. Совместная работа обоих гребных электродвигателей от любого из генераторов.

Для этого прежде всего необходимо соединительный переключатель  $C-P$  замкнуть на правые контакты (фиг. 47).

При положении генераторных переключателей  $П-Г$  на верхних контактах (при положении  $П-Г_1$  на контактах  $I$ ) гребные электродвигатели получают питание от  $G_1$ .

При положении генераторных переключателей  $П-Г$  на нижних контактах (при положении  $П-Г_1$  на контактах  $II$ ) гребные электродвигатели получают питание от  $G_2$ .

С помощью переключающих постов  $П-П_1$  и  $П-П_2$  гребные электродвигатели могут работать:

а) при включении рубильников у обоих электродвигателей на клеммы  $a$  и  $c$  питание электродвигателей осуществляется при последовательном включении всех четырех якорей (фиг. 48, схема а);

б) при включении рубильников у обоих электродвигателей на клеммы  $a$  и  $c$  питание электродвигателей осуществляется при последовательном соединении только верхних якорей (фиг. 48, схема б);

в) при включении рубильников у обоих электродвигателей на клеммы  $a$  и  $c$  питание электродвигателей осуществляется при последовательном соединении только нижних якорей (фиг. 48, схема в);

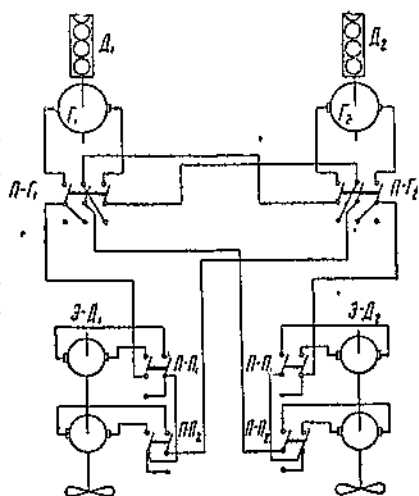
г) при включении рубильников у  $Э-Д_1$  на клеммы  $a$  и  $c$ , а у  $Э-Д_2$  на клеммы  $a$  и  $b$  гребные электродвигатели будут работать при последовательном соединении соответственно верхнего и нижнего якорей (фиг. 48, схема г);

д) при включении рубильников у  $Э-Д_1$  на клеммы  $a$  и  $b$ , а у  $Э_2$  на клеммы  $a$  и  $c$  гребные электродвигатели будут работать при последовательном соединении соответственно нижнего и верхнего якорей (фиг. 48, схема д).

Для упрощения операций по переключениям в эксплуатационных условиях можно ограничиться только частью схем возможных приведенных переключений.

Примером электрогребных установок с двумя дизель-генераторами и двумя двухъякорными гребными электродвигателями могут служить строящиеся в настоящее время в СССР два дизель-электрохода постоянного тока «Труд» и «Пролетарий».

Принципиальная схема электрических соединений электрохода «Труд» представлена на фиг. 49.



Фиг. 49. Схема электрических соединений строящихся дизель-электроходов «Труд» и «Пролетарий».

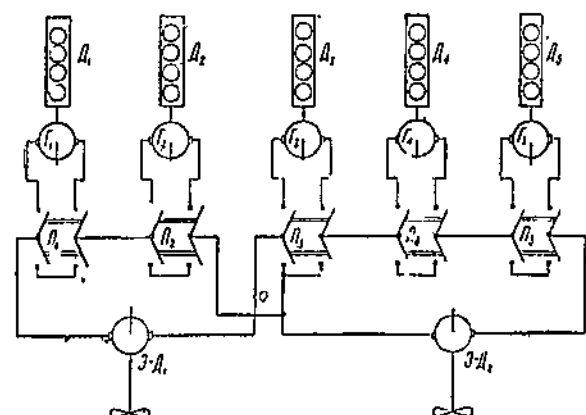
Этот электроход оборудуется двумя дизелями мощностью по 3500 л. с. при 350 об/мин.

Дизеля соединяются непосредственно с шунтовыми генераторами постоянного тока мощностью по 2400 квт, 350 об/мин., напряжением 750 в, силой тока 3080 а.

Два гребных электродвигателя, шунтовые, двухъякорные, мощностью каждый по  $2 \times 1500$  л. с. = 3000 л. с., напряжением 750 в, при числе оборотов в минуту  $n = 144$ .

Генераторы и электродвигатели изготовлены на заводе «Электро-сила», в Ленинграде.

Принципиальная схема цепи главного тока дизель-электрохода «Труд», приведенная на фиг. 49, позволяет производить те же соединения, что и вышеразобранные схемы на фиг. 48.



Фиг. 50. Схема электрических соединений цепи главного тока нескольких (пяти) дизель-генераторов, обслуживающих два гребных электродвигателя, выполненная на судне «Vogtland».

$Д_1 - Д_5$  — дизели —;  $Г_1 - Г_5$  — генераторы  
 $Э-Д_1 - Э-Д_2$  — гребные электродвигатели.

ших немецких судоходных компаний Hamburg American Line. Нуждаясь в тоннаже для ускорения выпуска судна на линию, компания решила два главных, сильно износившихся, двигателя заменить установкой пяти быстроходных дизель-генераторов, предназначенных для питания двух гребных электродвигателей. Возможность быстрого получения и установки менее мощных быстроходных дизель-генераторов и гребных электродвигателей позволила выпустить судно в эксплуатацию на 5 месяцев раньше, по сравнению со сроком, если бы судно оборудовалось двумя мощными специальными судовыми дизелями.

Принципиальная схема соединений цепи главного тока электрохода «Vogtland» представлена на фиг. 50.

С помощью двухполюсных переключателей имеется возможность производить различные соединения как в отношении раздельного и совместного питания и работы гребных электродвигателей, так и

Обозначения, принятые на фиг. 48 и 49, одинаковы.

IV. Установки с двумя гребными электродвигателями и несколькими (больше двух) питающими генераторами. Примером последнего типа установок может служить электрогребная установка постоянного тока на судне «Vogtland», переоборудованном в 1938 г. из теплохода в дизель-электроход. При этом интересно отметить следующее. Это судно принадлежит одной из самых боль-

в отношении количества подключаемых питающих дизель-генераторов.

Следующие четыре основных соединения можно получать при работе гребных электродвигателей согласно фиг. 51, с выполнением 14 различных вариантов соединений.

1. Схема совместной работы гребных электродвигателей при последовательном соединении обоих гребных электродвигателей с питающими их агрегатами.

Эта схема позволяет иметь пять различных вариантов в отношении количества питающих агрегатов, а именно: от одного генератора, работающего на оба гребных электродвигателя, до 5 генераторов, подключаемых последовательно в цепь гребных электродвигателей (см. схему соединений, варианты *a* и *b*).

2. Схема раздельной работы гребных электродвигателей, допускающая иметь следующие три варианта различных соединений: питание каждого гребного электродвигателя от двух генераторов (см. схему соединений, вариант *в*), питание каждого гребного электродвигателя от одного из генераторов (см. схему соединений, вариант *г*).

В этих вариантах соединений средний генератор  $G_3$  отключен от главной цепи и переключатель  $P_3$  включен на нижние контакты. Остальные переключатели или все включены на верхние контакты или по одному с каждой стороны от среднего переключателя на нижние контакты.

3. Схема одиночной работы гребного электродвигателя Э-Д<sub>1</sub>, допускающая три варианта — питание электродвигателя от двух или одного из генераторов  $G_1$  и  $G_2$  (см. схему соединений, варианты *д* и *е*).

При этих вариантах соединений переключатель  $P_3$  замкнут на нижние контакты, а переключатели  $P_1$  и  $P_2$  включены в соответствии с требуемым питанием.

4. Схема одиночной работы гребного электродвигателя Э-Д<sub>2</sub>, допускающая три варианта — питание электродвигателя от двух или одного из генераторов  $G_4$  и  $G_5$  (см. схему соединений, варианты *ж* и *з*). При этих вариантах соединений переключатель  $P_3$  замкнут на нижние контакты, а переключатели  $P_4$  и  $P_5$  включены соответственно с требуемым питанием.

## Б. Переменный ток

Принципиальные схемы электродвижения на переменном токе можно различать по двум основным признакам:

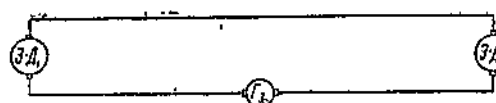
1. По количеству генерирующих агрегатов, обслуживающих гребной электродвигатель, и способу их соединения.

2. По типу гребных электродвигателей.

По первому признаку наиболее распространенные схемы электрогребных установок на переменном токе выполняются применительно к первичным двигателям.

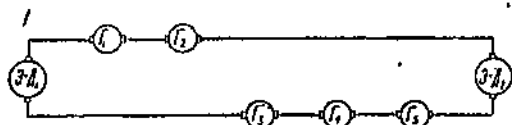
### 1. Для турбо-электроходов:

а) С одиночным гребным электродвигателем и обслуживающим его генерирующим агрегатом (фиг. 52).



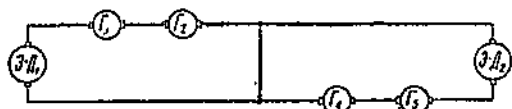
Вариант а

а — 1 генератор питает 2 электродвигателя.



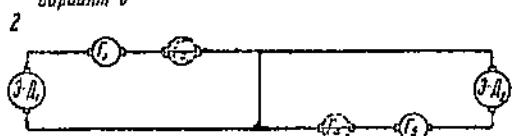
Вариант б

б — 5 генераторов питают 2 электродвигателя.



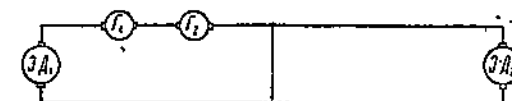
Вариант в

в — Раздельная работа электродвигателей при питании каждого от 2 генераторов.



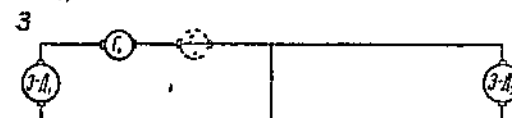
Вариант г

г — То же, что и вариант „в“, но с питанием каждого электродвигателя от 1 генератора.



Вариант д

д — Одноточная работа ЭД1 от 2 генераторов.



Вариант е

е — Одноточная работа ЭД1 от 1 генератора.



Вариант ж

ж — Одноточная работа ЭД2 от 2 генераторов.



Вариант з

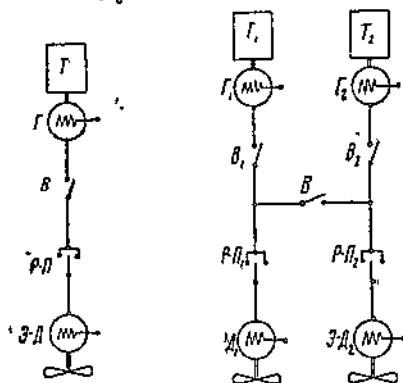
з — Одноточная работа ЭД2 от 1 генератора.

б) С двумя гребными электродвигателями и двумя генерирующими агрегатами. В этих установках каждый генератор может питать свой гребной электродвигатель, а также и оба гребных электродвигателя одновременно (фиг. 53).

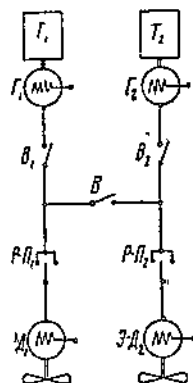
Эта схема является наиболее распространенной схемой современных турбо-электроходов и в частности по этой схеме выполнены для СССР турбо-электроходы «Иосиф Сталин» и «Вячеслав Молотов».

в) С двумя генерирующими агрегатами и четырьмя гребными электродвигателями (фиг. 54). По этой схеме выполнен пассажирский лайнер «Monarch of Bermuda».

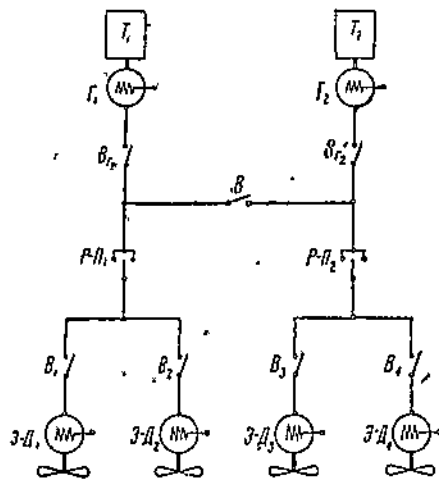
г) С четырьмя генерирующими агрегатами и четырьмя гребными электродвигателями (фиг. 55). По схеме а (фиг. 55) оборудован



Фиг. 52.



Фиг. 53.



Фиг. 54.

$T$  — паровая турбина;  $\Gamma$  — генератор трехфазного тока;  $\mathcal{E}-\mathcal{D}$  — гребной электродвигатель трехфазного тока;  $B$  — трехполюсный выключатель;  $P-П$  — переключатель реверсирования.

самый большой турбо-электроход «Normandie». В подобных установках каждый генератор может питать свой электродвигатель. Два генератора и два гребных электродвигателя каждого борта объединяются вместе, что дает возможность производить питание обоих электродвигателей от любого из этих двух генераторов.

Более сложным и не дающим особых преимуществ для судов коммерческого флота является подвариант схемы, в котором все четыре генератора соединяются таким образом, что любой из них может обслуживать любую пару гребных электродвигателей (фиг. 55).

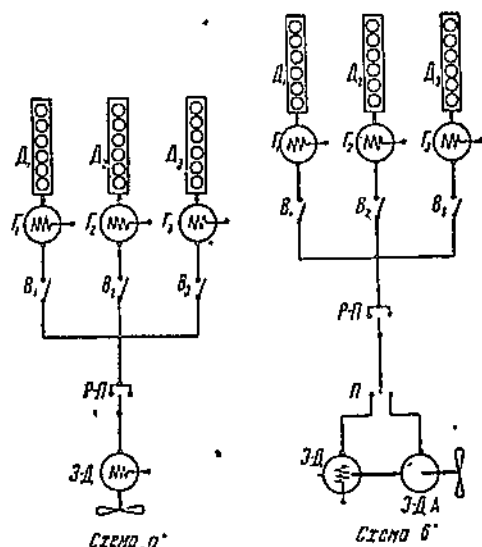
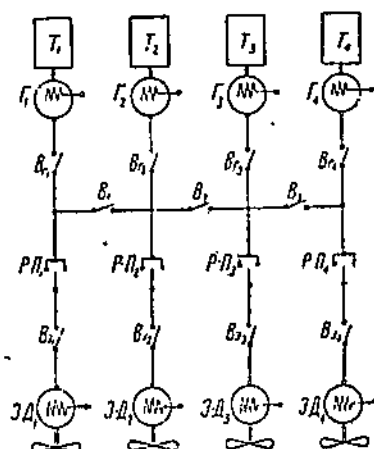
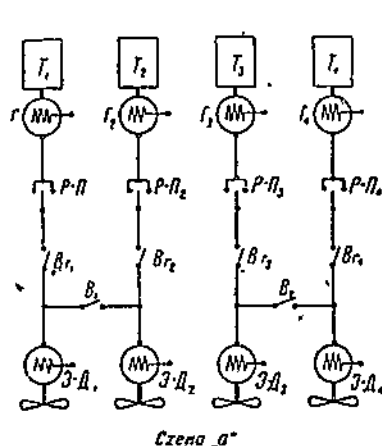
## II. Для дизель-электроходов:

а) С одной гребной установкой и несколькими (обычно тремя) генерирующими агрегатами.

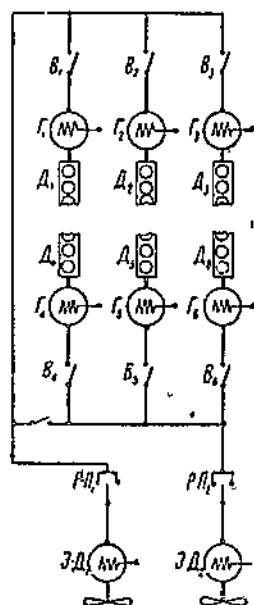
В этих установках могут быть два подварианта: более простой подвариант, когда на гребном валу находится один гребной электродвигатель (фиг. 56, схема а); второй, более сложный, но и более

надёжный, когда на гребном валу находятся два гребных электродвигателя (фиг. 56, схема б).

По последнему подварианту выполнен первый мощный дизель-электроход на переменном токе «Wuppertal».



Фиг. 56.



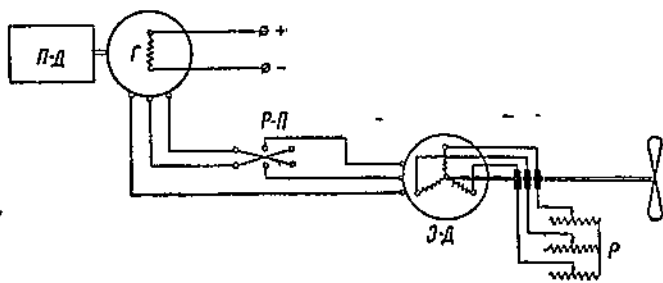
Д — дизель; Г — генератор трехфазного тока; Э-Д — синхронный гребной электродвигатель трехфазного тока; Э-Д-А — асинхронный гребной электродвигатель трехфазного тока; В — трехполюсный выключатель; Р-П — переключатель реверсирования; П — переключатель для включения одного из электродвигателей.

б) Двухвальные гребные установки, имеющие по гребному электродвигателю на каждом валу, с несколькими (обычно с шестью) генерирующими дизель-альтернаторами (фиг. 57).

Примерами таких выполненных установок могут являться дизель-электроходы «Patria» и «Robert Ley».

По второму признаку — типу гребных электродвигателей — электрогребные установки переменного тока могут оборудоваться:

а) Гребными электродвигателями обычного асинхронного типа, имеющими контактные кольца. Пуск этих электродвигателей производится с помощью реостата (фиг. 58).



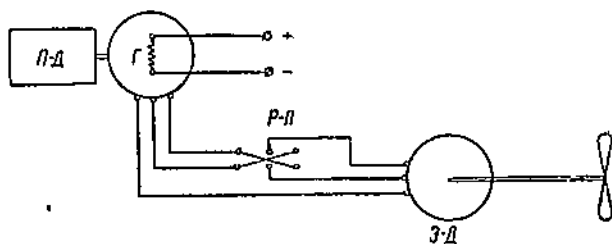
Фиг. 58.

Примером таких установок может являться коммерческий турбо-электроход «Wulsty Castle».

б) Гребными асинхронными короткозамкнутыми электродвигателями системы Бушера (имеющими двойную беличью клетку) (фиг. 59).

Типы подобных электродвигателей вследствие их дороговизны, больших габаритов и веса, как уже отмечалось выше, на судах коммерческого флота применения не находят.

в) Синхронно-асинхронными электродвигателями, т. е. синхронными электродвигателями, имеющими асинхронный запуск. Эти



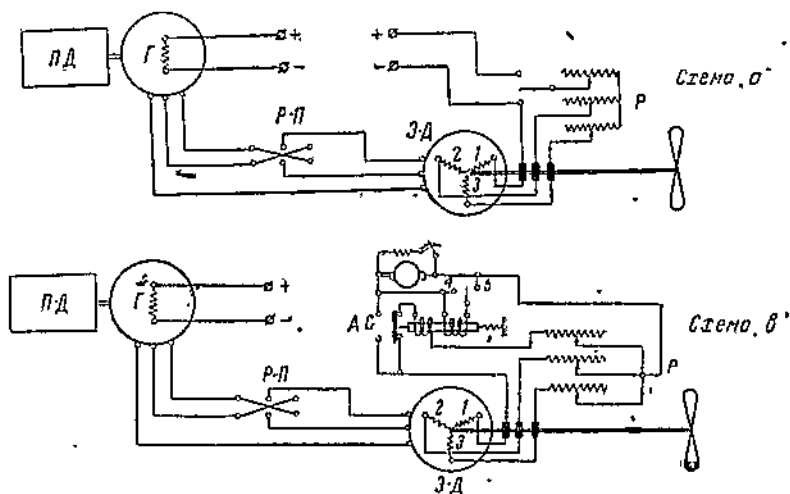
Фиг. 59.

электродвигатели могут выполняться двух видов: синхронные электродвигатели по типу асинхронных электродвигателей с фазным ротором, имеющим контактные кольца, и синхронные электродвигатели с явно выраженными полюсами, осуществляющими асинхронный запуск за счет демпферной обмотки, заложенной в полюсовые наконечники и играющей роль беличьей клетки при асинхронном запуске.

Запуск синхронных электродвигателей с фазным ротором производится помощью пускового реостата, включаемого в цепь ротора, с последующим переключением обмотки ротора на питание посто-

янным током и, следовательно, с переводом электродвигателей с асинхронной работы на синхронную.

Простейший способ включения этих электродвигателей представлен на фиг. 60, схемы *а* и *в*, причем вариант способа включения по схеме *в*, разработанный фирмой Броун-Бовери, при наличии специального реле, состоящего из двух катушек, обеспечивает авто-

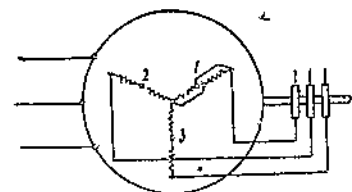


Фиг. 60.

матически наилучшие условия введения электродвигателя в синхронизм.

Для этого реле-переключатель должен быть поставлен в правое положение (контакт 5).

Выполнение электродвигателей с одинаковыми обмотками отдельных фаз при способах включения согласно схемам *а* и *в* создает неравномерное распределение постоянного тока в фазах ротора при синхронной работе электродвигателя, вследствие чего получается относительный перегрев обмотки фазы 1.



Фиг. 61.

Для избежания последнего обстоятельства фирма Эрликой предложила выполнять обмотку ротора, обеспечивающую равномерные условия нагрева отдельных его фаз, для чего обмотки фаз, состоящие из двух катушек, у 2 и 3-й фазы соединяют последовательно, а у 1-й фазы параллельно.

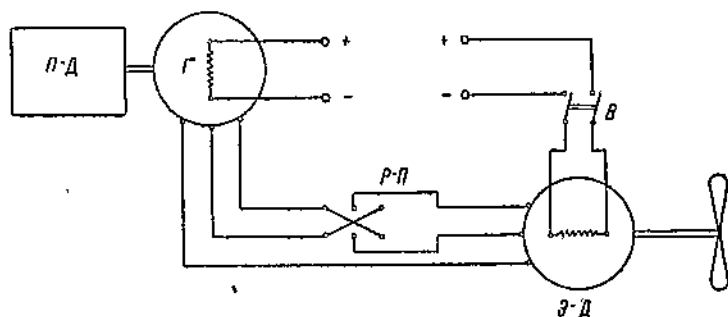
Выполнение обмотки ротора подобных электродвигателей представлено на фиг. 61.

Применение синхронно-асинхронных электродвигателей с фазными роторами, вследствие необходимости пользования пусковыми реостатами и связанными с ними дополнительными переключениями, на современных судах коммерческого флота почти не находит применения.

Современные электроходы оборудуются вторым типом синхронных электродвигателей с явно выраженными полюсами. Эти электродвигатели обладают асинхронным запуском, не требуют дополнительных пусковых реостатов и, следовательно, исключают все отрицательные моменты, связанные с их наличием.

Общая принципиальная схема подключения синхронно-асинхронного гребного электродвигателя с явно выраженными полюсами представлена на фиг. 62.

Примером применения электродвигателей последнего типа, т. е. с явно выраженными полюсами, могут служить турбо-электроходы «Normandie», построенные для СССР турбо-электроходы «Иосиф



Фиг. 62.

П-Д — пералачный двигатель; Г — генератор трехфазного тока; Э-Д — гребной электродвигатель; Р-П — переключатель для реверса; Р — пусковой реостат; А-С — реле автоматической синхронизации.

Сталин» и «Вячеслав Молотов», и равным образом крупные современные дизель-электроходы на переменном токе, как, например, «Wuppertal» и «Patria».

## Глава V

### РАЗБОР ВЫПОЛНЕННЫХ СХЕМ

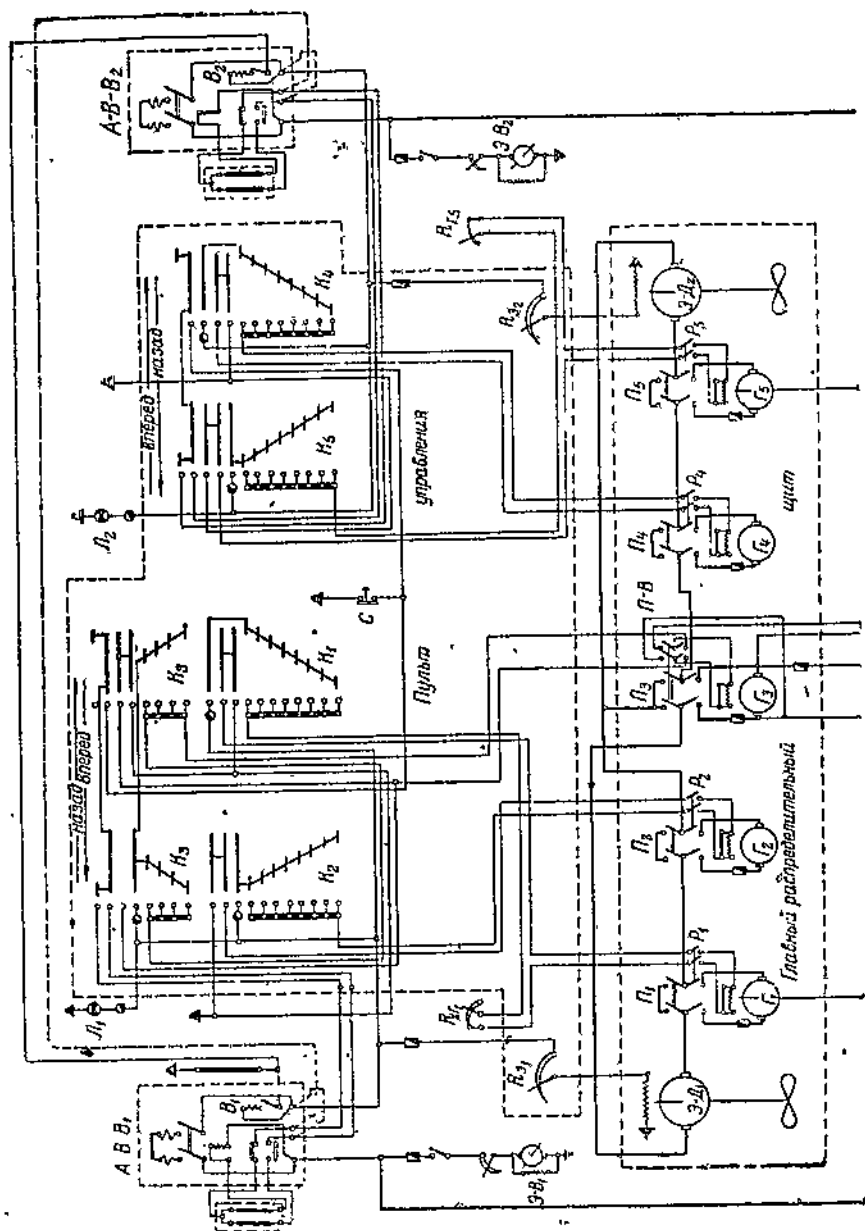
#### § 12. На постоянном токе

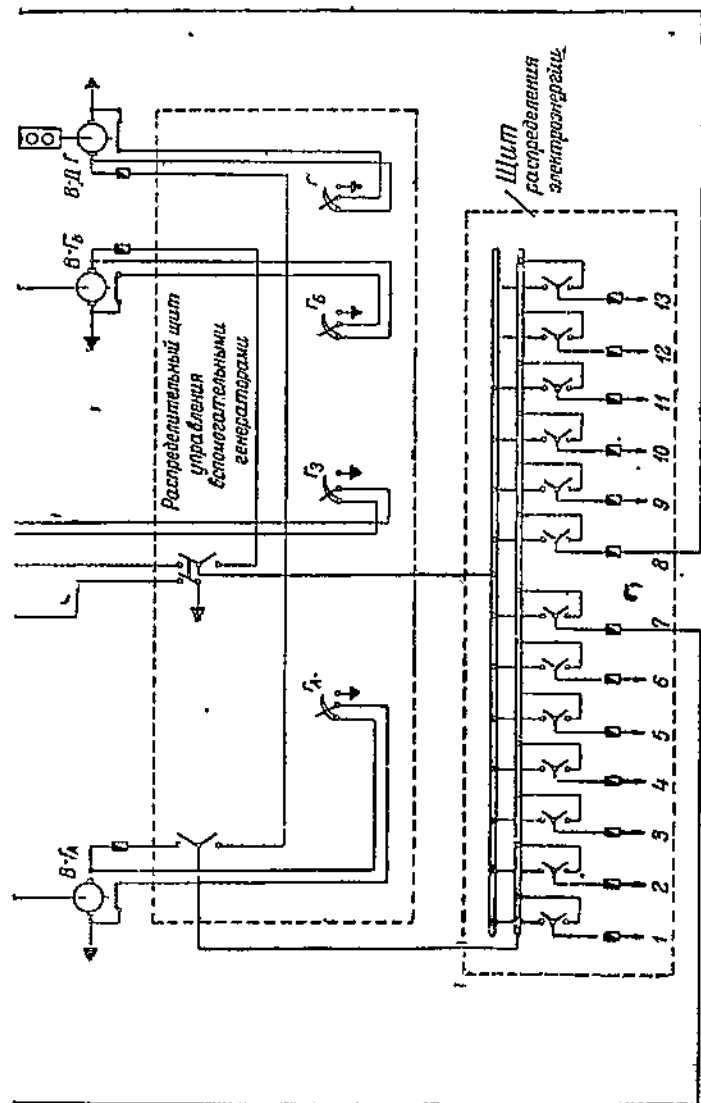
Одной из современных и удачно выполненных электрогребных установок постоянного тока является электрогребная установка на электроходе «Vogtland», переоборудованном из теплохода.

Схема электрохода «Vogtland» представлена на фиг. 63, согласно которой и подлежит более детальному разбору.

Представленная схема отображает соединения главных электромашин и управление их возбуждением, а также распределение электроэнергии для вспомогательных целей совместно с вспомогательными генераторами. Для упрощения схемы соединения, относящиеся к измерительным, защитным и сигнальным приборам, а также и самые приборы, опущены.

Гребная установка оборудована двумя электродвигателями ЭД<sub>1</sub> и ЭД<sub>2</sub> фирмы AEG, мощностью по 1300 квт (1770 л. с.) каждый.





Фиг. 63. Упрощенная схема электропривода на постоянном токе переоборудованного в 1938 г. судна „Vogland“ общества Hamburg American Line.

Нормальное напряжение электродвигателя 640в и число оборотов 230 в минуту. Электродвигатели установлены в старом машинном отделении, расположенном в средней части судна, и приводят гребные винты через редукторы с передаточным числом 2,7, что снижает число оборотов гребного винта до 85 об/мин. по сравнению с нормальными оборотами гребного электродвигателя. Гребные электродвигатели шунтового типа обслуживаются регулировочными реостатами  $R_{\Sigma 1}$  и  $R_{\Sigma 2}$ , позволяющими соответственно изменить вращающий момент и скорость гребных электродвигателей, что обеспечивает более эффективное использование гребных электродвигателей при различных длительных режимах работы установки. Для охлаждения гребных электродвигателей предусмотрены электровентиляторы  $\mathcal{B}-B_1$  и  $\mathcal{B}-B_2$ .

Для питания гребных электродвигателей установлено пять дизель-генераторов  $G_1-G_5$  мощностью по 600 квт и напряжением 350 в.

Генераторы включаются последовательно с гребными электродвигателями. Варианты различных включений генераторов с помощью переключателей  $P_1-P_5$  были рассмотрены выше.

Для управления возбуждением генераторов применены реверсивные контроллеры  $K_1-K_5$ . Контроллеры первых трех генераторов  $K_1-K_3$  помещены в одной тумбе управления, а контроллеры двух остальных генераторов  $K_4-K_5$  помещены в другой тумбе управления. Действие реверсивных контроллеров управления на возбуждение генераторов понятно из схемы.

Через контроллеры напряжение подводится к двухполюсным рубильникам  $P_1, P_2, P_4, P_5$  соответствующих генераторов и к двухполюсному переключателю цепи возбуждения  $P-B$  у генератора  $G_3$ .

Все рубильники и переключатель возбуждения  $P-B$  механически заблокированы с соответствующими переключателями  $P_1-P_5$ .

При включении главных генераторов в цепь гребных электродвигателей происходит подключение обмоток возбуждения генераторов к контроллерам управления, посредством которых обмотки возбуждения и получают питание. Генератор  $G_3$  при отключении от цепи гребных электродвигателей и включении его переключателя  $P_3$  на верхние контакты, может, в отличие от других генераторов, получать самовозбуждение, благодаря переключателю возбуждения  $P-B$ , механически заблокированного с переключателем  $P_3$ .

Экстренное выключение системы возбуждения генераторов и гребных электродвигателей можно произвести с помощью нажатия кнопки  $C$ , которая размыкает цепи катушек напряжения у автоматических выключателей  $A-B-B_1$  и  $A-B-B_2$ , а через последние происходит питание возбуждения машин электрогребной установки.

Подача напряжения к контроллерам проверяется по сигнальным лампам  $L_1$  и  $L_2$ .

Для питания цепей возбуждения машин электродвижения предусмотрены два фидера № 7 и № 8 (см. схему на фиг. 63, щит распределения электроэнергии). Эти фидера могут подводить электроэнергию для питания возбуждения отдельно к контроллерам управления, а именно, фидер № 7 через  $A-B-B_1$  к тумбе управления контроллеров  $K_1-K_3$ , а фидер № 8 через  $A-B-B_2$  к тумбе управления кон-

троллеров  $K_4 — K_5$ . Кроме того, каждый фидер может питать одновременно обе тумбы управления, т. е. всю систему возбуждения электрогребной установки. Для осуществления последнего условия в обоих автоматических выключателях возбуждения  $A-B-B_1$  и  $A-B-B_2$  предусмотрено по дополнительному выключателю  $B_1$  и  $B_2$ , соединенных между собой кабелем. С помощью этих выключателей и соединительного кабеля можно производить питание всей системы возбуждения машин электродвижения от одного любого из вышеперечисленных фидеров № 7 и № 8. Следовательно, система возбуждения машин электродвижения в отношении питающего фидера, так же как и в отношении возбудителей, — резервирована.

Для вспомогательных, целей электроснабжения предусмотрены четыре генерирующих единицы с двойной системой шин.

Первой генерирующей единицей является главный дизель-генератор  $G_3$ . При отключении этого генератора от цепи электродвижения и замыкании его переключателя  $P_3$  на верхние контакты происходит, как упоминалось выше, автоматическое переключение обмотки возбуждения генератора  $G_3$  на систему самовозбуждения, управляемую реостатом возбуждения  $r_3$ , расположенным на распределительном щите управления вспомогательными генераторами. Генератор  $G_3$  при работе его для вспомогательных целей можно приключить к верхней системе шин щита распределения электроэнергии.

Двумя следующими генерирующими единицами для вспомогательных целей являются вспомогательные генераторы  $B-G_A$  и  $B-G_B$ . Каждый из этих генераторов насажен соответственно на валу главного генератора  $G_1$  и  $G_5$ .

Генераторы  $B-G_A$  и  $B-G_B$  с самовозбуждением, управляемым посредством реостатов возбуждения  $r_A$  и  $r_B$ , которые расположены на распределительном щите управления вспомогательными генераторами; мощность генераторов  $B-G_A$  и  $B-G_B$  по 125 квт, напряжение 230 в. Генератор  $B-G_A$  может приключаться к нижним шинам, а генератор  $B-G_B$  к верхним шинам щита распределения электроэнергии.

Так как вспомогательные генераторы  $B-G_A$  и  $B-G_B$  насажены на общие валы с генераторами  $G_1$  и  $G_5$ , у последних предусмотрены дополнительные реостаты возбуждения  $R_{Г_1}$  и  $R_{Г_5}$  для поддержания нагрузки первичных двигателей в допустимых пределах.

Четвертым генерирующим агрегатом для вспомогательных целей служит вспомогательный дизель-генератор  $B-D-G$  мощностью 40 квт, напряжением 230 в. Последний генератор может питать нижнюю систему шин и предназначается главным образом для работы во время стоянки судна в портах.

Распределение электроэнергии для вспомогательного электроснабжения напряжением 220 в производится от щита с двойной системой шин, что позволяет соответствующим образом группировать нагрузку для обеспечения поддержания на некоторых фидерах постоянного напряжения и большей гарантии бесперебойности снабжения ответственных потребителей.

Каждый отходящий от щита фидер снабжен переключателем, что легко позволяет наиболее выгодным образом распределить и комбинировать нагрузку.

От щита распределения электроэнергии отходят следующие 13 фидеров:

Фидера №№ 1 (на 600 а), 2 и 3 (по 500 а) — обслуживают нагрузку машинного отделения.

Фидер № 4 (на 450 а) — питает нагрузку вспомогательных механизмов.

Фидера № № 5 и 6 (по 360 а) — питают распределительные щитки носовых и кормовых лебедок.

Фидера № № 7 и 8 (по 260 а) — обслуживают возбуждение электрогребной установки и электровентиляторы гребных двигателей.

Фидер № 9 (на 225 а) — питает распределительный щиток рефрижераторного устройства.

Фидер № 10 (на 300 а) — питает нагрузку прогулочной палубы и нагревателей.

Фидер № 11 (на 260 а) — питает нагрузку главной палубы.

Фидер № 12 (на 260 а) — обслуживает брашпиль.

Фидер № 13 (на 160 а) — питает распределительный щиток лебедок средней части судна.

В заключение отметим следующие отличительные особенности рассмотренной электроустановки постоянного тока на электроходе «Vogtland».

1. Гребная установка оборудована большим количеством генерирующих агрегатов (пять штук). Несмотря на большое количество генерирующих агрегатов, благодаря применению двойного и тройного контроллера, управление установкой весьма упрощено и является надежным вследствие отсутствия многих контакторных приспособлений.

2. Для несения вспомогательной нагрузки использованы три главных дизеля, что сводит к минимуму установку вспомогательных первичных двигателей и обеспечивает компактность установки.

Дополнительно установленным агрегатом для вспомогательных целей является только один небольшой дизель-генератор, работа которого требуется при стоянке судна в портах.

3. Дублирование питания системы возбуждения главных генераторов, которое можно рассматривать, как резервирование. Ходовые испытания электрохода «Vogtland», переоборудованного согласно рассмотренной схеме, были произведены в начале 1938 г. и дали удовлетворительные результаты.

### § 13. На переменном токе

Ознакомившись со схемой электродвижения на постоянном токе, перейдем к детальному рассмотрению наиболее типичных электрических схем современных турбо- и дизель-электроходов на переменном токе.

#### А. Разбор электрической схемы турбо-электроходов

Примером наиболее распространенной схемы электродвижения, применяемой на современных турбо-электроходах, оборудованных

двумя генерирующими агрегатами и двумя гребными синхронными электродвигателями, может служить схема электроходов «Иосиф Сталин» и «Вячеслав Молотов», выполненных для СССР в Голландии.

Схема электродвижения этих судов, в несколько упрощенном виде для более легкой ориентировки и с второстепенными опущениями электрических соединений, не относящихся непосредственно к вопросам электродвижения (как, например, опущены присоединения: электрических грелок главных машин, электроventilаторов для охлаждения гребных электродвигателей, термометров сопротивления, контролирующей степень нагрева главных машин), представлена на фиг. 64 (см. на вклейке в конце книги).

Большинство коммутационной, измерительной и сигнальной электрической аппаратуры, а также штурвалы управления с механической блокировкой, связанные с производством централизованных операций, смонтированы на общем столе, называемом пультом управления.

Перечень агрегатов и аппаратуры электродвижения, с краткими пояснениями, согласно нумерации, произведенной на схеме фиг. 64, приводится ниже.

#### Пояснение к схеме фиг. 64

##### 1. Электрическая часть

- 1—2 — питающие фидера.
- 3—4 — выключатели с ручным приводом, снабженные электромагнитной катушкой и катушкой пониженного напряжения для автоматического выключения выключателя.
- 5 — переключатель.
- 6 — амперметр, учитывающий общую нагрузку питающего фидера, включая и нагрузку от электроventilаторов гребных электродвигателей.
- 7 — линия питания защитной, контрольной и сигнальной аппаратуры. От этой же линии питаются и электроподогреватели генераторов и электродвигателей.
- 8—11 — блок-контакты, замкнутые при выключенном положении соответствующих штурвалов 4—4 и 5—5.
- 12—14 — преобразователи (мотор-генераторы) для питания возбуждения главных генераторов.
- 15—17 — плавкие предохранители у моторов преобразователей.
- 18—20 — переключатели для использования резервного мотор-генератора 13 для возбуждения главных генераторов.
- 21—26 — кулачковые выключатели для пуска 12—14, механически, заблокированные с соответствующими штурвалами 4—4.
- 27—30 — пусковые сопротивления.
- 31—32 — выключатели возбуждения генераторов преобразователей с блок-контактами, механически соединенные со штурвалами 5—5.
- 33—34 — сопротивления, шунтируемые на время пуска гребных электродвигателей, для создания наибольшего возбуждения главных генераторов.
- 35—36 — выключатели с блок-контактами для шунтирования соответственно сопротивлений 33—34. Эти выключатели размыкаются в положении 3 штурвалов 5—5, а в положении 0 этих штурвалов, что соответствует началу пуска, контакты 35—36 замкнуты. Выключатели механически соединены соответственно со штурвалами 5—5.
- 37—38 — реостаты возбуждения.
- 39—40 — реле с выдержкой времени (P-B), которые предупреждают слишком затяжной пуск гребных электродвигателей при перевозбужденных генераторах.
- 41—42 — амперметры, учитывающие нагрузку возбуждения главных генераторов.

- 43—44 — кулачковые выключатели возбуждения главных генераторов.
- 45—46 — разрядные сопротивления.
- 47—48 — обмотки возбуждения генераторов  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$ .
- 49—50 — главные синхронные турбогенераторы ( $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$ ) трехфазного тока напряжением 3150 в, мощностью 4500 ква,  $\cos \varphi = 1$ , 52,5 герц, число оборотов 3150 в минуту.
- 51—52 — электротермометры сопротивления (Т-С) главных генераторов  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$ . Каждый генератор имеет 2 электротермометра для подшипников, 3 — для обмотки, 1 для охлаждающего воздуха.
- 53—54 — электротаксометры, приводимые от валов генераторов  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$ .
- 55—56 — контакты, замыкающиеся при возникновении пожара в генераторах  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$ , воздействующие на выключающие электромагнитные катушки у выключателей 3—4 для снятия питания возбуждения генераторов и на включение катушек 57—58.
- 57—58 — электромагнитные катушки для включения механизма огнетушения (ВМОТ) главных генераторов.
- 59—60 — разъединители главных турбогенераторов  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$ . Эти разъединители механически приводятся от штурвалов 1—1 и соединены с блок-контактами 61—62.
- 61—62 — блок-контакты в цепи контактов 55—56.
- 63—64 — плавкие предохранители.
- 65—66 — трансформаторы напряжения.
- 67—68 — сигнальные реле заземления, дают световой и звуковой сигналы при заземлении обмотки статора.
- 69—70 — вольтметры с переключателями.
- 71—72 — ваттметры на пульте управления.
- 73—74 — регистрирующие ваттметры в каюте инженера.
- 75—76 — амперметры для определения нагрузки генераторов  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$ .
- 77—78 — реле балансной защиты (Б-Р) с контактами, замыкающими цепь выключающих катушек у выключателей 3—4.
- 79—80 — трансформаторы тока, встроенные в соединительные шины со стороны генераторов  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$ .
- 81 — трехполюсный разъединитель в соединительных шинах генераторов  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$ .
- 82 — низковольтный (24 в) фидер для питания счетчиков оборотов гребных электродвигателей.
- 83—84 — дуплекс-спидометры, из которых каждый представляет двойной тахометр — тахометр генератора (С-Г) и тахометр гребного электродвигателя (С-Э); тахометры снабжены каждый своей стрелкой, движущейся вдоль общей вертикальной шкалы.
- 85—86 — амперметры со стороны гребных электродвигателей для учета нагрузки последних.
- 87—88 — трансформаторы тока для питания амперметров 85—86.
- 89—90 — переключатели кулачкового типа для производства реверса гребных электродвигателей. Эти переключатели механически управляются от штурвалов 3—3.
- 91—92 — блок-контакты, связанные с реверсирующими переключателями для цепи контактов 93—94.
- 93—94 — контакты, замыкающиеся при возникновении пожара в гребных электродвигателях Э-Д<sub>1</sub> и Э-Д<sub>2</sub>, воздействуют на выключающие электромагнитные катушки у выключателей 3—4 для снятия питания возбуждения гребных электродвигателей и на замыкание катушек 95—96.
- 95—96 — электромагнитные катушки для включения механизма огнетушения (ВМОТ) гребных электродвигателей.
- 97—98 — звуковые сигналы, действующие при выпадении гребного электродвигателя из синхронизма.
- 99—100 — сигнальные реле выпадения гребного электродвигателя из синхронизма, дают световой сигнал и воздействуют на звуковой сигнал 97—98.
- 101—102 — трансформаторы тока.
- 103—104 — амперметры для учета нагрузки возбуждения гребных электродвигателей.

- 105—106 — механически-блокированные выключатели для шунтирования сопротивлений 107—108 при ходе судна в штормовую погоду.
- 107—108 — сопротивления.
- 109—110 — выключатели кулачкового типа для цепи возбуждения гребных электродвигателей; эти выключатели приводятся от штурвалов 5—5.
- 111—112 — контакты, замыкаемые при включении выключателей 109—110.
- 113—114 — проходные выключатели цепи возбуждения гребных электродвигателей, механически связанные с реверсивными переключателями 89—90.
- 115—116 — разрядные сопротивления.
- 117—118 — обмотки возбуждения синхронных гребных электродвигателей.
- 119—120 — синхронные гребные электродвигатели ЭД<sub>1</sub> и ЭД<sub>2</sub> трехфазного тока, напряжением 3150 в, мощностью 4350 кВт,  $\cos \varphi \approx 1$ ; 52,5 герц, число оборотов 225 в минуту.
- 121—122 — электротермометры сопротивлений (Т-С) гребных электродвигателей Э-Д<sub>1</sub> и Э-Д<sub>2</sub>. Каждый гребной электродвигатель имеет 2 электротермометра для подшипников, 3 для обмотки, 2 для охлаждающего воздуха.
- 123—124 — электротахометры, приводимые от валов гребных электродвигателей Э-Д<sub>1</sub> и Э-Д<sub>2</sub>.
- 125—126 — замыкающие контакты для счетчиков оборотов; контакты действуют от электротахометров 123—124.
- 127—128 — счетчики оборотов.
- 129—130 — одинарные соединительные выключатели, насаженные на штурвал 2, обеспечивающие или раздельное шунтирование обмоток возбуждения гребных электродвигателей на разрядные сопротивления 115—116 при раздельной работе гребных агрегатов, или возможность шунтирования обеих обмоток возбуждения гребных электродвигателей на разрядные сопротивления 115—116 при управлении обоими электродвигателями Э-Д<sub>1</sub> и Э-Д<sub>2</sub> от одного из штурвалов 5—5.
- 131—132 — двухполюсные соединительные выключатели, насаженные на штурвал 2. Эти выключатели обеспечивают возможность управления возбуждением обоих гребных электродвигателей Э-Д<sub>1</sub> и Э-Д<sub>2</sub> от любого из штурвалов 5—5.
- 133—134 — выключатели для управления возбуждением гребных электродвигателей Э-Д<sub>1</sub> и Э-Д<sub>2</sub> от одного из штурвалов 5—5, когда оба гребных электродвигателя приключены на параллельную работу от одного из главных генераторов. Эти выключатели механически связаны со штурвалами 5—5.

## II. Механическая часть

### Штурвалы для управления электрогребной установкой

Штурвалы расположены на пульте управления и между собой имеют механическую блокировку, которая позволяет производить включения штурвалов в порядке, соответствующем их номерам.

Штурвалы 1—7 служат для приключения главных генераторов Г<sub>1</sub> и Г<sub>2</sub> на свои шины.

Штурвал 2 служит для соединения гребных электродвигателей на параллельную работу от одного генератора и может включаться только в том случае, если один из генераторов приключен к шинам, а второй не приключен; после включения штурвала 2 нельзя приключать на шины оставшийся свободным генератор вследствие последовавшей соответствующей механической блокировки.

Штурвалы 3—3 служат для присоединения гребных электродвигателей Э-Д<sub>1</sub> и Э-Д<sub>2</sub> к шинам. Эти штурвалы обеспечивают возможность реверса гребных электродвигателей, а также производят включение проходных выключателей 114—115.

Штурвалы 4—4 служат для пуска мотор-генераторов 12—14.

Штурвалы 5—5 служат для возбуждения главных генераторов и включения возбуждения (введения в синхронизм) гребных электродвигателей.

Эти штурвалы имеют четыре положения: 0, 1, 2 и 3.

В положении 0 отсутствует возбуждение генераторов у преобразователей 12—14.

В положении 1 генераторы преобразователей возбуждены, что достигается включением выключателей 31—32.

В положении 2 включаются выключатели 43—44, что обеспечивает работу главных генераторов с перевозбуждением.

В положении 3 включаются выключатели 109—110, что обеспечивает возбуждение гребных электродвигателей, а затем по достижении синхронизма выключатели 35—36 размыкают, благодаря чему главные генераторы работают с нормальным возбуждением.

Штурвалы 6—6 связаны с регуляторами турбин главных генераторов. Помощью этих штурвалов регулируется число оборотов и мощность гребных электродвигателей.

Турбогенераторы, гребные электродвигатели и пульт управления гребной установкой изготовлены фирмой ASEA в Швеции.

Электрогребная установка рассчитана на два основных ходовых режима судна, а именно, на а) максимальную скорость судна в 20 узлов, б) экономическую скорость судна в 16 узлов.

Скорость судна в 20 узлов получается при раздельной работе обоих агрегатов с использованием максимальной номинальной их мощности.

В этих условиях каждый генератор приключается на свой гребной электродвигатель, и номинальный режим работы агрегата протекает при следующих данных:

1. Для генератора трехфазного тока, соединенного звездой. Мощность  $P = 4500$  квт, коэффициент мощности  $(\cos \varphi) \cong 1$ , число оборотов  $n = 3150$  в минуту, частота  $f = 52,5$  герц, напряжение  $V = 3150$  в, сила тока генератора  $I = 825$  а, сила тока возбуждения  $I_{\text{возб}} = 151$  а.

2. Для гребного электродвигателя трехфазного тока, соединенного звездой. Мощность  $P = 4350$  квт, коэффициент мощности  $(\cos \varphi) \cong 1$ , число оборотов  $n = 225$  в минуту, частота  $f = 52,5$  герц, подводимое напряжение  $V = 3150$  в, сила тока  $I = 825$  а.

Для хода судна при экономической скорости в 16 узлов достаточна работа одного генератора на оба гребных электродвигателя, приключенных на параллельную работу:

При экономическом ходе расчетные номинальные данные следующие:

1. Для генератора трехфазного тока, соединенного звездой. Мощность  $P = 3600$  квт, коэффициент мощности  $(\cos \varphi) \cong 1$ , число оборотов  $n = 2400$  в минуту, напряжение  $V = 2400$  в, частота  $f = 40$  герц, сила тока генератора  $I = 866$  а.

2. Для гребного электродвигателя трехфазного тока, соединенного звездой. Мощность  $P = 1740$  квт, коэффициент мощности  $(\cos \varphi) \cong 1$ , число оборотов  $n = 171$  в минуту, частота  $f = 40$  герц, подводимое напряжение  $V = 2400$  в, сила тока  $I = 466$  а.

Гребные электродвигатели с помощью фланцевого соединения непосредственно соединены с гребным валом.

Регулировка числа оборотов гребных электродвигателей производится путем изменения частоты подводимого тока, что легко и плавно достигается за счет изменения числа оборотов турбогенератора. Нижний предел скорости турбогенератора лежит около 20% нормального числа оборотов и этому пределу отвечает частота  $f = 10,5$  герц; при этом число оборотов гребного электродвигателя снижается до 45 об/мин.

Пуск гребной установки можно осуществлять следующим образом.

Запускают турбогенератор без возбуждения при числе его оборотов, примерно, в 20—25% нормального.

Дальнейшее изменение числа оборотов турбогенератора можно производить с пульта управления, для чего штурвал № 6 соединен с регулятором турбины.

Перед пуском гребной установки штурвалы на пульте управления должны находиться в нулевом положении. Штурвалы имеют механическую блокировку, которая позволяет производить включение в последовательности их нумерации по схеме фиг. 64.

С помощью штурвала 6 увеличение числа оборотов турбогенератора свыше 20% его нормальной скорости можно осуществлять только после предварительного включения остальных штурвалов.

Нулевое, или исходное, положение штурвалов 4—4 и 5—5, благодаря блок-контактам 8—11, позволит включить выключатели 3—4.

Через эти выключатели от щита вспомогательной станции подводится питание постоянным током системам: возбуждения главных агрегатов, их подогревателей, электровентиляторов для охлаждения гребных электродвигателей (последние два потребителя на схеме не указаны).

После пуска турбин и включения автоматических выключателей 3—4 можно приступить к пуску электрогребной установки. С помощью штурвалов 1—7 производим приключение генераторов на шины. Включение штурвалов 1—1 возможно только при закрытых дверцах пульта управления, что обеспечивает безопасность обслуживания высоковольтной коммутационной части гребной установки, сосредоточенной в пульте управления.

Включение штурвала 2 возможно только для условия работы одним генератором, т. е. для экономического хода судна. При включении штурвала 2 производится механическая блокировка, ограничивающая степень открытия регулятора турбины с помощью штурвала 6—6 в пределах соответствующей мощности генератора; работающего на два параллельно приключенных гребных электродвигателя.

После приключения генераторов на раздельную или параллельную работу гребных электродвигателей помощью штурвалов 3—3 можно присоединять гребные электродвигатели к генераторам.

При этом штурвалы 3—3 позволяют производить независимое присоединение гребных электродвигателей на передний и задний ход, т. е. электродвигатели могут работать оба вперед или назад, или один вперед, а второй назад. После подготовки посредством штурвалов 3—3 электрических соединений блока генератор—гребной электродвигатель или генератор—гребные электродвигатели можно перейти к включению штурвалов 4—4, управляющих пусковыми приспособлениями электродвигателей преобразователей.

При включении этих штурвалов происходит пуск соответствующих моторгенераторов 12—14. Включение штурвалов 4—4 можно производить независимо от других штурвалов, а выключать их можно только после предварительного выключения штурвалов 5—5.

Включение штурвалов 3—3 освободит механическую блокировку у штурвалов 5—5, после чего только имеется возможность включать последние.

Штурвалами 5—5 производится асинхронный запуск гребных электродвигателей от перевозбужденных генераторов с последующим вводом в синхронизм гребных электродвигателей.

Для соблюдения нормальных условий ввода в синхронную работу гребных электродвигателей служат дуплекс-спидометры 83—84, стрелки которых взаимно обращены друг к другу остриями. Стрелки указывают числа оборотов гребного электродвигателя и питающего его генератора, благодаря чему легко определить подходящий момент для ввода гребного электродвигателя в синхронную работу.

При раздельной работе гребных электродвигателей требуется раздельное включение штурвалов 5—5 и отдельные наблюдения по дуплекс-спидометрам 83—84.

При параллельной работе гребных электродвигателей операции по включению обоих гребных электродвигателей производятся от одного штурвала 5, соответствующего тому генератору, от которого производится питание гребных электродвигателей. При этом питание тахометров С-Г обоих дуплекс-спидометров производится от работающего генератора.

После введения гребных электродвигателей в синхронную работу переходят к штурвалам 6—6, с помощью которых и устанавливают соответствующий режим работы гребных электродвигателей.

Процесс реверсирования требует первоочередного включения штурвала 6—6, вследствие чего число оборотов турбогенератора снижается до исходного, т. е., примерно, до 20% нормального числа оборотов; затем выключают штурвал 5—5, благодаря чему снимают возбуждение у электродвигателя и генератора и с помощью штурвала 3—3 переключают электродвигатель на реверс; после этого, вновь включая штурвал 5—5, дают перевозбуждение генератору и по дуплекс-спидометру наблюдают за соотношением числа оборотов генератора и гребного электродвигателя; когда это соотношение достигает значения, позволяющего ввод в синхронизм асинхронно-работающего гребного электродвигателя, тогда дают возбуждение последнему путем поворота штурвала 5—5 в его крайнее положение.

После вступления гребного электродвигателя в синхронизм с помощью штурвала 6—6 увеличивают мощность и обороты электродвигателя.

Расчетное время реверса гребного электродвигателя с введением его на синхронную работу достигает 38 сек. (см. график на фиг. 9).

Фактическое время реверса, полученное при ходовых испытаниях, достигало 18—20 сек при скорости генераторов в 1000 об/мин.

Положительной особенностью установленных электрогребных агрегатов на турбо-электроходах голландской постройки нужно отметить сравнительно высокий к. п. д. электрических машин.

На основании заводских испытаний, проведенных по косвенному методу, значения к. п. д. этих машин в зависимости от нагрузки их даются кривыми, приведенными на графике фиг. 65.

Из этих кривых видно, что общий к. п. д. электрогребного агрегата<sup>1</sup> достигает при максимальной скорости до 94%, а при коммерческой до 92,8%.

<sup>1</sup> Под общим к. п. д. электрогребного агрегата понимается произведение к. п. д. генератора и гребного электродвигателя, т. е.  $\eta_{\text{общ.}} = \eta_{\text{г.}} \eta_{\text{эл.-дв.}}$

Таким образом последний общий к. п. д. электрогребного агрегата при переменном токе может достигать большего значения по сравнению с к. п. д. одного только гребного электродвигателя на постоянном токе в условиях, примерно, одинаковой мощности электродвигателей (табл. 2, гл. I).

Интересно отметить, что вес гребного электродвигателя, установленного на турбо-электроходе «Иосиф Сталин», выражается в 42 т, из них на долю ротора с валом падает 17,5 т.

Вес же гребного электродвигателя постоянного тока, мощностью приблизительно в два раза меньшею (на дизель-электроходе «Труд» мощность гребного электродвигателя равна 2260 кВт), превышает, примерно, в полтора раза вес синхронного электродвигателя рассмотренных турбо-электроходов и равен около 65 т. Из этого веса на долю ротора с валом падает около 30 т.

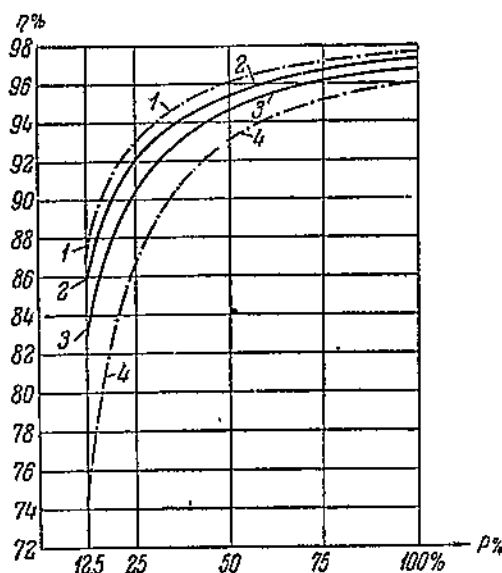
Точно так же и вес турбогенераторов трехфазного тока напряжением 3 кв, мощностью 4500 кВт, при 3000 об/мин, установленных на турбо-электроходах СССР, меньше веса генераторов постоянного тока напряжением 800 в, мощностью в 2470 кВт, при 360 об/мин., предназначенных для дизель-электрохода «Труд».

Вес последних без возбуждателя достигает 30 т, из них на долю якоря приходится около 15 т, вес же генераторов на турбо-электроходах, примерно, в 1½ раза меньше веса вышеуказанных генераторов постоянного тока.

Такая большая разница в весе главных электрических агрегатов в судовых условиях имеет вообще большое значение и особенно во время ремонта и осмотра роторов крупных агрегатов, когда приходится поднимать или удалять наиболее тяжелые детали.

## Б. Разбор электрической схемы дизель-электрохода «Wuppertal»

Для детального ознакомления с дизель-электроходными установками на переменном токе рассмотрим сравнительно подробную принципиальную схему электрооборудования, выполненного на первом большом дизель-электроходе «Wuppertal».



Фиг. 65.

Для генераторов: 2 — при 3150 об/мин.,  $P_{100\%} = 4500$  квт.,  $P_{100\%} = 3600$  квт., 3 — при 2400 об/мин.,  $P_{100\%} = 4500$  квт., 1 — при 225 об/мин.,  $P_{100\%} = 4350$  квт., 4 — при 171 об/мин.,  $P_{100\%} = 1800$  квт.

Это судно, как отмечалось, вступило в эксплуатацию в 1937 г., построено в Германии на Deutsche Werft для Hamburg American Line.

На судне установлены:

1. Три главных генерирующих агрегата, применяющие в качестве первичных двигателей семицилиндровые двухтактные дизеля простого действия, фирмы MAN, мощностью 2600 л. с., при 250 об/мин. Дизеля соединены с альтернаторами трехфазного тока фирмы Броун-Бовери мощностью 1900 ква, напряжением 2000 в.

2. Два вспомогательных генерирующих агрегата с первичными пятицилиндровыми четырехтактными двигателями мощностью по 220 л. с. при 500 об/мин. Дизеля соединены с трехфазными генераторами мощностью 150 ква, напряжением 380/220 в.

3. Одновальный гребной двигатель, состоящий из спаренных на общем валу двух электродвигателей трехфазного тока. Один, главный, электродвигатель синхронного типа с явно выраженными полюсами и демпферной обмоткой для асинхронного запуска. Мощность главного электродвигателя 5000 ква. Число оборотов главного электродвигателя составляет половину числа оборотов питающих его генераторов. Второй, так называемый вспомогательный, электродвигатель асинхронного типа, короткозамкнутый, мощностью 900 л. с. (664 ква) с числом оборотов, равным  $\frac{1}{3}$  скорости главных генераторов. Последний электродвигатель удобно используется во время маневров в гавани при низких оборотах гребного вала. Этот электродвигатель может обеспечить скорость хода судна не выше 9 узлов. Главный и вспомогательный электродвигатели могут работать только раздельно. К особенности гребных электродвигателей, установленных на «Wuppertal», нужно также отнести впервые примененные для этой цели роликовые подшипники.

4. Три мотор-генератора для преобразования переменного тока в постоянный, два из них служат для питания возбуждения главных генераторов и синхронного гребного электродвигателя, а третий является резервным. От этих же преобразователей питаются электродвигатели постоянного тока палубных механизмов (шпилей, брашпилей, лебедок).

5. Два масляных трехфазных понизительных трансформатора мощностью по 175 ква, преобразующие высокое напряжение 2000 в на 380/220 в и могущие питать вспомогательные электродвигатели и освещение судна от главных генераторов.

Применение масляных силовых трансформаторов в судовых условиях впервые осуществлено на электроходе «Wuppertal».

При длительном ходе судна питание шин 380/220 в производится обычно от главных генераторов через понизительные трансформаторы  $2 \times 175$  ква. Во избежание колебания напряжения при ходе судна, особенно во время регулировки и изменения скорости гребного электродвигателя, которая требует изменения скорости главных генераторов, для осветительных потребителей и для бытовой нагрузки (камбуза) применены два специальных трансформатора мощностью по 20 ква с регулировкой для поддержания постоянства напряжения.

Асинхронные электродвигатели трехфазного тока, мощность и число оборотов которых зависят от напряжения и частоты тока, могут

применяться для привода вспомогательных механизмов обслуживающего значения, как, например, циркуляционные насосы охлаждения дизелей, топливные насосы, сепараторы и др., без всяких ограничений, так как при снижении скорости главных агрегатов от них требуется и соответственно меньшая производительность.

Что касается вспомогательных механизмов общего потребления, таких как баластные насосы, насосы питьевой воды, санитарные насосы, вентиляторы и др., то для привода их приходится выбирать асинхронные двигатели с некоторым запасом мощности, чтобы при снижении числа оборотов главных агрегатов их производительность оставалась бы еще достаточной.

Допустимое изменение частоты тока для удовлетворительной работы электродвигателей вспомогательных механизмов на электроходе «Wuppertal» лежит в пределах 50—36 периодов. Если по условиям эксплуатации судна частота тока главных генераторов, питающих гребной электродвигатель и вспомогательные механизмы, будет лежать ниже 36 периодов, то для удовлетворительной работы вспомогательных механизмов требуется отключение от шин гребного электродвигателя одного из трех параллельно работающих главных генераторов с использованием его исключительно для вспомогательной нагрузки в условиях раздельной, независимой работы. Для удовлетворения последнего обстоятельства на пульте управления у главного штурвала, управляющего регулировкой оборотов гребного электродвигателя, имеется блокирующее приспособление, которое не позволяет вести параллельной работы трех главных генераторов при частоте ниже 36 периодов, и только после отсоединения одного из трех параллельно работавших генераторов имеется возможность вести с помощью главного штурвала дальнейшее снижение частоты генераторов, питающих гребной электродвигатель.

Таким образом разрешена возможность использования главных генераторов и для обслуживания нагрузки вспомогательных механизмов в условиях сравнительно широких пределов регулировки частоты переменного тока, питающего гребной электродвигатель.

Возможность использования главных генераторов для несения нагрузки вспомогательных механизмов во время хода судна позволила мощность вспомогательной электростанции свести к минимуму (2 агрегата по 120 квт), причем вспомогательные агрегаты предназначены главным образом для работы при стоянках судна в порту.

Схема распределения электроэнергии на первом крупном дизель-электроходе переменного тока приведена на фиг. 66 (см. на вклейке в конце книги).

На приведенной схеме указано следующее основное электрооборудование:

1—3 — главные дизели фирмы MAN.

4—6 — главные генераторы трехфазного тока.

7—9 — электротахометры для точного контроля числа оборотов главных агрегатов.

10—15 — трансформаторы тока для питания амперметров и ваттметров.

16—18 — амперметры для учета силы тока генераторов.

19—21 — ваттметры для учета нагрузки генераторов.

22—24 — амперметры для учета силы тока возбуждения генераторов.

- 25—27 — трехполюсные высоковольтные автоматические выключатели с ручным управлением для приключения генераторов на шины 46. Эти выключатели механически заблокированы с выключателями 31—39.
- 28—30 — трехполюсные высоковольтные автоматические выключатели с ручным управлением для приключения генераторов на шины 47; эти выключатели механически заблокированы с выключателями 40—45.
- 31—33 и 40—42 — проходные выключатели для приключения обмоток возбуждения генераторов на разрядное сопротивление 59, при автоматах 25—30.
- 34—36 — проходные выключатели для приключения обмоток возбуждения главных генераторов, соответственно на разрядные сопротивления 59—61, при включенных автоматах 25—27 и при нахождении пускового контроллера 56 в положении 0—I.
- 37—39 — проходные выключатели для питания током через автомат 73 обмоток возбуждения главных генераторов, при включенных автоматах 25—27 и при нахождении пускового контроллера 56 в положении II—IV.
- 43—45 — проходные выключатели для питания током через автомат 72 обмоток возбуждения главных генераторов при включенных автоматах 28—30.
- 46 — сборные шины напряжением 2000 в для приключения на параллельную работу трех электрогенераторов. От этих шин производится питание гребных электродвигателей 52—53.
- 47 — вспомогательные шины напряжением 2000 в для питания трансформаторов 50—51.
- 48—49 — трехполюсные плавкие высоковольтные предохранители.
- 50—51 — понижительные трансформаторы трехфазного тока мощностью по 175 кВА, напряжением 2000/380—220 в.
- 52 — главный гребной электродвигатель трехфазного тока синхронный с асинхронным запуском, с явно выраженными полюсами и демпферной обмоткой, мощностью 5000 кВА, при нормальном числе оборотов 125 в минуту, напряжением 2000 в.
- 53 — вспомогательный гребной электродвигатель трехфазного тока асинхронный, с короткозамкнутым ротором, мощностью 900 л. с., при нормальном числе оборотов 83,3 в минуту.
- 54 — трехполюсный переключатель для приключения к шинам 46 одного из гребных электродвигателей.
- 55 — переключатель для производства реверсирования гребных электродвигателей. Управление переключателем реверсирования производится от контроллера 56.
- 56 — пусковой реверсирующий контроллер электрогребной установки, состоящий из двух частей — 56а и 56б; части 56а с пятью кулачками служит для управления реверсирующим переключателем 55 часть же 56б имеет 1—16 кулачков и служит для управления контактами цепей возбуждения: главных генераторов, гребного электродвигателя 52 и генераторов преобразователей 80—82. Контроллер 56 имеет следующих 9 положений:

Среднее положение 0 — отвечает отключению гребных электродвигателей от шин генераторов, при снятом напряжении генераторов, когда последние приключены к шинам 46; в случае же приключения генераторов 4—6 к вспомогательным шинам 47 любой из этих генераторов может получать возбуждение через выключатель 72.

Четыре положения нижних (I, II, III и IV) аналогичны четырем верхним положениям (I, II, III и IV); нижнее положение контроллера отвечает пуску электрогребной установки для хода судна «назад», а верхнее положение — ходу судна «вперед».

При положении реверсирующего контроллера I производится включение реверсирующего переключателя 55.

При положении II происходит размыкание контактов 6, 8 и 10 и замыкание контактов 5, 7, 9, благодаря чему происходит питание обмоток возбуждения главных генераторов при приключении последних на шины 46. Контакт 12 контроллера также замыкается, что обеспечивает перевозбуждение главных генераторов на время асинхронного запуска гребного электродвигателя 52.

При положении *III* замыкаются контакты *3*, *13* и *16*, а контакты *4*, *11* и *12* размыкаются.

Замыкание контакта *3* и размыкание контакта *4* производит подачу возбуждения гребному электродвигателю *52*. При размыкании контакта *12* и замыкании контакта *13* сохраняется перевозбуждение главных генераторов за счет шунтирования реостата *67* сопротивлением *57* применительно к пусковым условиям вспомогательного электродвигателя *53*.

Замыкание контакта *16* влечет повышение напряжения у генератора преобразователя, вследствие чего получается перевозбуждение синхронного электродвигателя *52*; размыкание контакта *11* сопровождается вводом дополнительного сопротивления *58* в обмотку возбуждения главного генератора для компенсации повышенного напряжения генератора преобразователя, питающего одновременно возбуждение гребного электродвигателя *52*, и одного из главных генераторов *4—6* при приключении последнего на шины *47*.

При положении *IV* контакт *11* замыкается, а контакты *13* и *16* размыкаются, благодаря чему гребная установка приходит в режим с нормальным возбуждением ее агрегатов.

*57* — регулируемое сопротивление в цепи возбуждения возбудителя.

*58* — компенсационное сопротивление,

*59—62* — разрядные сопротивления.

*63* — амперметр для учета нагрузки возбудителя, работающего на возбуждение главных генераторов при их приключении к шинам *46*.

*64* — амперметр цепи возбуждения синхронного электродвигателя *52*.

*65—68* — реостаты для регулировки возбуждения генераторов преобразователей при работе их в качестве возбудителей главных генераторов и гребного электродвигателя *52*.

*69* — сопротивление.

*70* — выключатель, шунтирующий сопротивление *69* при работе электродвигателя *53*.

*71* — проходной выключатель в цепи возбуждения гребного электродвигателя *52*, замыкающийся при включении переключателя *64* на электродвигатель *52*.

*72—74* — автоматические выключатели преобразователей, которые служат для выключения цепи возбуждения главных генераторов и гребного электродвигателя при остановке и запуске, а также для выключения возбуждения при воздействии защиты.

*75* — реостат для регулировки напряжения преобразователей, когда один из них работает на сеть палубных механизмов *79*.

*76* — ограничивающие сопротивления выключающих катушек автоматов возбуждения *72—74*.

*77* — разрядные сопротивления обмоток возбуждения генераторов преобразователей *80—82*.

*78* — коммутатор с тремя положениями *I*, *II* и *III*, служащий для переключения генераторов преобразователей.

При положении *I* (изображенном на схеме) генератор *80* приключается для питания возбуждения главных генераторов при работе их на шины *46*; генератор *81* — для питания возбуждения электродвигателя *52* и главных генераторов при работе их на вспомогательные шины *47*; генератор *82* — для работы на сеть палубных механизмов.

При положении *II*: генератор *80* — для питания возбуждения главных генераторов, при работе на шины *46*; генератор *81* приключается на сеть палубных механизмов; генератор *82* — для питания возбуждения электродвигателя *52* и возбуждения главных генераторов при работе последних на шины *47*.

При положении *III*: генератор *80* приключается для питания палубных механизмов; генератор *81* — для питания возбуждения главных генераторов при работе их на шины *46*; генератор *82* — для питания возбуждения электродвигателя *52* и возбуждения главных генераторов при работе на шины *47*.

*79* — фидера для питания палубных механизмов.

*80—82* — генераторы постоянного тока преобразователей. Один из них предназначен для питания возбуждения главных генераторов при работе

на шины 46; другой обслуживает возбуждение электродвигателя 52 и главных генераторов при работе последних на шины 47. Третий является резервным для первых двух и вместе с тем его можно использовать для питания электродвигателей постоянного тока палубных механизмов.

- 83—85 — электродвигатели трехфазного тока для вращения генераторов 80—82.
- 86—87 — пятицилиндровые четырехтактные двигатели Дейтца.
- 88—89 — генераторы трехфазного тока вспомогательных агрегатов, напряжением 380/220 в, мощностью по 150 кв.
- 90—91 — возбуждители вспомогательных генераторов, сидящие на общем с ними валу.
- 92—93 — амперметры в цепи возбуждения вспомогательных генераторов.
- 94—96 — плавкие предохранители.
- 97—98 — трехполюсные выключатели для возможности непосредственного питания электродвигателей 84—85 от вспомогательных генераторов 88—89.
- 99—100 — трехполюсные автоматы для приключения вспомогательных генераторов 88—89 на шины 112.
- 101—103 — трехполюсные автоматы на фидерах электродвигателей преобразователей.
- 104—107 — трехполюсные переключатели для отходящих фидеров, позволяющие производить питание от любой из систем шин 112—113.
- 108 — трансформаторы с регулировкой постоянства напряжения для осветительной и бытовой нагрузки.
- 109—110 — шины осветительной и бытовой нагрузки.
- 111 — вольтметр на шинах 109—110.
- 112—113 — раздельная система шин напряжением 380/220 в.
- 114 — вольтметр на шинах 112—113.
- 115—118 — трансформаторы тока для контрольной и защитной аппаратуры фидеров понижительных трансформаторов 50—57.
- 119—120 — автоматические трехполюсные выключатели.

От токов короткого замыкания и токов заземления цепь высокого напряжения защищена помощью уравнительных реле напряжения (voltage equalization relays). Эти реле снабжены тремя выключающими собачками, каждая из которых может воздействовать на цепь катушек автоматических выключателей генераторов, если разница напряжений в фазах будет больше 10%.

Распределительное устройство позволяет приключать для питания гребного электродвигателя один, два или три главных генератора, а также можно питать от них вспомогательную нагрузку через понижающие трансформаторы.

Если же главные генераторы необходимо иметь только для обслуживания гребных электродвигателей, например, при приближении к гавани, то для несения вспомогательной нагрузки могут быть включены вспомогательные генераторы 88—89.

При ходе судна с малой скоростью в течение значительного времени, например, при тумане, желательна работа одного альтернатора на гребной электродвигатель, а два вспомогательных генератора используют для электроснабжения судна.

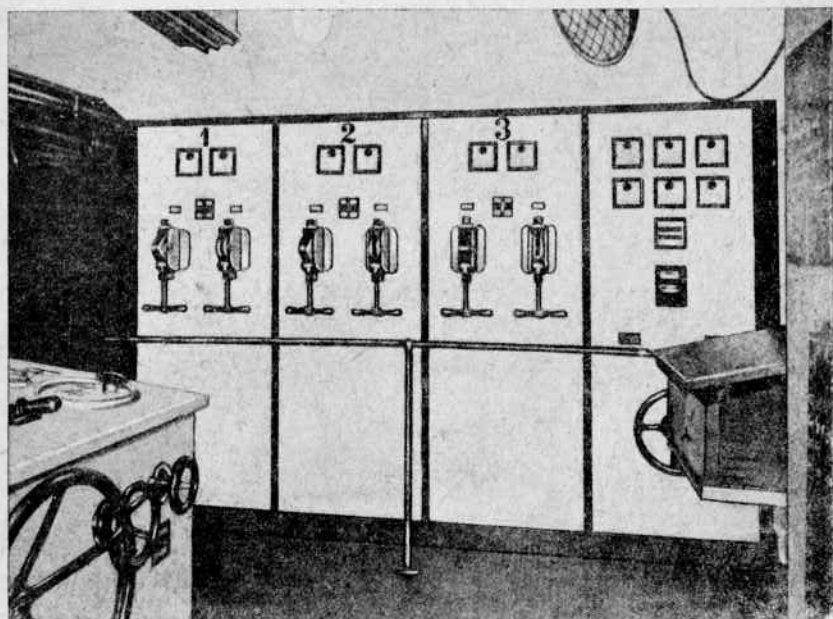
Когда производится маневрирование судна, то достаточно бывает мощности только двух главных генераторов, которые и приключаются на шины 46 гребного электродвигателя; третий генератор приключается на вспомогательные шины высокого напряжения 47.

В пределах изменения частоты, указанной выше (50—36 герц), работа всех трех генераторов может протекать при одинаковой скорости.

При отходе судна обычно пускаются все три главных дизеля посредством рычагов, расположенных на отдельных панелях управления для каждой машины. Общий вид распределительного щита высокого напряжения см. на фиг. 67.

Все машины запускаются до скорости 200 об/мин. После этого управление электрогребной установкой переходит на главный пульт, фотография которого приводится ниже (фиг. 68).

Скорость каждой машины регулируется посредством рычагов, расположенных налево (три маленьких рычага) от большого штурвала



Фиг. 67. Распределительный щит высокого напряжения на дизель-электроходе „Wuppertal“. С помощью этого щита электроэнергия генераторов подается для питания гребного электродвигателя и для вспомогательных механизмов через понижающие трансформаторы.

и видимых на фиг. 68. С помощью этих рычагов производится раздельное регулирование количества топлива каждого дизеля.

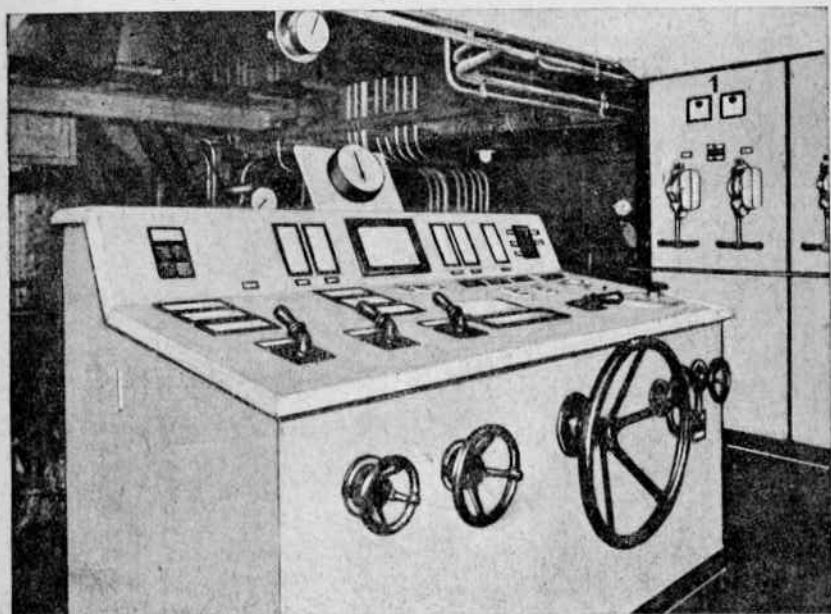
При параллельной работе главных агрегатов управление всеми параллельно приключенными агрегатами производится посредством одного рычага, видимого направо от большого штурвала (фиг. 68).

При пуске гребного электродвигателя скорость генераторов предварительно снижается, примерно, до 90—110 об/мин., затем с помощью большого штурвала приключается гребной электродвигатель и дается перевозбуждение генераторам, и приключенный к шинам генераторов гребной электродвигатель начинает работать асинхронно. После того как скорость гребного вала достигнет около 40 об/мин., главному электродвигателю дается возбуждение и он переходит на синхронную работу с генераторами, после чего возбуждение агрегатов приводится

к нормальному значению и, согласно распоряжению капитанской части, производится требуемая регулировка скорости гребной установки.

Как пуск, так и реверс гребной установки с последующим требуемым увеличением числа оборотов гребного вала свыше 40 в минуту осуществляется посредством большого штурвала.

Разобранная схема электродвижения на переменном токе дизель-электрохода «Wuppertal» свидетельствует о простоте управления



Фиг. 68. Пульт управления дизель-электрохода „Wuppertal“.

Большой штурвал служит для производства реверса гребного электродвигателя. Три рычага на пульте слева служат для управления скоростью генерирующих агрегатов каждого в отдельности; рычаг справа служит для одновременного управления скоростью всех главных генерирующих агрегатов.

гребной установки и положительном разрешении вопроса о применении переменного тока и для вспомогательных механизмов.

## § 14. Заключение

Первый удовлетворительный опыт с дизель-электроходом «Wuppertal» на переменном токе, оправдавший намеченные цели, позволил в дальнейшем расширить применение переменного тока на судах до технически возможных пределов.

Из-за недостаточности объема книги для подробного разбора схем других дизель-электроходов ограничимся только указанием на некоторые общие улучшения и расширения области использования переменного тока на последующих дизель-электроходах.

Так, например, на двух грузовых одновинтовых дизель-электроходах, построенных на верфи Blohm und Voss, принято по одному гребному электродвигателю синхронного типа, с асинхронным запуском. Это упрощает систему управления и обслуживания гребной установки на этих судах и повышает к. п. д. по сравнению с установкой на «Wuppertal».

На самом большом дизель-электроходе «Patria» (постройки 1938 г.) область применения переменного тока настолько расширена, что наличие на судне постоянного тока сведено к такому минимуму, как, например, питание системы возбуждения синхронных машин и питание палубных механизмов — лебедок, шпилей и брашпилей. Питание же рулевого электрогидравлического привода осуществлено на переменном трехфазном токе.

На двух вышеупомянутых грузовых дизель-электроходах, построенных на верфи Blohm und Voss (электроходы «Osorno» и «Huascarán»), все вспомогательные механизмы обслуживаются переменным током, и необходимость постоянного тока, получаемого от двух преобразователей, из которых один резервный, обусловлена только питанием возбуждения главных и вспомогательных дизель-альтернаторов.

Таким образом оборудование последующих дизель-электроходов указывает на полную возможность применения на судах этого типа гребных электродвигателей синхронного типа, с асинхронным запуском, что вполне аналогично оборудованию современных турбо-электроходов, а широкое внедрение переменного тока, включая и применение понижающих трансформаторов, начинает приближать судовые электроустановки к современному береговому электрооборудованию.

## Глава VI

### ОБСЛУЖИВАНИЕ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОГРЕБНЫХ УСТАНОВОК И КАНАЛИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

#### § 15. Питание вспомогательных потребителей электрогребных установок

Как видно из рассмотрения выполненных схем электродвижения, кроме электроэнергии, используемой непосредственно гребными электродвигателями, большей частью при высоком (более 250 в) напряжении, также требуется электроэнергия и низкого напряжения.

Электроэнергия низкого напряжения применяется для обслуживания вспомогательных потребителей электрогребных установок и в первую очередь для возбуждения главных машин. К вспомогательным потребителям электрогребных установок также могут относиться электродвигатели охлаждений и вентиляции гребных агрегатов и всевозможные их электроподогреватели, разные мелкие электродвигатели, защитная, сигнальная аппаратура и аппараты автоматического и дистанционного управления и другие подобные потребители.

Как известно, электростанции по обслуживанию общесудовой электрификации в силу специфических условий и требований почти

на всех судах выполняются на постоянном токе. Подобные электростанции, применяемые на электроходах по обслуживанию общесудовых потребителей и вспомогательных потребителей электродвижения, называются вспомогательными электростанциями. Вследствие того, что некоторые из перечисленных выше вспомогательных потребителей электрогребных установок, и в первую очередь возбуждение главных машин, требуют постоянного тока, то на современных электроходах охотно прибегают к выполнению вспомогательных электростанций также на постоянном токе. Это облегчает возможность использовать вспомогательные электростанции для непосредственного обслуживания постоянным током и электрогребных установок.

Современные электростанции по снабжению электроэнергией судна, которые на электроходах являются вспомогательными электростанциями, выполняются трех основных типов, а именно:

- 1) электростанции с отдельной системой работы генераторов или так называемые электростанции с выборной системой питания,
- 2) электростанции с параллельным подключением генераторов на сборные шины,
- 3) электростанции с параллельным подключением генераторов, работающих по системе Мейера.

Прежде чем перейти к выводу о наиболее подходящей системе выполнения вспомогательных электростанций для электроходов предварительно кратко ознакомимся с принципиальными особенностями каждой из трех перечисленных систем.

Электростанции первого типа, т. е. с выборной системой питания, имеют одно большое техническое преимущество, заключающееся в том, что эти системы гарантируют независимое питание одних потребителей от других при отдельном их подключении к нескольким работающим генераторам. Эти системы позволяют питать так называемые ответственные потребители отдельно от второстепенных потребителей, и все аварии, повреждения и ненормальности в работе последних, вызывающие отключение питающих их генераторов, совершенно не затрагивают бесперебойного снабжения электроэнергией ответственных потребителей.

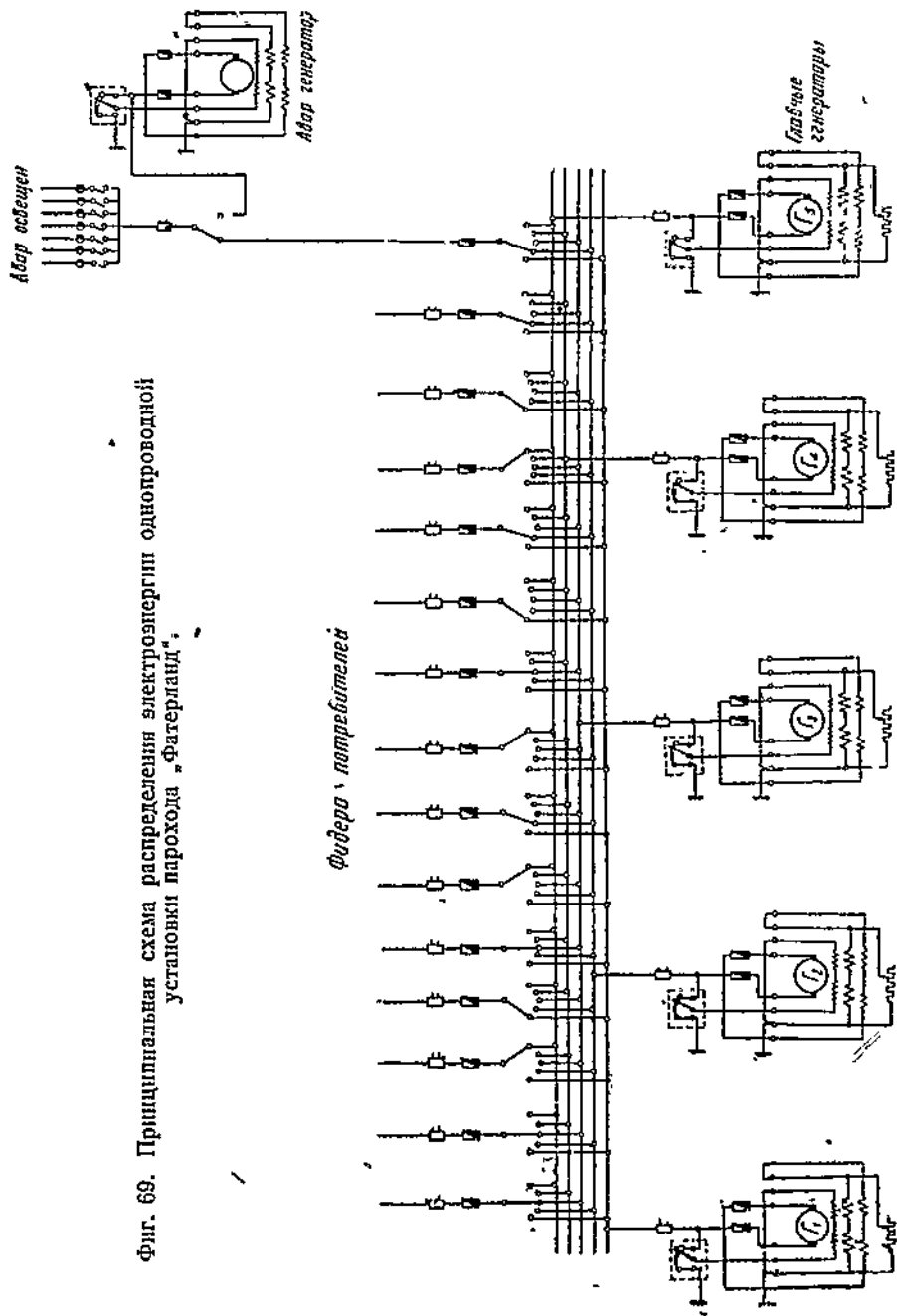
Подобные системы электростанций по обслуживанию общей электрификации судна нашли применение главным образом в Германии и осуществлены были на таких крупных судах, как, например, «Фатерланд», «Император» и «Бисмарк».

Основные данные судна «Фатерланд» следующие: полное водоизмещение 54 282 рег. т, мощность главных турбин 61 000 л. с., скорость 22,5 узла, мощность электростанции 1490 квт, напряжение — 115 в. Судно вступило в эксплуатацию в 1914 г. Принципиальная схема распределения электроэнергии с выборной системой питания, выполненная на пароходе «Фатерланд», приведена на фиг. 69.

Распределение электроэнергии осуществлено по однопроводной системе, с использованием металлического корпуса судна в качестве обратного провода.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Заграничные классификационные общества разрешают применять на судах однопроводные системы распределения электроэнергии. По действующим правилам Регистра СССР применение однопроводных систем на судах не разрешается.

фиг. 69. Принципиальная схема распределения электроэнергии однопроводной установкой парохода "Фатерланд".



Обращаясь к приведенной на фиг. 69 схеме, легко усмотреть, что каждого потребителя можно питать от любого из пяти генераторов и этим самым обеспечивать независимое питание ответственных потребителей.

Отмеченное одностороннее техническое преимущество выборных систем распределения электроэнергии требует сравнительно больших и сложных распределительных устройств, а по затратам осуществления и ремонта и в отношении эксплуатационных расходов эти электростанции являются дорогими. В силу экономических соображений на современных коммерческих судах новейшей постройки выборная система распределения электроэнергии почти не находит применения, включая и Германию.

Вторая система распределения электроэнергии, т. е. с осуществлением параллельной работы генераторов, экономически является более выгодной системой как в отношении эксплуатационного использования генерирующих агрегатов, так и в отношении габаритов и стоимости распределительных устройств. Возможность параллельной работы генераторов позволяет использовать их с оптимально-возможным коэффициентом полезного действия, чего нельзя иметь при выборной системе.

Применение надежной и особенно селективной защиты потребителей при электростанциях с параллельной работой генераторов сводит к минимуму возможность отключения генераторов от сборных шин, и только крупные аварии у второстепенных потребителей, при неисправности действия их защиты, могут повлечь отключение генераторов и вызвать перерыв в работе ответственных потребителей.

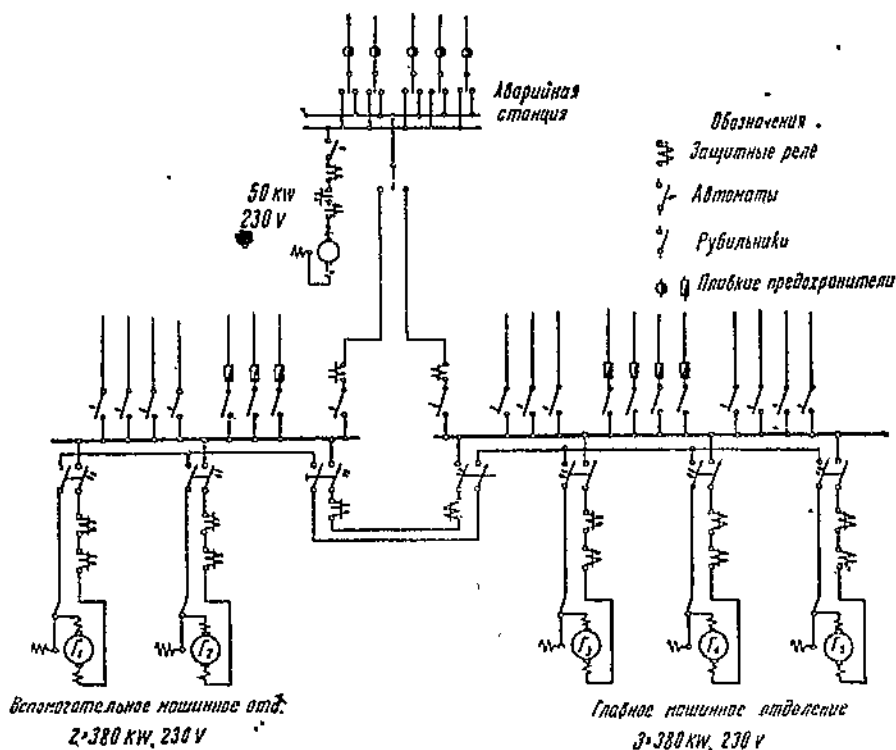
Вследствие экономических преимуществ электростанций с параллельной работой генераторов и сравнительно надежного действия современной защитной автоматической аппаратуры электростанции этого типа находят все более широкое применение на коммерческих судах. Примером осуществления электростанций с параллельным приключением генераторов могут являться многие крупные современные суда, а также, в частности, и коммерческие суда германского флота (названия последних приведены в табл. 15).

Таблица 15

| № по пор. | Наименование судна   | Год выпуска | Род главного двигателя или тип судна | Водоизмещение в т | Мощность главной машины в л. с. | Скорость в узлах | Электростанция |                |
|-----------|----------------------|-------------|--------------------------------------|-------------------|---------------------------------|------------------|----------------|----------------|
|           |                      |             |                                      |                   |                                 |                  | мощность в кат | напряжение в в |
| 1         | „Cap Arcopa“ . . .   | 1927        | Турбины                              | 27 560            | 24 000                          | 19,5             | 1520           | 230            |
| 2         | „Europa“ . . . . .   | 1930        | „                                    | 49 746            | 105 000                         | 27               | 2280           | 230            |
| 3         | „Potsdam“ . . . . .  | 1935        | Турбо-электроход                     | 17 518            | 26 000                          | 21               | 3100           | 230            |
| 4         | „Pretoria“ . . . . . | 1936        | Турбины                              | 16 662            | 14 200                          | 18               | 1860           | 230            |
| 5         | „Wilhelm Gustloff“   | 1938        | Теплоход                             | 24 000            | 9 500                           | 15,5             | 1960           | 230            |

Принципиальная однолинейная схема распределения электроэнергии с параллельным приключением генераторов, осуществленная на теплоходе «Wilhelm Gustloff», приведена на фиг. 70.

Электростанция этого современного судна оборудована пятью одно-типными генераторами, допускающими возможность параллельной работы на сборные шины. Последние с помощью автоматических выключателей секционированы, что гарантирует большую бесперебойность питания части ответственных потребителей в случае аварии на одной из секций шин. Фидера ответственных потребителей соответствующим образом распределены между двумя секциями шин, чтобы обеспечить большую живучесть судна.



Фиг. 70. Однолинейная принципиальная схема распределения электроэнергии на теплоходе „Wilhelm Gustloff“.

Аварийная станция имеет двойную систему шин, из которых одна система шин может получать питание от любой из секций шин главного распределительного щита. Благодаря двойной системе шин аварийной станции исключается возможность параллельной работы аварийного генератора с шинами главного распределительного щита, что легко проследить по схеме.

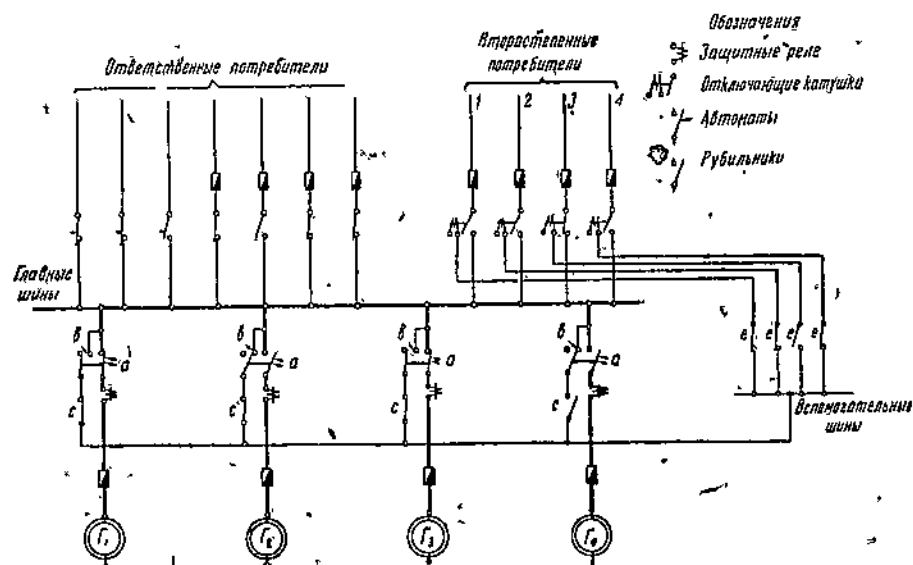
Третий вид приключения генераторов на общесудовых электростанциях по системе Мейера (Meuer) совмещает экономические преимущества возможности параллельной работы генераторов с необходимостью отключения второстепенных потребителей, для гарантии большей бесперебойности питания ответственных потребителей.

Идею совмещения экономических и технических преимуществ в системе Мейера легко понять из рассмотрения элементарной принципиальной, однолинейной схемы, представленной на фиг. 71.

Фидеры потребителей разбиваются на ответственных и второстепенных; выключатели последних снабжены отключающими катушками, получающими питание от вспомогательных шин при наличии на них напряжения.

Четыре генератора приключены в параллель на главные сборные шины.

Автоматические выключатели *a* генераторов снабжены дополнительными контактами *в*, помощью которых напряжение главных шин



Фиг. 71. Принципиальная схема распределения электроэнергии по системе Мейера.

подается на вспомогательные шины в случае автоматического отключения любого из генераторов от сборных шин. Для того чтобы напряжение главных шин не подавалось на вспомогательные шины при требуемом (ручном) отключении генераторов, цепь замыкаемых при этом вспомогательных контактов *в* снабжена рубильниками *с*, которые отключаются вручную. Напряжение главных шин, поданное на вспомогательные шины, производит питание отключающих катушек, которыми снабжены выключатели фидеров второстепенных потребителей. Таким образом при автоматическом отключении генератора одновременно происходит и отключение фидеров второстепенных потребителей, чем предупреждается перегрузка оставшихся в работе генераторов, а следовательно, не происходит и их отключения.

На приведенной схеме генераторы 1 и 3 продолжают работать на главные шины после того, как генератор 2 автоматически отключился. Выключение генератора 2 вызвало отключение фидеров 1, 2 и 4 вспомогательных потребителей. Провода отключающих катушек вспомо-

гательных фидеров у вспомогательных шин снабжены выключателями *e*, с помощью которых гарантируется, по желанию, бесперебойная работа любого из фидеров вспомогательных потребителей независимо от подачи напряжения на вспомогательные шины; для этого необходимо только предварительно выключить (вручную) требуемый выключатель *e*, как это, например, сделано на схеме у фидера 3 второстепенных потребителей.

Осуществление параллельной работы генераторов применительно к разобранной схеме Мейера не только предупреждает перерыв в питании фидеров ответственных потребителей при каких-либо авариях, сопровождающихся выходом из строя одного из параллельно работающих генераторов, но даже повышает надежность питания ответственных потребителей по сравнению с ранее разобранной выборной системой их питания, так как в системе Мейера питание ответственных потребителей происходит не от одного генератора, а от нескольких.

Вероятность выхода из строя одного генератора, работающего на ответственных потребителей в выборной системе, несравненно большая, чем возможность одновременного выхода из строя всех параллельно работающих по системе Мейера генераторов.

На основании произведенного рассмотрения основных типов общесудовых электростанций можем прийти к следующему выводу о технической целесообразности и возможности использования этих станций для питания вспомогательных потребителей электрогребных установок.

Так как вспомогательные потребители электрогребных установок относятся к ответственным потребителям, требующим бесперебойного снабжения их электроэнергией, то наиболее технически надежное и экономически выгодное питание вспомогательных потребителей электрогребных установок можно производить от общесудовых (в данном случае вспомогательных) электростанций лишь в том случае, если последние выполнены применительно к системе Мейера.

Подтверждением этому может служить принятое на наших турбо-электроходах питание вспомогательных потребителей от общесудовой (вспомогательной) электростанции, которая осуществлена с параллельным подключением генераторов на общие сборные шины по системе Мейера.

Принципиальная схема соединений вспомогательной электростанции наших турбо-электроходов постройки 1940 г. приведена на фиг. 72 (см. на вклейке в конце книги).

Вспомогательная электростанция оборудована пятью параллельно подключенными генераторами, из которых три, мощностью по 425 квт, приводятся турбинами и два дизель-генератора мощностью по 75 квт. Последние, называемые портовыми генераторами, предназначены, главным образом, для работы при длительных стоянках судна.

Общее количество отходящих фидеров от сборных шин электростанции равно 57, из них 4 фидера — I, II, III и IV — предназначены для питания вспомогательных потребителей электрогребной установки (фидера I и II обеспечивают питание линии 7 применительно к нумерации схемы электродвижения на фиг. 64; фидера III и IV схемы фиг. 72 соответствуют фидерам 1 и 2 схемы фиг. 64).

Остальные 53 фидера разбиты на две группы, а именно, второстепенных потребителей и ответственных потребителей. Десять фидеров: 12, 15, 24, 25, 26, 30, 32, 33, 34 и 35 обслуживают второстепенных потребителей, а прочие фидера отнесены к ответственным потребителям.

При перегрузке работающих генераторов на 10% или выше (что может иметь место вследствие выхода из строя одного из параллельно работающих генераторов) указанные фидера вспомогательных потребителей будут отключены, что предупреждает дальнейшую возможную перегрузку оставшихся в работе агрегатов. Для этого каждый генератор снабжен реле максимального тока  $C$ , настроенного на 110%  $I_{\text{ном}}$ . При срабатывании эти реле разрывают цепь питания катушек  $K$  контакторов на фидерах вспомогательных потребителей, в силу чего прекращается питание последних.

Приведенная схема распределения электроэнергии предусматривает дистанционное управление выключателями генераторов с помощью кнопок  $P$  и  $СТ$  и катушек  $H$ , а также дистанционное управление и большинства фидеров, отходящих от сборных шин станции.

В выполненной схеме приключения генераторов к сборным шинам вспомогательной электростанции интересно отметить, что плавкие предохранители, располагаемые обычно у самого генератора для его защиты, отсутствуют, а вместо них предусмотрены реле перегрузки  $B$ , настроенные на 200%  $I_{\text{ном}}$ .

Подобная замена плавких предохранителей перегрузочными реле обеспечивает бесперебойную работу генераторов на сборные шины в нормальных условиях эксплуатации, что не гарантируется плавкими предохранителями. Плавкие предохранители из-за снижения защитных свойств плавких вставок со временем (окисление и испарение металла) могут вызвать отключение генераторов даже в условиях нормальной их эксплуатации.

В остальном схема вспомогательной электростанции является нормальной схемой распределительных устройств с генераторами, приключенными на параллельную работу, и ясна при непосредственном рассмотрении фиг. 72.

Кроме рассмотренного питания вспомогательных потребителей электрогребных установок от общесудовых электростанций иногда предусматривают для питания этих потребителей отдельные агрегаты. Выполнение схем питания вспомогательных потребителей электрогребных установок от специальных агрегатов является более простой задачей и будет частным вариантом применительно к требованиям данной установки. Поэтому рассмотрение подобных частных схем и не представляет особого интереса.

## § 16. Канализация электроэнергии на судах

Электроэнергия для питания электрогребных установок применяется, как видели выше, обычно двух напряжений — высокого напряжения — для электрогребных двигателей и низкого напряжений (менее 250 в) — для вспомогательных потребителей.

По данным иностранной литературы можно считать, что до 90% всей мощности морских электроходов применяют напряжение 3000 в

для целей электродвижения, а остальные, почти все 10% по мощности, приходится на долю крупных электроходов, применяющих напряжение 5000 и 6000 в.

В соответствии с применяемыми на судах напряжениями — высоким, главным образом в 3000 в, для электрогребных установок, и низким, до 250 в, для обслуживания потребителей вспомогательных и общесудовых электростанций — канализацию тока в отношении требований к изоляции прежде всего можно подразделить на канализацию высокого напряжения и на канализацию низкого напряжения.

Как та, так и другая в качестве токоведущих элементов применяют кабельные изделия из меди и полосовые изделия: из меди или сплавов алюминия (силумина). Токоведущие полосы просто называют шинами. Изделия из полосовой меди и силумина или шины применяются для зашивки низкого и высокого напряжения распределительных щитов электростанций, пультов управления электрогребных установок и нередко для соединения главных генераторов с гребными электродвигателями в условиях близкого и подходящего их расположения.

При канализации из полосовой меди и силумина как высокого, так и низкого напряжения в качестве изоляционных прокладок и покрытий применяют негигроскопические и огнестойкие изолирующие материалы, среди которых первое место занимает micaнит, а при низком напряжении также нередко применяют гетинакс, а за последнее время начинают внедрять и изолирующие пластмассы.

Соединительные шины высокого напряжения прокладываются или в защитных кожухах, с надежной изоляцией для предупреждения всякой возможности прикосновения извне к высокому напряжению, или же, проложенные на щитах и пультах, требуют выполнения соответствующей блокировки, которая открывает доступ к шинам только при снятии напряжения. Шины, прокладываемые в кожухах, должны иметь доступ для осмотра и контроля их состояния.

Судовые кабели высокого и низкого напряжения различаются, главным образом, в отношении их изоляции и согласно правилам Английского Ллойда бывают:

- а) кабели для напряжений до 250 в — с резиновой изоляцией,
- б) кабели для напряжений до 660 в — с резиновой изоляцией,
- в) кабели для напряжений до 1000 в — с бумажной или кембриковой изоляцией,
- г) кабели для напряжения 3300 в — с бумажной или кембриковой изоляцией.

Из указанного подразделения видно, что кабели с резиновой изоляцией применяются для напряжений до 660 в, а для более высоких напряжений требуются кабели, имеющие бумажную или кембриковую изоляцию (кембриковая изоляция представляет батист, пропитанный изоляционными лаками).

Структура кабелей, толщины изоляционных слоев и защитных покровов, технические нормы и испытательные напряжения устанавливаются классификационными обществами в зависимости от назначения кабелей, места их прокладки и технических условий, предъявляемых к материалам, из которых изготавливаются кабели.

В отношении конструкции кабелей можно отметить только следующие общие положения:

1. Так как в судовых условиях приходится иметь дело с весьма ограниченными пространствами для монтажа, то поэтому прибегают к гибкой структуре кабелей, что достигается, главным образом, за счет многопроволочности отдельных жил кабеля (по правилам Регистра СССР все кабели и провода, начиная с сечения от 0,75 и до 1000 мм<sup>2</sup>, изготавливаются многопроволочные с числом проволок в жиле соответственно от 7 до 259; по правилам Английского Ллойда кабели сечением приблизительно до 2 мм<sup>2</sup> могут применяться с одной проволокой в жиле, остальные же кабели многопроволочные).

2. В отношении внешних оболочек наиболее распространенные судовые кабели выполняются:

- а) с голой свинцовой оболочкой;
- б) армированные кабели с оплеткой из тонких отожженных оцинкованных стальных проволок, поверх свинцовой оболочки;
- в) бронированные кабели, которые применяют поверх свинцовой оболочки защиту, большую частью из крупных стальных проволок, сплошь покрывающих кабель по винтовой линии, обычно с шагом от 13 до 16 наружных диаметров кабеля.

Между свинцовой оболочкой и наружным металлическим покрытием, а иногда и поверх последнего, применяют оплетки из пряжи с пропиткой для негигроскопичности. Бронированные кабели применяются для прокладки в местах, подверженных механическим воздействиям, могущим вызвать повреждение свинцовой оболочки.

Прокладка в таких местах кабелей с голой свинцовой оболочкой требует устройства защитных кожухов, в которых могут быть сгруппированы несколько кабелей.

3. Кабели выполняются одножильные, двухжильные и трехжильные, а также и многожильные, с общей защитной оболочкой. Для трехфазного тока лучше применять трехжильные кабели, так как от прокладки их через стальные переборки судна или крепления их на стальные переборки ток в кабеле не будет вызывать нагрева этих частей судна, а равным образом и других близко расположенных стальных и железных предметов, включая и стальные крепящие скобы. При одножильных же кабелях, под влиянием переменного магнитного поля, возникающего вокруг одножильных кабелей, в подобных условиях прокладки кабеля будет происходить нагрев ферро-металлических частей.

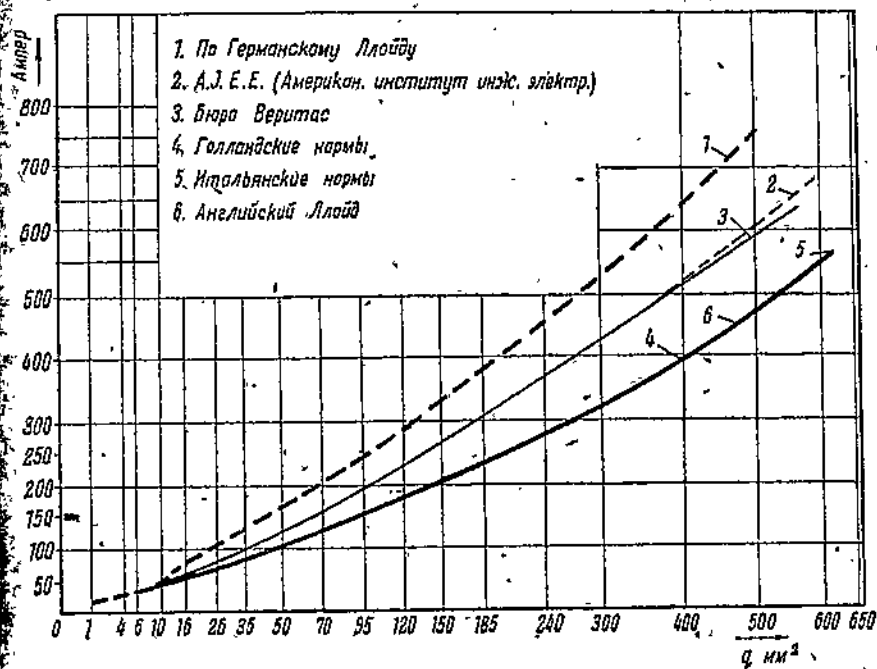
Во избежание нагрева наружных защитных оболочек одножильные оцинкованные кабели для переменного тока применяются с металлическим покрытием из немагнитных материалов. При прокладке одножильных кабелей переменного тока через стальные переборки или другие части судна из магнитных материалов кабели, обслуживающие потребителей, должны собираться в общую группу таким образом, чтобы практически устранить эффект индукции.

Расстояние между одножильными кабелями и частями из магнитных материалов должно быть (согласно правилам Английского Ллойда) не менее 75 мм (последнее условие не обязательно для кабелей с нагрузкой менее 10 а).

Согласно правилам того же Ллойда одножильные кабели переменного тока с нагрузкой 100а или выше, прокладываемые параллельно конструкциям из магнитных материалов, должны также располагаться от последних на расстоянии не менее 75 мм.

4. Все кабели должны обеспечиваться достаточной и надежной вентиляцией, чтобы допустимая нагрузка на кабели не вызывала большего их нагрева, чем это предусмотрено в нормах классификационных обществ.

Сечение токоведущей жилы кабеля выбирается в зависимости от нагрузки кабеля током. Нормы различных классификационных об-



Фиг. 73. Кривые максимально-допустимой длительной силы тока в зависимости от сечения меди кабелей с резиновой изоляцией по нормам классификационных обществ.

ществ по допустимой нагрузке кабелей током не совпадают между собой, что можно усмотреть из приводимого на фиг. 73 графика кривых, дающих зависимость между сечением жилы кабеля и максимально допустимой продолжительной силой тока на кабели, с резиновой изоляцией.<sup>1</sup>

Допустимая нагрузка кабеля током зависит не только от сечения жилы, но также от рода изоляции, от длительности нагрузки и от количества жил.

Для примера ниже дается таблица допустимых нагрузок в амперах на одножильные кабели согласно правилам Английского Ллойда (табл. 16).

<sup>1</sup> Нормы Регистра СССР ближе всего совпадают с нормами Германского Регистра.

## Максимально-допустимые нагрузки в амперах на одножильные кабели

| Сечение проводника |             | С резиновой изоляцией       |                           |                      | С бумажной изоляцией        |                           |                      | С кембриковой изоляцией     |                           |                      |
|--------------------|-------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------|
| в кв. мм           | в кв. дюйм. | нагрузка в течение 1/2 часа | нагрузка в течение 1 часа | непрерывная нагрузка | нагрузка в течение 1/2 часа | нагрузка в течение 1 часа | непрерывная нагрузка | нагрузка в течение 1/2 часа | нагрузка в течение 1 часа | непрерывная нагрузка |
| 1                  | 2           | 3                           | 4                         | 5                    | 6                           | 7                         | 8                    | 9                           | 10                        | 11                   |
| 9,35               | 0,0145      | 38                          | 37                        | 37                   | 60                          | 57                        | 57                   | 54                          | 51                        | 51                   |
| 14,5               | 0,0225      | 47                          | 46                        | 46                   | 79                          | 75                        | 75                   | 71                          | 68                        | 68                   |
| 19,3               | 0,03        | 56                          | 54                        | 53                   | 94                          | 89                        | 87                   | 84                          | 80                        | 78                   |
| 25,8               | 0,04        | 68                          | 65                        | 64                   | 113                         | 105                       | 104                  | 102                         | 95                        | 94                   |
| 38,7               | 0,06        | 92                          | 85                        | 83                   | 151                         | 138                       | 135                  | 136                         | 124                       | 122                  |
| 48,3               | 0,075       | 113                         | 101                       | 97                   | 180                         | 162                       | 157                  | 162                         | 146                       | 141                  |
| 64,5               | 0,1         | 142                         | 124                       | 118                  | 225                         | 199                       | 191                  | 203                         | 179                       | 172                  |
| 77,3               | 0,12        | 160                         | 138                       | 130                  | 252                         | 220                       | 210                  | 226                         | 198                       | 189                  |
| 97                 | 0,15        | 191                         | 164                       | 152                  | 303                         | 261                       | 246                  | 273                         | 235                       | 222                  |
| 129                | 0,2         | 247                         | 204                       | 184                  | 376                         | 320                       | 296                  | 338                         | 288                       | 266                  |
| 161                | 0,25        | 295                         | 244                       | 214                  | 453                         | 377                       | 343                  | 407                         | 340                       | 309                  |
| 193                | 0,3         | 351                         | 283                       | 240                  | 523                         | 435                       | 385                  | 470                         | 392                       | 346                  |
| 258                | 0,4         | 452                         | 357                       | 288                  | 663                         | 543                       | 464                  | 596                         | 488                       | 417                  |
| 322                | 0,5         | 534                         | 422                       | 332                  | 804                         | 648                       | 540                  | 723                         | 584                       | 486                  |
| 387                | 0,6         | 641                         | 499                       | 384                  | 960                         | 767                       | 624                  | 864                         | 690                       | 561                  |
| 483                | 0,75        | 774                         | 604                       | 461                  | 1180                        | 930                       | 738                  | 1061                        | 838                       | 664                  |
| 548                | 0,85        | 900                         | 680                       | 512                  | 1325                        | 1045                      | 815                  | 1190                        | 940                       | 733                  |
| 645                | 1,0         | 1036                        | 803                       | 595                  | 1548                        | 1211                      | 932                  | 1390                        | 1090                      | 839                  |

Для прокладки и крепления кабелей на судах в настоящее время за границей широко применяют панели из перфорированного (продырявленного) металла, главным образом из мягкой стали. Этот метод прокладки кабеля ускоряет монтаж, экономически выгоден и, до некоторой степени, улучшает условия охлаждения кабелей. Обычно изготавливаются стандартные перфорированные панели шириной от 10 до 60 см и длиной до 3 м.

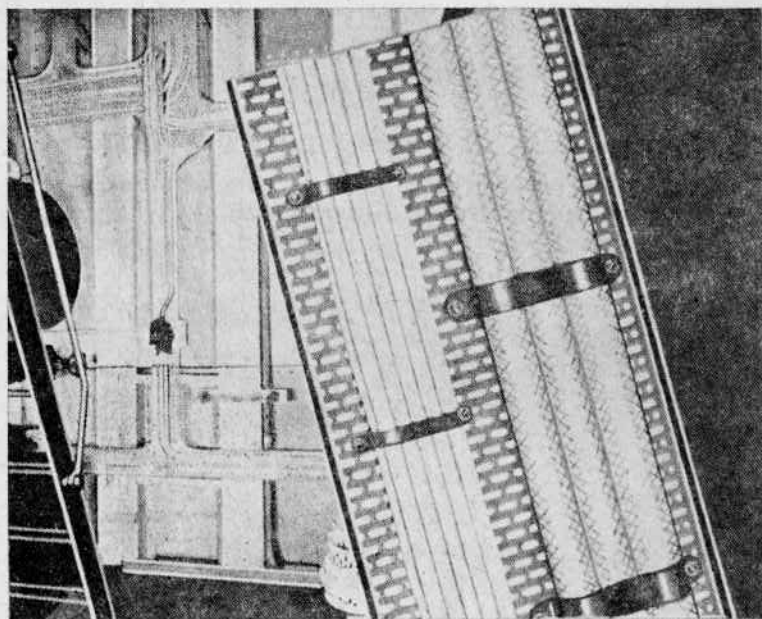
Примерный способ монтажа судового кабеля на перфорированных панелях дан на фиг. 74.

Для прокладки высоковольтных кабелей электрогребных установок нередко прибегают к устройству специальных кабельных кожухов. Примером подобных условий выполнения монтажа кабеля может служить способ прокладки кабеля, выполненный на дизель-электроходе «Wuppertal». На фиг. 75 дан эскиз разреза кабельного кожуха.

В верхней части расположен кабель высокого (2000 в) напряжения, соединяющий генераторное помещение с помещением гребных электродвигателей трехфазного тока. В нижней части находятся кабели постоянного тока для возбуждения.

Для условий улучшения охлаждения кабелей через кожух продувается воздух. Кабели высокого напряжения, как кабели переменного тока, смонтированы на желобах из силумина. Кабели предусмотрены

для возможности нахождения их в воде. Это позволяет, в случае возникновения пожара в трюмах судна, где пролегает кабельный кожух,

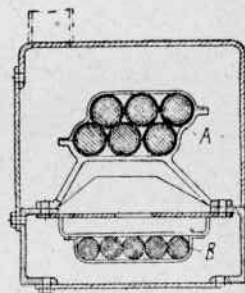


Фиг. 74.

заполнять кожух водой и тем самым предохранить кабели от повреждения огнем.

По правилам классификационных обществ металлический покров кабелей высокого напряжения подлежит надежному заземлению как на концах, так и на промежуточных участках.

В отношении высоковольтных кабелей нужно отметить, что кабели с кембриковой изоляцией стойки по своим изоляционным качествам и негигроскопичны. Они более предпочтительны по сравнению с кабелями, имеющими бумажную изоляцию, так как для предупреждения вытекания пропитывающего бумагу изоляционного масла, на концах кабелей с бумажной изоляцией необходимо предусматривать герметические наконечники в виде коробок, заполняемых маслом.



Фиг. 75. Сечение кожуха с кабелями на дизель-электроходе „Wuppertal“.

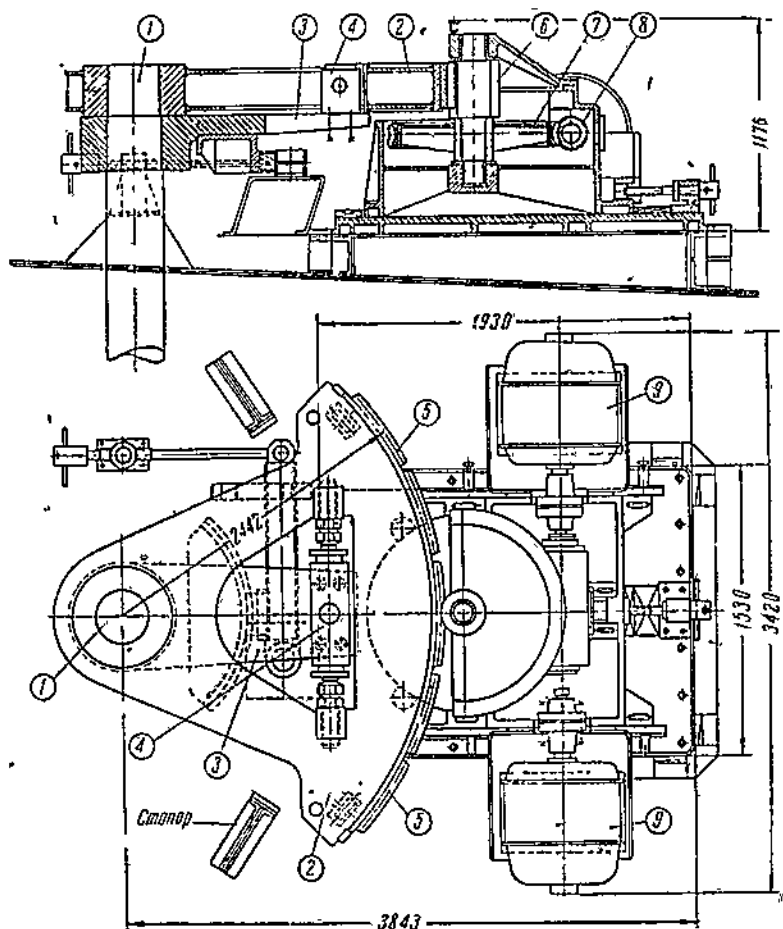
А — кабели высокого напряжения, В — кабели низкого напряжения.

# ЧАСТЬ ВТОРАЯ

## ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

### Глава VII. РУЛЕВОЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД

§ 17. Назначение рулевого устройства, основные типы рулей; определение вращающего момента. Классификация рулевых приводов



Фиг. 76. Рулевой электропривод.

1 — головка баллера, 2 — сектор, посажен свободно на баллер, 3 — руфель, закреплен на баллере, 4 — буферные пружины, 5 — зубчатые сегменты, прикрепленные к ободу сектора, 6 — зубчатая шестерня, 7 — колесо червячного зацепления, 8 — червяк привода, 9 — электродвигатель привода.

Рулевое устройство является одной из наиболее ответственных частей судна. Оно обеспечивает управление судна при его движении.

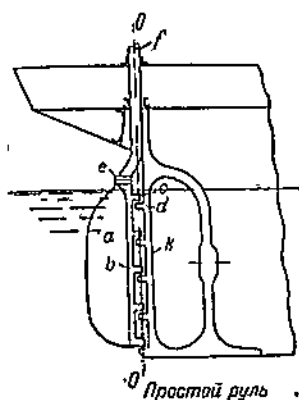
От исправного, надежного, бесперебойного, быстрого и точного действия рулевого управления большей частью зависит безаварийность плавания судна. Ответственность рулевого устройства возрастает вместе с интенсивностью и увеличенной скоростью современного движения судов.

Обычно рулевое устройство на судах состоит из следующих частей: собственно руля, механической передачи и привода.

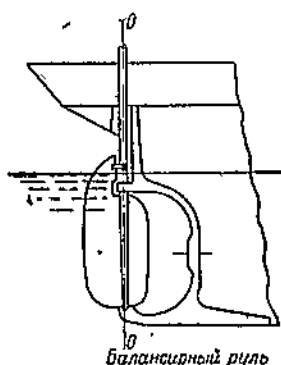
Общий вид одного из рулевых устройств приведен на фиг. 76.

Первая составная часть рулевого устройства, или собственно руль, представляет той или иной формы плоское тело, называемое пером руля, которое прикрепляется к стержню, называемому баллером. Отклонение пера руля производится вращением с помощью баллера вокруг оси последнего.

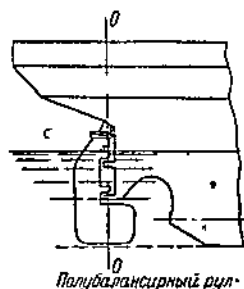
Рули на коммерческих судах встречаются следующих трех основных типов:



Фиг. 77.



Фиг. 78.



Фиг. 79.

1. Простой руль, у которого перо располагается по одну сторону относительно оси вращения. Тип простого руля представлен на фиг. 77.

Перо руля *a* с помощью выступающих петель *c* у рудерписа *b* ширирно крепится с выступающими петлями *d* кормовой части ахтерштевня *k*, именуемой рудерпостом. С помощью замка *e* перо руля жестко соединяется с баллером руля *f*. Ось баллера руля и шарнирного соединения пера руля расположены по одной прямой 00.

2. Балансирный руль. У этого руля перо располагается по обе стороны оси вращения. Тип балансирующего руля представлен на фиг. 78.

3. Полубалансирный руль. Полубалансирный руль, так же как и балансирный, имеет перо руля, расположенное по обе стороны оси вращения, но передняя, или так называемая балансирующая, часть пера имеет меньшую высоту по сравнению с задней частью пера. Тип полубалансирного руля представлен на фиг. 79.

Действие руля на управляемость или, другими словами, на изменение направления движения судна, сводится к следующему: если

перо руля с помощью баллера отклонить на некоторый угол  $\alpha$  по отношению к диаметральной плоскости судна, то встречный поток воды будет оказывать давление на перо руля.

По законам гидравлики сила давления воды на руль будет прямо пропорциональна проекции площади погруженной части пера руля на плоскость, перпендикулярную к набегающему потоку, и прямо пропорциональна квадрату скорости потока или, что то же, скорости движения судна по отношению воды.

Распределение сил, действующих на судно при отклонении пера руля, можно видеть на прилагаемом эскизе (фиг. 80).

AA — диаметральная плоскость,

oa — перо руля, отклоненное на угол  $\alpha$ .

Обозначим:

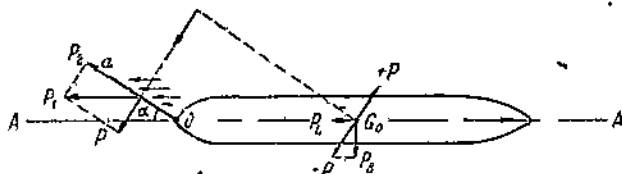
$F$  — площадь погруженной части пера руля в  $\text{м}^2$ ,

$v$  — скорость движения судна в узлах,

$G_0$  — центр тяжести судна,

$l$  — длина пера руля = oa в м,

$K$  — коэффициент пропорциональности для выражения давления в кг.



Фиг. 80.

Сила давления набегающего потока на площадь пера руля будет:

$$P_1 = KF \sin \alpha v^2 \text{ кг.}$$

Составляющая этой силы в направлении, перпендикулярном к плоскости пера руля, выразится уравнением:

$$P = P_1 \sin \alpha = KF \sin^2 \alpha v^2 \text{ кг.}$$

Прилагая в центре тяжести судна  $G_0$  две равных и взаимнопротивоположных силы  $+P$  и  $-P$  в направлении, перпендикулярном к плоскости пера руля, будем иметь следующую картину действующих на судно сил:

1 — сила  $P_2$ , направленная вдоль плоскости пера руля;

2 — силы  $P_L$  и  $P_R$  как результат разложения силы  $-P$  и

3 — пара сил  $PP$ .

Сила  $P_2$  обеспечивает движение оттекающих струй воды, отклоненных плоскостью пера руля;

Сила  $P_L$  является тормозящей силой;

Сила  $P_R$  вызывает небольшое боковое смещение судна.

Пара сил  $PP$  вызывает отклонение судна от прямолинейного его движения или создает так называемую циркуляцию судна.

Для создания требуемой циркуляции судна необходимо перо руля отклонить от диаметральной плоскости на соответствующий.

угол  $\alpha$ , для чего к баллеру руля нужно приложить вращающий момент, который должен быть равен вращающему моменту со стороны давления воды на руль относительно оси его вращения.

Для простого руля прямоугольной формы точку приложения равнодействующей давления на руль можно считать на расстоянии, равном половине длины пера руля, т. е.  $\frac{l}{2} = \frac{oa}{2}$ , и момент давления воды на руль относительно оси баллера будет:

$$M_G = KF \sin^2 \alpha v^2 \frac{l}{2} = 13,5 F v^2 \frac{l}{2} \sin^2 \alpha \text{ кгм.}$$

Теоретическое значение коэффициента пропорциональности при вышеуказанных значениях размерности величин найдено из выражения:

$$K = \frac{1000 \cdot 1850^2}{2g \cdot 3600^2} = 13,5.$$

где  $g$  — ускорение силы тяжести.

Теоретическое значение  $K$  найдено на основании известного в гидравлике выражения скоростного напора  $\frac{v^2}{2g}$ , где при размерности  $v$  м/сек. и  $g = 9,81$  м/сек<sup>2</sup> размерность скоростного напора будет в метрах водяного столба; 1000 — переводный коэффициент тонн в кг;  $\frac{1850}{3600}$  — переводный коэффициент узлов в м/сек.

Для определения давления на перо простого руля и момента от этого давления на баллере руля, помимо полученной теоретической формулы, существует ряд опытных формул, предложенных различными авторами, приводимых в табл. 17.

Таблица 17

| № по-<br>пор. | Автор<br>формулы         | Сила давления на перо<br>руля, перпендикулярная<br>его плоскости, в кг | Значение<br>давления<br>в проц.<br>от давле-<br>ния по<br>теорети-<br>ческой<br>формуле | Момент на баллере руля<br>$M_G$ в кгм                  | Значение<br>момента<br>в проц.<br>от момен-<br>та по тео-<br>ретиче-<br>ской фор-<br>муле |
|---------------|--------------------------|------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1             | 2                        | 3                                                                      | 4                                                                                       | 5                                                      | 6                                                                                         |
| 1             | Теоретиче-<br>ская . . . | $13,5 \sin^2 \alpha F v^2$                                             | 100                                                                                     | $13,5 \sin^2 \alpha F v^2 \frac{l}{2}$                 | 100                                                                                       |
| 2             | Ранкин . .               | $11 \sin^2 \alpha F v^2$                                               | 81,4                                                                                    | $11 \sin^2 \alpha F v^2 \frac{l}{2}$                   | 81,4                                                                                      |
| 3             | Эйлер . . .              | $13,8 \sin^2 \alpha F v^2$                                             | 102                                                                                     | $13,8 \sin^2 \alpha F v^2 \frac{l}{2}$                 | 102                                                                                       |
| 4             | Мидден-<br>дорф . .      | $15,8 \sin^2 \alpha F v^2$                                             | 117                                                                                     | $15,8 \sin^2 \alpha F v^2 \frac{l}{2}$                 | 117                                                                                       |
| 5             | Вейсбах . .              | $34,5 \sin \alpha (1 - \cos \alpha) F v^2$                             | 78,4                                                                                    | $34,5 \sin \alpha (1 - \cos \alpha) F v^2 \frac{l}{2}$ | 78,4                                                                                      |
| 6             | Жоссель . .              | $\frac{5,3 \sin \alpha F v^2}{0,2 + 0,3 \sin \alpha}$                  | 137                                                                                     | $5,3 \sin \alpha F v^2 l$                              | 137                                                                                       |

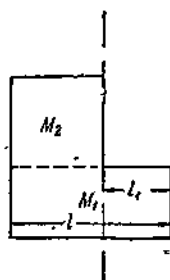
Сравнивая формулы различных экспериментаторов с полученной теоретической формулой, можно отметить, что наиболее близкой формулой по своему выражению к теоретической формуле является формула Эйлера; формулы Вейсбаха и Ранкина дают заниженное значение; формула Миддендорфа дает несколько большее значение. Самый больший результат из приведенных формул дает формула Жоссея.

Приведенная теоретическая формула не учитывает некоторых дополнительных факторов, влияющих на величину силы давления воды на перо руля, как, например, дополнительного коэффициента повышенной скорости поступающих струй воды на перо руля при расположении его позади гребных винтов по сравнению со скоростью движения судна вперед.

Этот дополнительный коэффициент больше единицы и поэтому будет ближе к действительности пользоваться формулами Миддендорфа или Жоссея. Приведенная теоретическая формула дает критерий на допустимость применения существующих формул для определения давления на перо руля и для определения момента сопротивления на баллере руля.

В практике судостроения нашего флота для расчета рулевых приводов обычно пользуются формулой Жоссея. Поэтому в дальнейшем при расчете рулевого электропривода и будем исходить из момента на баллере руля, получаемого по формуле Жоссея.

Для определения момента сопротивления на баллере балансирного руля Жосседем предложена формула следующего вида:



Фиг. 81.

$$M_0 = \frac{5,3 \cdot \sin^2 \alpha}{0,2 + 0,3 \sin \alpha} [(0,2 + 0,3 \sin \alpha) l - l_1] \text{ кг.}$$

где  $l_1$  — длина передней, или балансирной, части пера руля, в м.

Остальные значения те же, что указаны выше. Для определения момента сопротивления на баллере в случае полубалансирных рулей, плоскость пера руля разбивают на две части, из которых нижняя часть будет представлять балансирный руль с моментом сопротивления  $M_1$ , а верхняя часть будет представлять простой руль с моментом сопротивления  $M_2$  согласно прилагаемому эскизу (фиг. 81).

Момент сопротивления на баллере для полубалансирного руля будет равен сумме моментов балансирной части и простой части пера руля, т. е.:

$$M_0 = M_1 + M_2.$$

Управляемость судна характеризуется его циркуляцией, т. е. траекторией, весьма близкой к окружности, описываемой судном, если перо руля в течение некоторого времени неизменно держать под одним и тем же углом по отношению к диаметральной плоскости судна (см. эскиз циркуляции, фиг. 82).

Диаметр циркуляции  $D$  для морских судов коммерческого флота лежит обычно в пределах 6—8 длин судна. Зависимость диаметра цир-

куляции от основных размеров судна выражается также опытной формулой:

$$D = \frac{L^2 T}{10F} \text{ м,}$$

где:  $L$  — длина судна по ватерлинии или длина между перпендикулярами в м,

$T$  — осадка или глубина погружения судна в м,

$F$  — площадь погруженной части пера руля в м<sup>2</sup>.

Для обеспечения требуемой циркуляции или управляемости судна можно исходить и из площади пера руля в зависимости от площади погружения судна в вертикальной проекции, а также и назначения судна.

На основании выполненных судов площадь погруженной части пера руля берется:

для больших океанских судов:

$$F \cong \frac{1}{85} LT;$$

для грузовых судов:

$$F = \text{от } \frac{1}{40} \text{ до } \frac{1}{60} LT,$$

для небольших судов:

$$F = \text{от } \frac{1}{40} \text{ до } \frac{1}{50} LT.$$

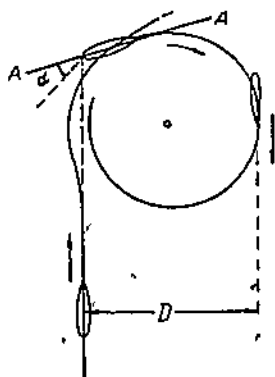
Чтобы в дальнейшем при расчете рулевого электропривода руководствоваться характером изменения момента сопротивления на баллере руля в зависимости от типа руля и положения пера руля по отношению к диаметральной плоскости судна, построим графическую зависимость изменения момента сопротивления на баллере:

$$M_6 = f(\alpha),$$

пользуясь вышеприведенными формулами Жосселя.

Из приведенных формул в табл. 17 для простого руля видно, что с увеличением угла отклонения пера руля  $\alpha$  от диаметральной плоскости значение момента давления на перо руля возрастает. Угол  $\alpha_{\max}$ , при котором обеспечивается максимальное значение вращающего момента судна, для коммерческих судов обычно лежит в пределах 35—40°. Значение  $\alpha_{\max}$  зависит от скорости судна, его длины и значения отношения площади пера руля к площади вертикальной проекции погружения судна; при этом для судов с относительно большей скоростью или с относительно меньшей длиной  $\alpha_{\max}$  имеет меньшие значения; для судов же с относительно малой скоростью или с относительно большой длиной нужно брать значение  $\alpha_{\max}$  большее.

Для сравнительного выяснения характера изменения момента сопротивления на баллере руля в нижеприводимой табл. 18 даны результаты подсчетов изменения  $M_6$  в зависимости от  $\alpha$ , равного от 0 до 35° для



Фиг. 82. Эскиз циркуляции судна при отклонении пера руля на угол  $\alpha = \text{const.}$

трех основных типов руля применительно к одному и тому же заданию, а именно, длина судна  $L = 125$  м, осадка  $T = 6,2$  м, скорость  $v = 20$  узлов,

$$F = \frac{1}{75} LT = 10,4 \text{ м}^3.$$

Перо руля с прямоугольными очертаниями; отношение длины передней части пера руля ко всей длине руля взято:

а) для балансирующего руля  $\frac{l_1}{l} = 0,24$ ,

б) для полубалансирующего руля  $\frac{l_1}{l} = 0,44$

при одинаковых площадях балансирующей части пера руля.

Таблица 18

| № по пор. | Значение $\alpha^\circ$ | $M_B$ в кг/м.              |                                  |                                      |
|-----------|-------------------------|----------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|
|           |                         | для простого руля $M_{B1}$ | для балансирующего руля $M_{B2}$ | для полубалансирующего руля $M_{B3}$ |
| 1         | 2                       | 3                          | 4                                | 5                                    |
| 1         | 0                       | 0,00                       | 0,00                             | 0,00                                 |
| 2         | 5                       | 3 230                      | — 210                            | — 1180                               |
| 3         | 10                      | 6 430                      | + 290                            | — 1380                               |
| 4         | 15                      | 9 500                      | + 1250                           | — 960                                |
| 5         | 20                      | 12 600                     | + 2600                           | 0,00                                 |
| 6         | 25                      | 15 400                     | + 4000                           | + 1300                               |
| 7         | 30                      | 18 400                     | + 5800                           | + 2700                               |
| 8         | 35                      | 21 200                     | + 7500                           | + 4300                               |

На основании табл. 18 построены графики изменения момента на баллере руля в зависимости от угла  $\alpha$  для трех основных типов рулей (фиг. 83).

Из приведенных графиков видно, что момент сопротивления на баллере балансирующего руля и полубалансирующего руля, подсчитанный по формуле Жосселя, в пределах от диаметральной плоскости ( $0^\circ$ ) до угла  $\alpha_1$ , имеет отрицательное значение, т. е. давление воды на перо руля создает как бы вращающий момент на баллере руля.

Ознакомившись с основными типами рулей в отношении выполнения пера руля и с формулами, позволяющими определять момент сопротивления на баллере руля, а также и характером изменения момента сопротивления на баллере руля в зависимости от типа руля и его положения по отношению к диаметральной плоскости судна, перейдем к знакомству с классификацией рулевых устройств с точки зрения их привода.

Прежде всего рулевые устройства разделяются на рули с ручным приводом и рули с механическим приводом. На морских самоходных судах применяются преимущественно рули с механическим приводом.

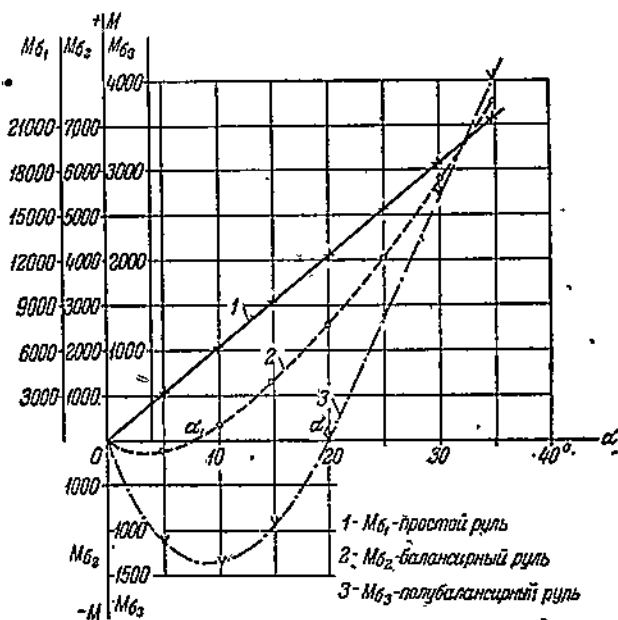
Последние бывают:

а) рулевые устройства с паровым приводом,

б) рулевые устройства с чисто электрическим приводом, где электродвигатель непосредственно сцепляется с механической передачей рулевого устройства,

в) рулевые устройства с комбинированным электрогидравлическим приводом, в которых электродвигатель воздействует на гидравлическую систему, которая и производит собственно перекачку руля.

В дальнейшем подлежат рассмотрению рулевые устройства с чисто электрическим приводом, поскольку на судах коммерческого флота СССР распространен, главным образом, этот тип рулевого электропривода, а также и рекомендован правилами Регистра СССР и, частично, рулевые устройства комбинированного электрогидравлического привода, которые находят широкое применение на коммерческих судах иностранного флота.



Фиг. 83.

Установки рулевых электроприводов можно различать:

1. По роду тока:

- а) с электродвигателями постоянного тока,
- б) с электродвигателями переменного тока.

2. В отношении источников питания приводных рулевых электродвигателей:

- а) с питанием от специальных агрегатов, обычно по системе Вард-Леонарда;
- б) с непосредственным питанием от общей судовой сети, обычно с контакторным и реже с контроллерным управлением.

3. В отношении дополнительного использования гидравлических передач:

- а) системы с непрерывно-вращающимися электродвигателями,
- б) системы с реверсивными электродвигателями.

#### 4. В отношении управления:

- а) электроприводы с простым управлением, в которых положение штурвала не предопределяет точного положения пера руля,
- б) с симпатической системой управления.
- в) с автоматической системой управления,

Из всех перечисленных систем наиболее распространенными рулевыми электроприводами на наших судах являются электроприводы постоянного тока с применением питания от агрегатов по системе Вард-Леонарда.

Правила Регистра СССР по электрооборудованию судов рекомендуют применять для рулевых электроприводов систему Вард-Леонарда как наиболее надежную по работе и оправдавшую себя благодаря простоте обслуживания. Применение других систем рулевых электроприводов допускается с особого разрешения Регистра СССР. Поэтому ниже наибольшее внимание и будет уделено рулевому электроприводу по системе Вард-Леонарда.

В отношении управления рулевым электроприводом нужно отметить, что в современных интенсивных условиях судоходства так называемая симпатическая система управления рулем имеет большие преимущества перед простой системой управления, так как непрерывно дает точную фиксацию положения руля в зависимости от положения штурвала. Эта система нашла широкое применение в заграничном коммерческом флоте, а также начинает распространяться и на суда нашего флота.

Применение автоматической системы управления рулем является более сложным и дорогим устройством, пригодным, главным образом, для судов, работающих на постоянных линиях большого протяжения, не требующих частой перемены курса.

### § 18. Расчет и выбор рулевого электропривода

Имея возможность находить момент сопротивления на баллере того или иного типа руля, можно от момента на баллере руля перейти к определению момента сопротивления на валу приводного двигателя.

Для рулей с электрическим приводом между баллером руля и приводным электродвигателем применяют механическую передачу. При определении момента сопротивления на валу рулевого электродвигателя необходимо располагать значением к. п. д. механической передачи между рулем и приводным электродвигателем с учетом потерь на трение в баллере руля и, кроме того, необходимо располагать и передаточным числом между баллером и валом приводного двигателя.

Момент сопротивления на валу приводного двигателя будет:

$$M_c = \frac{M_b}{\eta_{\text{мех}} K} \text{ кгм}, \quad (1)$$

где  $\eta_{\text{мех}}$  — к. п. д. механической передачи,

$K$  — передаточное число, т. е.

$$K = \frac{n_{\text{ал.-дв.}}}{n_{\text{балл.}}},$$

$K$ , п. д. механической передачи берется обычно меньше 0,5 для обеспечения условия самоторможения руля, чтобы не иметь произвольного изменения заданного положения руля под действием внешних усилий, действующих на перо руля (удары волн, качка и др.). При использовании для привода руля электродвигателей, имеющих при нормальном исполнении сравнительно большую угловую скорость по сравнению с угловой скоростью баллера, приходится прибегать к механическим передачам с большими передаточными числами. Значение передаточного числа механической передачи можно выразить в зависимости от числа оборотов электродвигателей такой формулой:

$$K = n \frac{2\pi t}{60 \cdot 2\alpha_{\text{max}}}, \quad (2)$$

где  $2\alpha_{\text{max}}$  — максимальное значение угла прокладки пера руля с борта на борт, которое лежит в пределах  $70-80^\circ$  и берется в радианах.

$t$  — время перекладки руля с борта на борт; последнее обычно предписывается классификационными обществами и по правилам Регистра СССР время перекладки руля с борта на борт не должно превосходить 30 сек.

При пользовании нормальными электродвигателями каталожного типа, число оборотов которых находится в пределах от 450 до 1500 об/мин., передаточное число соответственно должно иметь значения от 1000 до 3850. По условиям быстроты разгона предпочтительнее электродвигатели с меньшим числом оборотов.

При переднем ходе судна во время перекладки руля с борта к диаметральной плоскости руль будет получать вращающий момент вследствие давления воды на перо руля. Для балансирных и полубалансирных рулей момент на баллере при перекладке руля от диаметральной плоскости на борт в пределах от  $0^\circ$  до  $\alpha_1$ , как это следует из формул Жосседа и приведенных выше графиков, имеет отрицательное значение, т. е. является вращающим моментом со стороны пера руля.

Но так как для чисто электромоторных приводов механическая передача обычно берется с к. п. д.  $\eta_{\text{мех}} < 0,5$ , то, несмотря на наличие вращающего момента со стороны давления воды на руль, на валу электродвигателя необходимо иметь и в этом случае активный вращающий момент, который обозначим  $M_0$ , для преодоления сопротивлений в самотормозящей механической передаче.

В зависимости от величины  $\eta_{\text{мех}}$  находится и значение необходимого вращающего момента  $M_0$  на валу приводного электродвигателя как при прохождении рулем диаметральной плоскости, так и для перекладки руля в пределах наличия вращающих моментов со стороны давления воды на руль (или, другими словами, в пределах отрицательных моментов сопротивления на баллере руля).

Для упрощения определения момента сопротивления рулевого привода на валу электродвигателя полагают:

1. Что значение  $M_0$  постоянно в пределах:

- а) для простого руля от  $-\alpha_{\max}$  до  $0^\circ$  (т. е. при переключке с борта до диаметральной плоскости);  
 б) для балансирующего и полубалансирующего руля от  $-\alpha_{\max}$  до  $+\alpha_1$  (т. е. при движении руля с борта до диаметральной плоскости и за диаметральную плоскость в пределах отрицательных моментов сопротивления на баллере).

2. Что изменение момента сопротивления в пределах от  $0^\circ$  до  $\alpha_{\max}$  для простых рулей и от  $+\alpha_1$  до  $\alpha_{\max}$  — для балансирующих и полубалансирующих рулей — происходит по прямой линии.

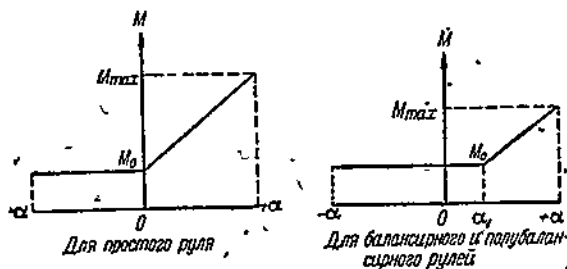
При расчете рулевых электроприводов величину необходимого вращающего момента  $M_0$  со стороны приводного электродвигателя обычно принимают:

для простых рулей

$$M_0 = \text{от } 10\% \text{ до } 20\% M_{\max},$$

для балансирующих и полубалансирующих рулей

$$M_0 = \text{от } 20\% \text{ до } 30\% M_{\max}.$$



Фиг. 84.

где  $M_{\max}$  — момент сопротивления рулевого привода, отнесенный к валу электродвигателя при  $\alpha_{\max}$ , определяемый по формуле Жоссея. Таким образом момент сопротивления на валу рулевого электропривода или, что то же, вращающий момент приводного электродвигателя для установившегося режима работы при полной переключке руля с борта на борт от  $-\alpha_{\max}$  до  $+\alpha_{\max}$  будет представлен следующим графиком (фиг. 84).

Пользуясь приведенным упрощенным графиком изменения момента сопротивления, отнесенным к валу электродвигателя, можно составить аналитическое выражение изменения момента в зависимости от угла  $\alpha^\circ$ , т. е. дать уравнение для функции вида:

$$M = f(\alpha^\circ).$$

Для простого руля имеем:

- а) на участке от  $-\alpha_{\max}$  до  $0^\circ$  переключка руля совершается в пределах  $\alpha_{\max}$  при постоянном моменте сопротивления:

$$M_{c1} = M_0 = \text{const.} \quad (3)$$

б) на участке от  $0^\circ$  до  $+\alpha_{\max}$  перекадка руля происходит в пределах  $\alpha_{\max}$  при переменном моменте сопротивления  $M_{c2}$ , общее выражение которого будет

$$M_{c2} = M_0 + b\alpha,$$

где значение углового коэффициента можно найти из частного выражения:

$$M_{\max} = M_0 + b\alpha_{\max},$$

$$b = \frac{M_{\max} - M_0}{\alpha_{\max}}.$$

Подставляя найденное значение  $b$  в выражение общего вида, имеем:

$$M_{c2} = M_0 + \frac{M_{\max} - M_0}{\alpha_{\max}} \alpha. \quad (4)$$

Для балансируемых и полубалансируемых рулей получим аналогичные же уравнения, только пределы применения соответственных уравнений будут:

а) для

$$M_{c1} = M_0 = \text{const. от } -\alpha_{\max} \text{ до } +\alpha_1,$$

т. е. в пределах

$$(\alpha_{\max} + \alpha_1);$$

б) для

$$M_{c2} = M_0 + \frac{M_{\max} - M_0}{\alpha_{\max}} \alpha \text{ от } \alpha_1 \text{ до } \alpha_{\max},$$

т. е. в пределах

$$(\alpha_{\max} - \alpha_1).$$

Полученные упрощенные выражения для моментов сопротивления на валу приводного электродвигателя и можно применить к выбору электродвигателей рулевого привода.

Вследствие значительных изменений момента сопротивления, а следовательно, и равного ему вращающего момента на валу приводного электродвигателя, необходимо прежде всего располагать таким электроприводом, который позволял бы производить в широких пределах изменение вращающего момента без чрезмерного потребления мощности из судовой сети. В то же время вращающий момент электропривода должен лежать в заданных ограниченных пределах во избежание возможных поломок рулевого устройства при случайном заедании, заклинивании или внешнем препятствии, мешающем перекадке руля. Кроме того, электропривод руля должен быть реверсивным, иметь минимум выключающих и контактных приспособлений, что обеспечит при многократных включениях и выключениях, достигающих иногда до 200—300 операций в час, наиболее бесперебойную работу такого ответственного элемента судна, каким является руль, особенно у быстроходных судов. Все эти основные требования автоматической регулировки в допустимых пределах потребляемой мощности, включая и возможный момент стоянки электродвигателя под током, необходи-

мость и быстрота производства реверса наиболее совершенно осуществляются при применении рулевого электропривода по системе Вард-Леонарда с противокомпаундной характеристикой генератора.

Располагая найденным аналитическим выражением момента сопротивления на валу приводного электродвигателя и зная уравнение механической характеристики приводного электродвигателя, можно разрешить вопрос о выборе подходящего электродвигателя путем приравнивания выражения для вращающего момента электродвигателя к выражению момента сопротивления, приведенного к валу электродвигателя.

Для возможности производства ориентировочного выбора каталожных габаритных размеров рулевых электродвигателей ниже приводится вывод приближенных формул механических характеристик электродвигателей и определение основных данных машин, как то:

- а) номинальной мощности  $P_n$  (часовой или получасовой),
- б) номинального числа оборотов —  $n_n$  применительно к заданию рулевого устройства.

Задание для выбора рулевого электропривода должно содержать:

1. Время переключки пера руля с борта на борт, значение которого должно быть не выше требований классификационного общества, т. е.  $T_{кл}$  ( $T_{кл}$  по Регистру = 30 сек.). В дальнейших расчетах учитывается время переключки,  $T \cong 0,9 T_{кл}$ , т. е. за вычетом времени, требующегося для разгона привода.

2. Максимальный угол отклонения пера руля на борт  $= \alpha^\circ_{\max}$ .

3. Максимальный момент сопротивления на валу электродвигателя

$M_{\max} = \frac{M_0}{\eta K}$ , или необходимые данные для определения момента сопротивления на баллере, при пользовании формулой Жосселя.

4. Передаточное число привода —  $K$ .

5. Максимально допустимый вращающий момент на валу электродвигателя при стоянке его под током, гарантируемый допустимой прочностью механической части привода; обычно  $M_{ст}$  берут в пределах от 1,7 до 2,5  $M_{\max}$ .

6. Значение необходимого вращающего момента  $M_0$  в зависимости от типа руля;  $M_0$  берут в пределах; указанных выше.

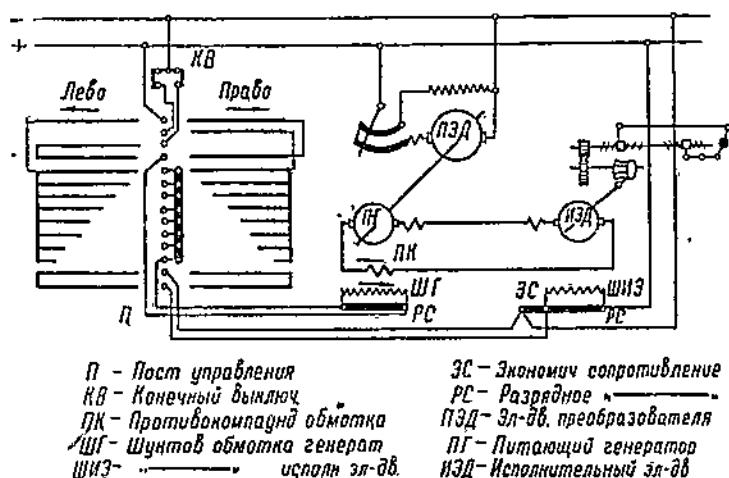
7. Напряжение судовой сети. Передаточное число привода рекомендуется выбирать таким, чтобы число оборотов приводного электродвигателя было близко 1500, 1000, 750, 600 и 500 об/мин., так как и электродвигатели постоянного тока нормальных типов в большинстве случаев имеют числа оборотов, близкие к стандартным синхронным оборотам электродвигателей трехфазного тока при частоте 50 герц.

Полученные основные данные  $P_n$  и  $n_n$  с механическими характеристиками электродвигателей и некоторыми дополнительными требованиями, как, например, продолжительность стоянки электродвигателей под током, указанием исполнения машин и аппаратов, сообщаются заводу-изготовителю для окончательного предложения электрооборудования руля.

В первую очередь перейдем к рассмотрению электропривода, оборудованного по системе Вард-Леонарда, которая, как отмечалось выше, рекомендована Регистром СССР для судов коммерческого флота.

Нижеприводимые расчеты относятся к выбору рулевых электродвигателей при переднем ходе судна, что для судов, оборудованных простыми рулями, является достаточным, так как для этого типа рулей момент при заднем ходе, скорость которого берется в пределах 0,5 до 0,7 скорости переднего хода, обычно меньше момента при переднем ходе судна. Что касается балансирующих и полубалансирующих рулей, то при выборе приводного электродвигателя для них требуется также и проверка электродвигателя на работу при заднем ходе судна, так как для указанных пределов заднего хода судна наибольший момент сопротивления рули этого типа имеют при заднем ходе.<sup>1</sup>

а) Рулевой электропривод по системе Вард-Леонарда с противокомпаундной характеристикой. Принципиальная схема включений электрооборудования по системе Вард-Леонарда с противокомпаундным генератором представлена на фиг. 85.



Фиг. 85. Принципиальная схема соединений отдельных элементов рулевого устройства по системе Вард-Леонарда.

При изменении направления тока в шунтовой обмотке генератора изменяется направление э. д. с. генератора, а также и направление тока в цепи якоря генератора, включая и противокомпаундную обмотку. Следовательно, противокомпаундность характеристики генератора при всех режимах работы установки сохранится.

Выражая число оборотов исполнительного электродвигателя

$$n_n = \frac{V_r - I_a R_n}{C_n \Phi_n} \text{ об/мин.}, \quad (5)$$

а вращающий момент на валу этого электродвигателя

$$M_n = 0,975 C_n \Phi_n I_a \text{ кгм}, \quad (6)$$

<sup>1</sup> В случае необходимости проверки рулевого электропривода для условий и заднего хода судна можно обратиться к специальной литературе, как, например, «Электрооборудование корабельных рулевых устройств» инж. Н. М. Хомякова.

где  $V_r$  — напряжение генератора,  
 $I_a$  — сила тока в цепи якорного контура генератора,  
 $C_n = \frac{N_n P_n}{60 a_n} \cdot 10^{-8}$  — постоянный коэффициент, зависящий от конструкции исполнительного электродвигателя,

$\Phi_n$  — магнитный поток полюса исполнительного электродвигателя.

$R_n$  — сопротивление цепи якоря исполнительного электродвигателя.

Если принять работу системы в условиях ненасыщенной магнитной цепи генератора и пренебречь явлением реакции якорей генератора и исполнительного электродвигателя, т. е. считать

$$\Phi_n = \text{const.},$$

а магнитный поток генератора  $\Phi_r$  в линейной зависимости от суммарных ампервитков обмотки его, тогда можно написать:

$$\begin{aligned}\Phi_r &= K_r a w_r = K_r (a w_{ш} - a w_{пк}), \\ \Phi_r &= K_r (a w_{ш} - w_{пк} I_a),\end{aligned}\quad (7)$$

где  $K_r$  — коэффициент пропорциональности  $= \frac{0,4\pi S_r}{l}$ ,

$a w_{ш}$  и  $a w_{пк} = I_a w_{пк}$  — ампервитки шунтовой и противокомпаундной обмоток генератора.

Электродвижущая сила генератора

$$E_r = \tilde{C}_r n_r \Phi_r = C_r n_r K_r (a w_{ш} - w_{пк} I_a),$$

где

$$C_r = \frac{N_r P_r}{60 a_r} \cdot 10^{-8},$$

$C_r$  зависит от конструкции генератора;

$n_r$  — число оборотов генератора для упрощения считаем постоянным.

$$\begin{aligned}V_r &= E_r - I_a R_r = C_r n_r K_r (a w_{ш} - w_{пк} I_a) - I_a R_r = \\ &= C_r n_r K_r a w_{ш} - (C_r n_r K_r w_{пк} + R_r) I_a,\end{aligned}$$

подставляя в выражение для  $n_n$  написанное значение  $V_r$  и заменяя  $I_a$  через  $M_n$ , т. е.:

$$I_a = \frac{M_n}{0,975 C_n \Phi_n},$$

получим выражение  $n_n$  в следующем виде:

$$n_n = \frac{C_r n_r K_r a w_{ш}}{C_n \Phi_n} - \frac{(C_r n_r K_r w_{пк} + R_r + R_n)}{0,975 C_n^2 \Phi_n^2} M_n.$$

Заменяя выражения постоянных в первом и втором членах уравнения соответственно через коэффициенты  $A$  и  $B$ , получим:

$$A - B M_n = n_n = n_{хх} - B M_n, \quad (8)$$

так как при  $M_n = 0$ ;  $A = n_{\text{хх}}$ , т. е. числу оборотов при холостом ходе исполнительного электродвигателя. Таким образом  $n_n$  представляет прямую наклонную линию.

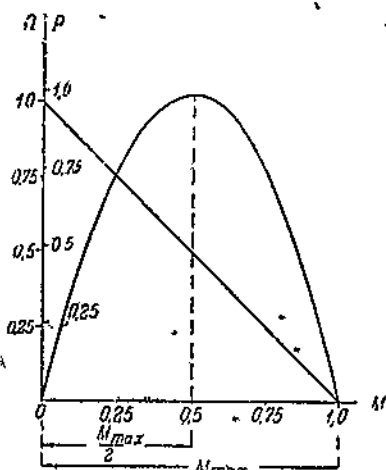
От уравнения (8) легко можно перейти к уравнению механической характеристики, т. е. к зависимости вида  $M = f(n)$ .

Для этого по частному случаю уравнения (8), а именно, при стоянке электродвигателя под током, т. е. при  $n_n = 0$  и  $M_n = M_{\text{ст}}$  определим значение коэффициента  $B$ :

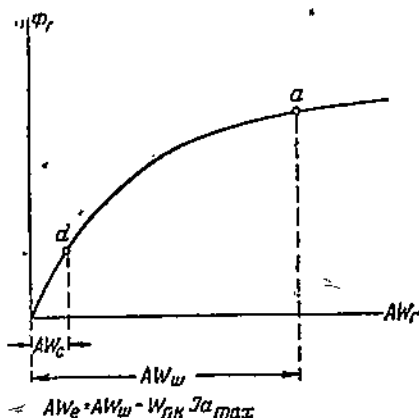
$$0 = n_{\text{хх}} - BM_{\text{ст}},$$

откуда

$$B = \frac{n_{\text{хх}}}{M_{\text{ст}}}.$$



Фиг. 86.



Фиг. 87.

Подставляя найденное значение  $B$  в уравнение (8), последнее напишется

$$n_n = n_{\text{хх}} - \frac{n_{\text{хх}}}{M_{\text{ст}}} M_n.$$

После преобразований уравнение механической характеристики исполнительного электродвигателя, работающего в системе Вард-Леонарда при ненасыщенной магнитной системе генератора, примет следующий вид:

$$M_n = M_{\text{ст}} \frac{n_{\text{хх}}}{n_{\text{хх}}} - M_{\text{ст}} \frac{n_n}{n_{\text{хх}}} = M_{\text{ст}} \left( 1 - \frac{n_n}{n_{\text{хх}}} \right). \quad (8a)$$

Мощность исполнительного электродвигателя выразится:

$$P_n = \frac{M_n n_n}{975} \text{ кВт} = \frac{A}{975} M_n - \frac{B}{975} M_n^2. \quad (9)$$

Полученное выражение  $P_n$  представляет уравнение параболы.

$P_n=0$ , когда  $M_n=0$ , т. е. при  $n_{xx}$  и когда  $n_n=0$ .

Графическое изображение характеристик:  $n=f(M)$  и  $P=f(M)$  для исполнительного электродвигателя при вышеуказанных упрощениях представится в следующем виде (фиг. 86).

За номинальную мощность исполнительного электродвигателя, работающего в системе Вард-Леонарда с противокомпаундным генератором, принимают его максимальную мощность.

В действительности генератор работает при насыщенной магнитной системе, что видно из приводимой кривой намагничивания генератора с противокомпаундной обмоткой (фиг. 87).

Точка  $a$  кривой соответствует холостому ходу исполнительного электродвигателя, а точка  $d$  — стоянке электродвигателя под током.

Следовательно, коэффициент  $K_r = \frac{\Phi_r}{aw_r}$  не является величиной постоянной, а переменной при изменении намагничивающих витков генератора.

Изменение величины  $K_r = \frac{0,4\pi S}{l} \mu = K_\mu$  зависит от изменения магнитной проницаемости  $\mu$ .

По данным А. S. Mc Allister'a изменение  $\mu$  в зависимости от магнитной индукции  $B$  можно, с достаточной степенью точности, представить таким уравнением:

$$\mu = 2800 - 3,2 \left[ \frac{(7500 - B)^2}{10^6} \right]. \quad (10)$$

Учитывая насыщенность магнитной системы при работе генератора в пределах изменения  $B$  от 7500 до 15 000 гаусс, этому увеличению  $B$  будет соответствовать уменьшение значения  $\mu$  от 2800 до 1000. Следовательно, имеем, что от увеличения  $B$  вдвое значение  $\mu$  снижается в 2,8 раза, а от увеличения  $B$  в 1,5 раза  $\mu$  снижается в 1,19 раза. Чтобы иметь увеличение  $B$  в 2 раза намагничивающие ампервитки необходимо увеличить, примерно, в 5,6 раза, а при увеличении  $B$  в 1,5 раза требуется увеличение ампервитков в 1,79 раза.

Для увеличения магнитной индукции  $B$  от 7500 до 15 000 гаусс, т. е. в 2 раза, необходимое увеличение намагничивающих ампервитков можно представить выражением:

$$2B = 5,6 Caw,$$

где

$$C = \frac{0,4\pi\mu}{l}.$$

Следовательно, численное изменение магнитной индукции в зависимости от изменения намагничивающих ампервитков для насыщенной магнитной цепи, где происходит обратное изменение  $\mu$ , приближенно можно представить квадратным корнем из коэффициента при  $aw$ , так как имеем:

а) для увеличения  $B$  в 2 раза:  $2 \cong \sqrt{5,6} = 2,36$ ; ошибка составляет  $\pm 18\%$ .

б) для увеличения  $B$  в 1,5 раза:  $1,5 \cong \sqrt{1,79} = 1,34$ ; ошибка составляет  $12\%$ .

На основании этого среднее изменение магнитного потока генератора, работающего при насыщенной магнитной системе в указанных пределах нормального насыщения, приближенно, для упрощения решения вопроса, можно свести к квадратной зависимости от изменения ампервитков, т. е.

$$\Phi_r^2 = K_r a w_r = K_r (a w_{ш} - w_{пк} I_a) \quad (11)$$

для холостого хода имеем:

$$\Phi_{хх}^2 = K_r a w_{ш}.$$

Общее выражение магнитного потока генератора можно представить:

$$\Phi_r^2 = \Phi_{хх}^2 - K_r w_{пк} I_a = \Phi_{хх}^2 - b I_a. \quad (12)$$

При постоянном числе оборотов генератора э. д. с. последнего пропорциональна его магнитному потоку.

т. е.

$$E_r = K_1 \Phi_r,$$

где  $K_1$  — постоянный коэффициент  $= \frac{PNn}{a \cdot 60} 10^{-8}$ .

Но так как  $E_r = V_r + I_a R_r \cong V$ , т. е. напряжению, подводимому к рулевому электродвигателю, а также можно считать, что подводимое к электродвигателю напряжение равно, приблизительно, противо-электродвижущей силе электродвигателя, т. е.

$$V = E_n + I_a R_n \cong E_n,$$

а последняя пропорциональна числу оборотов электродвигателя, т. е.

$$E_n = K_2 n \cong E_r = K_1 \Phi_r,$$

где  $K_2$  — также постоянный коэффициент  $= \frac{P_n N_n}{a_n \cdot 60} \cdot 10^{-8} = C_n$ .

$$\Phi_r \cong \frac{K_2}{K_1} n.$$

Полученное выражение  $\Phi_r$  подставляем в уравнение (12), в силу чего получим уравнение для числа оборотов исполнительного электродвигателя в таком виде:

$$n^2 = n_{хх}^2 - \left( \frac{K_1}{K_2} \right)^2 b I_a, \quad (13)$$

где  $n_{хх}$  — число оборотов при холостом ходе рулевого электродвигателя (т. е. когда  $I_a = 0$ ).

При постоянстве магнитного потока рулевого электродвигателя, его вращающий момент пропорционален силе тока в цепи якоря, т. е.

$$M_{эл.-дв.} = b_1 I_a \quad (14)$$

$$n^2 = n_{хх}^2 - \left( \frac{K_1}{K_2} \right)^2 \frac{b}{b_1} M = n_{хх}^2 - b_2 M,$$

где произведение постоянных коэффициентов  $\left(\frac{K_1}{K_2}\right)^2 \frac{b}{b_1}$  заменено через один коэффициент  $b_2$ .

Для нахождения значения коэффициента  $b_2$  возьмем следующее частное выражение числа оборотов исполнительного электродвигателя: при  $n=0$  имеем:

$$0 = n_{xx}^2 - b_2 M_{ст},$$

откуда

$$b_2 = \frac{n_{xx}^2}{M_{ст}},$$

и уравнение (13) можно представить:

$$n^2 = n_{xx}^2 - \frac{n_{xx}^2}{M_{ст}} M. \quad (15)$$

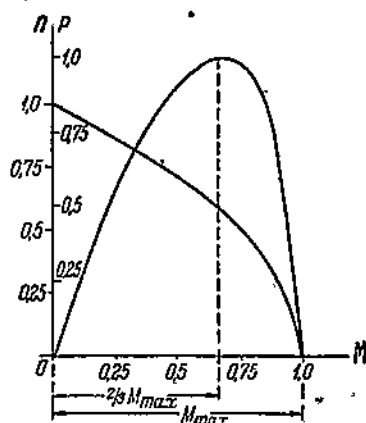
Окончательное уравнение для выражения оборотов рулевого электродвигателя примет вид:

$$n = n_{xx} \sqrt{\frac{M_{ст} - M}{M_{ст}}} \quad (16)$$

и, соответственно, уравнение механической характеристики исполнительного двигателя, т. е.  $M = f(n)$ , представится:

$$M_{и. эл.-дв.} = M_{ст} \left[ 1 - \frac{n^2}{n_{xx}^2} \right]. \quad (17)$$

На основании полученного аналитического выражения механической характеристики рулевого электродвигателя, работающего по системе Вард-Леонарда, с противокомпаундным генератором, с учетом насыщения магнитной цепи последнего, строим графическую зависимость характеристик рулевого электродвигателя (фиг. 88):



Фиг. 88.

графическую зависимость характеристик рулевого электродвигателя (фиг. 88):

$$n = f(M) \text{ и } P = f(M).$$

Приравнявая значение момента сопротивления на валу рулевого электродвигателя к значению его вращающего момента, будем иметь:

1. Для простого руля:

а) На участке перекладки руля с борта до диаметральной плоскости, т. е. в пределах от  $\alpha_{max}^0$  до  $0^0$ .

$$M_{с1} = M_0 = M_{ст} \left( 1 - \frac{n_0^2}{n_{xx}^2} \right),$$

при постоянстве  $M_0$  число оборотов  $n_0$  также постоянно, а следовательно, и угловая скорость  $\omega = \text{const}$ .

$$\alpha_{max} = \omega t_1 = \frac{\omega_{эл.-до.}}{K} t_1 = \frac{2\pi n_0}{60K} t_1,$$

$$t_1 = \frac{60K\alpha_{\max}}{2\pi n_0} \quad (18)$$

Значение  $n_0$ , на основании уравнения (16), будет:

$$n_0 = n_{\text{хх}} \sqrt{\frac{M_{\text{ср}} - M_0}{M_{\text{ср}}}}$$

Это значение  $n_0$  подставляем в выражение  $t_1$ :

$$t_1 = \frac{60K\alpha_{\max} \sqrt{M_{\text{ср}}}}{2\pi n_{\text{хх}} \sqrt{M_{\text{ср}} - M_0}} \quad (19)$$

б) На участке перекладки руля от диаметральной плоскости на борт, т. е. в пределах от  $0^\circ$  до  $\alpha_{\max}^\circ$ :

$$M_{\text{с2}} = M_0 + \frac{M_{\max} - M_0}{\alpha_{\max}} \alpha = M_{\text{ср}} \left(1 - \frac{n^2}{n_{\text{хх}}^2}\right)$$

Решая это уравнение относительно  $n$ , имеем:

$$n = n_{\text{хх}} \sqrt{\frac{M_{\text{ср}} - M_0}{M_{\text{ср}}} - \frac{M_{\max} - M_0}{M_{\text{ср}} \alpha_{\max}}} \alpha = n_{\text{хх}} [A - B\alpha]^{1/2},$$

где  $A$  заменяет постоянный член  $\frac{M_{\text{ср}} - M_0}{M_{\text{ср}}}$ ,

а  $B$  заменяет постоянный член  $\frac{M_{\max} - M_0}{M_{\text{ср}} \alpha_{\max}}$ .

Обозначаем время перекладки руля на втором участке, т. е. в пределах от  $0^\circ$  до  $\alpha_{\max}^\circ$ , через  $t_2$  и выражаем на основании зависимости:

$$\omega_{\text{эл.-дв.}} = \frac{2\pi n}{60} = K\omega_0 = K \frac{d\alpha}{dt}$$

число оборотов  $n$  рулевого электродвигателя через угловую скорость баллера:

$$n = \frac{60K}{2\pi} \cdot \frac{d\alpha}{dt}$$

Найденным выражением заменяем  $n$  в предыдущем уравнении, т. е.

$$\frac{60K}{2\pi} \cdot \frac{d\alpha}{dt} = n_{\text{хх}} [A - B\alpha]^{1/2}$$

На основании этого уравнения можем написать:

$$dt = \frac{60K}{2\pi n_{\text{хх}}} [A - B\alpha]^{-1/2} d\alpha$$

Интегрируя в пределах для второго участка, имеем:

$$\int_0^{t_2} dt = \int_0^{\alpha_{\max}} \frac{60K}{2\pi n_{\text{хх}}} [A - B\alpha]^{-1/2} d\alpha =$$

$$= -\frac{60K \cdot 2}{2\pi n_{xx} B} \int_0^{\alpha_{\max}} d[A - B\alpha]^{1/2},$$

$$t_2 = -\frac{60K \cdot 2}{2\pi n_{xx} B} [(A - B\alpha_{\max})^{1/2} - A^{1/2}].$$

Заменяя  $A$  и  $B$  их значениями, получим:

$$t_2 = -\frac{60 \cdot K M_{\text{ст}} \alpha_{\max}}{\pi n_{xx} (M_{\max} - M_0)} \left[ \left( \frac{M_{\text{ст}} - M_{\max}}{M_{\text{ст}}} \right)^{1/2} - \left( \frac{M_{\text{ст}} - M_0}{M_{\text{ст}}} \right)^{1/2} \right]$$

или

$$t_2 = -\frac{60K \sqrt{M_{\text{ст}}} \alpha_{\max}}{\pi \cdot n_{xx} (M_{\max} - M_0)} [\sqrt{M_{\text{ст}} - M_{\max}} - \sqrt{M_{\text{ст}} - M_0}], \quad (20)$$

Полное время перекадки простого руля с борта на борт представится, как сумма найденных значений  $t_1 + t_2$ :

$$T = t_1 + t_2 =$$

$$= -\frac{60K \alpha_{\max} \sqrt{M_{\text{ст}}}}{\pi n_{xx}} \left[ \frac{1}{2 \sqrt{M_{\text{ст}} - M_0}} - \frac{\sqrt{M_{\text{ст}} - M_{\max}} - \sqrt{M_{\text{ст}} - M_0}}{M_{\max} - M_0} \right]. \quad (21)$$

Так как время перекадки  $T \cong 0,9 T_{\text{кл.}}$  задается, то находим значение  $n_{xx}$ :

$$n_{xx} = \frac{60 K \alpha_{\max} \sqrt{M_{\text{ст}}}}{\pi \cdot T} \left[ \frac{1}{2 \sqrt{M_{\text{ст}} - M_0}} - \frac{\sqrt{M_{\text{ст}} - M_{\max}} - \sqrt{M_{\text{ст}} - M_0}}{M_{\max} - M_0} \right]. \quad (22)$$

Для балансирного и полубалансирного рулей, учитывая значение угла перекадки согласно графику на первом участке, т. е. с постоянным моментом  $M_0$ , в пределах угла  $\alpha_{\max} + \alpha_1$ , и на втором участке — в пределах  $\alpha_{\max} - \alpha_1$ , выражение для  $t_1$  и  $t_2$  соответственно будет:

$$t_1 = -\frac{60K (\alpha_{\max} + \alpha_1) \sqrt{M_{\text{ст}}}}{2\pi n_{xx} \sqrt{M_{\text{ст}} - M_0}}, \quad (23)$$

$$t_2 = -\frac{60K \sqrt{M_{\text{ст}}} (\alpha_{\max} - \alpha_1)}{\pi n_{xx} (M_{\max} - M_0)} [\sqrt{M_{\text{ст}} - M_{\max}} - \sqrt{M_{\text{ст}} - M_0}], \quad (24)$$

и значение числа оборотов рулевого электродвигателя при холостом ходе представится выражением:

$$n_{xx} = \frac{60K \sqrt{M_{\text{ст}}}}{\pi T} \left\{ \frac{\alpha_{\max} + \alpha_1}{2 \sqrt{M_{\text{ст}} - M_0}} - \frac{(\alpha_{\max} - \alpha_1) \sqrt{M_{\text{ст}} - M_{\max}} - \sqrt{M_{\text{ст}} - M_0}}{M_{\max} - M_0} \right\}. \quad (25)$$

Располагая значением  $n_{xx}$ , легко построить графики характеристик  $n = f(M)$  и  $M = f(n)$  для рулевого электродвигателя, пользуясь уравнениями (16) и (17).

За номинальную мощность рулевого электродвигателя, работающего по системе Вард-Леонарда с противокомпаундным генератором, как выше отмечалось, принимают максимальную мощность, развиваемую электродвигателем, т. е.  $P_n = P_{\max}$ .

Для нахождения номинального числа оборотов берем производную от мощности и приравниваем ее нулю:

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dn} = 0; \quad P &= \frac{M_{\text{ст}}}{975} \text{ кВт} = \frac{M_{\text{ст}}}{975} \left( n - \frac{n^3}{n_{\text{xx}}^2} \right), \\ \frac{dP}{dn} &= \frac{M_{\text{ст}}}{975} \left( 1 - \frac{3n^2}{n_{\text{xx}}^2} \right) = 0; \quad \left[ 1 - \frac{3n^2}{n_{\text{xx}}^2} \right] = 0, \\ n_n &= n_{\text{xx}} \sqrt{\frac{1}{3}} = 0,577 n_{\text{xx}} \end{aligned} \quad (26)$$

Номинальному числу оборотов отвечает номинальный, вращающий момент:

$$M_n = M_{\text{ст}} \left( 1 - \frac{n_n^3}{n_{\text{xx}}^3} \right) = \frac{2}{3} M_{\text{ст}}. \quad (27)$$

Значение максимальной или в данном случае номинальной мощности рулевого электродвигателя будет:

$$P_n = \frac{2M_{\text{ст}} \cdot 0,577 n_{\text{xx}}}{3 \cdot 975} = \frac{0,385 M_{\text{ст}} n_{\text{xx}}}{975} \text{ кВт}. \quad (28)$$

Рулевой электродвигатель, несмотря на повторно-кратковременный характер его работы (200—300 включений в час, которые сравнительно трудно поддаются учету) обычно выбирается на основании полученной номинальной мощности и номинального числа оборотов, на кратковременную 30-минутную или 60-минутную работу; конструктивное исполнение электродвигателя выбирается применительно к условиям его установки.

При выборе номинального напряжения рулевого исполнительного электродвигателя необходимо руководствоваться соображением, что при холостом ходе электродвигателя напряжение системы Вард-Леонарда с противокомпаундным генератором возрастает, как видели выше, примерно, пропорционально увеличению числа оборотов, т. е.

$$V_{\text{xx}} = V_n \frac{n_{\text{xx}}}{n_n} = \frac{V_n}{0,577} = 1,74 V_n. \quad (29)$$

При выборе габаритов генератора нужно учесть, с одной стороны, необходимость получения от него повышенного напряжения при холостом ходе и, с другой стороны, генератор должен выдерживать повышенный ток при стоянке исполнительного электродвигателя под током.

Считаем, в первом приближении, что габариты шунтового генератора возрастают пропорционально увеличению напряжения и момента на его валу, т. е.

$$P_{\text{габ.}} = P_n \frac{V_{\text{xx}}}{V_n} \cdot \frac{M_{\text{ст}}}{M_n} = P_n \sqrt{3} \frac{3}{2},$$

так как для генератора с противокомпаундным возбуждением, на индукторах его, помимо шунтовых ампервитков, необходимо уложить и ампервитки противокомпаундной обмотки. Принимая установленное ранее приближенное соотношение между ампервитками и магнитным потоком генератора для условий насыщенной магнитной цепи, т. е.

$$\begin{aligned} aW_r &= aW_{ш} - aW_{пк} \equiv \Phi_r^2 \equiv V_r^2 \equiv n^2, \\ aW_{ш} &\equiv \Phi_{xx}^2 \equiv V_{xx}^2 \equiv n_{xx}^2 \end{aligned}$$

откуда:

$$aW_{пк} \equiv (n_{xx}^2 - n^2),$$

полное число ампервитков, уложенное на индукторы генератора, будет:

$$aW_{пк} + aW_{ш} \equiv (n_{xx}^2 - n^2 + n^2).$$

Следовательно, относительное увеличение габаритов противокомпаундного генератора по сравнению с шунтовым генератором выразится коэффициентом:

$$\frac{aW_{пк} + aW_{ш}}{aW_{ш}} = \frac{n_{xx}^2}{n^2} \left( 2 - \frac{n^2}{n_{xx}^2} \right) = 2 - \frac{1}{3} = \frac{5}{3}.$$

Учитывая возможность кратковременных (до 2 мин.) перегрузок машин постоянного тока в пределах (2—2,5)  $P_n$ , получим габаритную мощность генератора, в зависимости от номинальной его мощности, в пределах:

$$P_{габ.} = \frac{\sqrt{3} \cdot 3 \cdot 5}{2 \cdot 3 [2 \div 2,5]} P_n = [2,16 \div 1,73] P_n. \quad (30)$$

Номинальная мощность генератора:

$$P_{нг} = \frac{P_{н. \text{ эл.-дв.}}}{\eta_{эл.-дв.}}, \quad (31)$$

Приводной электродвигатель генератора выбирается по номинальной мощности генератора:

$$P_{прив. \text{ эл.-дв. генер.}} = \frac{P_{нг}}{\eta_r} = \frac{P_{н. \text{ эл.-дв.}}}{\eta_{эл.-дв.} \eta_r}, \quad (32)$$

Приближенное значение  $\eta_{эл.-дв.}$  и  $\eta_r$  можно брать в пределах от 0,7 до 0,85 в зависимости от мощности и числа оборотов.

б) Рулевые электроприводы с шунтовыми электродвигателями. Применение шунтовых электродвигателей для электроприводов ограничивается незначительными мощностями порядка 0,5—2 квт, так как использование этих электродвигателей требует быстропадающей их механической характеристики, чтобы обеспечить  $M_{ст}$  в пределах токов, безопасных для обмотки якоря. Для обеспечения быстропадающей или смягчения их механической характеристики обычно снижают напряжение, подводимое к якорю, для чего в цепь якоря включают дополнительные сопротивления, благодаря чему получается неэкономичное использование электродвигателя.

Для аналитического выражения механической характеристики шунтового электродвигателя принимают напряжение, подводимое к якорю

электродвигателя  $V = \text{const.}$  и магнитный поток электродвигателя  $\Phi = \text{const.}$  Тогда уравнение механической характеристики электродвигателя представится в виде:

$$n = a - bM, \quad (33)$$

где  $a$  и  $b$  — постоянные величины.

При холостом ходе электродвигателя, т. е.  $M = 0$

$$n_{\text{хх}} = a.$$

При стоянке электродвигателя под током, т. е. при  $n = 0$

$$0 = n_{\text{хх}} - bM_{\text{ст}}$$

$$b = \frac{n_{\text{хх}}}{M_{\text{ст}}}$$

и уравнение характеристик шунтового электродвигателя в общем виде примет вид:

а) для

$$n = f(M) \\ n = n_{\text{хх}} - \frac{n_{\text{хх}}}{M_{\text{ст}}} M = n_{\text{хх}} \left( 1 - \frac{M}{M_{\text{ст}}} \right), \quad (34)$$

б) для

$$P = f(M) \\ P = \frac{Mn}{975} = \frac{n_{\text{хх}}}{975} \left( M - \frac{M^2}{M_{\text{ст}}} \right). \quad (35)$$

Механическую характеристику электродвигателя на основании выражения (34) также можно представить уравнением:

$$M_{\text{эл.-дв.}} = M_{\text{ст}} \left( 1 - \frac{n}{n_{\text{хх}}} \right). \quad (36)$$

Приравнявая уравнение момента сопротивления рулевого привода на валу электродвигателя к выражению вращающего момента электродвигателя по уравнению (36), для простого руля получим:

а) Участок работы электродвигателя при перекладке руля с борта до диаметральной плоскости

$$M_{\text{с.г.}} = M_0 = \text{const.}$$

$$M_{\text{эл.-дв.}} = M_{\text{с.г.}}$$

или

$$M_{\text{ст}} \left( 1 - \frac{n}{n_{\text{хх}}} \right) = M_0 = M_{\text{ст}} \left( 1 - \frac{n_0}{n_{\text{хх}}} \right), \quad (37)$$

так как электродвигатель работает при постоянном моменте  $M_0$ , то и число его оборотов также постоянно, т. е.

$$n = n_0 = \text{const.} \quad (38)$$

Обозначая время при установившейся работе электродвигателя на этом участке перекладки руля в пределах  $\alpha_{\text{max}}$  через  $t_1$ , можем написать:

$$K\alpha_{\text{max}} = \omega_{\text{эл.-дв.}} t_1 = \frac{2\pi n_0}{60} t_1,$$

где  $K$  — передаточное число между валом электродвигателя и баллером, откуда:

$$n_0 = \frac{60K\alpha_{\max}}{2\pi t_1};$$

подставим найденное значение  $n_0$  в уравнение (36):

$$M_0 = M_{\text{cr}} \left[ 1 - \frac{60K\alpha_{\max}}{2\pi t_1 n_{\text{xx}}} \right].$$

Из этого уравнения находим значение времени  $t_1$ :

$$t_1 = \frac{60K\alpha_{\max} M_{\text{cr}}}{2\pi n_{\text{xx}} (M_{\text{cr}} - M_0)}. \quad (39)$$

б) Участок работы электродвигателя при перекладке руля от диаметральной плоскости на борт:

$$M_{c_2} = M_0 + \frac{M_{\max} - M_0}{\alpha_{\max}} \alpha$$

$$M_{\text{эл.-дв.}} = M_{c_2}$$

или

$$M_{\text{cr}} \left( 1 - \frac{n}{n_{\text{xx}}} \right) = M_0 + \frac{M_{\max} - M_0}{\alpha_{\max}} \alpha.$$

Обозначая время перекладки руля на этом участке через  $t_2$  и выражая  $n$  через угловую скорость перекладки руля, т. е.

$$K\omega = K \frac{d\alpha}{dt} = \frac{2\pi n}{60},$$

откуда

$$n = \frac{60K}{2\pi} \cdot \frac{d\alpha}{dt};$$

найденное выражение  $n$  подставляем в уравнение (36):

$$M_{\text{cr}} \left[ 1 - \frac{60K}{2\pi n_{\text{xx}}} \cdot \frac{d\alpha}{dt} \right] = M_0 + \frac{M_{\max} - M_0}{\alpha_{\max}} \alpha.$$

Преобразовывая уравнение, имеем

$$\frac{60KM_{\text{cr}}}{2\pi n_{\text{xx}}} \frac{d\alpha}{dt} = M_{\text{cr}} - M_0 - \frac{M_{\max} - M_0}{\alpha_{\max}} \alpha,$$

откуда

$$dt = \frac{60KM_{\text{cr}}\alpha_{\max}}{2\pi n_{\text{xx}}} \cdot \frac{d\alpha}{(M_{\text{cr}} - M_0)\alpha_{\max} - (M_{\max} - M_0)\alpha};$$

заменяя

$$\frac{60KM_{\text{cr}}\alpha_{\max}}{2\pi n_{\text{xx}}} \text{ через постоянную } A$$

$$\begin{array}{lll} (M_{\text{cr}} - M_0)\alpha_{\max} & \gg & B \\ (M_{\max} - M_0) & \gg & C, \end{array}$$

имеем:

$$dt = A \frac{d\alpha}{B - C\alpha}.$$

Интегрируя, получаем:

$$\int_0^{t_2} dt = A \int_0^{\alpha_{\max}} \frac{d\alpha}{B - C\alpha} = -\frac{A}{C} \int_0^{\alpha_{\max}} d \ln(B - C\alpha),$$

так как

$$d \ln(B - C\alpha) = \frac{d(B - C\alpha)}{B - C\alpha} = -\frac{C d\alpha}{B - C\alpha}$$

$$|t|_0^{t_2} = -\frac{A}{C} \left[ \ln(B - C\alpha) \right]_0^{\alpha_{\max}}$$

$$t_2 = -\frac{A}{C} [\ln(B - C\alpha_{\max}) - \ln B]$$

$$t_2 = -\frac{A}{C} \ln \frac{B - C\alpha_{\max}}{B}.$$

Подставляем значения постоянных  $A$ ,  $B$  и  $C$  и, упрощая, получим:

$$t_2 = -\frac{60KM_{\text{ст}}\alpha_{\max}}{2\pi n_{\text{хх}}(M_{\max} - M_0)} \ln \frac{(M_{\text{ст}} - M_0)^{\alpha_{\max}} - (M_{\max} - M_0)^{\alpha_{\max}}}{(M_{\text{ст}} - M_0)^{\alpha_{\max}}}$$

$$t_2 = -\frac{60KM_{\text{ст}}\alpha_{\max}}{2\pi n_{\text{хх}}(M_{\max} - M_0)} \ln \frac{M_{\text{ст}} - M_{\max}}{M_{\text{ст}} - M_0}. \quad (40)$$

Полное время перекадки руля с борта на борт:

$$T = t_1 + t_2 = \frac{60K\alpha_{\max}M_{\text{ст}}}{2\pi n_{\text{хх}}(M_{\text{ст}} - M_0)} -$$

$$-\frac{60KM_{\text{ст}}\alpha_{\max}}{2\pi n_{\text{хх}}(M_{\max} - M_0)} \ln \frac{M_{\text{ст}} - M_{\max}}{M_{\text{ст}} - M_0}$$

$$T = \frac{60K\alpha_{\max}M_{\text{ст}}}{2\pi n_{\text{хх}}} \left[ \frac{1}{M_{\text{ст}} - M_0} - \frac{1}{M_{\max} - M_0} \ln \frac{M_{\text{ст}} - M_{\max}}{M_{\text{ст}} - M_0} \right]. \quad (41)$$

Откуда

$$n_{\text{хх}} = \frac{30K\alpha_{\max}M_{\text{ст}}}{\pi T} \left[ \frac{1}{M_{\text{ст}} - M_0} - \frac{1}{M_{\max} - M_0} \ln \frac{M_{\text{ст}} - M_{\max}}{M_{\text{ст}} - M_0} \right].$$

Заменяя выражение натурального логарифма через десятичный логарифм, т. е.

$$\ln \frac{M_{\text{ст}} - M_{\max}}{M_{\text{ст}} - M_0} = 2,3 \lg \frac{M_{\text{ст}} - M_{\max}}{M_{\text{ст}} - M_0},$$

окончательно получим для простого руля:

$$n_{\text{хх}} = \frac{30K\alpha_{\max}M_{\text{ст}}}{\pi T} \left[ \frac{1}{M_{\text{ст}} - M_0} - \frac{2,3}{M_{\max} - M_0} \lg \frac{M_{\text{ст}} - M_{\max}}{M_{\text{ст}} - M_0} \right]. \quad (42)$$

Для балансирного и полубалансирного руля, учитывая значение угла перекадки на первом участке  $\alpha_{\max} + \alpha_1$  и на втором участке, соответственно,  $\alpha_{\max} - \alpha_1$ , выражение для числа оборотов приводного электродвигателя при холостом ходе будет:

$$n_{\text{хх}} = \frac{30K\alpha_{\max}M_{\text{ст}}}{\pi T} \left[ \frac{\alpha_{\max} + \alpha_1}{M_{\text{ст}} - M_0} - \frac{\alpha_{\max} - \alpha_1}{M_{\max} - M_0} 2,3 \lg \frac{M_{\text{ст}} - M_{\max}}{M_{\text{ст}} - M_0} \right]. \quad (43)$$

Располагая значением  $n_{xx}$ , легко определить и числа оборотов для любого заданного момента путем подстановки значения последнего в уравнение (34).

Беря выражение мощности электродвигателя

$$P = \frac{Mn}{975} \text{ кВт}$$

и подставляя в него выражение  $n$  по уравнению (34), получим уравнение для мощности рулевого электродвигателя:

$$P = \frac{n_{xx}}{975} \left( M - \frac{M^2}{M_{ст}} \right)$$

соответственно вышеприведенному уравнению (35).

Полагая максимальную мощность за номинальную, легко определить  $P_n$  и  $n_n$ , приравнявая производную мощности нулю, а именно:

$$\frac{dP}{dM} = \frac{n_{xx}}{975} \left( 1 - \frac{2M}{M_{ст}} \right) = 0,$$

откуда

$$M_n = \frac{1}{2} M_{ст}, \quad (44)$$

$$n_n = n_{xx} \left( 1 - \frac{M_n}{M_{ст}} \right) = n_{xx} \left[ 1 - \frac{1}{2} \right] = 0,5 n_{xx}, \quad (45)$$

$$P_n = \frac{M_n n_n}{975} = \frac{M_{ст} n_{xx}}{2 \cdot 2 \cdot 975} = \frac{M_{ст} n_{xx}}{3900} \text{ кВт.} \quad (46)$$

Возможность использования шунтовых электродвигателей для рулевых электроприводов требует сильно падающей их механической характеристики для обеспечения  $n_n = 0,5 n_{xx}$ , что достигается путем соответствующего повышения сопротивления цепи якоря электродвигателя.

Для определения по данным каталога габарита шунтового электродвигателя, используемого для привода руля, будем исходить из следующих положений:

а) Мощность электродвигателя по каталогу используется путем введения дополнительного сопротивления в цепь обмотки его якоря, благодаря чему нормальный вращающий момент становится равным моменту стоянки электродвигателя под током, т. е.

$$M_{н. \text{ кат.}} = M_{ст.}$$

б) Нормальное число оборотов шунтовых реверсивных электродвигателей, в пределах мощности электродвигателей до 5 кВт, обычно меньше числа оборотов при холостом ходе, в среднем, на 8%, т. е.

$$n_{н. \text{ кат.}} = 0,92 n_{xx}.$$

в) Габариты электродвигателя при сохранении неизменной его магнитной системы считаем пропорциональными значениям его силы тока или для шунтовых электродвигателей — их вращающим моментам.

В силу этих предпосылок имеем:

$$KM_{ст} \cdot 0,5 n_{xx} = M_{н. кат.} \cdot 0,92 n_{xx},$$

$$K = \frac{0,92}{0,5} = 1,85.$$

Следовательно, для определения габарита шунтового рулевого электродвигателя по данным каталога его номинальную мощность, полученную по формуле (46), следует умножить на  $K$ , т. е. считать:

$$P_{габ.} = KP_n = 1,85 \frac{M_{ст} n_{xx}}{3900} \text{ кВт.} \quad (47)$$

в) Рулевые электроприводы с серийными электродвигателями. Для упрощения задачи предполагается, что работа рулевого электродвигателя протекает при насыщенной его магнитной системе, а магнитный поток в этих условиях, как видели выше, на основании экспериментальной формулы Mc Allister'a можно приближенно считать изменяющимся во второй степени от намагничивающего тока, т. е.

$$\Phi^2 = CI_a, \quad (48)$$

где  $C$  — коэффициент, зависящий от конструктивных данных электродвигателя.

Применяя уравнение для вращающего момента  $M$  и числа оборотов  $n$  электродвигателей постоянного тока, имеем:

$$M = C_1 I_a \Phi = \frac{C_1}{C} \Phi^3.$$

где  $I_a$  — сила тока в цепи контура якоря,

$C_1$  — постоянный коэффициент, зависящий от конструктивных данных электродвигателя,

$$n = \frac{V - I_a(R_a + R_c)}{C_2 \Phi} \cong \frac{V}{C_2 \Phi}, \quad (49)$$

где  $V$  — напряжение, подводимое к электродвигателю,

$R_a + R_c$  — сопротивления якоря с дополнительными полюсами и серийной обмотки,

$C_2$  — постоянный коэффициент, зависящий от конструктивных данных электродвигателя.

Выражая  $\Phi$  через  $n$  и подставляя в уравнение вращающего момента электродвигателя, имеем:

$$\Phi = \frac{V}{C_2 n}; \quad M = \frac{C_1}{C} \Phi^3 = \frac{C_1 V^3}{CC_2^3 n^3}.$$

При постоянстве напряжения  $V$ , подводимого к электродвигателю, произведение постоянных  $\frac{C_1 V^3}{CC_2^3}$  можно заменить одним значением постоянного коэффициента  $A$ :

$$M = \frac{A}{n^3}; \quad Mn^3 = A = \text{const.} \quad (50)$$

Следовательно:

$$Mn^3 = A = M_0 n_0^3 = \text{const.}$$

Согласно данным проф. В. И. Полонского, для серийных электродвигателей, работающих в пределах, употребительных на практике степеней насыщения магнитной системы, показатель степени  $x$  в уравнении

$$Mn^x = \text{const.}$$

чаще всего имеет значения от 2,5 до 3,1 для электродвигателей с номинальным вращающим моментом от 6 до 50 кгм.<sup>1</sup>

В дальнейших выводах значение показателя степени  $x$  считаем постоянным и равным 3, что, принимая во внимание приближенное значение формул для вращающего момента на баллере руля, дает вполне допустимые для предварительных расчетов результаты.

Выражение вращающего момента серийного электродвигателя примет вид:

$$M_{\text{эл.-дв.}} = \frac{M_0 n_0^3}{n^3}.$$

При работе электродвигателя на первом участке, т. е. во время перекладки руля с борта к диаметральной плоскости, момент сопротивления на валу электродвигателя постоянен и равен  $M_0$ ; скорость перекладки также постоянна и совершается при  $n_0$  об/мин. в течение  $t_1$  сек.

Для простого руля это время  $t_1$  найдется из уравнения:

$$\begin{aligned} K\alpha_{\text{max}} &= \omega_{\text{эл.-дв.}} t_1 = \frac{2\pi n_0}{60} t_1, \\ t_1 &= \frac{60 K\alpha_{\text{max}}}{2\pi n_0}, \end{aligned} \quad (51)$$

При дальнейшей работе электродвигателя на втором участке, т. е. при перекладке простого руля от диаметральной плоскости на борт, найденное приближенное выражение вращающего момента серийного электродвигателя приравняем к выражению момента сопротивления на валу рулевого электродвигателя:

$$M_{\text{эл.-дв.}} = M_{c2}$$

или

$$\frac{M_0 n_0^3}{n^3} = M_0 + \frac{M_{\text{max}} - M_0}{\alpha_{\text{max}}} \alpha.$$

Находя значение

$$n = \frac{n_0}{\left(1 + \frac{M_{\text{max}} - M_0}{M_0 \alpha_{\text{max}}} \alpha\right)^{1/3}}$$

и выражая  $n$  через угловую скорость баллера, т. е.

$$n = \frac{60K}{2\pi} \cdot \frac{d\alpha}{dt},$$

<sup>1</sup> См. журнал «Электричество» № 12 за 1927 г.

после преобразований получим:

$$dt = \frac{60K}{2\pi n_0} \left( 1 + \frac{M_{\max} - M_0}{M_0 \alpha_{\max}} \alpha \right)^{1/3} d\alpha$$

$$\int_0^{t_2} dt = \frac{60K}{2\pi n_0} \int_0^{\alpha_{\max}} \left[ 1 + \frac{M_{\max} - M_0}{M_0 \alpha_{\max}} \alpha \right]^{1/3} d\alpha$$

$$t_2 = \frac{60K \cdot 3M_0 \alpha_{\max}}{2\pi n_0^4 (M_{\max} - M_0)} \int_0^{\alpha_{\max}} d \left[ 1 + \frac{M_{\max} - M_0}{M_0 \alpha_{\max}} \alpha \right]^{1/3}$$

или

$$t_2 = \frac{60K \cdot 3 \alpha_{\max} M_0}{2\pi n_0 \cdot 4 (M_{\max} - M_0)} \left[ \left( 1 + \frac{M_{\max} - M_0}{M_0 \alpha_{\max}} \alpha_{\max} \right)^{1/3} - 1 \right]$$

$$t_2 = \frac{3 \cdot 60K \alpha_{\max} M_0}{4 \cdot 2\pi n_0 (M_{\max} - M_0)} \left[ \left( \frac{M_{\max}}{M_0} \right)^{1/3} - 1 \right]. \quad (52)$$

Выражаем полное время перекачки с борта на борт через найденные значения  $t_1 + t_2$ , т. е.:

$$T = t_1 + t_2 = \frac{60K \alpha_{\max}}{2\pi n_0} \left\{ 1 + \frac{3M_0}{4 (M_{\max} - M_0)} \left[ \left( \frac{M_{\max}}{M_0} \right)^{1/3} - 1 \right] \right\}. \quad (53)$$

Так как  $T$  задано, то определяем  $n_0$ :

$$n_0 = \frac{60K \alpha_{\max}}{2\pi T} \left\{ 1 + \frac{3M_0}{4 (M_{\max} - M_0)} \left[ \left( \frac{M_{\max}}{M_0} \right)^{1/3} - 1 \right] \right\}. \quad (54)$$

Для балансирных и полубалансирных рулей, принимая углы перекачки для первого участка  $\alpha_{\max} + \alpha_1$  и для второго участка  $\alpha_{\max} - \alpha_1$ , выражение для  $n_0$  примет такой вид:

$$n_0 = \frac{60K}{2\pi T} \left\{ (\alpha_{\max} + \alpha_1) + \frac{3}{4} \cdot \frac{M_0 (\alpha_{\max} - \alpha_1)}{(M_{\max} - M_0)} \left[ \left( \frac{M_{\max}}{M_0} \right)^{1/3} - 1 \right] \right\}. \quad (55)$$

Располагая значением  $n_0$ , легко найти и любое число оборотов электродвигателя при требуемом вращающем моменте, так как

$$M_0 n_0^3 = A = M n^3 = M_{\max} n_{\max}^3$$

$$n_{\max} = n_0 \sqrt[3]{\frac{M_0}{M_{\max}}}$$

Для определения номинальной мощности и номинального числа оборотов будем исходить из допустимой кратковременной перегрузочной способности серийных электродвигателей для условий повторно-кратковременной нагрузки при пуске. Перегрузочная способность этих электродвигателей практически лежит в пределах

$$\frac{M_{\text{пер.}}}{M_n} = 2 \div 2,5.$$

Принимая

$$M_{\text{пер.}} = M_{\text{пуск.}}$$

и полагая

$$M_{\text{пуск}} \cong 1,5 M_{\text{max}},$$

имеем

$$M_n = \frac{1,5 M_{\text{max}}}{(2 \div 2,5)} = (0,75 \div 0,6) M_{\text{max}} \quad (56)$$

$$M_n n_n^3 = M_{\text{max}} n_{\text{max}}^3$$

$$n_n = n_{\text{max}} \sqrt[3]{\frac{M_{\text{max}}}{(0,75 \div 0,6) M_{\text{max}}}} \cong (1,1 \div 1,2) n_{\text{max}} \quad (57)$$

$$P_n = \frac{M_n n_n}{975} = \frac{(0,75 \div 0,6) (1,1 \div 1,2) M_{\text{max}} n_{\text{max}}}{975}$$

$$P_n = (0,825 \div 0,72) \frac{M_{\text{max}} n_{\text{max}}}{975}. \quad (58)$$

Выбранная мощность подлежит уточнению на заводе-изготовителе. Серийный электродвигатель для рулевых приводов обычно применяется мощностью не выше 15 квт.

г) Рулевые электроприводы с асинхронными электродвигателями трехфазного тока. Из двигателей переменного тока наиболее подходящими по своей механической характеристике являются асинхронные электродвигатели трехфазного тока, с фазным ротором.

Если принять, что а) число оборотов асинхронного электродвигателя при холостом ходе (т. е. при  $S=0$ ) равно синхронному числу оборотов (т. е. скорости вращения магнитного потока статора) и б) омическое сопротивление цепи ротора взято таким, что максимальный вращающий (опрокидывающий) момент электродвигателя, обусловливаемый равенством

$$\left[ \frac{1}{1} \right] \quad S = \frac{r_2}{x_2},$$

будет при стоянке электродвигателя под током, т. е. при  $S=1$ , то кривая механической характеристики асинхронного электродвигателя в этих условиях имеет вид, аналогичный кривой механической характеристики шунтового рулевого электродвигателя, работающего по схеме Вард-Леонарда, с противокомпаундным генератором.

Нижеприводимая таблица дает значения вращающих моментов в долях  $M_{\text{ст}}$  для асинхронного электродвигателя и шунтового электродвигателя в системе Вард-Леонарда с противокомпаундным генератором в зависимости от числа оборотов, выраженных в долях  $n_{\text{хх}}$ .

Таблица составлена на основании уравнений моментов:

а) для асинхронного электродвигателя:

$$M = C \frac{S r_2}{r_2^2 + (x_2 S)^2}$$

и б) для электродвигателя с противокомпаундным генератором:

$$M = M_{\text{ст}} \left( 1 - \frac{n^2}{n_{\text{хх}}^2} \right).$$

Таблица 19

| Значение<br>$n$ | Значение<br>$M_{ac}$ | Значение<br>$M_{противокомп.}$ | Расхождение                            |
|-----------------|----------------------|--------------------------------|----------------------------------------|
|                 |                      |                                | $\frac{M_{ac} - M_{пр}}{M_{пр}} 100\%$ |
| 1,0 $n_{xx}$    | 0                    | 0                              | 0,0                                    |
| 0,9 $n_{xx}$    | 0,198 $M_{ст}$       | 0,19 $M_{ст}$                  | 4,2                                    |
| 0,8 $n_{xx}$    | 0,384 $M_{ст}$       | 0,36 $M_{ст}$                  | 6,87                                   |
| 0,7 $n_{xx}$    | 0,55 $M_{ст}$        | 0,51 $M_{ст}$                  | 7,85                                   |
| 0,6 $n_{xx}$    | 0,69 $M_{ст}$        | 0,64 $M_{ст}$                  | 7,80                                   |
| 0,5 $n_{xx}$    | 0,8 $M_{ст}$         | 0,75 $M_{ст}$                  | 6,67                                   |
| 0,4 $n_{xx}$    | 0,883 $M_{ст}$       | 0,84 $M_{ст}$                  | 5,12                                   |
| 0,3 $n_{xx}$    | 0,94 $M_{ст}$        | 0,91 $M_{ст}$                  | 3,3                                    |
| 0,2 $n_{xx}$    | 0,976 $M_{ст}$       | 0,96 $M_{ст}$                  | 1,67                                   |
| 0,1 $n_{xx}$    | 0,995 $M_{ст}$       | 0,99 $M_{ст}$                  | 0,505                                  |
| 0,0 $n_{xx}$    | 1,00 $M_{ст}$        | 1,00 $M_{ст}$                  | 0,0                                    |

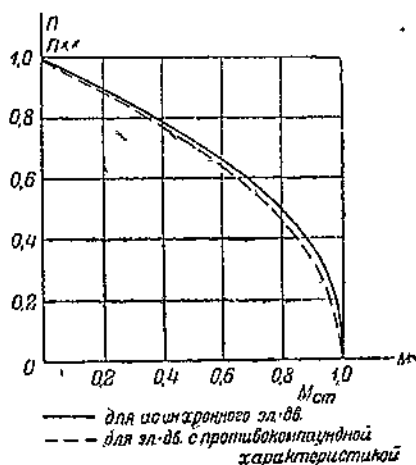
Из приведенной таблицы (табл. 19) видим, что расхождение значения моментов для одинаковых соотношений изменения чисел оборотов не превосходит 8% у механических характеристик указанных выше электродвигателей.

На основании приведенной таблицы построены графики механических характеристик, приведенные на фиг. 89. Сплошная кривая относится к механической характеристике асинхронного двигателя, пунктирная кривая — к механической характеристике электродвигателя с противокомпаундным генератором.

Основываясь на аналогии кривых механических характеристик, можно, с достаточной для практики точностью, механическую характеристику асинхронного электродвигателя для условия максимального значения его вращающего момента при заторможенном якоре, т. е. при  $S = 1 = \frac{r_2}{x_2}$ , представить уравнением, аналогичным уравнению рулевого электродвигателя системы Вард-Леонарда, с противокомпаундным генератором, а именно:

$$M_{ac} = M_{ст} \left( 1 - \frac{n^2}{n_{xx}^2} \right). \quad (59)$$

Поэтому выводы, полученные для рулевого электродвигателя системы Вард-Леонарда, приложимы и для асинхронных рулевых



Фиг. 89.

электродвигателей с введенным сопротивлением в цепь ротора; следовательно:

$$n_n \cong 0,577 n_{\text{хх}} = 0,577 n_{\text{синхр.}}$$

$$M_n \cong \frac{2}{3} M_{\text{ст}} = \frac{2}{3} M_{\text{опр.}}$$

$$P_n \cong \frac{0,385 M_{\text{опр.}} n_{\text{синхр.}}}{975} \text{ кВт.}$$

Передаточные числа  $K$  механической части необходимо подбирать в соответствии со значениями синхронных чисел оборотов.

Значение  $K$  для  $\alpha_{\text{тах}}$ , выраженного в градусах, приближенно можно определить по формуле:

$$K \cong \frac{2\pi \cdot 0,9 T_{\text{кл}} \cdot 0,577 n_{\text{синхр.}}}{2\alpha_{\text{тах}} \cdot 60} = 1,56 \frac{T_{\text{кл}} n_{\text{синхр.}}}{\alpha_{\text{тах}}}.$$

Так, для  $\alpha_{\text{тах}} = 35^\circ$ ,  $T_{\text{кл}} = 30$  сек. значения  $K$  в соответствии с  $n_{\text{синхр.}}$  будут (табл. 20).

Таблица 20

| Для $n_{\text{синхр.}}$ | 1500 | 1000 | 750  | 600 | 500 |
|-------------------------|------|------|------|-----|-----|
| $K \approx$             | 2000 | 1340 | 1000 | 800 | 670 |

Для чисто электрических рулевых приводов асинхронные электродвигатели вследствие непроизводительной потери электроэнергии в дополнительно приключаемом сопротивлении ротора, так же как и шунтовые электродвигатели, экономически могут себя оправдывать только при незначительных мощностях электродвигателей, в пределах порядка до 5 квт.

Для электрогидравлических приводов могут быть применены асинхронные электродвигатели и больших мощностей, так как в этих установках приводной электродвигатель может работать на жесткой части своей нормальной механической характеристики, т. е. без необходимости повышенного сопротивления в цепи ротора. Роль электродвигателя в электрогидравлических рулевых приводах может ограничиться требованиями обычных насосных приводов, так как гидравлическая система, при наличии перепускных предохранительных клапанов повышенного давления, защищает электродвигатель, работающий по жесткой характеристике, от недопустимых перегрузок.

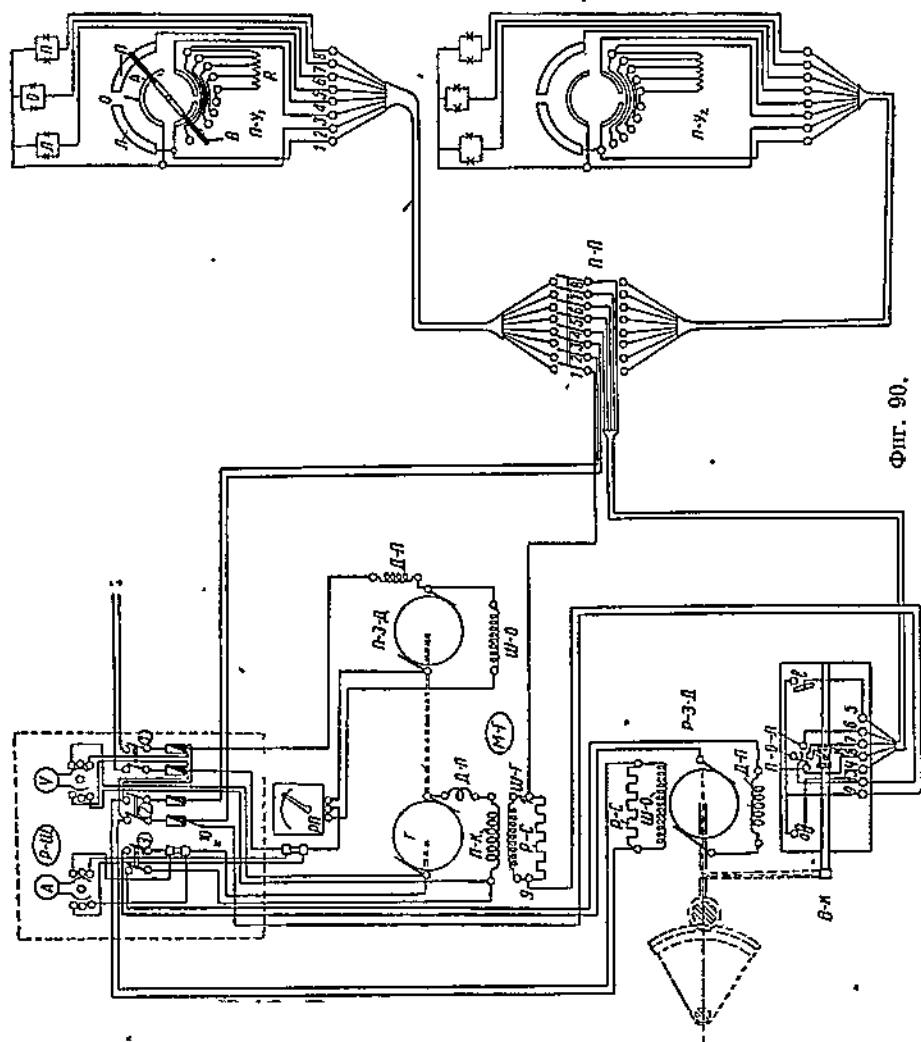
## § 19. Рассмотрение выполненных схем рулевых электроприводов

а) Системы Вард-Леонарда. 1. Простая система Вард-Леонарда, с противокомпаундным генератором. Схема рулевых электроприводов по системе Вард-Леонарда, установленных на рейдовых буксирах Каспара, лесовозах 3-й се-

рии, рефрижераторных теплоходах 2-й и 3-й серий и на пассажирских теплоходах Крымско-Кавказской линии, приводится на фиг. 90.

Рулевой электропривод по системе Вард-Леонарда состоит из следующих основных частей:

а) мотор-генератора М-Г, устанавливаемого, как правило, в машинном отделении;



б) распределительного щитка Р-Щ (рулевая подстанция), устанавливаемого вблизи мотор-генератора;

в) исполнительного или рулевого электродвигателя Р-Э-Д, устанавливаемого в румпельном отделении, для привода механической передачи руля;

г) шпиндельного конечного выключателя В-К с контактами для сигнальных ламп; конечный выключатель механически связан с баллером руля;

д) переключающего поста П-П, устанавливаемого обыкновенно в рулевой рубке;

е) постов управления П-У (2 или более), устанавливаемых в рулевой или штурвальной рубке и на верхнем ходовом мостике. Посты управления снабжены сигнальными лампами положения руля.

Мотор-генератор состоит из приводного шунтового электродвигателя П-Э-Д и генератора Г с противокомпаундной обмоткой П-К. Приводной электродвигатель получает питание от общей судовой сети через двухполюсный рубильник 1 и плавкие предохранители, установленные на распределительном щитке Р-Щ, и запускается с помощью пускового реостата РП. Генератор с помощью двухполюсного рубильника 3, установленного на том же щитке, приключается к фидеру, непосредственно соединенному с клеммами якоря рулевого электродвигателя. Шунтовая обмотка генератора Щ-Г получает независимое возбуждение, включение, величина и направление которого регулируются соответствующим постом управления У-П, приключенным в данный момент к рулевому электроприводу с помощью переключателя П-П. Питание шунтовой обмотки генератора производится от общей судовой сети через двухполюсный рубильник 2 с плавкими предохранителями, установленными на Р-Щ.

Генератор и оба электродвигателя снабжены дополнительными полюсами Д-П; шунтовая обмотка Щ-Г генератора и шунтовая обмотка Щ-О рулевого электродвигателя снабжены разрядными сопротивлениями Р-С.

На распределительном щитке мотор-генератора установлены вольтметр и амперметр для контроля работы рулевой установки. Мотор-генератор при установке его в машинном отделении берется защищенного типа, с предохранением от капежа (попадания капель сверху) и с противосырной изоляцией.

Рулевой или исполнительный электродвигатель реверсивного типа, с независимым возбуждением, которое подается от Р-Щ при включении рубильника 1. Рулевой электродвигатель помощью фланцевой муфты жестко соединяется с механической передачей руля. Мощность рулевого электродвигателя 9 л. с., при 260 об/мин. Электропривод позволяет производить перекладку руля в 35° на каждый борт.

Для предотвращения перекладки руля свыше 35° установлен конечный выключатель ВК, который связан механической передачей с рулевым приводом. Благодаря передаче приводится во вращение шпиндель с винтовой нарезкой. При вращении шпинделя перемещается ползунок-каретка К, имеющая внутреннюю нарезку. Одновременно с изменением направления вращения руля происходит и изменение направления вращения шпинделя, вследствие чего и ползунок-каретка меняет направление своего поступательного движения. Нахождение пера руля в диаметральной плоскости соответствует среднему положению каретки.

При переключке руля на правый или на левый борт соответственно происходит изменение направления перемещения каретки от среднего положения, и когда угол переключки пера руля достигает  $\alpha_{\text{max}} = 35^\circ$ , то каретка замыкает выключатель  $a$  или  $b$ , включенный в цепь шунтовой обмотки возбуждения генератора. Вследствие этого напряжение последнего упадет до нуля и даже под действием противокомпаундной обмотки на мгновение может изменить свое направление, благодаря чему рулевой электродвигатель быстро остановится.

Посредине конечного выключателя имеются три контакта  $П-О-Л$ , соединенные через переключающий пост  $П-П$  с тремя сигнальными лампами  $П-О-Л$ , помещенными в постах управления  $П-У$ .

При нахождении руля в диаметральной плоскости каретка конечного выключателя замыкает средний контакт  $О$ , благодаря чему в посту управления горит белая сигнальная лампа  $О$ . При отклонении руля от диаметральной плоскости на правый борт каретка  $К$  замыкает средний контакт  $О$  и замыкает контакт  $П$ , вследствие чего белая сигнальная лампа гаснет, а загорается зеленая сигнальная лампа  $П$ , которая горит все время пока руль отклонен от диаметральной плоскости на правый борт. При отклонении пера руля на левый борт каретка замыкает контакт  $Л$  и в посту управления рулем загорается только красная сигнальная лампа  $Л$ .

Переключающий пост  $П-П$  с ручным управлением представляет многоконтактный (многополюсный) переключатель, средние контакты которого соединяются с электрооборудованием рулевой части установки, верхние контакты соединяются с одним постом управления  $П-У_1$ , а нижние — с другим  $П-У_2$ . Пост управления представляет кнопочно-контактный реостат, с помощью которого производится включение и ступенчатая регулировка величины тока в шунтовой обмотке генератора, а также и изменение направления возбуждения генератора.

Кроме контактных кнопок реостатная часть  $П-У$  имеет сегментные контактные пластины и поворотный рычаг с двумя контактными пружинами  $A$  и  $B$ , изолированными одна от другой.

При повороте рычага пружина  $A$  скользит по верхним сегментным пластинам, замыкая их, а пружина  $B$  по нижним сегментным пластинам и контактными кнопкам, соединяя последние с нижними сегментными пластинами. К контактным кнопкам приключены секции сопротивлений реостата.

При вертикальном,  $О$ , положении рычага цепь возбуждения генератора разомкнута, рулевой электродвигатель не работает. При отклонении рычага по часовой стрелке от положения  $О$  в положение  $П$  достигается переключка руля на правый борт; при отклонении рычага от положения  $О$  против часовой стрелки, т. е. в положение  $Л$ , руль переключивается на левый борт. Степень отклонения рычага  $П-У$  от положения  $О$  изменяет величину возбуждения генератора, а следовательно, и быстроту переключки руля.

Действие рулевого электропривода согласно представленной схеме сводится к следующему.

На распределительном щитке  $Р-Щ$  включают рубильник  $1$  и помощью пускового реостата  $Р-П$  запускают мотор-генератор.

Затем включают рубильник 2, благодаря чему подается напряжение на переключающий пост П-П, и если он включен, то на соответствующий пост управления П-У. Последний должен иметь рычаг А-В в положении 0, иначе рулевой электродвигатель после включения рубильника 3 начнет производить перекладку руля. Включают рубильник 3, чем достигается соединение цепи якоря генератора Г с цепью якоря рулевого электродвигателя Р-Э-Д. После этого рулевой электропривод готов к работе и управление им производится с соответствующего поста управления.

Проследим работу электропривода при приключенном верхнем посту управления П-У<sub>1</sub> и отклонении рычага А-В по часовой стрелке, т. е. от положения 0 в положение П (на правый борт).

От полюса +, рубильник 1, через плавкий предохранитель, рубильник 2 и его плавкий предохранитель по жиле соединительного кабеля ток поступает к контакту 2 П-П, откуда по жиле соединительного кабеля в клемм 2 П-У<sub>1</sub>, и по соединительному проводу подводится к сегментной пластине 1 П-У<sub>1</sub>. Из последней по соединительной контактной щетке А ток попадает в сегментную пластину П; откуда по соединительному проводу в клемм 5 П-У<sub>1</sub>, дальше по соединительному кабелю через П-П, поступает в клемм 5-й В-К; здесь через выключатель в ток подводится к клемму 9 В-К и затем по жиле кабеля к клемму 9 шунтовой обмотки Ш-Г генератора, через шунтовую обмотку по соединительной жиле кабеля в контакт 1 П-П и дальше по кабелю в клемм 1 П-У<sub>1</sub> и нижнюю левую сегментную пластину, откуда по контактной щетке В в соответствующую кнопку реостата R в посту управления П-У<sub>1</sub>, пройдя секции сопротивления R ток, через клемм 3 П-У<sub>1</sub>, контакт 3 П-П и соединительные провода поступает к клемму 3 у предохранителя рубильника 2 на распределительном щитке, откуда возвращается, через отрицательный полюс в питающую сеть.

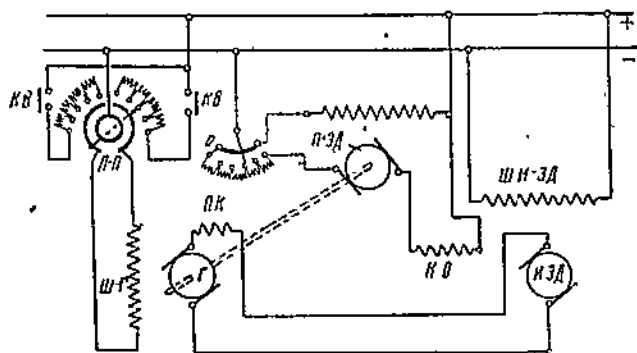
При отклонении рычага АВ влево от положения 0 изменяется направление тока только в обмотке возбуждения генератора, что легко проследить по схеме. Изменение направления магнитного потока генератора при постоянстве направления вращения его якоря, влечет изменение знака электродвижущей силы, а следовательно, и тока в цепи якорей генератора и рулевого электродвигателя. Происходит реверсирование рулевого электродвигателя и изменение направления перекладки руля.

Разобранная система управления руля не дает представления о точном положении руля, а сигнальные лампы только отмечают, на каком борту или же в диаметральной плоскости находится руль в данный момент. Поэтому эти рулевые электроприводы нуждаются в установке специальных указателей положения руля, схемы и принцип действия которых будут рассмотрены ниже.

2. Система Вард-Леонарда — Федоричко. Рулевые электроприводы иногда выполняются по схеме Вард-Леонарда — Федоричко с противокомпаундным генератором. Принципиальное выполнение этой схемы приведено на фиг. 91.

Отличие этой схемы от разобранной выше заключается только в том, что рулевой электродвигатель берется не шунтовой, а компаунд-

ный, у которого шунтовая обмотка также получает независимое возбуждение, как и в разобранный схеме Вард-Леонарда, компаундная же обмотка включается в цепь якоря приводного электродвигателя мотор-генератора. Благодаря такой комбинации системы возбуждения исполнительного или рулевого электродвигателя рулевая установка при повышенных моментах сопротивления на валу рулевого электродвигателя вызывает менее резкие колебания тока в питающей сети, так как одновременно с увеличением нагрузки на электродвигатель мотор-генератора магнитный поток рулевого электродвигателя возрастает за счет большой силы тока, протекающей по его компаундной обмотке, вследствие чего возрастает и вращающий момент рулевого электродвигателя.



Фиг. 91.

- И-Э-Д — исполнительный или рулевой электродвигатель,
- П-Э-П — приводный электродвигатель,
- Г — генератор,
- П-К — противокомпаундная обмотка генератора,
- К-О — компаундная обмотка исполнительного электродвигателя,
- Ш-И-Э-Д — шунтовая обмотка исполнительного электродвигателя,
- Ш-Г — шунтовая обмотка генератора,
- К-В — конечный выключатель,
- П-П — переключающий пост.

Система Вард-Леонарда — Федоричко в остальном аналогична разобранный простой системе Вард-Леонарда с противокомпаундным генератором, поэтому нет необходимости в детальном ее рассмотрении.

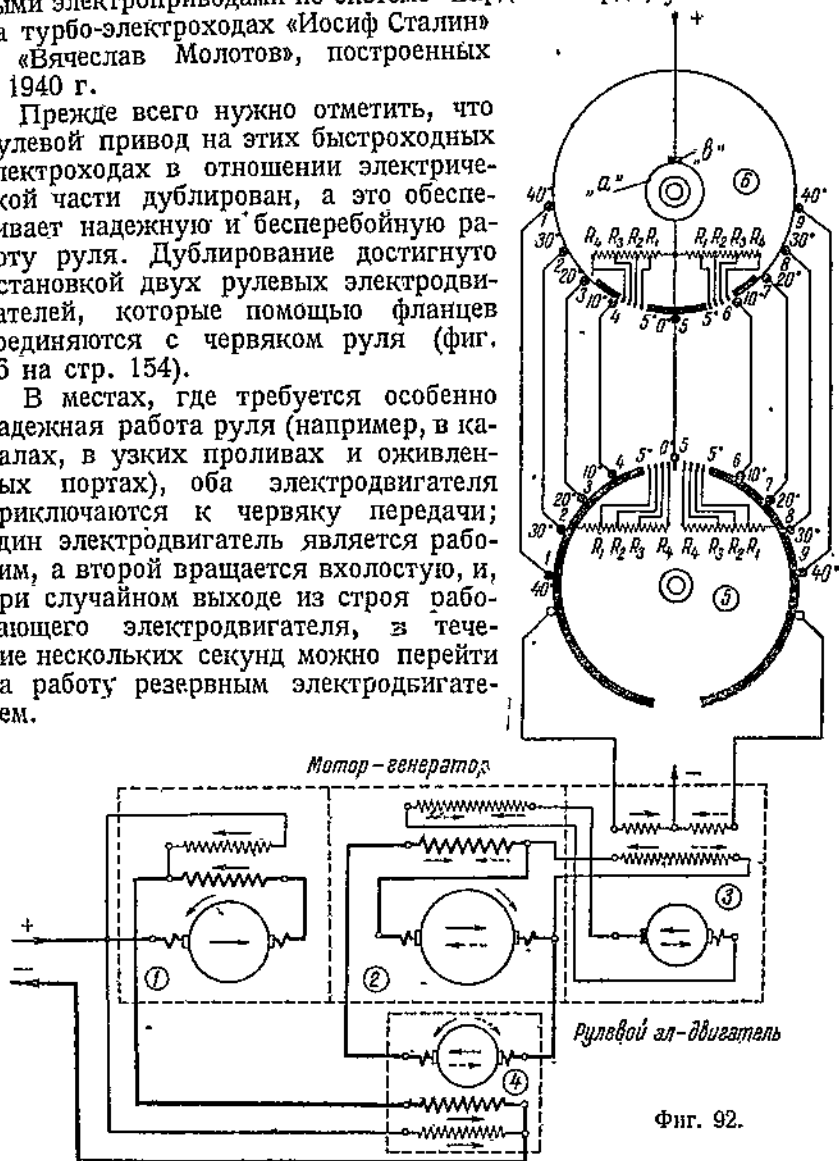
б) Симпатическая система управления в выполнении фирмы АЕГ. Как отмечалось выше, наиболее совершенной в техническом отношении является симпатическая система управлением рулем, которая автоматически обеспечивает строго заданное положение руля в соответствии с заданным отклонением штурвала на тот или другой борт.

Степень точности соответствия между положением штурвала и положением пера руля может достигать одного градуса и меньше одного градуса, но большая точность требует больших габаритов оборудования. Точность соответствия больше чем в один градус практически не требуется, и поэтому выполняемые системы симпатического управления обычно ограничиваются точностью соответствия в один градус.

Ниже рассматривается схема симпатического управления рулевыми электроприводами по системе Вард-Леонарда, установленными на турбо-электроходах «Иосиф Сталин» и «Вячеслав Молотов», построенных в 1940 г.

Прежде всего нужно отметить, что рулевой привод на этих быстроходных электроходах в отношении электрической части дублирован, а это обеспечивает надежную и бесперебойную работу руля. Дублирование достигнуто установкой двух рулевых электродвигателей, которые помощью фланцев соединяются с червяком руля (фиг. 76 на стр. 154).

В местах, где требуется особенно надежная работа руля (например, в каналах, в узких проливах и оживленных портах), оба электродвигателя приключаются к червяку передачи; один электродвигатель является рабочим, а второй вращается вхолостую, и, при случайном выходе из строя работающего электродвигателя, в течение нескольких секунд можно перейти на работу резервным электродвигателем.



Мотор-генераторы, питающие рулевые электродвигатели с их пусковыми приспособлениями и кабельной проводкой также дублированы, включая и датчик, находящийся в посту управления рулевой (штурманской) рубки. Близ поста управления в рулевой рубке находится выключатель, поворотом ручки которого производится переход от работающего электропривода на работу с резервным электроприводом.

Принципиальная схема мощного (60 л. с.) рулевого электропривода в выполнении фирмы АЕГ, применительно к вышеупомянутым турбо-электроходам, представлена на фиг. 92.

На прилагаемой схеме даны следующие части рулевого электропривода:

а) Мотор-генератор с сидящим на его валу вспомогательным возбудителем, состоящий из: 1 — приводного компаундного электродвигателя с дополнительными полюсами; 2 — генератора с противоконпаундной обмоткой и дополнительными полюсами; 3 — вспомогательного возбудителя с дифференциальной обмоткой и стабилизирующей обмоткой; последняя служит для быстрой стабилизации равновесного состояния магнитной системы возбудителя, благодаря чему избегается качание рулевого электродвигателя; эта стабилизирующая обмотка вспомогательного возбудителя приключена к клеммам якоря генератора; <sup>1</sup>

б) 4 — рулевой компаундный электродвигатель, приключенный по системе Вард-Леонарда — Федорицкого, с независимым возбуждением и компаундной обмоткой, последовательно соединенной с цепью главного тока приводного электродвигателя 1 для ослабления мгновенных толчков тока в питающей сети.

в) 5 — контактный приемник, допускающий перекидку руля в заданных пределах; приемник помещается в румпельном отделении и имеет передачу от привода руля;

г) 6 — датчик, связанный со штурвалом поста управления и при повороте штурвала вызывающий нарушение балансирности тока в дифференциальной обмотке вспомогательного возбудителя 3, под действием чего и возникают условия, определяющие перекидку руля в требуемых пределах.

Назначение и действие отдельных электромашин рулевой установки понятно из приведенной схемы. Нужно при этом отметить только, что питание возбуждения генератора 2 производится от вспомогательного возбудителя 3 с дифференциальной обмоткой возбуждения; действие последней сводится к следующему. Дифференциальная обмотка индукторов возбудителя состоит из двух ветвей с одинаковым числом витков в каждой ветви, но создающих магнитные потоки противоположного направления.

При равенстве сил токов, протекающих в обеих ветвях дифференциальной обмотки, действие намагничивающей силы обмотки взаимно уничтожается и магнитный поток индукторов возбудителя равен нулю, а следовательно, и напряжение возбудителя также равно нулю и генератор 2 не получает возбуждения. В случае нарушения равенства токов в дифференциальной обмотке индукторов возбудителя под действием преобладающей силы тока в одной из ветвей появляется магнитный поток, пропорциональный разности ампервитков двух ветвей дифференциальной обмотки. Под преобладающим действием ампервитков одной из ветвей дифференциальной обмотки возбудитель развивает э. д. с., в результате которой и получается ток в обмотке возбуждения генератора 2, приключенной

<sup>1</sup> В рулевых установках малой мощности вспомогательный возбудитель не применяется.

к якору возбуждателя 3. Изменение преобладающей силы тока в одной или в другой ветви дифференциальной обмотки возбуждателя вызывает соответственное изменение величины и направления тока возбуждения генератора 2, а следовательно, мощности и направления вращения рулевого электродвигателя 4.

Для более быстрого размагничивания индукторов возбуждателя после уравнивания сил токов в ветвях дифференциальной обмотки магнитная система возбуждателя снабжена дополнительно стабилизирующей обмоткой. Для этого стабилизирующая обмотка получает питание от якоря генератора 2 и создает магнитный поток противоположно-направленный магнитному потоку дифференциальной обмотки. Изменение силы тока в ветвях дифференциальной обмотки возбуждателя достигается путем поворота датчика 6, связанного со штурвалом, восстановление же равенства или балансирности силы тока в ветвях дифференциальной обмотки возбуждателя достигается за счет ответного поворота приемника 5 в направлении, противоположном по отношению к направлению вращения датчика.

Датчик представляет вращающийся диск, на котором имеются контактные пластины, изолированные друг от друга. Средняя контактная сегментная пластина (у щетки № 5) занимает часть диска расстоянием, пропорциональным  $10^\circ$ , и своей серединой прилегает к щетке № 5, что отвечает  $0^\circ$  штурвала, т. е. нахождению пера руля в диаметральной плоскости. В обе стороны от средней контактной пластины на диске помещены по четыре изолированных контактных пластины с расстоянием между ними пропорциональным  $1^\circ$ . Средняя контактная пластина с помощью кольца *a* и скользящей щетки *б* соединяется с положительным полюсом сети. Боковые контактные пластины диска также присоединяются к положительному полюсу, но через набор сопротивлений, значения которых указаны в приводимой таблице (табл. 21).

Таблица 21

Значения набора сопротивлений датчика и приемника

| Для напряже-<br>ния сети | Значения сопротивлений в омах |       |       |       |       |
|--------------------------|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|                          | $R_1$                         | $R_2$ | $R_3$ | $R_4$ | Всего |
| 110                      | 27,5                          | 46    | 91,5  | 275   | 440   |
| 220                      | 92                            | 154   | 304   | 915   | 1465  |

К диску датчика прилегают неподвижные щетки в форме роликов, которые расположены друг от друга на расстоянии, пропорциональном  $10^\circ$ . В каждую сторону от щетки № 5 расположено по четыре щетки и, следовательно, все расстояние между крайними щетками 1—9 пропорционально  $80^\circ$ . Диск датчика можно вращать как по часовой, так и против часовой стрелки. Неподвижные щетки датчика 1—9 девятижильным кабелем соединяются соответственно с девятью неподвижными щетками приемника.

Приемник представляет также диск, вращаемый от рулевого привода. На диске приемника имеются две больших боковых сегментных контактных пластины, расстояние между которыми в верхней части пропорционально  $10^\circ$ . В этом пространстве между боковыми контактными пластинами размещено на диске 9 контактных пластин с расстоянием между ними, кратным  $1^\circ$ . Все контактные пластины приемника изолированы. Центральная контактная пластина свободна, а боковые от нее через набор таких же сопротивлений, как и у датчика, соединяются с большими боковыми сегментными пластинами. Сопротивления приемника приключаются к контактным пластинам в обратной последовательности сравнительно с сопротивлениями датчика относительно нулевых положений. Нахождение щетки № 5 приемника на центральной контактной пластине соответствует положению пера руля в диаметральной плоскости.

Рассматриваемая система симпатического управления может быть использована для перекладки пера руля в  $80^\circ$  с борта на борт и с точностью соответствия между положением штурвала и руля в  $1^\circ$ .

Действие датчика *A* и приемника *П* на изменение величин сил токов в ветвях дифференциальной обмотки и на восстановление равновесия токов уясним из следующего примера.

Требуется положить руль на  $8^\circ$  правого борта. Для этого штурвал и связанный механически с ним датчик *D* поворачиваем, допустим, по часовой стрелке.

Измененное взаимоположение датчика *D* и приемника *П* представлено на фиг. 93.

При исходном положении, т. е. когда штурвал находился на  $0^\circ$ , тока в системе не было. При смещении датчика *D* по часовой стрелке на  $8^\circ$  имеем поступление тока в левую сегментную контактную пластину приемника *П* и дальше в левую ветвь дифференциальной обмотки возбuditеля. В правой ветви ток отсутствует. Руль начнет перекадываться на правый борт; перекладка руля вызовет поворот приемника *П* против часовой стрелки, и когда приемник повернется на  $8^\circ$  в обеих ветвях дифференциальной обмотки будем иметь ток одинаковой силы в соответствии с последовательно-приключенными сопротивлениями  $R_1 + R_2 + R_3$  датчика *D* для правой ветви дифференциальной обмотки и сопротивлениями  $R_1 + R_2 + R_3$  приемника *П* для левой ветви обмотки. Последнее легко проследить на фиг. 94.

Всякое произвольное отклонение пера руля от заданного положения вызовет смещение приемника, вследствие чего нарушится установившаяся балансирность токов в ветвях дифференциальной обмотки и рулевая система автоматически придет в действие для восстановления нарушенного положения руля.

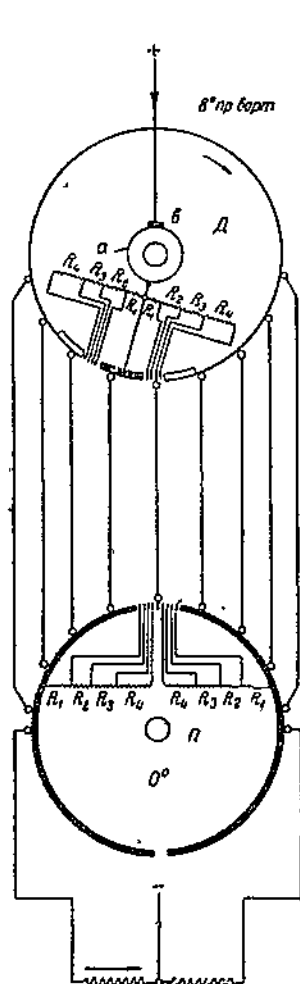
Для настройки и защиты системы возбуждения возбuditеля применяется набор сопротивлений, принципиальная схема приключений которых дана на фиг. 95.

Назначение сопротивлений следующее. Сопротивления  $K_{22}$  и «—» и  $I_{11}$  и «—» являются разрядными сопротивлениями ветвей дифференциальной обмотки.

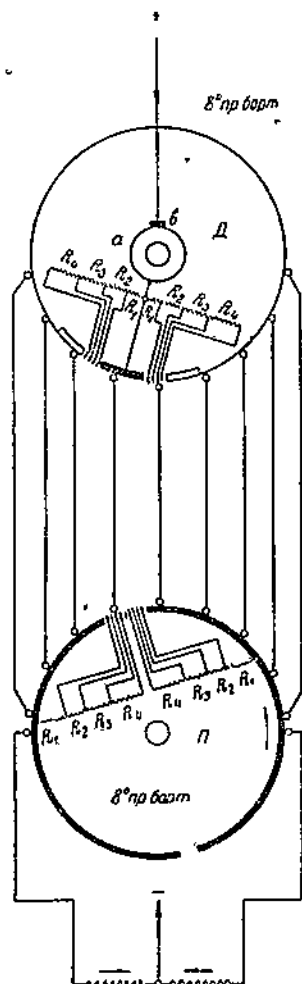
Сопротивления  $K_{22} \div K_2$  и  $I_{11} \div I_1$  являются сопротивлениями для настройки чувствительности системы.

Сопротивления  $K_{22} \div «+»$  и  $I_{11} \div «+»$  служат для искрогашения.

70—71 и 60—61 — дополнительные сопротивления.



Фиг. 93.



Фиг. 94.

Монтажная схема соединений одного комплекта оборудования рулевого электропривода турбо-электроходов «Иосиф Сталин» и «Вячеслав Молотов» представлена на фиг. 96 (см. на вклейке в конце книги).

Второй дублирующий комплект оборудования на схеме опущен, так как подключение его к общим элементам оборудования — тумбе управления 6 и пусковому ключу 2 — вполне аналогично представленному на схеме комплекту оборудования.

7 — контакторная станция для запуска мотор-генератора, получающая питание от общесудовой сети.

2 — пусковой ключ в виде пакетного выключателя, представляющий комбинацию четырех выключателей, управляемых одной рукояткой. При нахождении рукоятки ключа в вертикальном положении обе контакторные станции выключены, при повороте рукоятки ключа направо включается изображенная на схеме станция, при повороте налево — приключается вторая нижняя контакторная станция, обслуживающая дублирующий агрегат.

3 — мотор-генератор, с сидящим на его валу вспомогательным возбудителем.

4 — рулевой электродвигатель.

5 — приемник, связанный с рулевым приводом.

6 — тумба управления, имеющая дублированный датчик, механически приводимый от штурвала. В тумбе управления помещаются две сигнальных лампы — красная и зеленая. При перекладке руля право на борт освещается часть шкалы красной лампы, если же руль переключается лево на борт, то освещается часть шкалы зеленой лампы. Тумбы управления установлены в рулевой рубке и на ходовом мостике.

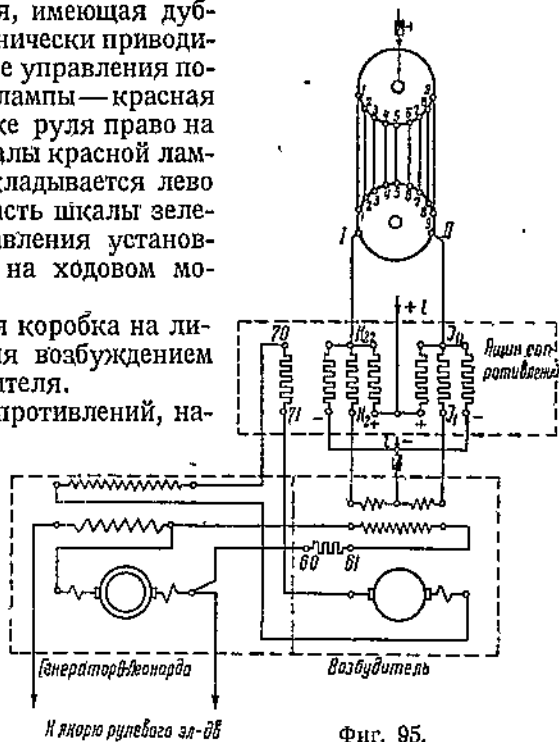
7 — предохранительная коробка на линии питания и управления возбуждением вспомогательного возбудителя.

8—ящик с набором сопротивлений, назначение которых указано в пояснении к схеме фиг. 95.

Для введения в действие рулевого электропривода поворачивают пусковой ключ 2 направо или налево, вследствие чего производится автоматический пуск с помощью той или другой контактной станции 1, требуемого мотор-генератора 3 и подается возбуждение соответствующему рулевому электродвигателю 4.

Контакторная станция 1 имеет следующее оборудование:

а) Контактор  $I$  с искрогасительной катушкой  $ИК$  и включающей катушкой  $ВК_1$ , в цепь которой включены плавкий предохранитель  $ПП$  и две ступени ограничительного сопротивления  $ОС_1$ ; этот контактор имеет два блок-контакта, из них  $1'$  нормально-открытый, а  $1''$  — нормально-закрытый.



Фиг. 95.

б) Тайм-тактор II (контактор с выдержкой времени) с искрогасительной катушкой ИК, включающей катушкой ВК<sub>II</sub> и нормально-закрытыми блок-контактами 2'; в цепь ВК<sub>II</sub> включены две ступени ограничительного сопротивления ОС<sub>II</sub>.

в) Контактор III с искрогасительной катушкой ИК, включающей катушкой ВК<sub>III</sub>, нормально-закрытыми блок-контактами 3' и вспомогательным контактором IV со своей искрогасительной катушкой; в цепь ВК<sub>III</sub> включены две ступени ограничительного сопротивления ОС<sub>III</sub>.

Параллельно контактору III приключена пусковая ступень сопротивления R электродвигателя мотор-генератора.

Автоматичность пуска мотор-генератора и приключения возбуждения рулевого электродвигателя протекает следующим образом.

От поворота ключа 2 замыкается цепь ВК<sub>I</sub> контактора I, благодаря чему последний включается, замыкает блок-контакт 1' и размыкает 1''; размыкание последнего блок-контакта вводит в ВК<sub>I</sub> обе ступени ОС<sub>I</sub>. Электродвигатель мотор-генератора начинает работать, так как его якорь с серийной обмоткой приключен к сети через пусковое сопротивление R, а шунтовая обмотка также находится под током после включения контактора I, что легко проследить по схеме.

Включение блок-контакта 1' замыкает ВК<sub>II</sub> тайм-тактора II, после чего последний через промежуток времени, отвечающий настройке тайм-тактора, включается, одновременно вводя в цепь ВК<sub>II</sub> обе ступени ОС<sub>II</sub>. Включение тайм-тактора II сопровождается размыканием блок-контакта 2', а это гарантирует невозможность предварительного включения контактора I, пока тайм-тактор II не включен, что предохраняет систему от больших бросков тока во время случайных понижений напряжения в сети.

Замыкание тайм-тактора II вызывает включение контакторов III и IV с последующим размыканием блок-контакта 3' и введением обеих ступеней ОС<sub>III</sub> в цепь ВК<sub>III</sub>. По включении контактора III мотор-генератор развивает полное число оборотов, а включение вспомогательного контактора IV сопровождается подачей питания на предохранительный щиток 7 в следующем направлении: положительный потенциал подается на клемм С через включенный контактор I, а отрицательный потенциал — на клемм J, что легко проследить по схеме.

Таким образом рулевой электропривод готов к работе, и дальнейшая работа рулевого электропривода будет зависеть только от перемещения датчика, связанного со штурвалом тумбы управления б.

в) Контактное управление рулевого электропривода системы б. Балтийского завода. Эта система рулевого электропривода установлена на лесовозах 2-й серии: «Рабочий», «Искра», «Правда», «Крестьянин» и на рефрижераторах «Андрей Жданов» и «Мария Ульянова».

Контакторные системы рулевых электроприводов имеют следующие особенности:

1) Положительные:

Меньшая первоначальная стоимость, а также меньший вес и габариты по сравнению с системой Вард-Леонарда.

2) Отрицательные:

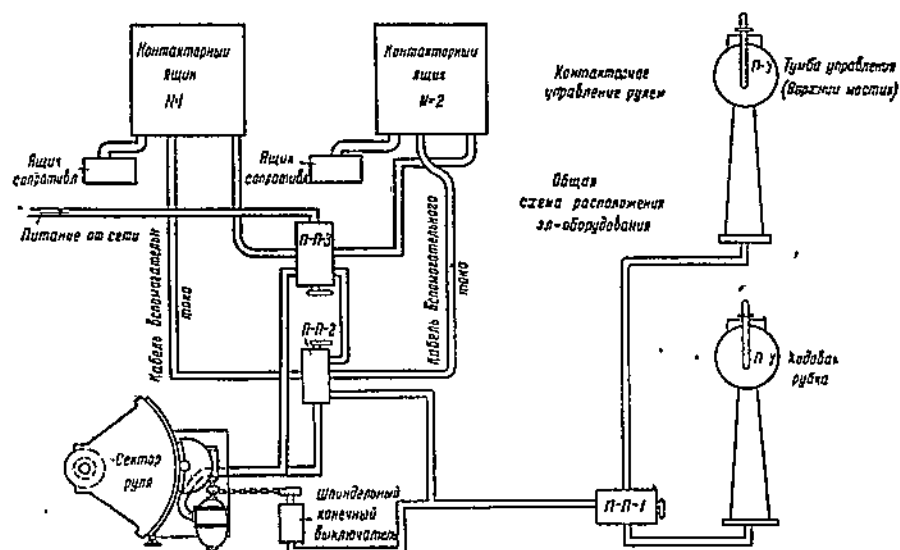
а) меньшая надежность исправности действия при многократных

Включения и выключения благодаря наличию многих контактов, поэтому требуется установка двух контактных ящиков;

б) более сложное и тщательное обслуживание, особенно контакторов, требующее соответствующей регулировки пружин для избежания произвольных отключений в судовых условиях;

в) большие броски тока при пуске, что при частых включениях руля отрицательно отзывается на питающей сети и сопровождается большой затратой электроэнергии при пусках и реверсах;

г) невозможность или меньшая вероятность дальнейшей работы рулевого привода после кратковременных заеданий руля или больших перегрузок его электродвигателя; последнее обстоятельство может вызвать сравнительно длительную потерю управления кораблем и быть причиной аварии судна;



Фиг. 97.

д) для производства быстрого маневрирования требуется повышенный навык рулевого и исправность действия рулевого указателя, чтобы избежать действия конечного выключателя.

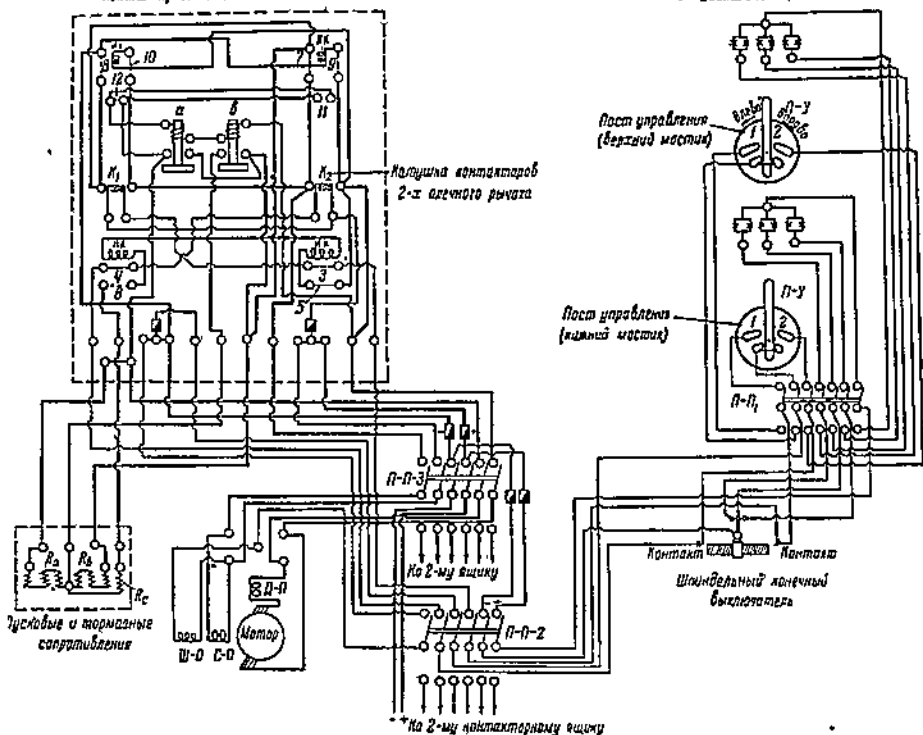
На прилагаемом чертеже (фиг. 97) приведена наглядная схема соединений элементов электропривода на вышеуказанных судах. На фиг. 98 дана монтажная схема электрических соединений электропривода. Для более легкого ознакомления с работой рулевого электропривода контакторной системы Балтийского завода дана развертка схемы электрических соединений, представленная на фиг. 99. Сокращенные обозначения, приведенные на фиг. 99, одинаковы и для фиг. 97, 98 и 98а.

Действие привода сводится к следующему: включают в требуемом направлении все *П-П*, затем, поворачивая рукоятку *П-У*, допустим, налево (фиг. 99) и с помощью ее токопроводящей части производим замыкание контакта 2, благодаря чему катушка *K*<sub>2</sub> оживляется

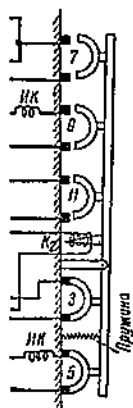
током и происходит поворот двухплечного рычага-контактора, сопровождающийся следующим переключением контактов: нечет-

Контактный ящик №1

Сигнальные цепи лампы



Фиг. 98. Схема электрических соединений рулевого привода на лесовозах II серии.



Деталь - 2-х плечный рычаг контактор

Фиг. 98а.

ные контакты, нормально-закрытые, 3 и 5, размыкаются, а нормально-открытые, 7, 9, 11, замыкаются. Ток проходит по шунтовой обмотке и серийной обмотке; из последней поступает через контакт 7,  $R_b$  и  $R_a$  в якорь, из якоря через контакт 9 возвращается в линию. Двигатель начинает вращаться. Приключенные к клеммам якоря катушки реле  $a$  и  $b$  получают питание, так как контакт 11 замкнут. Когда скорость электродвигателя достигнет, примерно, 40% нормального числа оборотов, сработает реле  $a$ , как имеющее большее число витков, и зашунтирует ступень пускового сопротивления  $R_a$ . Электродвигатель увеличит мощность и скорость, и когда скорость возрастет до 70%  $n_n$ , сработает реле  $b$  и зашунтирует вторую ступень —  $R_b$ . Электродвигатель перейдет на нормальный режим работы.

При повороте рукоятки П-У в положение 0 в катушке  $K_2$  ток прервется; двухплечный рычаг вернется в исходное положение и соответственно разомкнет контакты 7, 9 и 11, вследствие чего якорь электродвигателя будет

отключен от сети, а замыкание контакта 5 приключит к якору сопротивления  $R_a$  и  $R_c$ . Замыкание якоря на сопротивление, при наличии магнитного потока от шунтовой обмотки, вызовет быстрое торможение электродвигателя, обеспечивающее раскат руля не свыше  $2^\circ$ .

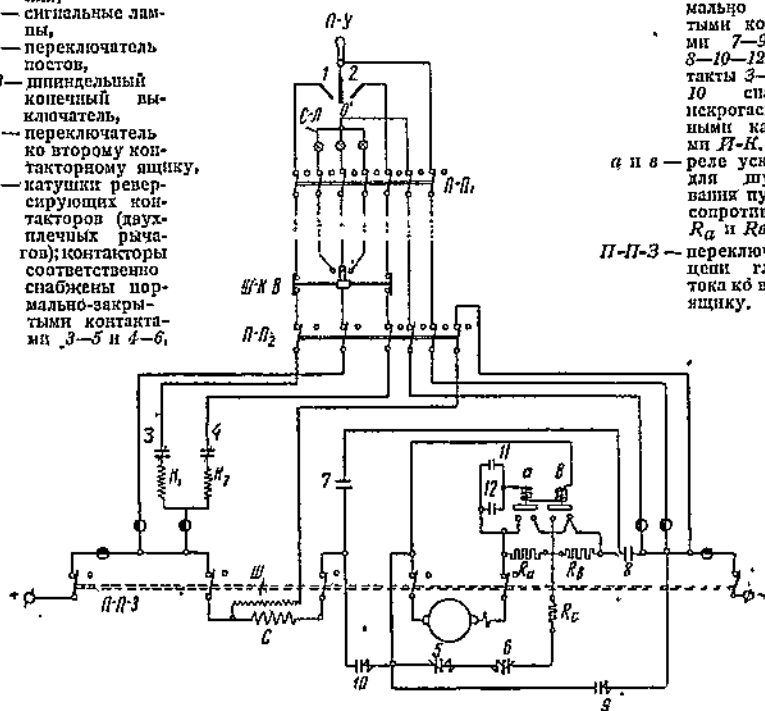
Размыкание контакта 3 при включении катушки  $K_2$  предохраняет систему от возможного короткого замыкания через сериесную обмотку, если бы произошло при этом в посту управления П-У случайное замыкание цепи катушки  $K_1$ .

- П-У — пост управления,  
С-Л — сигнальные лампы,  
П-П<sub>1</sub> — переключатель постов,  
Ш-К-В — шпиндельный конечный выключатель,  
П-П<sub>2</sub> — переключатель ко второму контакторному ящику,  
 $K_2-K_1$  — катушки реверсирующих контакторов (двухплечных рычагов); контакторы соответственно снабжены нормально-закрытыми контактами 3-5 и 4-6;

а также соответственно нормально открытыми контактами 7-9-11 и 8-10-12. Контакты 3-6 и 9-10 снабжены искротасительными катушками П-К.

$\alpha$  и  $\beta$  — реле ускорения для шунтирования пусковых сопротивлений  $R_a$  и  $R_b$ .

П-П-3 — переключатель цепи главного тока ко второму ящику.



Фиг. 99.

Для ограничения угла перекладки руля служит шпиндельный конечный выключатель, который размыкает цепь катушки  $K_1$  или  $K_2$ , когда отклонение руля от диаметральной плоскости превысит допустимые пределы, благодаря чему электродвигатель отключится от сети.

Шпиндельный выключатель также использован и для обслуживания сигнальных ламп в П-У, а именно, когда руль находится в диаметральной плоскости, то шпиндельный выключатель замыкает цепь средней лампы; при отклонении пера руля от диаметральной плоскости средняя лампа гаснет, а загорается красная или зеленая лампа, смотря на каком борту находится руль. Соответствующая

цветная лампа продолжает гореть все время, пока руль находится отклоненным от диаметральной плоскости.

При замыкании рукояткой контакта 7 включается катушка  $K_1$ , которая производит соответствующие размыкания и замыкания четных контактов. От этого электродвигатель начинает работать в обратном направлении. Реверс электродвигателя осуществляется за счет изменения направления тока в якоре, что легко проследить по схеме.

## § 20. Рулевые комбинированные электрогидравлические приводы

В рулевых комбинированных электроприводах роль электродвигателя сводится к превращению электрической энергии в гидравлическую, а последняя непосредственно уже используется для осуществления перекладки руля путем воздействия на его румпель.

В зависимости от устройства и использования гидромеханической части рулевые электрогидравлические приводы можно разделить на два типа:

а) Электрогидравлические приводы с постоянным вращением приводного электродвигателя.

б) Электрогидравлические приводы с прерывистым вращением приводного электродвигателя.

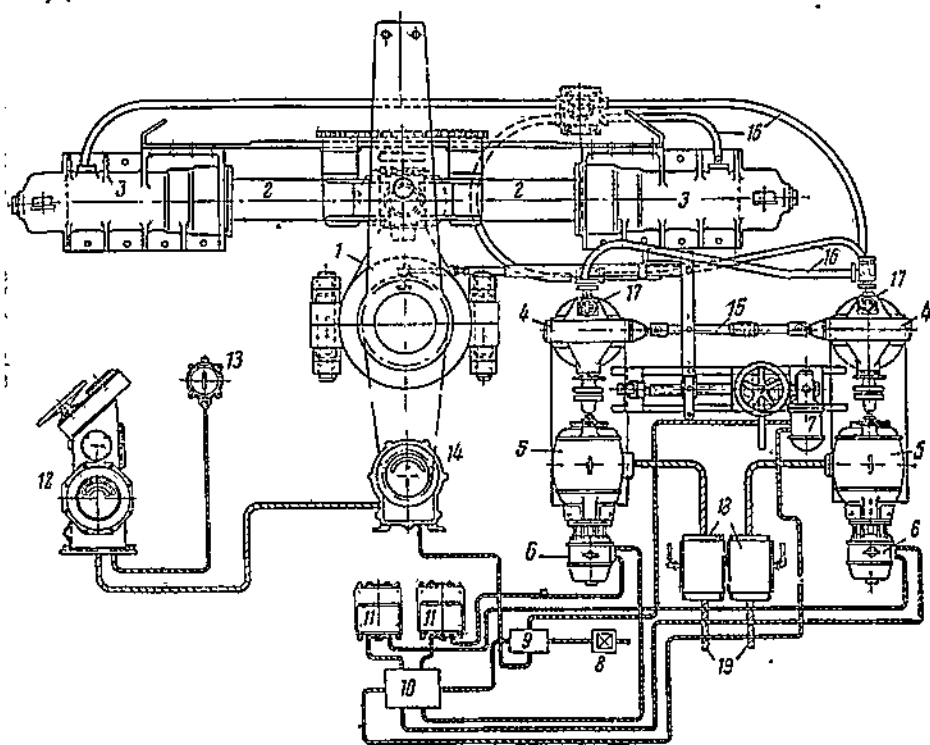
Первые системы приводов являются технически совершенными благодаря плавности и скорости производства перемены перекладки руля, особенно в мощных установках, почему они и находят широкое применение на судах заграничного флота. Включение системы для перекладки руля и особенно быстрая перемена направления перекладки не затрагивает работы мощного приводного электродвигателя, вращающегося с постоянной скоростью в одном направлении и обладающего большими инерционными (динамическими) сопротивлениями. Управление перекладкой руля в этих системах сводится к включению или реверсированию маленького электромоторчика так называемого телемотора (мотора с дистанционным управлением), обладающего ничтожными маховыми массами и вызывающего при этом незначительные смещения в регулирующей части гидравлической системы. Благодаря этому управление мощными рулевыми установками с постоянным вращением приводного электродвигателя создает быстроту изменения режимов, необходимых для перекладки руля, и дает иногда также экономические преимущества в отношении меньшего расхода электроэнергии за счет отсутствия пусковых режимов мощного приводного электродвигателя.

Число включений рулевого привода на коммерческих судах, как указывалось выше, может достигать 200—300 в час, а полезное использование электроэнергии при пусках, например, у шунтового электродвигателя, лежит ниже 50%, поэтому экономия от расходования электроэнергии на пуски приводного электродвигателя может оказаться больше по сравнению с расходом электроэнергии на холостой его ход.

Примером оборудования электрогидравлическими рулевыми приводами с постоянным вращением электродвигателя могут служить

построенные за последнее время за границей первоклассные лайнеры:

а) Дизель-электроход «Patria», вступивший в эксплуатацию в августе 1938 г. и имеющий рулевую установку мощностью  $2 \times 14$  л. с.



Фиг. 100. Электрогидравлический рулевой привод фирмы AEG на дизель-электроходе «Patria».

- |                                                             |                                                                                      |
|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 — румпель,                                                | 12 — тумба управления с датчиком симпатической системы,                              |
| 2 — поршень (плунжер),                                      | 13 — контрольный указатель,                                                          |
| 3 — цилиндры,                                               | 14 — приемник симпатической системы управления, связанный с баллером руля,           |
| 4 — ротационные насосы,                                     | 15 — тяга для управления подачей насосов,                                            |
| 5 — электродвигатели насосов трехфазного тока,              | 16 — соединительные трубопроводы,                                                    |
| 6 — генераторы системы Вард-Леонард,                        | 17 — запорные клапаны,                                                               |
| 7 — телемотор (электродвигатель дистанционного управления), | 18 — пусковые ящики электродвигателей трехфазного тока с защитными приспособлениями, |
| 8 — выпрямитель тока,                                       | 19 — фидера электродвигателей трехфазного тока,                                      |
| 9 — клеммная коробка,                                       |                                                                                      |
| 10 — распределительный ящик,                                |                                                                                      |
| 11 — регулировочные сопротивления,                          |                                                                                      |

б) Самый мощный теплоход «Dominion Monarch», вступивший в эксплуатацию в феврале 1939 г. и оборудованный рулевым приводом мощностью  $2 \times 90$  л. с.

Схема общего расположения электрогидравлического привода на дизель-электроходе «Patria» представлена на фиг. 100. Рулевой электрогидравлический привод на «Patria» выполнен фирмой AEG. Перекладка руля производится непосредственно давлением на румпель 1

со стороны одного из плунжеров (поршней) 2 гидравлических цилиндров 3, расположенных на одной оси.

При подаче жидкости под поршень одного цилиндра и соответственном удалении жидкости из полости другого цилиндра создается давление в первом цилиндре и выталкивается его плунжер, который и производит отклонение румпеля, а следовательно, и перекладку руля в необходимых пределах. Перекачивание жидкости из одного цилиндра в другой осуществляется помощью ротативно-поршневого насоса 4 системы Lauff Thoma (Лёфф Тома). Рулевой привод снабжен двумя одинаковыми насосами. Перекладку руля можно производить при работе одного или обоих насосов. Перекладка руля с борта на борт при работе одним насосом продолжается 50 сек., а при работе обоих насосов, примерно, 25 сек. При установившемся длительном ходе судна обычно достаточно для управления рулем работы одного насоса.

Насосы помощью трубопроводов 16 соединяются с цилиндрами и перекачивание жидкости в системе в том или другом направлении совершается только во время перекладки руля. Возможные утечки жидкости в системе вследствие неплотностей пополняются из запасного бачка.

Для привода насосов применены электродвигатели 5 трехфазного тока, непосредственно соединенные помощью муфт с роторами насосов. На валах электродвигателей 5 находятся генераторы Леонарда 6, из которых каждый может служить для питания телемотора 7. Для питания возбуждения генераторов 6 и телемотора 7 установлен выпрямитель 8. Выпрямленный ток поступает в клеммную коробку 9, откуда подается непосредственно на возбуждение телемотора 7 и через распределительный ящик 10 с регулировочными сопротивлениями 11 на возбуждение генераторов 6.

Питание цепи якоря телемотора 7 производится от генераторов 6 также через распределительный ящик 10. Управление телемотором производится по системе Вард-Леонарда с помощью штурвала поста управления (тумбы). Система управления рулем симпатическая. Вращение телемотора вызывает смещение тяги 15 в том или другом направлении в зависимости от направления вращения телемотора 7.

Величина смещения тяги 15 обуславливает производительность насосов, а изменение направления смещения тяги относительно ее среднего положения вызывает перемену направления течения жидкости в гидравлической системе (среднее положение тяги отвечает холостому ходу насосов, т. е. их производительность равна нулю). От изменения производительности насосов зависит скорость перекладки руля, а изменение направления течения жидкости в системе влечет перемену направления перекладки руля. Принцип действия насосов системы Lauff Thoma будет разобран ниже. Полный ход поршня цилиндров 3 составляет 1080 мм, диаметр поршня — 270 мм, максимальный вращающий момент 36 тм.

Рулевая установка на «Dominion Monarch» развивает максимальный вращающий момент 153 тм. Эта установка как более мощная оборудована четырьмя цилиндрами, расположенными попарно

с обеих сторон баллера. Установка оборудована двумя электронасосными агрегатами, из которых один нормально является резервным. Электродвигатели неререверсивные, с постоянным числом оборотов, развивают максимальную мощность каждый 90 л. с. При работе одного агрегата обеспечена скорость перекачки руля в 30 сек. с борта на борт. При работе обоих агрегатов (например, в извилистых каналах, при доковании и т. п.) скорость перекачки, а следовательно, и быстрота маневров судна, примерно, удваивается.

Электрогидравлические рулевые приводы второго типа, т. е. с прерывистым и реверсивным вращением электродвигателя, применяются в установках сравнительно малой мощности (порядка до 3 квт).

Рулевые электрогидравлические устройства второго типа установлены на рефрижераторных теплоходах Марсельской линии (постройки завода им. Марти) «Волга», «Нева» «Рион» и «Кубань». Мощность приводного электродвигателя в этих установках составляет 1,2 л. с.

Для ознакомления с принципом действия электрогидравлических рулевых устройств второго типа и электрической схемой их управления рассмотрим выполненные установки на теплоходах Марсельской линии.

В этих приводах применены ротативно-поршневые насосы системы Лёфф-Тома (Lauff Thoma), устройство которых видно на фиг. 101.

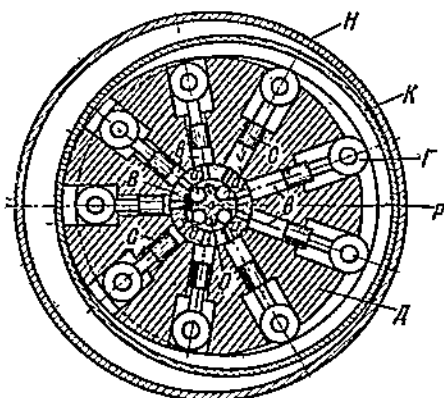
Принцип действия насоса сводится к следующему: вокруг неподвижной оси  $O$ , имеющей продольные каналы  $a_1—a_4$ , вращается диск  $D$ , сидящий на валу  $B$ ; вал спарен с приводным электродвигателем.

В диске  $D$  просверлено 9 радиальных цилиндрических каналов  $b$ , в которых могут перемещаться в радиальном направлении поршни  $C$ , связанные с роликовыми головками  $Г$ , скользящими по выточке направляющего кольца  $K$ , или же головки связаны шарнирно с направляющим кольцом, как это имеет место у подобных насосов системы «Hele-Show».

Направляющее кольцо  $K$  своей выточкой  $P$  определяет положение головок, а следовательно, и поршней  $C$ , и может под действием тяг (не указаны) смещать свое положение относительно неподвижной оси  $O$  и диска  $D$ . Благодаря смещению кольца могут быть следующие характерные положения:

а) Кольцо смещено доотказа — максимальное значение правого эксцентриситета кольца относительно оси  $O$  (положение, указанное на чертеже).

б) Концентрическое положение кольца  $K$  относительно оси  $O$  (эксцентриситет кольца равен нулю).



Фиг. 101. Принцип устройства насоса Лёфф-Тома.

в) Кольцо смещено доотказа влево (максимальное значение левого эксцентриситета кольца  $K$ ).

Ось, вал с диском и направляющее кольцо заключены в кожух насоса  $H$ . Изменением с помощью тяги величины эксцентриситета кольца  $K$  относительно оси  $O$  достигается соответственно и изменение хода поршней в диске  $D$ , а именно, при эксцентриситете, равном нулю, ход поршней в диске относительно оси  $O$  также равен нулю, при увеличении эксцентриситета соответственно увеличивается и ход поршней.

Рассмотрим работу насоса.

1. При правом эксцентриситете кольца  $K$  (положение на чертеже):

а) вращение диска  $D$  по часовой стрелке; поршни верхней половины диска  $D$  удаляются от оси  $O$  и производят всасывание жидкости из верхних каналов ( $a_1$  и  $a_2$ ).

Поршни нижней половины диска  $D$  приближаются к оси  $O$  и производят нагнетание (выталкивание) жидкости в нижние каналы ( $a_3$  и  $a_4$ ).

б) Вращение диска  $D$  против часовой стрелки; в этих условиях жидкость будет всасываться из нижних каналов ( $a_3$  и  $a_4$ ) и нагнетаться в верхние каналы ( $a_1$  и  $a_2$ ).

2. При левом эксцентриситете кольца  $K$ :

а) Вращение диска по часовой стрелке; жидкость будет всасываться из нижних каналов и нагнетаться в верхние каналы.

б) Вращение диска против часовой стрелки; жидкость всасывается из верхних каналов и нагнетается в нижние каналы.

Каналы верхней и нижней половины оси  $O$  между собой разделены и трубопроводами соединены каждый со своим цилиндром рулевой машины.

Таким образом изменение течения жидкости в установке, вызывающее изменение направления перекладки руля, можно производить или смещением эксцентриситета кольца  $K$  при постоянном направлении вращения диска насоса, или изменением направления вращения диска насоса при сохранении положения эксцентриситета относительно оси  $O$ .

Изменение величины эксцентриситета кольца  $K$  при постоянной скорости приводного электродвигателя обуславливает только производительность насоса, а следовательно, и скорость перекладки руля.

В качестве рабочей среды гидравлической системы рулевых приводов применяют жидкости, противостоящие замерзанию и значительному увеличению коэффициента вязкости при пониженных температурах. В то же время жидкость не должна вызывать разъедания металлических частей системы. Наиболее подходящей жидкостью для электрогидравлических приводов является минеральное масло высших марок, поэтому в гидравлических системах наших судов, а также и указанных заграничных лайнеров применяют первосортное минеральное масло.

Давление жидкости, развиваемое в цилиндрах рулевых гидравлических машин, обычно бывает в системах:

а) с непрерывным вращением насоса — до  $150 \text{ кг/см}^2$ ,

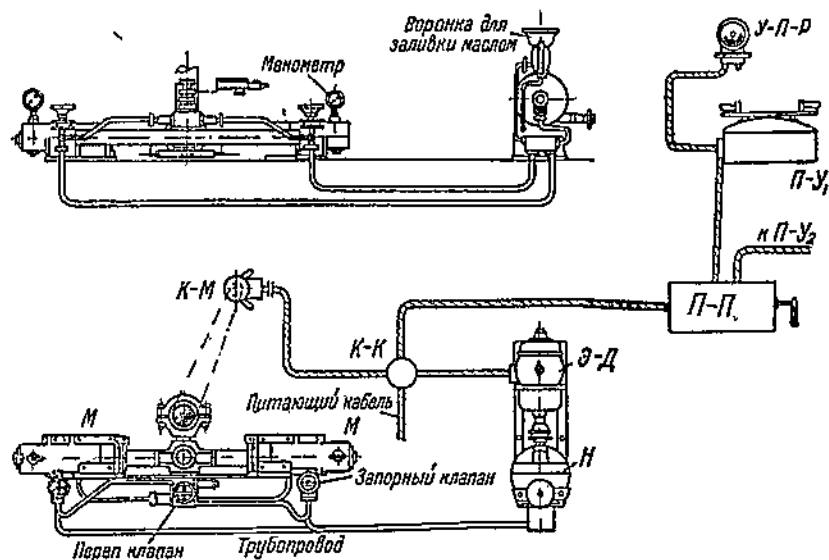
б) с прерывистым вращением насоса — до  $80 \text{ кг/см}^2$ .

Для привода насосов на теплоходах Марсельской линии применены серийные реверсивные электродвигатели, которые благодаря незначительной мощности (1,2 л. с.) допускают безреостатный пуск.

Общая схема рулевой электрогидравлической установки этих теплоходов приведена на фиг. 102.

Установка состоит из:

- а) гидравлической двухцилиндровой машины *М*, воздействующей на румпель руля,
- б) ротативно-поршневого насоса *Н*,
- в) приводного электродвигателя *Э-Д*,
- г) соединительной коробки *К-К*,
- д) переключающих постов *П-П*,
- е) постов управления *П-У*,
- ж) коммутатора *К-М*, управляющего указателем положения руля,
- з) указателя положения руля *У-П-Р*.



Фиг. 102. Схема установки электрогидравлических приводов на теплоходах Марсельской линии.

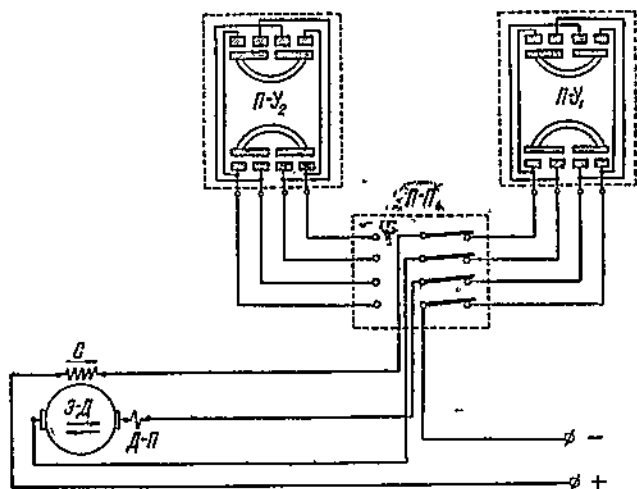
Принцип действия электрической части, представленный на фиг. 103, заключается в следующем.

Нажимая на одну из кнопок двухплечего рычага *П-У*, производим замыкание правых или левых контактов в *П-У*, что влечет приключение к питающей линии серийного электродвигателя *Э-Д*, который и начинает вращать насос *Н*. Последний, подавая жидкость в один или другой цилиндр гидравлической машины *М*, вызывает требуемую перекладку руля, определяемую по указателю *У-П-Р*. Так как система обладает инертностью, хотя и незначительной, то прекращение нажатия на кнопку, рукоятки *П-У* не может вызвать моментального прекращения перекладки руля и возможная раскатка руля может достигать до 2°.

Поэтому управление рулем требует опытности рулевого. Реверсивность электродвигателя достигается за счет изменения направления тока в якоре, что легко проследить по схеме.

Системы электрогидравлических приводов не требуют конечных выключателей, так как сама гидравлическая машина ограничивает пределы перекладки руля.

Для предохранения гидравлической системы от недопустимого повышения давления в ней предусмотрены предохранительные клапаны. Система не предотвращена от произвольной самоперекладки руля под действием внешних усилий.



Фиг. 103. Схема электрических соединений рулевых приводов на теплоходах Марсельской линии.

## § 21. Указатели положения руля

В результате рассмотрения электрических, а также и электрогидравлических рулевых приводов можно заключить, что все эти системы приводов, за исключением системы симпатического управления, нуждаются в указателях положения руля, фиксирующих величину отклонения пера руля от диаметральной плоскости на любой борт.

Установка подобных указателей особенно необходима в электроприводах, которые снабжаются конечными выключателями, так как незнание рулевым истинного положения пера руля может повлечь перекладку руля за допустимые пределы, в результате чего сработает конечный выключатель и произойдет нежелательный, а иногда и опасный перерыв в управлении судном.

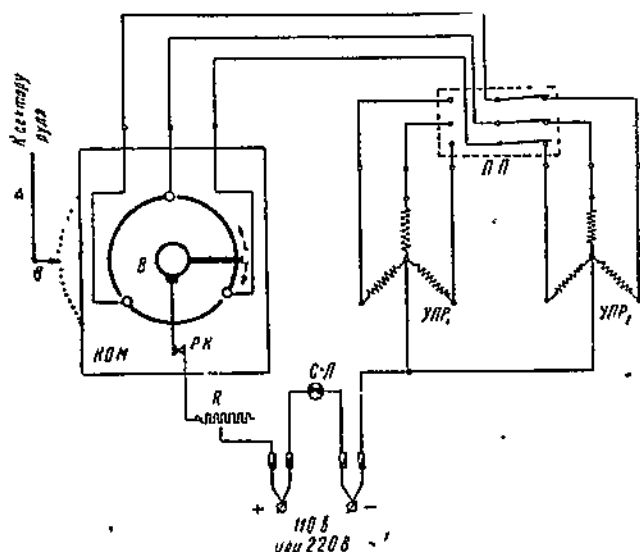
Наиболее распространенными рулевыми указателями на наших судах являются системы Гейслера. Подобные указатели установлены, например, на теплоходах Крымско-Кавказской линии и на рефрижераторах «А. Жданов» и «М. Ульянова». Принципиальная

схема соединений указателей системы Гейслера представлена на фиг. 104. На схеме приняты следующие обозначения.

*АВ* — механическая тяга, соединяющая коммутатор с сектором руля.

*КОМ* — коммутатор, представляющий трехлинейный контакт переключения тока в катушках указателей положения руля. Переключение тока производится помощью вращения контактного валика *В*, связанного зубчатой передачей с сектором; оба расположены в коммутаторе. Сектор приводится в движение от механической тяги *АВ*. Валик с помощью контактного пальца скользит по контактным пластинкам и производит при вращении переключение тока с одной линии на другую через  $120^\circ$ .

*РК* — разрывной контакт, размыкающий цепь при положении руля в диаметральной плоскости.



Фиг. 104.

*R* — омическое сопротивление для снижения подводимого напряжения судовой сети до 35 в.

*СЛ* — сигнальная лампа.

*УПР* — указатели положения руля, установленные вблизи постов управления в рулевой рубке и на верхнем мостике.

*П-П* — переключающий пост для перевода приключения к коммутатору одного *УПР* на другой.

Указатель положения руля представляет механизм, состоящий из трех П-образных электромагнитов, оси которых расположены под углом в  $120^\circ$  одна по отношению к другой. Якорьки электромагнитов связаны шарнирными тягами с общим коленчатым валиком. Каждое притяжение якорьков электромагнитов вызывает с помощью тяги поворот коленчатого вала на  $120^\circ$ . При поочередном включении катушек электромагнитов в одном направлении будет происходить со-

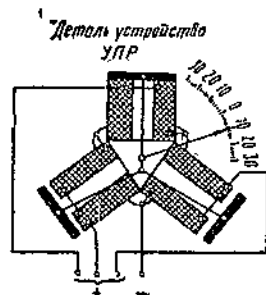
ответствующее вращение тягами коленчатого вала. Вращение последнего через зубчатые передачи сообщается стрелке УПР. При изменении направления поочередного включения катушек электромагнитов изменяется и направление перемещения стрелки УПР.

Принцип устройства электромагнитного механизма УПР представлен на фиг. 105.

Указатель положения руля снабжен внутри возвратными пружинами, которые при отсутствии тока в электромагнитах вызывают возврат стрелки УПР в нулевое положение.

Действие указателей положения руля сводится к следующему.

При нахождении руля в диаметральной плоскости разрывной контакт разомкнут и питания катушек электромагнитного механизма УПР не производится, вследствие чего стрелка УПР под действием возвратных пружин занимает нулевое положение.



Фиг. 105.

По мере отклонения руля от диаметральной плоскости сектор руля с помощью тяг АВ смещает сектор коммутатора, который посредством зубчатых передач вращает контактный валик В. Вращение валика с пальцем вызывает поочередное замыкание контактных пластин, а через них и соединительные провода производится поочередное включение электромагнитов УПР. Якорьки электромагнитов посредством тяг смещают стрелку указателя руля в направлении, соответствующем отклонению пера руля. Остановка руля, отклоненного от диаметральной плоскости,

оставляет под током один из электромагнитов УПР, вследствие чего и стрелка УПР остается в положении, отвечающем положению руля. Возвратные пружины не в состоянии преодолеть силу притяжения якорька электромагнитом.

Изменение направления переключки руля будет производить замыкание пальцем валика контактных пластин коммутатора, но в обратной последовательности, что в свою очередь вызовет поочередное замыкание катушек электромагнитов УПР также в обратном порядке, вследствие чего и смещение стрелки УПР будет происходить в противоположном направлении.

УПР внутри снабжается пальцеобразными лампочками, которые по мере надобности можно включать для освещения изнутри шкалы указателя.

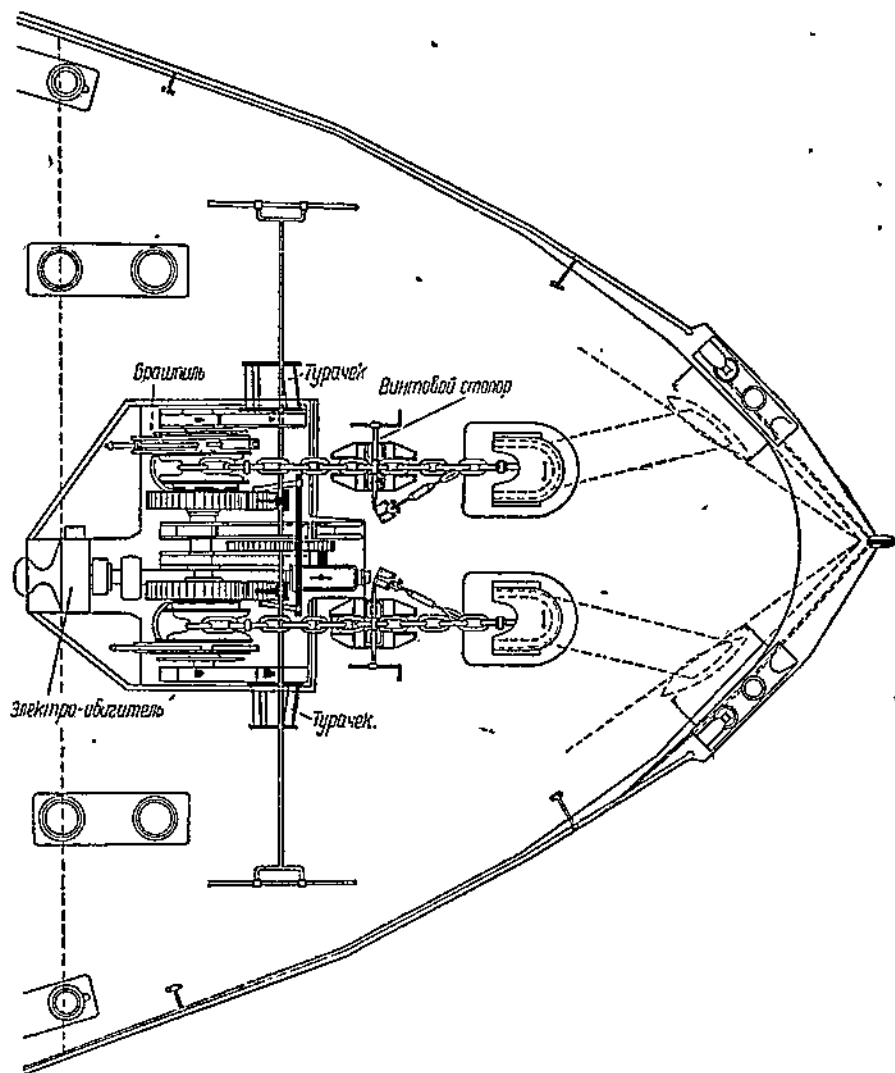
## Глава VIII

### ЯКОРНЫЕ И ШВАРТОВЫЕ УСТРОЙСТВА

#### § 22. Назначение и основные элементы якорных и швартовых устройств

Каждое судно снабжается якорным устройством, которое обеспечивает стоянку судна среди открытой акватории, преимущественно на внутреннем или внешнем рейде.

Для стоянки судна в порту у набережной, пирса или пристани предварительно производится притягивание судна к причалам помощью швартовых канатов. Для отдачи якоря и его выбирания применяются специальные приспособления, так называемые якорные лебедки. Якорные лебедки, выполняемые с вертикальными барабанами, назы-

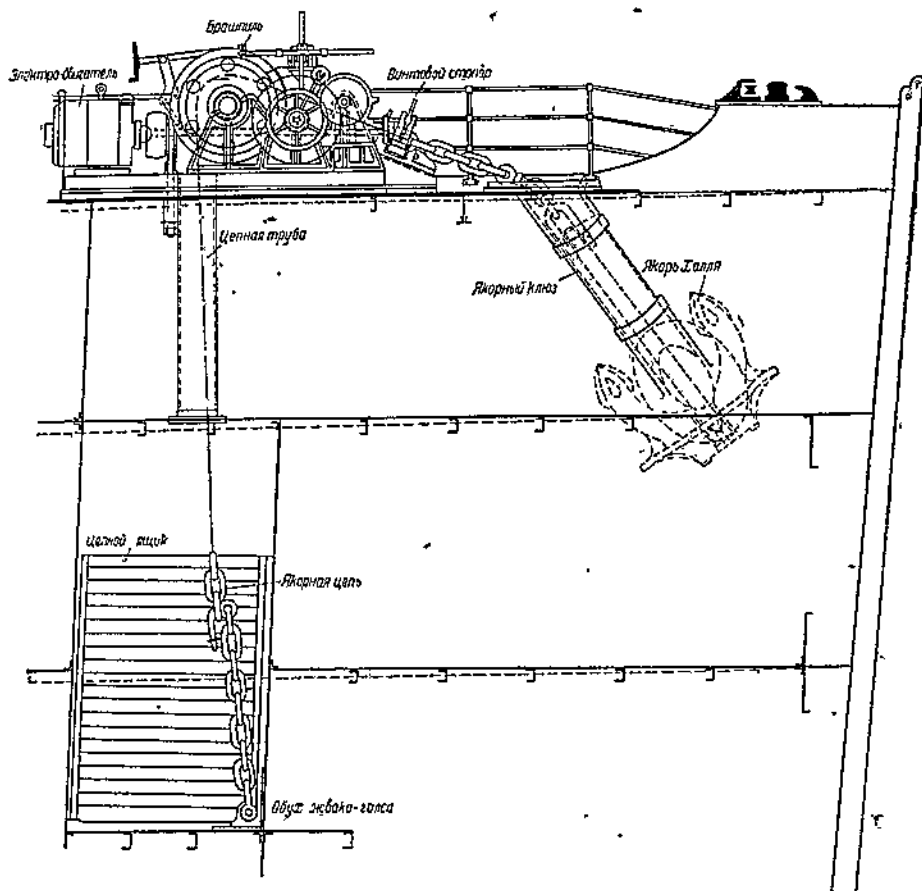


Фиг. 106. Якорное устройство — план.

ваются шпилями, а с горизонтальными барабанами — башпильями. Наибольшее распространение имеют башпильи с двумя барабанами и на большинстве современных морских судов башпильи выполняются с электрическим приводом. Эскиз башпильного устройства см. на фиг. 106 (план) и на фиг. 107 (боковой вид).

Выбирание швартовых канатов для притягивания судна к причалам на большинстве судов осуществляется брашпилем и только крупные суда снабжаются специальными швартовыми лебедками.

Брашпили, а также иногда и грузовые лебедки, используемые для швартования, снабжаются по бокам дополнительными, конической формы, барабанами или турачками.



Фиг. 107. Якорное устройство — боковой вид.

Так как работа швартовых устройств менее сложна по сравнению с работой брашпелей, то в дальнейшем ограничимся рассмотрением только брашпильных устройств.

Чтобы иметь представление об условиях работы электродвигателей и тех необходимых требованиях, которым должны удовлетворять электроприводы брашпелей, предварительно ознакомимся с якорным устройством и его работой..

Вес якорей, употребляемых для стоянки судов, или так называемых становых якорей, зависит от размеров судна, которые характеризуют его водоизмещение, и размеров надстроек.

В зависимости от водоизмещения судна приближенный вес станвого якоря можно определить по следующей опытной формуле:

$$Q = C \sqrt[3]{D^3},$$

где

$Q$  — вес якоря в кг,

$D$  — водоизмещение судна в т,

$C$  — постоянная в пределах  $8 \div 10,5$ .

Из условий лучшей буферности при противодействии внешним, особенно внезапным, силам во время стоянки судов на якоря применяются канаты с относительно большим погонным весом. К таким канатам принадлежат в первую очередь цепные канаты, которые преимущественно и применяются для становых якорей.

В зависимости от веса якоря находится и калибр, т. е. диаметр, цепного железа якорного каната. Приблизленно калибр якорного каната найдется из зависимости

$$d = \sqrt{Q},$$

где  $d$  — диаметр цепного железа в мм,

$Q$  — вес якоря в кг.

Вес 1 пог. м цепного якорного каната определяется по следующей приближенной формуле:

$q = 0,0215 d^2$  кг — для цепей с распорками,

$q = 0,0225 d^2$  кг — для цепей без распорок.

Общая длина якорных цепных канатов, применяемых на современных торговых судах, лежит в пределах от 100 до 600 м.

Для определения длины якорных цепных канатов пользуются таблицами классификационных обществ, которые в зависимости от характеристики вооружения дают значения о б щ е й д л и н ы якорных канатов становых якорей, а также указывают и число становых якорей. По правилам Регистра СССР характеристика вооружения зависит от квадратичного модуля судна, равного

$$M = L(B + H) + C_1 L_1 H_1 + L_2 H_2,$$

где

$L$  — длина судна между перпендикулярами в м,

$B$  — наибольшая ширина судна в м,

$H$  — высота борта судна в м,

$L_1$  — длина надстройки судна в м,

$H_1$  — высота надстройки судна в м,

$L_2$  — длина возвышенной кормовой палубы в м,

$H_2$  — высота возвышенной кормовой палубы над верхней палубой в м,

$C_1 = 0,75$  для надстроек во всю ширину судна,

$C_1 = 0,5$  для надстроек, не доходящих до бортов, но размеры которых по длине или ширине превосходят полуширину судна на миделе.

Таблицу якорного вооружения, согласно правилам Регистра СССР, см. в приложении (табл. 1).

Из общего количества якорей один берется как запасной, называемый штурмовым, и вес его обычно бывает на 7—15% меньше стандартного якоря.

Малые суда с характеристикой до 550 снабжаются двумя якорями, большинство же судов с характеристикой в пределах 600 — 9500 имеет по 3 якоря, из которых один запасной. Следовательно, на большинстве судов устанавливаются двухъякорные брашпили.

Для выбора и стравливания цепных канатов брашпили снабжаются обычно пятигранными кулачковыми барабанами, или так называемыми цепными звездочками. Размер грани, а следовательно, и диаметр звездочки строго связаны с калибром цепного каната.

Диаметр описанной окружности звездочки для цепей с нормальным шагом звена цепи, равным  $5d$ , имеет следующее значение:

$$D_{ав} = 13,6d.$$

Скорость одновременного подъема обоих якорей с наибольшей глубины стоянки судна ( $h = 80$  м), согласно правилам Регистра СССР, должна быть не менее 6 м в минуту.

Скорость подъема якорей, на основании практики, обычно берется в пределах

$$v = 12 \div 20 \text{ м/мин.}$$

## § 26. Определение усилий, действующих на брашпиль при подъеме якоря

Работа брашпиля при выборе якоря складывается из следующих операций:

1. Приведение судна на канат при постоянном тяговом усилии.
2. Приведение судна на канат при изменяющемся тяговом усилии.
3. Отрыв якоря от грунта.
4. Подъем якоря.

Нагрузку брашпиля при выборе якоря в зависимости от длины выбранной цепи, т. е.

$$M = f(l)$$

можно представить следующим упрощенным графиком (фиг. 108).

На участке  $l_1$  в течение времени  $t_1$  происходит выбор якоря при постоянном моменте  $M_1$ , с постоянным числом оборотов  $n_1$ .

На участке  $l_2$  в течение времени  $t_2$  происходит выбор каната при изменяющемся тяговом усилии, включительно до отрыва якоря от грунта; на этом участке момент изменяется от  $M_1$  до  $M_2$ . Момент  $M_2$  отвечает отрывному усилию якоря от грунта.

После отрыва якоря от грунта производится подъем якоря с глубины стоянки судна  $h$ , с начальным моментом  $M_3$  и с конечным моментом  $M_4$ ; последний отвечает нахождению поднятого якоря у клюза. Длина выбираемой цепи на участке  $l_3$  за время  $t_3$  равна глубине стоянки судна  $h$  м.

На графике (фиг. 108) обозначено:

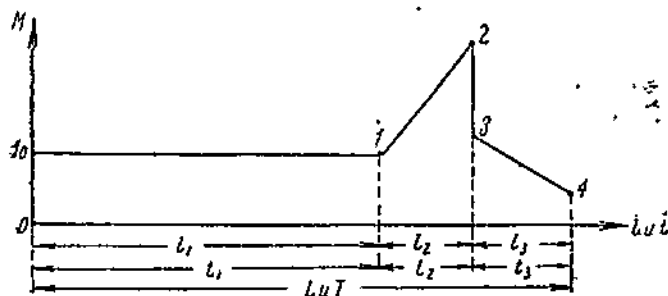
$L$  — длина вытравленной цепи якоря,

$T$  — полное время выбора якоря.

До решения вопроса выбора электродвигателя брашпиля выясним предварительно значения моментов, которые необходимо будет преодолевать брашпилю.

Для определения начального момента  $M_1$ , соответствующего участку  $l_1$ , исходим из условия, что выбирание якоря без подрабатывания винтами может происходить при свежем ветре силой не свыше 5 баллов, чему, применительно к шкале Бофорта, отвечает верхний предел скорости ветра  $v_1 = 9,8$  м/сек.<sup>1</sup>

В соответствии с требованиями практики стоянки судов на якорях внешние силы, действующие на судно, не должны вызывать никаких усилий, отрывающих якорь от грунта, а должны компенсироваться весом вытравленной провисающей цепи. Для обеспечения этого требования обычно длина вытравливаемого цепного каната



Фиг. 108.

принимается в зависимости от глубины стоянки судна и практически лежит в пределах 3—4 глубин стоянки судна, т. е.

$$L = nh = (3 \div 4) h \text{ м.}$$

Считаем, что максимальное удерживающее усилие от провисания всей вытравленной цепи обеспечивает стоянку судна при жестком шторме со скоростью ветра  $v_2 = 29$  м/сек. (при 11 баллах шкалы Бофорта, согласно вышеуказанному источнику).

На основании уравнения цепной линии удерживающее усилие вытравленного якорного каната можно определить из выражения<sup>2</sup>

$$R = q \frac{l^2 - h^2}{2h} \text{ кг.} \quad (1)$$

Выражение же для определения натяжения цепи у клюза имеет вид:<sup>2</sup>

$$F = q \frac{l^2 + h^2}{2h} \text{ кг.} \quad (2)$$

В приведенных формулах:

$q$  — вес 1 пог. м каната в кг,

$l$  — длина провисающего каната в м,

$h$  — глубина при стоянке судна (возвышение клюза над грунтом) в м.

<sup>1</sup> Шкалу Бофорта (согласно Мореходным таблицам Гидрографического управления, изд. 1933 г. см. в приложении табл. 2).

<sup>2</sup> Проф. В. Л. Полюдин, Судовые устройства, 1935 г.

Так как усилие  $R$  равно горизонтальной проекции  $F_0$ , составляющей внешних сил, действующих на судно, а последние пропорциональны квадрату скорости ветра, то на основании этого можно найти усилие  $R_1$  при выборе цепи на всем первом участке, включая точку 1 графика нагрузки (фиг. 108).

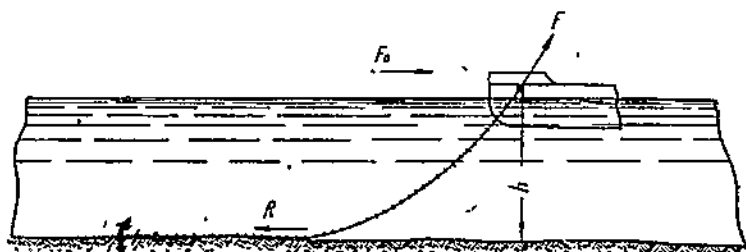
На основании приводимого эскиза и вышеуказанной зависимости усилий имеем:

$$F_0 = kv^2 = R.$$

Для точки 1 графика нагрузки, отвечающей скорости ветра  $v_1$ , и для точки 2 графика нагрузки, отвечающей скорости ветра  $v_2$ , соответственно можем написать:

$$F_{01} = kv_1^2 = R_1,$$

$$F_{02} = kv_2^2 = R_2.$$



Фиг. 109.

откуда можем выразить значение  $R_1$  следующим уравнением:

$$R_1 = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^2 R_2 = \left(\frac{9,8}{29}\right)^2 R_2. \quad (3)$$

Значение  $R_2$  при всей стравленной цепи, длиной

$$L = (3 \div 4) h$$

имеет значение

$$R_2 = q \frac{h^2 (n^2 - 1)}{2h} = q \frac{(n^2 - 1) h}{2} = (4 \div 7,5) qh.$$

Подставляя найденное значение  $R_2$  в выражение  $R_1$ , получим:

$$R_1 = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^2 \frac{(n^2 - 1)}{2} qh = \left(\frac{9,8}{29}\right)^2 (4 \div 7,5) qh = (0,456 \div 0,857) qh.$$

Располагая усилием горизонтальной составляющей  $R_1$  на первом участке, можем найти на основании уравнения (1) значение длины вытравленной цепи в точке 1, т. е.

$$L - l_1 = \sqrt{\frac{2hR_1}{q} + h^2} = \sqrt{(0,456 \div 0,857) 2h^2 + h^2} = (1,38 \div 1,65) h.$$

Для упрощения дальнейших выводов берем значение  $L - l_1$ , равное  $1,5 h$ .

Принимая значение  $L - l_1 = 1,5 h$  против указанных крайних пределов, допустим ошибку:

$$\text{при } L = 3h \text{ ошибка составит } \frac{1,5 - 1,38}{1,5} \cdot 100 = +8\%,$$

$$\text{при } L = 4h \quad \gg \quad \gg \quad \frac{1,5 - 1,65}{1,5} \cdot 100 = -10\%.$$

Усилие натяжения цепи у клюза на первом участке найдется на основании уравнения (2):

$$F_1 = q \frac{(L - l_1)^2 + h^2}{2h} = q \frac{(2,9 \div 3,7)h^2}{2h} = (1,45 \div 1,85) qh.$$

Принимаем:  $K$  — передаточное число лебедки брашпиля от вала электродвигателя к валу звездочки,

$\eta_{\text{л}}$  — к. п. д. лебедки,

$\eta_{\text{кл}}$  — к. п. д. клюза, учитывающий потери от трения в нем.

Значение момента сопротивления  $M_1$  на первом участке, отнесенного к валу приводного электродвигателя, найдется из выражения:

$$M_1 = \frac{F_1 D_{\text{ав}}}{2K \eta_{\text{л}} \eta_{\text{кл}}} = \frac{(1,45 \div 1,85) qh D_{\text{ав}}}{2K \eta_{\text{л}} \eta_{\text{кл}}} \text{ кгм.} \quad (4)$$

На первом участке электродвигатель должен работать при постоянном моменте  $M_1$  и с числом оборотов

$$n_1 = \text{const.}$$

На втором участке между точками 1—2 брашпиль работает с переменным тяговым усилием, а следовательно, и с переменным моментом сопротивления. Изменение момента сопротивления на этом участке принимаем по закону наклонной прямой.

Значение момента сопротивления для любой точки на втором участке представится следующим уравнением:

$$M = M_1 + b_2 l,$$

где  $b_2$  — значение углового коэффициента наклона прямой — можно найти на основании выражения:

$$M_2 = M_1 + b_2 l_2$$

$$b_2 = \frac{M_2 - M_1}{l_2}$$

$M_2$  — момент, отвечающий отрывному усилию якоря от грунта,

$l_2$  — длина цепного каната в пределах второго участка, равная

$$\tilde{l}_2 = L - l_3 - l_1 = L - h - L + (1,38 \div 1,65) h \cong 0,5h.$$

Выражение для момента сопротивления на втором участке примет вид:

$$M = M_1 + \frac{M_2 - M_1}{l_2} l. \quad (5)$$

Усилие, развиваемое на звездочке брашпиля во время отрыва якоря от грунта, складывается из:

а) усилия, идущего непосредственно на отрыв якоря от грунта; практикой установлено, что это усилие обычно не превосходит двойного веса якоря, т. е. равно  $2Q$  кг;

б) из веса якоря, плюс вес цепного каната, длина которого отвечает глубине стоянки якоря, что с учетом нахождения их в воде составит:

$$\frac{\gamma-1}{\gamma} (Q + qh) \text{ кг};$$

$\gamma$  — удельный вес материала якоря и цепи, в среднем,  $\gamma = 7,8$ .

Для предельной глубины якорной стоянки, принимаемой обычно в 80 м, и считая, в среднем, вес 1 пог. м цепи  $= 0,022 \text{ д}^2 \text{ кг} = 0,022 Q \text{ кг}$ , усилие, прилагаемое у клюза для преодоления максимального суммарного веса якоря и цепи в этих условиях, составит:

$$\frac{7,8-1}{7,8} (Q + 0,022Q \cdot 80) \cong 2,4Q \text{ кг}.$$

Полное усилие, развиваемое на звездочке брашпиля, с учетом потерь в клюзе, которые составляют приблизительно 30%, можно принять равным

$$F_2 = 1,30 (2Q + 2,4Q) \cong 5,7Q \text{ кг}.$$

Практически отрывное усилие якоря на кулачковом барабане брашпиля принимают равным  $5,5Q$  кг.

Соответственно момент при отрыве якоря от грунта, отнесенный к валу электродвигателя, составит

$$M_2 = \frac{F_2 D_{зв}}{2K\eta_{лн}} = \frac{5,5Q D_{зв}}{2K\eta_{лн}} \text{ кгм}. \quad (6)$$

На третьем участке в пределах точек 3—4 происходит подъем оторванного якоря с глубины стоянки судна  $h_m$ .

Следовательно:

$$l_3 = h_m.$$

Работа брашпиля на этом участке происходит с переменным, линейно-убывающим моментом, значение которого представится уравнением:

$$M = M_3 - b_3 l,$$

где  $b_3$  — значение углового коэффициента — можно найти из частного значения

$$M_4 = M_3 - b_3 l_3, \\ b_3 = \frac{M_3 - M_4}{l_3} = \frac{M_3 - M_4}{h}.$$

Выражение для момента сопротивления при подъеме якоря представится уравнением:

$$M = M_3 - \frac{M_3 - M_4}{h} l. \quad (7)$$

Значения моментов сопротивлений для точек 3 и 4, отнесенные к валу электродвигателя, соответственно можно выразить:

$$M_3 = \frac{\gamma - 1}{\gamma} \cdot \frac{(Q + qh) D_{зв}}{2K\eta_n \eta_{кф}} \text{ КГМ}, \quad (8)$$

$$M_4 = \frac{QD_{зв}}{2K\eta_n \eta_{кф}} \text{ КГМ} \quad (9)$$

## § 24. Определение мощности приводного электродвигателя

Для якорных устройств обычно применяются электродвигатели с мягкой характеристикой как обладающие лучшими пусковыми условиями под нагрузкой и более приспособленные к значительным изменениям моментов.

К таким электродвигателям принадлежат, как известно, сериесные, которые и применяются главным образом для брашпилей.

В дальнейшем расчете электродвигателя брашпиля будем руководствоваться следующим уравнением механической характеристики сериесного электродвигателя:<sup>1</sup>

$$Mn^3 = \text{const.} \quad (10)$$

При определении номинальной мощности и числа оборотов электродвигателя будем исходить из заданного времени выбирания якоря и номинального момента электродвигателя, находящегося в допустимых пределах от максимального момента, отвечающего отрыву якоря от грунта.

Время выбирания якоря зависит от длины цепи  $L$  и средней скорости выбирания каната в минуту  $v_{ср}$ , которая практически берется в пределах 12 ÷ 20 м/мин. Следовательно, полное время выбирания якоря в секундах будет:

$$T = \frac{60 \cdot L}{v_{ср}} \text{ сек.}$$

Полное время выбирания якоря является суммой времени работы брашпиля на отдельных участках, т. е.

$$T = t_1 + t_2 + t_3.$$

Нахождение значений  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  позволит, как увидим в дальнейшем, найти число оборотов для вращающего момента электродвигателя и тем самым разрешить уравнение вида:

$$Mn^3 = \text{const.}$$

Для первого участка работы брашпиля при  $M_1 = \text{const.}$  и  $n_1 = \text{const.}$  можно написать следующую зависимость:

$$l_1 = v_1 t_1 = \frac{2\pi n_1 D_{зв} t_1}{60K \cdot 2} \cong L - 1,5h.$$

<sup>1</sup> Обоснования к этому виду уравнения механической характеристики сериесных электродвигателей см. § 18, гл. VII, часть II.

Отсюда выражение для времени работы электродвигателя на этом участке найдется по уравнению:

$$t_1 = \frac{60K l_1}{\pi n_1 D_{3в}} \cong \frac{60K (L - 1,5h)}{\pi n_1 D_{3в}} \text{ сек.} \quad (11)$$

Работа электродвигателя на втором участке протекает при переменном моменте сопротивления согласно уравнению (5):

$$M_{\text{сопр.}} = M_1 + \frac{M_2 - M_1}{l_2} l.$$

Вращающий момент электродвигателя для этого участка можно выразить из уравнения:

$$\begin{aligned} M n^3 &= M_1 n_1^3 \\ M_{\text{вр. эл.-дв.}} &= M_1 \frac{n_1^3}{n^3} \\ M_{\text{сопр.}} &= M_{\text{вр.}} \\ M_1 + \frac{M_2 - M_1}{l_2} l &= M_1 \frac{n_1^3}{n^3}. \end{aligned}$$

Найдем выражение для числа оборотов электродвигателя на втором участке на основании написанного равенства:

$$n = n_1 \left( \frac{1}{1 + \frac{M_2 - M_1}{M_1 l_2} l} \right)^{1/3}.$$

На основании зависимости

$$\frac{2\pi n D_{3в}}{60K \cdot 2} = v = \frac{dl}{dt}$$

заменяем  $n$  его значением

$$\begin{aligned} n &= \frac{60K}{\pi D_{3в}} \cdot \frac{dl}{dt} \\ \frac{60K}{\pi D_{3в}} \cdot \frac{dl}{dt} &= n_1 \left( \frac{1}{1 + \frac{M_2 - M_1}{M_1 l_2} l} \right)^{1/3}, \end{aligned}$$

откуда

$$dt = \frac{60K}{\pi D_{3в} n_1} \left( 1 + \frac{M_2 - M_1}{M_1 l_2} l \right)^{1/3} dl.$$

Производя интегрирование в пределах второго участка, имеем

$$\begin{aligned} \int_0^{l_2} dt &= \frac{60K}{\pi D_{3в} n_1} \int_0^{l_2} \left( 1 + \frac{M_2 - M_1}{M_1 l_2} l \right)^{1/3} dl \\ t_2 &= \frac{60K}{\pi D_{3в} n_1} \cdot \frac{3}{4} \cdot \frac{M_1 l_2 \left[ \left( \frac{M_2}{M_1} \right)^{1/3} - 1 \right]}{M_2 - M_1}; \end{aligned}$$

так как  $l_2$  было принято равным  $\sim 0,5 h$ , то имеем:

$$t_2 \cong \frac{45K M_1 h \left[ \left( \frac{M_2}{M_1} \right)^{1/3} - 1 \right]}{2\pi D_{3в} n_1 (M_2 - M_1)} \text{ сек.} \quad (12)$$

На третьем участке брашпиль работает также с переменным моментом сопротивления, выражение которого на основании уравнения (7) приравняем к выражению вращающего момента электродвигателя:

$$M_3 - \frac{M_3 - M_4}{h} l = M_1 \frac{n_1^3}{n^3}.$$

На основании этого уравнения выражаем число оборотов электродвигателя при работе на третьем участке:

$$n = n_1 \left( \frac{1}{\frac{M_3}{M_1} - \frac{M_3 - M_4}{M_1 h} l} \right)^{1/3}.$$

Подставляя вместо  $n$  его значение

$$n = \frac{60K}{\pi D_{3в}} \cdot \frac{dl}{dt}$$

получим:

$$\frac{60K}{\pi D_{3в}} \cdot \frac{dl}{dt} = n_1 \left( \frac{1}{\frac{M_3}{M_1} - \frac{M_3 - M_4}{M_1 h} l} \right)^{1/3}.$$

Отсюда имеем:

$$dt = \frac{60K}{\pi D_{3в} n_1} \left( \frac{M_3}{M_1} - \frac{M_3 - M_4}{M_1 h} l \right)^{1/3} dl$$

$$\int_0^{t_3} dt = \frac{60K}{\pi D_{3в} n_1} \int_0^h \left( \frac{M_3}{M_1} - \frac{M_3 - M_4}{M_1 h} l \right)^{1/3} dl.$$

$$t_3 = - \frac{60K}{\pi D_{3в} n_1} \cdot \frac{3}{4} \cdot \frac{M_1 h}{M_3 - M_4} \left[ \left( \frac{M_3}{M_1} - \frac{M_3 - M_4}{M_1} \right)^{4/3} - \left( \frac{M_3}{M_1} \right)^{4/3} \right] \text{ сек.}$$

После упрощений окончательно получим:

$$t_3 = \frac{45KM_1 h}{\pi D_{3в} n_1 (M_3 - M_4)} \left[ \left( \frac{M_3}{M_1} \right)^{4/3} - \left( \frac{M_4}{M_1} \right)^{4/3} \right] \text{ сек.} \quad (13)$$

Полное время работы электродвигателя при выборе якоря выразим, как сумму найденных значений  $t_1$ ,  $t_2$  и  $t_3$ , которые выражены соответственно формулами (11), (12) и (13):

$$\begin{aligned} T &= t_1 + t_2 + t_3 = \\ &= \frac{45K}{\pi D_{3в} n_1} \left\{ \frac{4}{3} (L - 1,5h) + \frac{M_1 h}{2} \frac{\left[ \left( \frac{M_2}{M_1} \right)^{4/3} - 1 \right]}{M_2 - M_1} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{M_1 h}{M_3 - M_4} \left[ \left( \frac{M_3}{M_1} \right)^{4/3} - \left( \frac{M_4}{M_1} \right)^{4/3} \right] \right\} \text{ сек.} \end{aligned} \quad (14)$$

Время выбора якоря задается или легко может быть определено из выражения:

$$T = \frac{60L}{v_{ср}} \text{ сек.}$$

где  $L$  — длина цепи в м,

$v$  — средняя скорость выбора цепи в минуту.

Располагая значением  $T$  на основании уравнения (14), можем найти число оборотов электродвигателя брашпиля для его вращающего момента  $M_1$ :

$$n_1 = \frac{45K}{\pi D_{ав} T} \left\{ \frac{4}{3} (L - 1,5h) + \frac{M_1 h}{2} \frac{\left[ \left( \frac{M_2}{M_1} \right)^{1/3} - 1 \right]}{M_2 - M_1} + \right. \\ \left. + \frac{M_1 h}{M_3 - M_4} \left[ \left( \frac{M_2}{M_1} \right)^{1/3} - \left( \frac{M_4}{M_1} \right)^{1/3} \right] \right\}. \quad (15)$$

Определив  $n_1$  по уравнению (15) и зная  $M_1$ , имеем:

$$M_1 n_1^3 = M n^3 = \text{const}. \quad (16)$$

Значение основных параметров серийного электродвигателя брашпиля, т. е. номинальной его мощности  $P_n$  и номинального числа оборотов  $n_n$ , производим по выражению эквивалентной силы тока, определяемой в соответствии с режимом работы брашпиля.

Для определения эквивалентной силы тока воспользуемся зависимостью между силой тока серийного электродвигателя и его вращающим моментом, исходя из условий работы электродвигателя при насыщенной магнитной системе. Как мы видели выше (см. § 18, гл. VII), на основании выражения, данного А. S. Mc Allister'ом для изменения  $\mu$  в зависимости от индукции  $B$  в условиях насыщенной магнитной цепи, величина изменения магнитного потока принята в квадратной зависимости от намагничивающего тока, т. е.

$$\Phi^2 = C I.$$

По выражению для вращающего момента электродвигателя можем написать:

$$M = K \Phi I = K_1 I^{2/3}, \quad (17)$$

откуда

$$I = \left( \frac{1}{K_1} \right)^{3/2} M^{3/2} = K_2 M^{3/2}. \quad (18)$$

Располагая выражением зависимости силы тока серийного электродвигателя от его вращающего момента, можем написать для известных значений вращающих моментов электродвигателя на основании режимов работы брашпиля соответствующие значения сил токов:

$$\begin{aligned} I_1 &= K_2 M_1^{3/2}, \\ I_2 &= K_2 M_2^{3/2}, \\ I_3 &= K_2 M_3^{3/2}, \\ I_4 &= K_2 M_4^{3/2}. \end{aligned}$$

Эквивалентное значение силы тока определяется по выражению:

$$I_{\text{экв.}} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + I_3^2 t_3}{T} + \frac{(I_2 - I_1)^2 t_2 + (I_3 - I_4)^2 t_3}{3T}}.$$

Заменяя соответствующие значения сил токов через выражения моментов, получим:

$$I_{\text{экв.}} = K_2 \sqrt{\frac{M_1^{4/3} t_1 + M_1^{2/3} M_2^{2/3} t_2 + M_2^{2/3} M_4^{2/3} t_3}{T}} + \frac{(M_2^{2/3} - M_1^{2/3})^2 t_2 + (M_2^{2/3} - M_4^{2/3})^2 t_3}{3T}; \quad (19)$$

подставляя выражение  $I_{\text{экв.}}$  по уравнению (19) в уравнение (17), имеем:

$$M_{\text{экв.}} = K_1 I_{\text{экв.}}^{3/2} = K_1 K_2^{3/2} \left( \sqrt{\frac{M_1^{4/3} t_1 + M_1^{2/3} M_2^{2/3} t_2 + M_2^{2/3} M_4^{2/3} t_3}{T}} + \frac{(M_2^{2/3} - M_1^{2/3})^2 t_2 + (M_2^{2/3} - M_4^{2/3})^2 t_3}{3T} \right)^{3/2};$$

окончательно получаем:

$$M_{\text{экв.}} = \left[ \frac{M_1^{4/3} t_1 + M_1^{2/3} M_2^{2/3} t_2 + M_2^{2/3} M_4^{2/3} t_3}{T} + \frac{(M_2^{2/3} - M_1^{2/3})^2 t_2 + (M_2^{2/3} - M_4^{2/3})^2 t_3}{3T} \right]^{3/4}. \quad (20)$$

Найденное значение  $M_{\text{экв.}}$  и принимаем за номинальный момент электродвигателя  $M_n$ .

По найденному значению  $M_n$  производим проверку на допустимую перегрузку при максимальном моменте на валу электродвигателя, т. е. при моменте во время отрыва якоря от грунта  $M_x$ :

$$\frac{M_x}{M_n} \leq 2 \div 2,5. \quad (21)$$

Значения  $t_1$ ,  $t_2$  и  $t_3$  для уравнения (20) можно определить из следующих выражений:

$$t_1 = \frac{l_1}{v_1} = \frac{60 l_1 \cdot 2K}{2\pi n_1 D_{3B}} = \frac{60 K l_1}{\pi D_{3B} n_1}, \quad (22)$$

$$t_2 = \frac{0,5h \cdot 2}{(v_2 + v_1)} = \frac{60 Kh}{\pi D_{3B} (n_1 + n_2)}, \quad (23)$$

$$t_3 = \frac{2h}{(v_3 + v_4)} = \frac{60 \cdot 2Kh}{\pi D_{3B} (n_3 + n_4)}. \quad (24)$$

При возможном расхождении суммы  $t_1 + t_2 + t_3$ , взятой на основании уравнений (22)–(24), со значением  $T$  значения  $t_2$  и  $t_3$  подлежат корректировке, умножением на коэффициент

$$a = \frac{T - t_1}{t_2 + t_3},$$

т. е. для формулы (20) нужно взять:

$$\begin{aligned} at_2 & \text{ вместо } t_2, \\ at_3 & \text{ вместо } t_3. \end{aligned}$$

Имея значение номинального момента, можно определить и номинальное число оборотов  $n_n$ :

$$n_n = n_1 \sqrt[3]{\frac{M_1}{M_n}} \quad (25)$$

Номинальная мощность будет:

$$P_n = \frac{M_n n_n}{975} \text{ кВт.} \quad (26)$$

Приведенный расчет выбора электродвигателя брашпиля произведен применительно к выбору одного якоря. Если по условиям задания требуется проверка работы брашпиля для одновременного выбирания и подъема двух якорей с отрывом одного из них от грунта, то метод расчета остается тот же, только в графике нагрузки брашпиля учитываются соответствующие значения моментов сопротивлений, а также и требуемые скорости выбирания и подъема.

Для улучшения условий отрыва якоря от грунта в случае его заедания используется инерция движущегося судна. Требуемая для этого стоянка электродвигателя под током, с максимальным натяжением якорного каната (при нагрузках, превышающих в 2,5 раза нормальную нагрузку), может быть достигнута путем применения в схеме управления брашпилем так называемого «стояночного» реле.

Это реле вводит добавочное сопротивление в цепь якоря электродвигателя для ограничения силы тока в допустимо-безопасных пределах, в течение времени, согласуемого с заводом-изготовителем. Харьковский электромеханический завод для этой цели в своих схемах в качестве стояночных реле использует тепловые реле.

## § 25. Классификация брашпиль и разбор выполненных схем

Шпили и брашпили с электроприводом в электрическом отношении различаются между собой главным образом по способу их управления, так как типы применяемых электродвигателей в отношении их выполнения более или менее однообразны. Применяются преимущественно серийные электродвигатели с легкой шунтовой обмоткой, в водонепроницаемом или закрытом исполнении. Поэтому наиболее целесообразно классифицировать электрические брашпильные и швартовые устройства по способу их управления.

Наиболее распространенными являются брашпильные устройства:

- а) с контакторной системой управления,
- б) с контроллерной системой управления,
- в) с управлением по системе Вард-Леонарда.

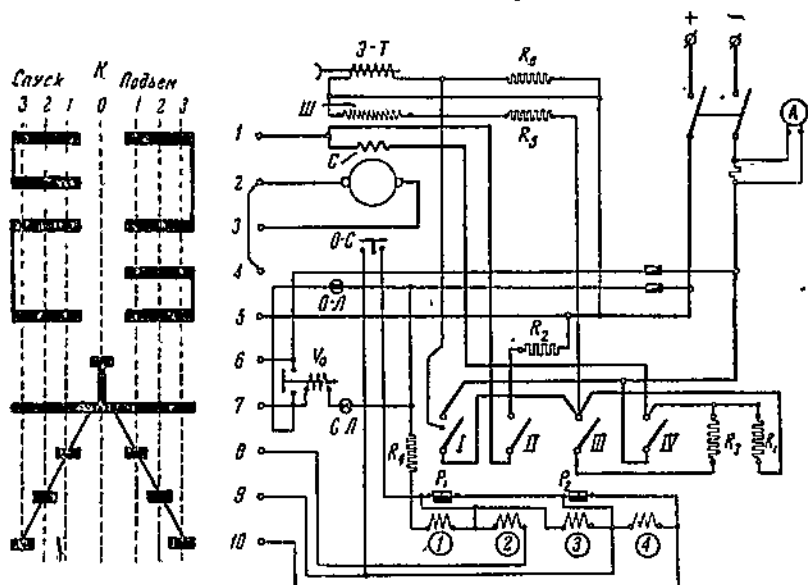
На некоторых иностранных судах применяют брашпили с бустерной системой управления и системой Gilbert Austin'a (последние две системы представляют видоизмененную идею системы Вард-Леонарда. В этих системах электродвигатель получает питание от сети через вспомогательные, специально устанавливаемые, динамомашини).

Дальнейшее рассмотрение схем управления брашпильными электроприводами ограничим разбором трех основных, наиболее распростра-

ненных, схем, которые выполнены на судах нашего торгового флота.

а) **Контакторная система управления.** В противоположность рулевым электроприводам применение контакторной системы управления для брашпильных приводов является технически надежным и вполне приемлемым, так как в этих приводах отсутствует та длительность работы, с многократностью включений, которая требуется, как мы видели, от рулевых приводов, и, кроме того, неожиданность отключения этой системы для брашпильных не так опасна, как для рулевых приводов.

При больших сравнительно мощностях брашпильных электродвигателей контакторная система облегчает управление этими электро-



Фиг. 110. Схема электрических соединений брашпиля лесовозов II серии.

двигателями, вследствие чего при относительно незначительной периодичности работы электробрашпильных повышается точность и надежность управления.

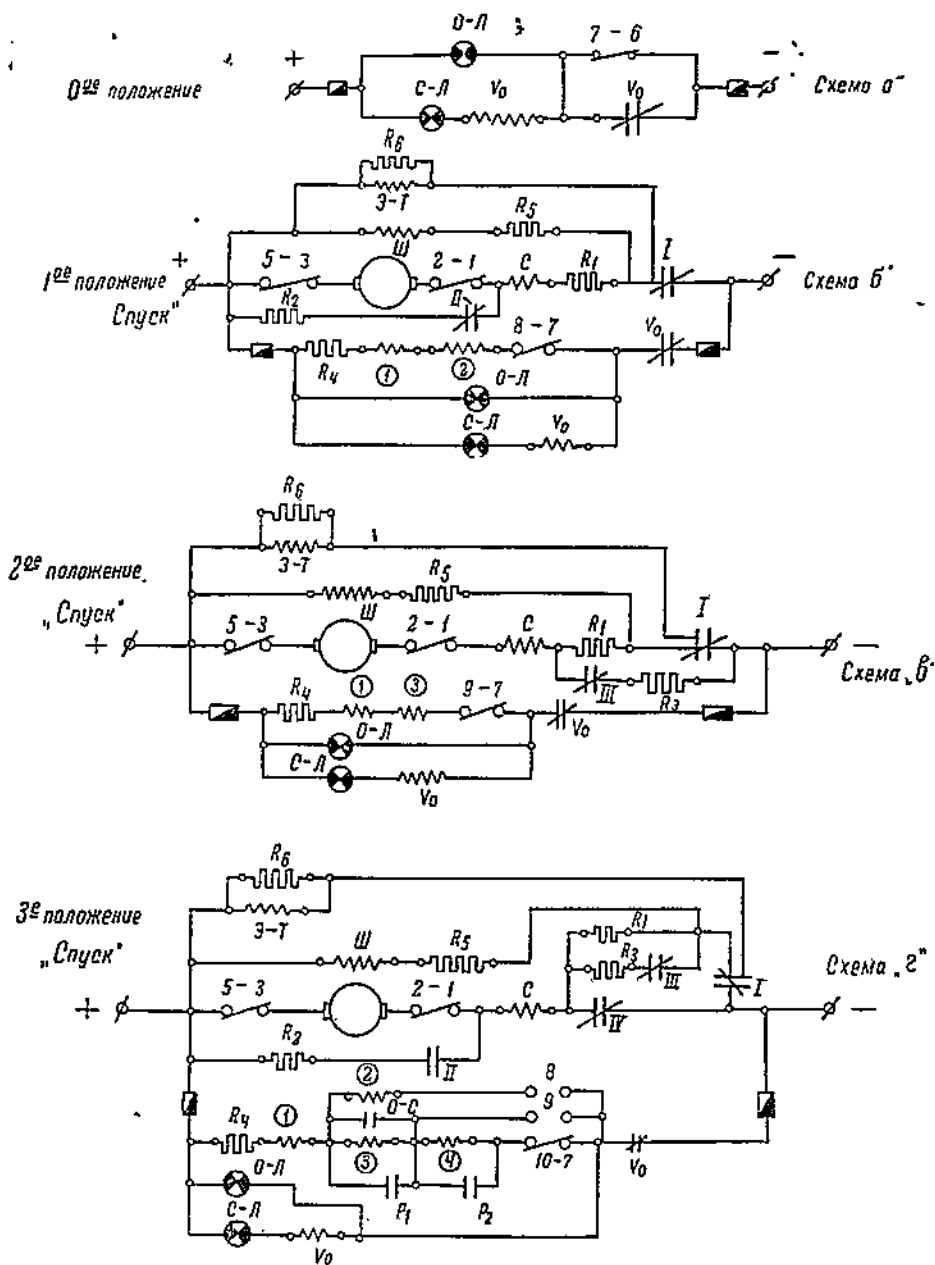
Являясь сравнительно недорогой, контакторная система управления брашпилями за последнее время начинает находить наиболее широкое распространение, особенно на крупных судах.

Ниже рассматривается контакторное управление брашпилем в выполнении схемы, предложенной фирмой Вильсон. Подобными брашпилями оборудованы лесовозы II серии постройки б. Балтийского завода (фиг. 110).

Электрическое устройство брашпиля состоит из:

а) **K** — контроллера, с помощью которого осуществляется переключение обмотки якоря электродвигателя для его реверсирования и управление питанием катушек контакторов.

б) **I—IV** — четырех однополюсных контакторов в цепи главного тока, управляющих пуском и скоростью электродвигателя.



Фиг. 111.

в)  $P_1 - P_2$  — двух реле выдержки времени, механически связанных соответственно с контакторами I и III.

Реле  $P_1$  и  $P_2$  представляют эбонитовые закрытые трубки с ртутью, которые при включении контакторов I и III повертываются в вертикальное положение, благодаря чему происходит замедленный слив ртути в один конец, вызывающий размыкание контактов в трубке, а следовательно, замедленный электрический разрыв цепи, в которую включено реле. Эти реле выдержки времени автоматически предохраняют от недопустимо быстрого перевода электродвигателя на следующую пусковую ступень.

г) 1—4 — катушек для управления контакторами I—IV.

д)  $V_0$  — нулевого реле, отключающего электробрашпиль от сети при снижении в ней напряжения.

е) Э-Т — электромагнитного тормоза.

ж) О-С — электромеханического ограничителя скорости, переводящего электродвигатель на пониженную скорость при внезапном сбрасывании нагрузки с брашпиля.

з) Э-Д — компаундного электродвигателя с легкой шунтовой обмоткой.

и)  $R_1 - R_6$  набора сопротивлений. Из них  $R_1 - R_3$  пусковые сопротивления;  $R_4$  — сопротивление, ограничивающее ток в цепи катушек 1—4;  $R_5$  — сопротивление для ограничения тока в шунтовой обмотке III;  $R_6$  — разрядное сопротивление катушки Э-Т.

к) Ламп: С—Л — сигнальной, О—Л — освещения.

Действие схемы сводится к следующему: при нулевом положении контроллера катушка нулевого реле  $V_0$  получает питание при следующем направлении тока: от положительного полюса, через плавкий предохранитель, сигнальную лампу С-Л и катушку  $V_0$  ток подводится к контакту 7, откуда через контактные пластины контроллера поступает в контакт 6 и по соединительному проводу возвращается в сеть. Катушка  $V_0$ , оживленная током, втягивает сердечник и замыкает свои контакты, благодаря чему при других положениях контроллера питание катушки  $V_0$ , а также и питание катушек контакторов 1—4 осуществляется через замкнутые контакты  $V_0$ . Снижение или исчезновение напряжения в питающей сети вызывает размыкание контактов  $V_0$ , вследствие чего прекращается питание цепи катушек контакторов, последние размыкаются и под действием Э-Т происходит остановка электродвигателя. При этом сигнальная лампа С-Л гаснет.

Для пуска Э-Д требуется контроллер вновь поставить в нулевое положение.

Действие схемы при различных положениях контроллера представлено в развернутом виде на фиг. 111.

а) Нулевое положение см. схему а.

б) Первое положение контроллера на спуск (см. схему б). Действие схемы легко усмотреть на приводимой развертке 1-е положение, а именно: соединение контактов 7 и 8 производит питание катушек 1 и 2 и замыкание контакторов I и II. Замыкание контактора I влечет поворот реле времени  $P_1$ , которое расшунтирует катушку 3 через некоторый промежуток времени, вследствие чего предупреж-

дается преждевременный перевод двигателя на вторую пусковую ступень даже в том случае, если контроллер из положения 0 сразу переведен в положение 2 или 3. При включении контактора I происходит приключение к сети обмоток III и Э-Т и включение ослабленного тока в цепь якоря, с относительно большим током в серийной обмотке С, при пониженном напряжении.

в) Второе положение контроллера на спуск см. схему в (фиг. 111).

При втором положении контроллера его контакт 7 соединяется с контактом 9, благодаря чему обеспечивается возможность питания катушки 3 и включение контактора III, после того как катушка 3 будет расшунтирована реле  $P_1$ . Катушка 2 при втором положении отключается от питания и контактор II размыкается. Электродвигатель получает большее напряжение, увеличивая мощность и обороты. Включение контактора III поворачивает трубку-реле  $P_2$ , чем подготавливается возможность питания катушки 4 при третьем положении контроллера.

г) Третье положение контроллера (см. схему а) соединяет его контакт 7 с контактом 10, что дает возможность катушке 4 получать питание, если  $P_2$  расшунтирует ее.

При включении контактора IV электродвигатель приключается на полное напряжение сети, имея возможность развивать максимум мощности. При малой нагрузке брашпиля электродвигатель в этом случае будет развивать большую скорость, нежелательную для брашпиля. Для предупреждения этого электромеханический ограничитель скорости О-С зашунтирует катушку 3, что вызовет размыкание контакторов III и IV с переводом электродвигателя на работу при пониженном напряжении. Этот автоматический перевод электродвигателя на сниженную мощность при включенном одном только контакторе I отвечает условиям работы по развертке 1-е положение при разомкнутом контакторе II, а следовательно, и отключенном сопротивлении  $R_3$ . По снижении оборотов брашпиля до нормального значения О-С размыкается и брашпиль вновь автоматически переводится в рабочее состояние, отвечающее третьему положению.

При работе на подъем производится только переключение обмотки якоря, вследствие чего направление тока в якоре меняется и последний вращается в другом направлении. В остальном действие схемы при подъеме аналогично разобранному условию спуска.

Для более наглядного представления развертки при нулевом, первом и втором положениях контроллера на этих схемах показаны только те части оборудования, которые находятся под током; в третьем положении схема дана с полным оборудованием.

б) Контроллерная система управления брашпилем на теплоходе «Молдавия». Контроллерные системы управления брашпилями обычно можно применять для установок небольшой сравнительно мощности (15—25 квт для барабанных контроллеров при напряжении соответственно 110—220 в). При больших мощностях потребуются слишком громоздкие и трудно управляемые контроллеры.

Примером брашпиля с контроллерной системой управления может служить товаро-пассажирский теплоход «Молдавия», построенный в Гамбурге в 1928 г. и предназначенный для рейсов Одесса—Херсон

и Одесса—Николаев. Судно построено на высший класс Германского Ллойда и имеет водоизмещение порядка 2000 т.

Электрический брашпиль рассчитан на подъем обеих якорей и 25 морских саженей (45,7 м) обоих цепных канатов.

Схема электрических соединений приведена на фиг. 112.

Электрическое оборудование брашпиля состоит из:

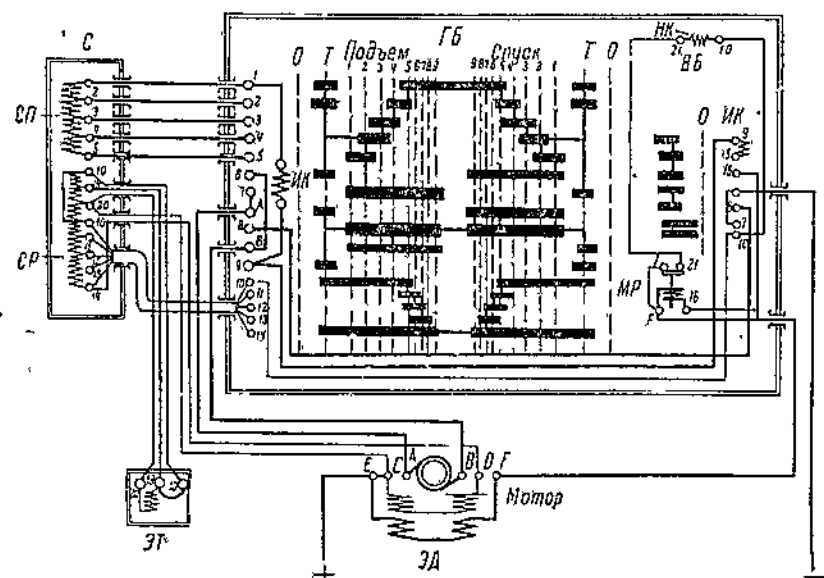
а) Реверсивного контроллера барабанного типа с главным барабаном ГБ и вспомогательным барабаном ВБ.

б) Набора сопротивлений С,

в) Электромагнитного тормоза ЭТ,

г) Компаундного электродвигателя ЭД.

Контроллер управляет реверсированием брашпиля, его пуском, регулировкой числа оборотов в сторону увеличения, например, при



Фиг. 112. Схема управления брашпилем теплохода „Молдавия“.

выбрании цепи, и торможением электродвигателя путем замыкания накоротко его якоря.

Реверсирование брашпиля осуществляется при изменении направления вращения контроллера от его исходного, нулевого положения.

Пуск электродвигателя производится при изменении положения контроллера в пределах первых пяти (1—5) пусковых позиций; при первом положении контроллера в цепь якоря электродвигателя включены все четыре секции пускового сопротивления (СП), при пятом же положении якорь электродвигателя получает питание, минуя пусковое сопротивление.

Увеличение числа оборотов электродвигателя производится за счет ослабления тока в шунтовой обмотке электродвигателя, что достигается путем введения сопротивления в цепь шунтовой обмотки электродвигателя при вращении контроллера в пределах от поло-

жения 6 до положения 9. При положениях 6 и 9 контроллера соответственно имеем одну и четыре ступени сопротивления, включенного в цепь шунтовой обмотки, благодаря чему происходит снижение магнитного потока электродвигателя и увеличение числа его оборотов.

Торможение электродвигателя брашпиля осуществляется при переводе ГБ в положение Т. В этом положении контроллера якорь электродвигателя замыкается накоротко благодаря соединению выведенных контактов якоря А и В через сегментные пластины контроллера А, 9, 1, 2 и 6 — при подъеме и соответственно В, 9, 1, 2 и 7 — при спуске.

При этом шунтовая обмотка электродвигателя остается приключенной к сети, что обеспечивает магнитный поток в электродвигателе, а следовательно, и его тормозной генераторный режим.

Вспомогательный барабан ВБ по своему включению обеспечивает питание током катушки электромагнитного тормоза ЭТ, благодаря чему последний растормаживает брашпиль и дает возможность производить питание электродвигателя током через ГБ.

Вспомогательный барабан имеет искрогасительную катушку ИК, максимальное реле МР, с контактами в цепи нулевой катушки НК, которая является и выключающей катушкой вспомогательного барабана ВБ путем воздействия на защелку.

Набор сопротивлений состоит из пускового сопротивления СП с четырьмя секциями; из регулировочного сопротивления СР (10—14), включаемого в цепь шунтовой обмотки электродвигателя, из разрядного сопротивления (20—10) шунтовой обмотки; из разрядного сопротивления (19—20) катушки ЭТ и добавочного сопротивления (10—19), ограничивающего ток в катушке ЭТ после включения.

Электромагнитный тормоз снабжен приспособлением, размыкающим его контакты (10—19) по включении катушки ЭТ, благодаря чему в цепь катушки вводится добавочное сопротивление (19—10), ограничивающее нагрев катушки ЭТ. При включении катушки ЭТ контакты (10—19) вновь замыкаются.

Приводной электродвигатель ЭД осуществляет реверс за счет изменения тока в якоре при сохранении постоянства направления магнитного потока индукторов.

Действие электрической схемы сводится к следующему.

**П о д ъ е м.** Подав питание на подводящие клеммы «+» «—», включают ВБ, благодаря чему ток подводится в катушку тормоза ЭТ и обеспечивается подача тока на главный барабан ГБ. Тормоз ЭТ освобождает вал электродвигателя.

Переводя ГБ в положение 1, имеем:

а) питание шунтовой обмотки электродвигателя по следующему направлению — положительный полюс, шунтовая обмотка, соединительный провод, контакт 14 СР и через нижнюю сегментную пластину ГБ в пластину на контакт 10 ГБ, откуда по соединительному проводу в контакт 10 ВБ, через сегментные пластины в контакт 7 и по соединительному проводу в отрицательный полюс,

б) питание главной цепи электродвигателя происходит от положительного полюса в серийную обмотку ЭД и в катушку МР, к

клемму 16 ВБ, через его сегментные пластины в контакт 9 ВБ, через соединительный провод в контакт 9 ГБ, откуда через контакт 1 и пусковое сопротивление СП в контакт 5 и соприкасающуюся с ним сегментную пластину, дальше через переключку в пластину контакта 7, затем в якорь ЭД и из него через контакт В и сегментные пластины в контакты 8 ГБ и ВБ, а из последнего через сегментные пластины в отрицательный полюс.

При переводе рукоятки контроллера в положения 2—5 производим шунтирование соответствующих ступеней СП, благодаря чему в положении 5 электродвигатель получает полное напряжение и развивает нормальное число оборотов.

При дальнейшем переводе рукоятки контроллера в положения 6—9 производим последовательное приключение от одной до четырех ступеней СР к шунтовой обмотке, вследствие чего магнитный поток ослабляется и ЭД увеличивает обороты, имея максимум при положении ГБ на позиции 9.

Выключая электродвигатель из положения 1, ставим ГБ в положение Т, вследствие чего обмотка якоря ЭД через контакты контроллера А, 9, 1, 2, 6 и В замыкается накоротко и электродвигатель при включенной шунтовой обмотке возбуждения быстро тормозится. Переводя ГК и ВК в нулевое положение, полностью отключают электродвигатель и катушку ЭТ, благодаря чему осуществляется механическое затормаживание электродвигателя. От случайных перерывов в подаче электроэнергии и снижении напряжения сверх допустимого предела НК выключает ВБ, и для пуска электродвигателя в работу требуется привести в нулевое положение ГБ и после этого возможно включить ВБ и вновь пустить электродвигатель. От перегрузки электродвигатель защищен максимальным реле МР, которое размыкает цепь НК.

**С п у с к.** Работа электродвигателя протекает аналогичным образом. Вращение электродвигателя в обратном направлении происходит за счет изменения тока в якоре.

Подобная схема управления брашпилем, с отсутствием регулировки числа оборотов за счет шунтовой обмотки, выполнена для теплохода «Калинин» (фиг. 113).

Ввиду аналогии и большей простоты схемы брашпильного электропривода теплохода «Калинин» по сравнению с рассмотренной схемой брашпиля теплохода «Молдавия» эта схема дается без пояснения.

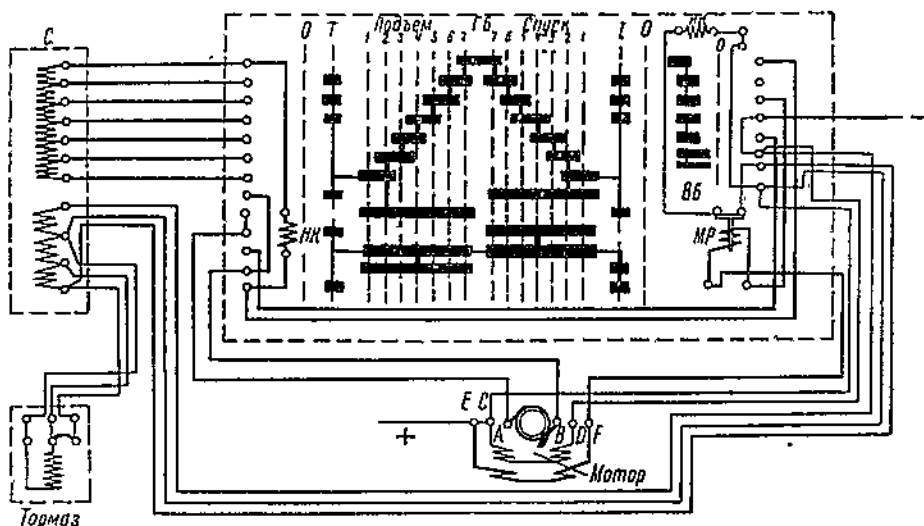
**в) Схема управления брашпиля по системе Вард-Леонарда, установленного на шхуне «Серп».** Шхуна «Серп» в числе аналогичных 15 шхун является теплоходом, предназначенным для перевозки зерна на рейды. Эти шхуны построены на заводе им. Марти в Одессе и на Севастопольском заводе в период с 1930 по 1935 г. Электробрашпиль изготовления завода «Дейче Верке» предназначен для подъема двух станковых якорей Холла, весом по 1197 кг, имеющих цепные канаты длиной по 192 м (105 морских саж.).

Для привода якорной лебедки взят серийный электродвигатель, управляемый по системе Вард-Леонарда. Реверс электродвигателя осуществляется за счет изменения направления тока в якорном контуре брашпильного электродвигателя.

Прилагаемая на фиг. 114 схема состоит из:

- а) командо-контроллера  $K-K$ ,
- б) электромагнитного тормоза  $ЭТ$ ,
- в) пуско-реверсирующих контакторов  $KP_1$ ,  $KP_2$  и  $KP_3$ ,
- г) максимального реле  $MP$ ,
- д) серийного электродвигателя брашпиля  $C-ЭД$ ,
- е) генератора  $G$ , питающего электродвигатель брашпиля,
- ж) рубильника  $P$ , приключающего питание цепи управления.

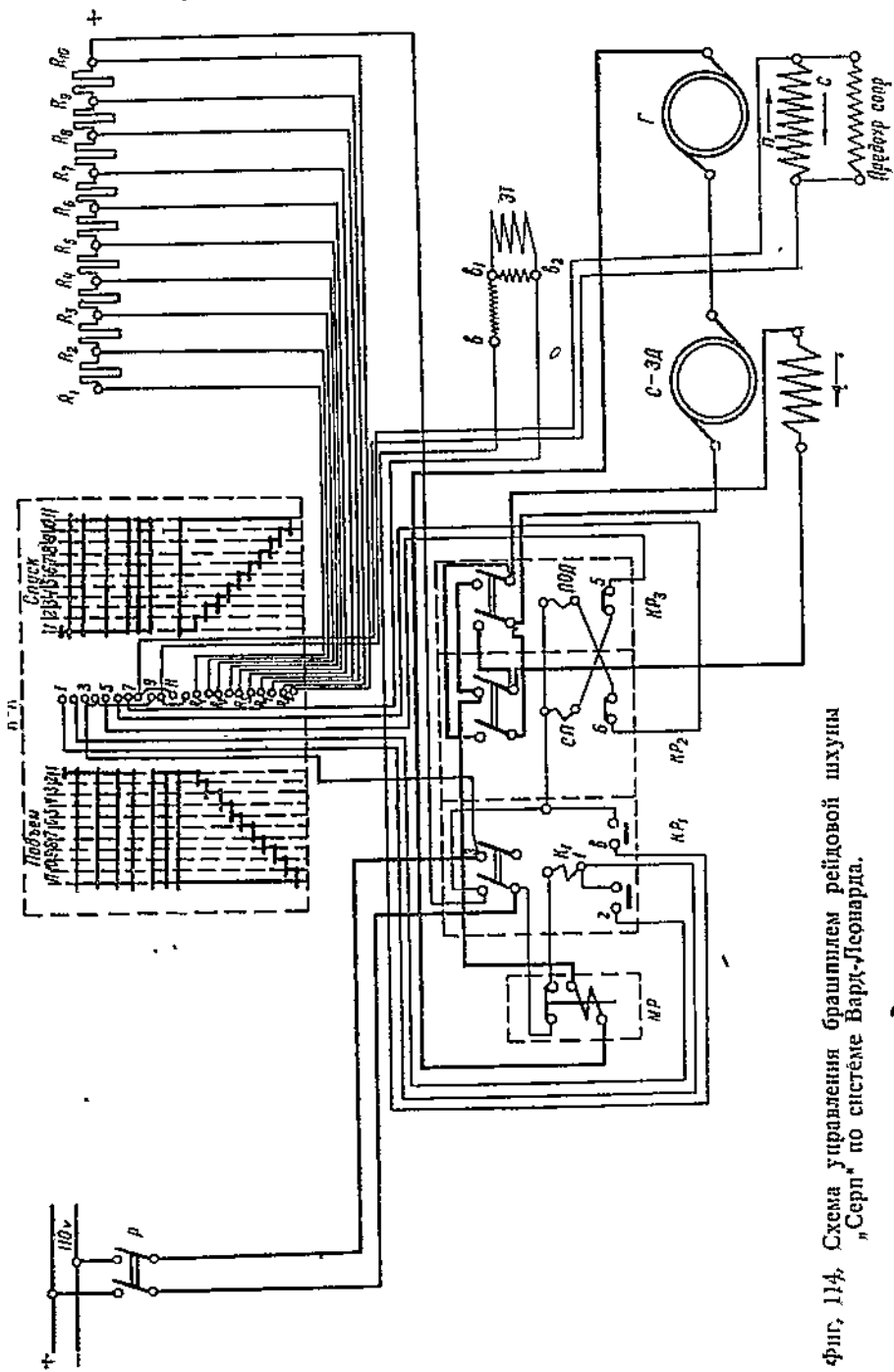
С помощью командо-контроллера  $K-K$  производится управление цепью возбуждения генератора в системе Вард-Леонарда, управление электромагнитным тормозом  $ЭТ$  и управление цепью катушек контакторов  $KP_1 - KP_3$ .



Фиг. 113. Схема управления брашпилем теплохода „Калинин“.

Командо-контроллер  $K-K$  состоит как бы из двух частей: верхней и нижней (ступенчатой). С помощью нижней части производится изменение величины возбуждения генератора (десять ступеней возбуждения), а верхняя часть производит изменение направления магнитного потока генератора, управляет электромагнитным тормозом и цепью катушек контакторов. При вращении рукоятки командо-контроллера в одном направлении от нулевого положения производят спуск якоря, при вращении в обратном направлении от нулевого положения производится подъем якоря.

Контактор  $KP_1$  снабжен двумя нормально-открытыми блок-контактами, из которых левые блок-контакты обеспечивают питание катушки контактора  $K_1$  при всех положениях командо-контроллера за исключением положения  $O$ . Размыкание левых блок-контактов при исчезновении или снижении напряжения в цепи управления ниже допустимого предела ( $\sim$  до 60% от  $V_{норм.}$ ) производит выключение контактора  $KP_1$ , вследствие чего возникает необходимость поставить командо-контроллер в исходное (первое) положение, чтобы вновь осуществить работу



Фиг. 114. Схема управления брашпильм рейдовой шхуны "Серп" по системе Ватт-Леоноарда.

брашпиля. Включение контактора  $KP_1$  и замыкание правых его блок-контактов оживляет током катушку электромагнитного тормоза  $ЭТ$ , вследствие чего брашпиль растормаживается; всякое размыкание контактора  $KP_1$  влечет выключение питания в катушке  $ЭТ$ , благодаря чему производится торможение брашпиля.

Контакторы  $KP_2$  и  $KP_3$  с нормально-закрытыми блок-контактами обеспечивают реверсирование брашпильного электродвигателя за счет изменения направления тока в якоре электродвигателя.

При включении контактора  $KP_2$  размыкание его блок-контактов разрывает цепь катушки контактора  $KP_3$ , что и обеспечивает невозможность включения последнего. При включении контактора  $KP_3$  происходит разрыв цепи катушки контактора  $KP_2$ .

Катушка шунтового электромагнитного тормоза  $ЭТ$  как обладающая большой самоиндукцией снабжена разрядным сопротивлением  $с_{162}$  и приключена к сети питания через дополнительное (ограничительное) сопротивление  $св_1$ .

Принцип действия электрической схемы при подъеме сводится к следующему.

Включив рубильник  $P$  и поставив командо-контроллер  $K-K$  на первое положение, имеем следующее движение тока: от положительного полюса шин, через нож рубильника, замкнутые контакты максимального реле  $МР$  напряжение подводится к катушке  $K_1$  контактора  $KP_1$ , откуда через соединительный провод подается на верхний неподвижный контакт 1 командо-контроллера  $K-K$  и через левые его сегменты, в соответствии с первым положением  $K-K$ , напряжение поступает к контакту 4 (сверху), а из него по перемычке в контакт 3; из последнего по соединительному проводу поступает на правый верхний контакт контактора  $KP_1$ , а затем через соединительный провод и правый нож рубильника  $P$  цепь замыкается на отрицательный полюс шин.

Под действием тока в катушке  $K_1$  контактор  $KP_1$  включается, замыкая при этом свои блок-контакты. Замыкание левых блок-контактов обеспечивает дальнейшее питание катушки  $K_1$  помимо контакта 1 командо-контроллера  $K-K$ , через его контакт 2.

Замыкание правых блок-контактов производит растормаживание  $ЭТ$ , так как ток от левого верхнего контакта включенного  $KP_1$  проходит через его замкнутый правый блок-контакт  $в$  и поступает в дополнительное сопротивление и катушку  $ЭТ$ , откуда по соединительному проводу подводится к контакту 7  $K-K$  и по левым сегментам к контакту 4 и через перемычку к контакту 3, откуда возвращается в сеть. Благодаря току в катушке  $ЭТ$  тормоз освобождает брашпиль.

Замыкание  $KP_1$  также вызывает питание обмотки возбуждения генератора  $G$ , а именно, от верхнего левого контакта  $KP_1$  ток поступает в крайнюю правую ступень сопротивления  $R_{10}$ , проходит через все ступени сопротивления и по соединительному проводу поступает на контакт  $R_1$  у  $K-K$ , откуда через сегментные пластины идет в 11-й сверху контакт, через перемычку в контакт 8 и по соединительному проводу в шунтовую обмотку  $G$ , пройдя которую возвращается в контакт 10  $K-K$ , через сегментные пластины в контакт 9, дальше по

перемычке в контакты 4 и 3, а из последнего по соединительному проводу возвращается в линию.

Вследствие возбуждения генератор может питать приключенный к нему электродвигатель брашпиля.

Приключение электродвигателя к генератору осуществляется за счет включения контактора  $KP_3$ , катушка которого после включения  $KP_1$  получает питание от положительного полюса через нормально-замкнутые блок-контакты  $KP_2$ , соединительный провод и контакт 6  $K-K$ , соединяемый через сегментные пластины и контакт 3 с отрицательным полюсом.

Замыкание  $KP_3$  производит следующее. Ток, допустим, из правой щетки генератора поступает через катушку  $MP$  в правый замкнутый контакт  $KP_3$  и из него в серийную обмотку, возвращаясь через левый замкнутый контакт  $KP_3$  в якорь  $C-ЭД$  и из последнего в якорь генератора.

Электродвигатель брашпиля начинает работать.

Стрелки с буквами  $P$  и  $C$  у шунтовой обмотки генератора указывают соответственное направление тока в обмотке при подъеме и спуске.

## Глава IX

### СУДОВЫЕ И ПОРТОВЫЕ ПОГРУЗОЧНО-РАЗГРУЗОЧНЫЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЗМЫ

#### § 26. Грузоподъемные устройства на судах и в портах и их классификация по электрическим признакам

На судах и в портах для обслуживания судов применяются самые разнообразные подъемно-транспортные механизмы, предназначенные для подъема и перемещения грузов. Нередко операции по подъему и перемещению грузов выполняются помощью одного приспособления, например, порталного крана.

Погрузочные приспособления бывают как для специальных грузов, таких, как, например, жидкое топливо — керосин, бензин и т. п., для сыпучих тел — зерно, уголь, руда, соль и т. д., так и для штучных грузов общего характера, или так называемых генеральных грузов. Последний вид грузов является наиболее распространенным. На судах специального назначения, таких, как лесовозы, рудовозы и т. п., погрузка и выгрузка производится отдельными, небольшими частями груза, с помощью таких же устройств, как и штучные грузы, только при наличии специальных захватных приспособлений.

Поэтому наиболее распространенными видами подъемных приспособлений на судах являются грузовые лебедки, имеющие своим назначением производить, главным образом, подъем и опускание грузов при погрузках и выгрузках судна.

Эти подъемные приспособления судна особенно необходимы при посещении судном портов, не имеющих механизированных средств для погрузки и выгрузки.

Что касается большинства портов, то : них наиболее распространенным видом подъемно-транспортных приспособлений по обслуживанию судов являются порталные краны, совмещающие операции по подъему и перемещению грузов.

- Крановое оборудование иногда применяется и на судах, особенно специальных, таких, как, например, пловучие доки. Указанные главные подъемные приспособления, т. е. судовые лебедки и разные виды портовых кранов, аналогичны по характеру своих грузовых операций, следовательно, основные требования по электрооборудованию, предъявляемые к электромашинам и аппаратам управления судовыми лебедками и портовыми кранами, также аналогичны.

Основное различие между судовыми лебедками и портовыми кранами может заключаться в роде тока, так как на судах для лебедок применяется почти исключительно постоянный ток, тогда как в портовых установках преобладает переменный трехфазный ток.

За последнее время на судах, особенно на электроходах, переменный ток начинает находить все более широкое применение, включая обслуживание палубных механизмов и, в частности, грузовых лебедок. Подтверждением расширяющегося внедрения переменного тока на судах является конференция 1937 г., созванная Германским Ллойдом, с участием трех главных и авторитетных германских электротехнических фирм: SSW, AEG и BBC. В силу этого на дизель-электроходах переменного тока последней постройки, таких, как «Osorno», можно видеть, что грузовые лебедки так же, как и остальные механизмы, используют трехфазный ток.

В отношении электрооборудования как судовые лебедки постоянного тока, так и портовые краны переменного тока наиболее характерно классифицировать по признаку системы управления, а именно:

а) краны и лебедки с контроллерным управлением,

б) краны и лебедки с контакторным управлением.

Лебедки и краны, устанавливаемые на судах, бывают грузоподъемностью  $\frac{1}{2}$ , 1,  $1\frac{1}{2}$ , 2, 3, 5,  $7\frac{1}{2}$  и 10 т, а большие современные суда нередко оборудуются и более мощными грузовыми устройствами, доходящими иногда до 50 т. Портовые краны по своей грузоподъемности не уступают судовым лебедкам, а в отдельности, особенно пловучие краны, применяются и на большую грузоподъемность, превышая 100 т.

Наиболее распространенная грузоподъемность судовых лебедок  $1\frac{1}{2}$ , 3 и 5 т, а береговых порталных кранов 5 и 7,5 т.

Скорости подъема, применяемые для операций по погрузке и выгрузке судов, лежат в пределах от 0,3 до 0,6 м/сек. (в среднем от 15 до 35 м/мин.), поднимаясь за последнее время до 0,7 м/сек. (42 м/мин.).

Существующее до последнего времени мнение, что одной из важных характеристик лебедок является возможность дальнейшего увеличения их подъемной скорости, по опытам, проведенным компанией Hamburg American Line над грузовыми операциями теплохода «Caribia», не находит себе оправдания.

Опыт был проведен в сравнительно благоприятных условиях для выявления всех преимуществ больших подъемных скоростей и скоростей опускания, а именно, производилась разгрузка кофе в мешках

из трюма глубиной 15 м, при среднем весе подъема 1120 кг, с выгрузкой на палубу, откуда кофе выгружали дальше береговым краном. Для обслуживания операций были использованы один человек у лебедки, трое на палубе и восемь человек в трюме. Проведенный хронометраж работы лебедки, согласно приводимому графику на фиг. 115, показал, что из общего времени одного полного цикла продолжительностью в 107 сек. только 24% приходится на подъем и опускание. Следовательно, дальнейшее увеличение подъемной скорости на 20% дало бы экономию от общего времени только порядка 4,5%. При этих же опытах было установлено, что полная подъемная скорость не может быть использована, так как редко бывает, чтобы груз поднимался на полную высоту без остановок. Поэтому дирекция фирмы считает, что скорость подъема, равная 0,7 м/сек., для грузоподъемности в 2 т и 0,5 м/сек. при 3-тонной грузоподъемности является вполне удовлетворительной.

Фиг. 115. График работы лебедки за 1 цикл на теплоходе „Саргива“.

Скорость подъема пустого захватного приспособления обычно принимается не свыше 3-кратного значения вышеуказанной максимальной подъемной скорости — 0,7 м/сек.

Для нового типа судовой электролебедки завода «Динамо», грузоподъемностью 3—1½ т, предназначенной к установке на новых судах Наркомморфлота, приняты следующие скорости:

|                                                    |           |
|----------------------------------------------------|-----------|
| Для подъема груза в 3 т. . . . .                   | 30 м/мин. |
| Наибольшая скорость спуска груза в 3 т. . . . .    | 60 "      |
| Скорость подъема пустого гака . . . . .            | 75 "      |
| То же — повышенной скоростью . . . . .             | 90 "      |
| Мощность электродвигателя при грузе в 3 т. . . . . | 180 "     |
|                                                    | 24 квт    |

### § 27. Работа грузоподъемных устройств и характерный график нагрузки

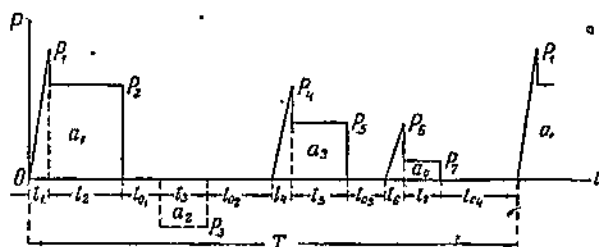
Как отмечалось выше, наиболее распространенные грузоподъемные приспособления для судов, а также и портов, обслуживающих суда, имеют своим преобладающим назначением операции с генеральными грузами. Работа судовых лебедок и кранов сводится, главным образом, к подъему и опусканию груза, с последующим подъемом и опусканием захватного приспособления.

Работу этих подъемных устройств можно представить следующими характерными графиками изменения нагрузки за 1 цикл:

$$P = f(t) \quad (\text{фиг. 116})$$

$$M = f(t) \quad (\text{фиг. 117})$$

$$I = f(t) \quad (\text{фиг. 118})$$



Фиг. 116. График изменения мощности грузоподъемного механизма за 1 цикл  $P = f(t)$ .

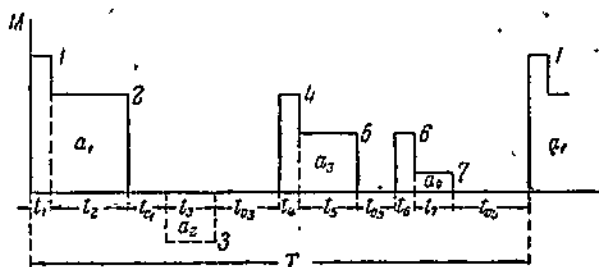
На приведенных графиках нагрузки обозначено:

$T$  — время одного цикла,

$t_1, t_2$  и т. д. — время работы электродвигателя или нахождения его под током,

$t_{01}, t_{02}$  и т. д. — время стоянки или нахождения электродвигателя без тока,

$a_1$  — подъем груза, включая и время его разгона  $t_1$ ,



Фиг. 117. График изменения момента грузоподъемного механизма за 1 цикл  $M = f(t)$ .

$a_2$  — спуск груза с электрическим торможением электродвигателя (если такое предусмотрено),

$a_3$  — подъем пустого гака с учетом времени разгона  $t_4$  электродвигателя,

$a_4$  — спуск пустого гака, с учетом времени разгона  $t_6$  электродвигателя.

Практикой установлено, что в большинстве случаев приходится оперировать с грузами весом не более 1 т, и среднее число подъемов при грузовых операциях судов достигает  $25 \div 35$  циклов в 1 час. Следовательно, среднее время одного цикла лежит в пределах:

$$T = \frac{3600}{25 \div 35} \cong 150 \div 100 \text{ сек.}$$

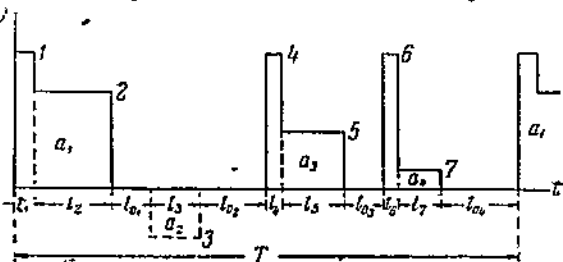
Из приведенных графиков, а также и на основании длительности одного цикла, заключаем, что *работа подъемных механизмов протекает по режиму повторно-кратковременной нагрузки*.

## § 28. Метод выбора электродвигателей грузовых лебедок

Выбор электродвигателей подъемных приспособлений, работающих по циклу повторно-кратковременной нагрузки, производится по температурному режиму, в пределах допустимого нагрева электродвигателя. Так как изменение температуры нагрева электродвигателя зависит, главным образом, от квадрата силы тока, то в силу этого для определения степени

нагрева электродвигателя необходимо учесть колебания силы тока электродвигателя при его работе, включая и пусковой режим. Для этого прибегают к определению эквивалентной или среднеквадратичной силы тока электродвигателя при меняющихся условиях его нагрузки с учетом и пускового

тока как имеющего максимальное значение. Эквивалентная сила тока отвечает тому значению тока, который создает такой же нагрев электродвигателя, но в условиях непрерывной его работы за все время цикла, и находится по известной формуле:



Фиг. 118. График изменения силы тока электродвигателя грузоподъемного механизма за 1 цикл при постоянном среднем значении пускового тока  $I = f(t)$ .

$$I_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + I_3^2 t_3 + \dots + I_7^2 t_7}{t_2 + t_3 + t_5 + t_7 + \alpha(t_1 + t_4 + t_6) + \beta(t_{01} + t_{02} + t_{03} + t_{04})}}$$

или

$$I_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + I_3^2 t_3 + \dots}{\Sigma t_{\text{раб}} + \alpha \Sigma t_{\text{пуск}} + \beta \Sigma t_{\text{ост}}}}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  — коэффициенты, учитывающие ухудшенные условия охлаждения электродвигателя при его пониженной скорости во время пуска и при стоянке.

Значение этих коэффициентов принимается для электродвигателей постоянного тока  $\alpha = 0,75$ ,  $\beta = 0,5$ , для электродвигателей переменного тока  $\alpha = 0,5$ ,  $\beta = 0,25$ .

Если отсутствует график изменения силы тока за цикл, и располагаем графиком изменения момента или мощности, что обычно и задается, то выбор шунтового электродвигателя и других электродвигателей с жесткой характеристикой можно производить по среднеквадратичному моменту или по среднеквадратичной мощности, так как изменение момента и мощности в этих электродвигателях практически пропорционально изменению силы тока в электродвигателе.

Так, например, для шунтового электродвигателя имеем:

$$M = K\Phi I_a = C I_a$$

и

$$P = K' M n = K K' \Phi n I_a = C' I_a.$$

Для шунтового электродвигателя при различных его нагрузках практически можно считать, что

$$\Phi = \text{const.}, \quad n = \text{const.},$$

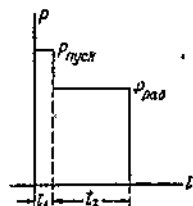
а  $K$  и  $K'$  — постоянные коэффициенты.

Поэтому для подъемных механизмов выбор электродвигателей с жесткой характеристикой, т. е. работающих практически с постоянной скоростью, при различных нагрузках, можно производить, исходя из:

$$\text{а) по } M_{\text{кв}} = \sqrt{\frac{\Sigma (M_{\text{пуск}}^2 t_{\text{пуск}}) + \Sigma (M_{\text{раб}}^2 t_{\text{раб}})}{\Sigma t_{\text{раб}} + \alpha \Sigma t_{\text{пуск}} + \beta \Sigma t_{\text{ост}}}}, \quad (2)$$

$$\text{б) по } P_{\text{кв}} = \sqrt{\frac{\Sigma (P_{\text{пуск}}^2 t_{\text{пуск}}) + \Sigma (P_{\text{раб}}^2 t_{\text{раб}})}{\Sigma t_{\text{раб}} + \alpha \Sigma t_{\text{пуск}} + \beta \Sigma t_{\text{ост}}}}. \quad (3)$$

При определении  $P_{\text{кв}}$  приближенно можно учитывать постоянное значение пусковой мощности ( $P_{\text{пуск}}$ ), так как среднепусковой ток обычно постоянен, т. е. нужно пользоваться графиком мощности вида, представленного на фиг. 119.



Фиг. 119. График к определению эквивалентной мощности электродвигателя по нагреву.

Что касается серийных электродвигателей, которые являются наиболее распространенными электродвигателями судовых лебедок, то при выборе этих электродвигателей необходимо пользоваться методом среднеквадратичного тока. Метод среднеквадратичного момента и среднеквадратичной мощности для серийных электродвигателей неприменим вследствие сложной и непостоянной степенной зависимости момента и мощности от силы тока в условиях переменной нагрузки. При использовании графика моментов, т. е.  $M = f(t)$ , для выбора серийных электродвигателей необходимо располагать зависимостью между моментом электродвигателя и его

током, как, например, это было принято в условиях выбора электродвигателя брашпиля.

Более упрощенным способом выбора электродвигателей подъемных механизмов является метод нагрузочных рядов, применительно к стандартно-принятым мощностям электродвигателей, предназначенных для повторно-кратковременной нагрузки. Как известно, мощность электродвигателя для повторно-кратковременной нагрузки дается в зависимости от коэффициента использования двигателя или от так называемого коэффициента продолжительности включения, который принято обозначать  $\epsilon$ , или  $ED$ , или  $ПВ$ .

Согласно принятым стандартам мощность электродвигателей указывается для трех значений  $P_B$ , а именно:

$$\begin{aligned}\varepsilon &= 15\%, \\ \varepsilon &= 25\%, \\ \varepsilon &= 40\%.\end{aligned}$$

Коэффициентом продолжительности включения называется отношение длительности работы электродвигателя или нахождения его под током к сумме времени его работы и стоянки за какой-либо промежуток времени.

Так, например, для одного цикла применительно к графику фиг. 116 имеем:

$$\varepsilon = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7 + t_{01} + t_{02} + t_{03} + t_{04}} \cdot 100$$

или

$$\varepsilon\% = \frac{\Sigma t_{\text{раб}}}{\Sigma t_{\text{раб}} + \Sigma t_{\text{ост}}} \cdot 100. \quad (4)$$

Для периода времени в 1 час, при  $Z$  циклах в час, будет:

$$\varepsilon = \frac{Z \Sigma t_{\text{раб}}}{3600} \cdot 100. \quad (5)$$

Значение продолжительности включения  $P_B$  сравнительно легко поддается расчету, а также экспериментальной проверке и статистическому учету помощью особых, применяемых для этого, счетчиков.

Выбор электродвигателя по упрощенному методу сводится к следующему:

1. определяют  $P_{\text{гр}}$  — установившуюся мощность при подъеме с полным грузом:

$$P_{\text{гр}} = \frac{(G + G_0)v}{102\eta_{\text{max}}} \text{ кВт.} = \frac{G_{\text{max}}v}{102\eta_{\text{max}}} \text{ кВт,} \quad (6)$$

где  $G$  — полный вес поднимаемого груза в кг,

$G_0$  — вес пустого подъемного приспособления в кг,

$v$  — скорость подъема в м/сек,

$\eta_{\text{max}}$  — к. п. д. подъемного механизма, который при полной нагрузке для судовых лебедок обычно лежит в пределах 0,7—0,8.

Изменение к. п. д. подъемного механизма в зависимости от нагрузки определяется на основании приведенных на фиг. 120 кривых, полученных по опытам Фейгля.

2. Определяют коэффициент  $K = \frac{M_{\text{п}} + M_0}{2M_{\text{п}}}$ , характеризующий среднюю относительную нагрузку подъемного механизма. В приведенном выражении  $M_{\text{п}}$  — вращающий момент при полном грузе на крюке, т. е. отвечает нагрузке  $G + G_0 = G_{\text{max}}$ ;  $M_0$  — вращающий момент при незагруженном крюке. Значение коэффициента средней относи-

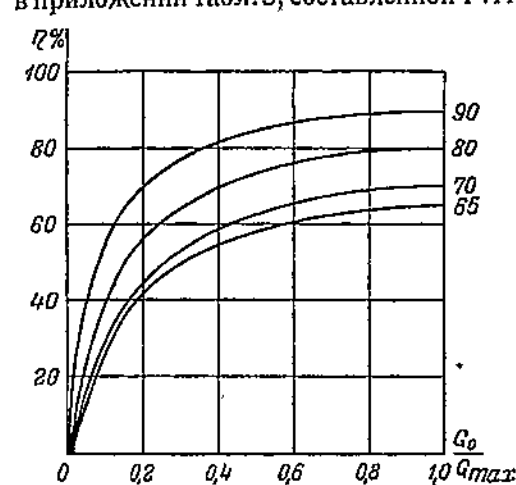
тельной нагрузки  $K$  лежит в пределах  $0,5 \div 1,0$  и может быть взято также по выражению:

$$K = 0,5 \left( 1 + \frac{G_0 \eta_{\max}}{G_{\max} \eta_0} \right), \quad (7)$$

где  $G_0$ ,  $G_{\max}$  и  $\eta_{\max}$  значения, указанные выше;

$\eta_0$  — к. п. д. подъемного механизма при холостом ходе берется на основании приведенных кривых Фейгля. В среднем можно считать для штучных грузов  $K=0,6$ , для грейферных кранов  $K=0,8$ .

3. Определяют значение  $ПВ$  ( $\epsilon\%$ ) на основании формулы (4) или (5), или же значение  $\epsilon$  ориентировочно можно взять из приводимых в приложении табл. 3, составленной F. Hartig'ом, или по данным табл. 4.



Фиг. 120. Кривые изменения к. п. д. подъемного механизма в зависимости от нагрузки.

4. Производится пересчет мощности  $P_{гр}$  на мощность при стандартном значении  $\epsilon$ , если полученное значение  $ПВ$ , или же взятое на основании табл. 3 или 4, отличается от вышеуказанных стандартных значений  $\epsilon = 15, 25$  и  $40\%$ .

Для пересчета мощности пользуются формулой:

$$P_{\text{станд.}} = K_{ш} P_{гр} \sqrt{\frac{\epsilon}{\epsilon_{ст}}}, \quad (8)$$

где  $K_{ш}$  — поправочный коэффициент, значение которого рекомендовано Шибелером в зависимости от рода тока и типа двигателя, а также и в соответствии с коэффициентами использования, отличающимися

от  $\epsilon_{ст} = 25\%$ , по отношению к которому и даны поправки. Значения поправочных коэффициентов Шибелера даны в табл. 22.

Таблица 22

| Род тока   | Тип электродвигателя | $\epsilon\%$ | 15   | 20   | 25  | 30   | 35   | 40   |
|------------|----------------------|--------------|------|------|-----|------|------|------|
| Трехфазный | Закрытый . . .       | $K_{ш}$      | 1,04 | 1,03 | 1,0 | 0,99 | 0,95 | 0,93 |
|            | Открытый . . .       | $K_{ш}$      | 1,01 | 1,01 | 1,0 | 0,98 | 0,96 | 0,96 |
| Постоянный | Закрытый . . .       | $K_{ш}$      | 1,01 | 1,05 | 1,0 | 0,99 | 0,96 | 0,94 |
|            | Открытый . . .       | $K_{ш}$      | 0,85 | 0,93 | 1,0 | 1,05 | 1,11 | 1,15 |

5. На основании взятых значений: а) коэффициента средней относительной нагрузки  $K$  подъемного механизма и б)  $\epsilon_{ст}$ , в соответствии с пересчетом мощности  $P_{гр}$  на  $P_{\text{станд.}}$  по формуле (8), производят выбор

электродвигателя, пользуясь нижеприводимой таблицей нагрузочных рядов, составленной Шибелером (табл. 23),

Таблица 23

| ПВ = ε % | Меняющаяся нагрузка |                 | Постоянная нагрузка |
|----------|---------------------|-----------------|---------------------|
|          | K = 0,6             | K = 0,8         |                     |
|          | Нагрузочный ряд     |                 | K = 1,0             |
| 15       | I                   | I               | II                  |
| 25       | II                  | 0,52 (II + III) | III                 |
| 40       | III                 | 0,52 (III + IV) | IV                  |

Пользование приведенной таблицей нагрузочных рядов сводится к следующему: электродвигатели, работающие в условиях повторно-кратковременной нагрузки, разбиваются на четыре ряда, из которых 1-й ряд относится к максимально-допустимой мощности электродвигателя по его магнитным и коммутационным свойствам.

Эту максимальную мощность электродвигатель способен развивать при  $ПВ < 15\%$ , что является мало характерным для работы подъемных и крановых механизмов. Для подъемных и крановых механизмов возможно мощность электродвигателей разбить на следующие три основных ряда при работе их с полной нагрузкой (при  $K = 1$ ), а именно: при  $\epsilon = 15\%$  — II ряд, при  $\epsilon = 25\%$  — III ряд, при  $\epsilon = 40\%$  — IV ряд.

В случае работы электродвигателя подъемного механизма при  $K = 0,6$  мощность электродвигателя можно принимать большую на один ряд.

Так, например, для  $\epsilon = 40\%$  и при  $K = 0,6$  электродвигатель можно использовать на мощность большую, т. е. отвечающую мощности при  $\epsilon = 25\%$ .

При работе электродвигателя с коэффициентом относительной нагрузки  $K = 0,8$  и при  $\epsilon = 40\%$  мощность электродвигателя можно принимать больше на 4% по сравнению с полусуммарной мощностью этого электродвигателя при  $\epsilon = 40\%$  и  $\epsilon = 25\%$ , для чего в таблице, в графе при  $K = 0,8$  и указано:

$$0,52 (III + IV) = 1,04 \frac{III + IV}{2}.$$

Для ориентировки выбора мощностей электродвигателей по изложенному методу нагрузочных рядов в приложении даны табл. 5 для крановых электродвигателей постоянного тока (закрытых), типа КЭП и табл. 6а и 6б для крановых электродвигателей трехфазного тока (открытых) типа (КТО) и (закрытых) типа КТ.

6. Выбранный электродвигатель в отношении достаточности его мощности подлежит проверке на дополнительный нагрев от пусковых токов, которые не учитываются принятой выше для расчета устано-

вившейся мощностью  $P_{гр}$ . Мощность с учетом нагрева от пусковых токов определяется по формуле:

$$P_{max} = P_{гр} \sqrt{\frac{nZ(x^2 - 1)t_{пуск}}{36 \cdot \varepsilon^0_0}} + 1, \quad (9)$$

где  $n$  — число пусков двигателя за 1 цикл, а

$nZ$  — соответственно за 1 час; для подъема портовых штучных грузов  $nZ$  лежит в пределах 120—150 пусков в час.

Работа портовых грейферных кранов требует до 150—200 включений электродвигателя в 1 час, т. е.  $nZ = 150 \div 200$ .

$$x = \frac{P_{пуск}}{P_{гр}}$$

коэффициент напряженности пуска.

Для подъемных механизмов значение  $x$  обычно берется равным 2, в соответствии с чем выражение  $P_{max}$  примет более простой вид:

$$P_{max} = P_{гр} \sqrt{\frac{nZt_{пуск}}{12 \cdot \varepsilon^0_0}} + 1, \quad (10)$$

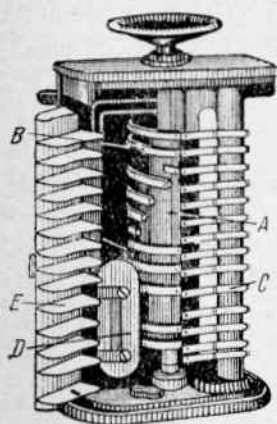
$t_{пуск}$  — среднее время разгона, которое для электродвигателей подъема обычно берется 2—3 сек.

## § 29. Основные пусковые и тормозные устройства

**А. Контроллеры.** Контроллерное управление имеет своим назначением производить все необходимые соединения и переключения в цепи главного тока за счет непосредственного вращения от руки: а) или контактных устройств, располагаемых обычно на вертикальном барабане и при вращении приходящих в соединение с неподвижно укрепленными и изолированными контактами; б) или же вала с насаженными и закрепленными на нем кулачковыми шайбами, которые при вращении управляют замыканием и размыканием укрепленных и изолированных на стойке контактов.

В соответствии с этим контроллеры бывают двух типов: а) простые или барабанные контроллеры, б) контроллеры кулачковые.

Первый тип представляет вращаемый с помощью рукоятки или штурвала барабан с укрепленными на нем так называемыми сегментными контактными пластинами из латуни. Сегментные контактные пластины изолированы от барабана, а некоторые и друг от друга, имея одинаковую или разную длину применительно к требуемым условиям переключений. Общий вид барабанного



Фиг. 121а. Барабанный контроллер.

А — вращаемый барабан, В — изолированные токоведущие сегменты, укрепленные на барабане, С — неподвижные контактные пальцы, Е — перегородки на несгораемого материала, D — искрогасительная катушка.

контроллера и деталь устройства неподвижного контактного пальца представлены на фиг. 121а и 121б.

Контроллер снабжается искрогасительной катушкой *D*, магнитное поле которой сдувает дугу, образующуюся при размыкании контактов. Контактные пальцы при закрытии кожуха контроллера разделяются огнестойкими перегородками во избежание перекрытия дугой. Для четкости установки положений контроллера под крышкой кожуха располагается храповой механизм (фиг. 122).

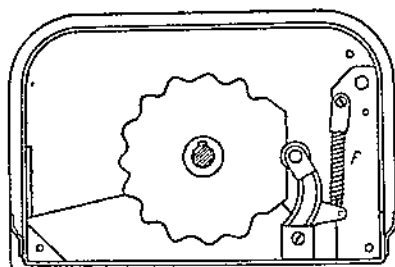
В кулачковом контроллере, в отличие от барабанного, нековедущие элементы не вращаются, а вращается вал с насаженными на нем кулачками.

Помощью последних производится замыкание или размыкание контактов, закрепленных на стойке. Устройство контактного элемента кулачкового контроллера см. на фиг. 123.

Завод «Динамо» изготавливает барабанные контроллеры для подъемных электродвигателей постоянного тока мощностью до 25 квт, напряжением 220 в.

Контроллеры, изготавливаемые заводом «Динамо» для подъемных электродвигателей постоянного тока, имеют следующие предельные характеристики:

а) Барабанный тип контроллера КПСТ имеет два барабана — главный и вспомогательный (переключающий), механически заблокированные между собой и действующие от

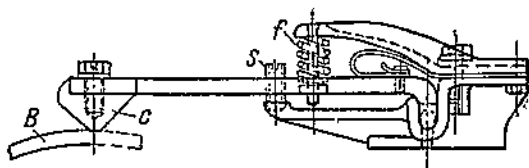


Фиг. 122. Храповой механизм контроллера.

общего привода. Этот контроллер применяется на напряжение 220 в при 120 включениях в 1 час для электродвигателей мощностью до 25 квт.

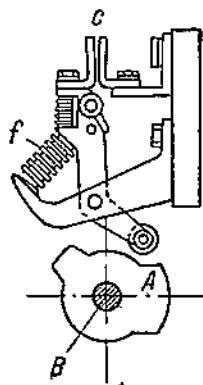
Обозначение контроллера типа КПСТ значит, что это контроллер крановый, постоянного тока, спуск с торможением.

Характеристики работы контроллера типа КПСТ приводятся на графике (фиг. 124).



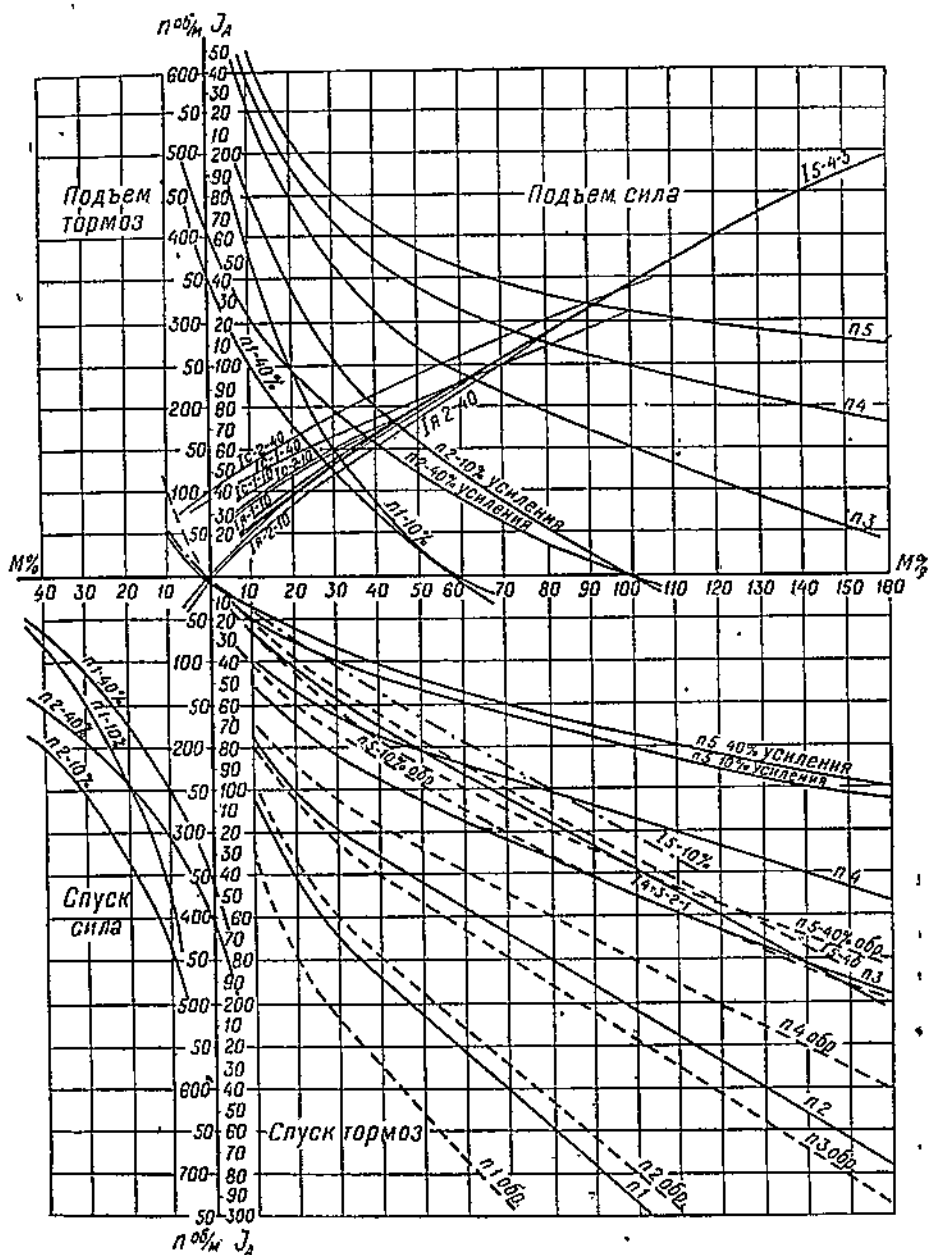
Фиг. 121б. Устройство контактного пальца барабанного контроллера.

*B* — токоведущий сегмент, *C* — сухарик (сменный контакт), *f* — пружина, *s* — винт для регулировки нажатия.



Фиг. 123.

*A* — кулачок, *B* — вал, вращающий кулачки, *C* — контакт, *f* — пружина.

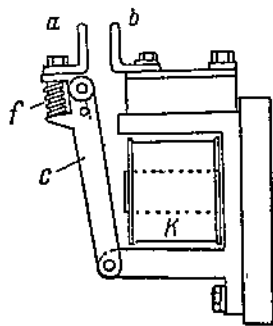


Фиг. 124. Характеристики контроллера типа ПСТ (постоянный ток, спуск с торможением) изготовления Харьковского механического завода для серийных электродвигателей подъемных лебедок.

$I$  — кривые изменения тока,  $I_A$  — в цепи якоря электродвигателя,  $I_C$  — в сети, т. е. подводимого к электродвигателю, ( $I_C > I_A$  за счет шунтирования якоря, что влечет усиление магнитного потока на 10 или 40%),  $n$  — кривые изменения числа оборотов.  
(Подробное описание построения приведенных характеристик контроллера типа ПСТ см. в журнале „Вестник электропромышленности“ № 4 за 1930 г., стр. 131—140.)

б) Кулачковый тип контроллера ПКС-26 имеет 6 положений и применяется (при условии не свыше 600 включений в час) для электродвигателей мощностью до 40 квт при 220 в и до 20 квт при 110 в.

**Б. Контакторы и автоматический пуск.** Контакторы или электромагнитные замыкатели за последнее время нашли самое широкое распространение в управлении электродвигателями брашпильных лебедок и кранов как при постоянном, так и при переменном токе. Принцип устройства контактора можно усмотреть из фиг. 125, где *a* и *b* — главные контакты, замыкаемые под действием электромагнитного притяжения катушкой *K*, якоря *C*, когда по катушке пропускается ток. При прекращении тока в катушке *K* якорек *C* под действием пружины *f* и собственного веса откидывается в исходное положение. Контакторы выполняются нормально-открытого типа, т. е. с разомкнутыми контактами *a* и *b*, при отсутствии тока в катушке *K* и нормально закрытого типа, когда под действием специальных пружин контакты замкнуты при отсутствии тока в катушке и размыкаются при оживлении катушки током. Контакторы для быстрого гашения дуги снабжаются искрогасительными катушками с помещением главных контактов в искрогасительной камере из изоляционного огнестойкого материала.



Фиг. 125.

Кроме главных контактов контакторы иногда снабжаются вспомогательными контактами или так называемыми блок-контактами, которые также бывают или нормально-открытые или нормально-закрытые.

Контакторы постоянного тока нормально исполняются однополюсные, а для переменного тока с числом полюсов от одного до пяти.

Устройство трехполюсного контактора типа КТ-32 и разрез контактных частей контактора типа КТ-4 в применении для пускателя типа ПМ-2 можно видеть на прилагаемой фиг. 126.

Контакторы постоянного тока типа КП предназначены для работы в цепях при значениях тока до 2500 а и напряжении сети до 500 в. В приложении дана табл. 7 основных данных контакторов типа КП.

На основании приложенных таблиц можно заключить, что применение контакторов для управления электродвигателями подъемных механизмов не ставит предела в отношении величины мощности устанавливаемых на судах электродвигателей, в противоположность контроллерам, которые весьма ограничивают возможную мощность управляемых ими электродвигателей.

Помимо отмеченного, следует указать на следующие преимущества контакторного управления по сравнению с контроллерным управлением:

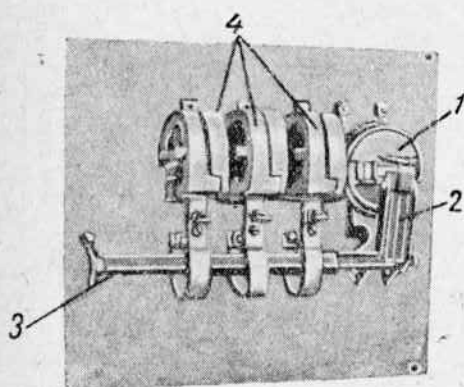
1. При контакторном управлении необходимо производить переключение токов, питающих катушки контакторов, которые ничтожны по сравнению с токами главных линий; благодаря этому быстрота и точность управления возрастает, что вызывает увеличение производительности подъемных механизмов.

При ручном управлении питанием катушек контакторов применяют контроллеры легкого типа, так называемые коммандо-контроллеры, а при автоматическом управлении контакторами применяются реле различных систем.

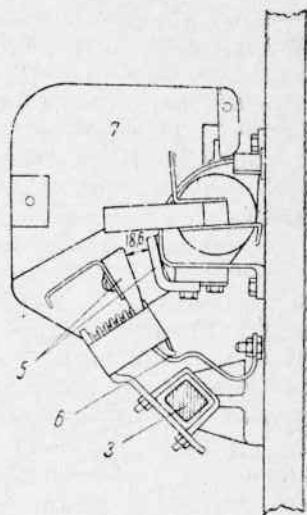
2. Контактры позволяют осуществлять самое широкое их использование при автоматическом пуске и регулировании скоростей подъемных механизмов, что дает возможность еще больше интенсифицировать работу и увеличить производительность подъемных механизмов.

3. Осмотр, ремонт и смена частей в контакторной системе управления более легки и быстры по сравнению с контроллерами, что также

1 — включающая катушка, 2 — якорь включающей катушки, 3 — изолированный вал квадратного сечения, 4 — контакты, заключенные в искрогасительные камеры, 5 — контактные сухарики, 6 — гибкие тоководущие соединения цепи главного тока, 7 — искрогасительная камера.



а)



б)

Фиг. 126. а) Внешний вид трехполюсного контактора переменного тока второй величины (КТ-32). б) Устройство контактных частей усовершенствованной конструкции контактора четвертой величины (КТ-4).

положительно влияет на производительность обслуживаемых механизмов.

Автоматичность пуска подъемных механизмов при контакторной системе управления дает возможность пусковое приспособление (коммандо-контроллер) сразу ставить в крайнее положение, отвечающее наибольшей скорости, не вызывая при этом никаких нарушений нормальности пуска.

Требуемое замыкание контактов для вывода секций пусковых сопротивлений и регулировка скорости электродвигателя в зависимости от его нагрузки автоматически обеспечиваются применением последовательно блокирующихся реле, имеющих или выдержку времени или вступающих в действие в зависимости от скорости, набранной электродвигателем. В последнем случае обычно используется нарастание противоэлектродвижущей силы якоря электродвигателя.

Как автоматичность пуска, так и нормальная, незавышенная мощность электродвигателя способствуют быстрому его разгону и торможению, чем сокращается время пуска и остановки. Это обеспечивает наибольшую интенсивность работы подъемного механизма, требующего частых пусков.

Наиболее убедительным подтверждением изложенных преимуществ использования контакторного пуска для автоматического управления подъемными механизмами является то обстоятельство, что за последнее время начали широко внедрять в судах лебедки с автоматизированным процессом контакторного управления.

Разбор работы лебедок с применением автоматизированного процесса пуска произведен ниже.

**В. Тормозные устройства.** При работе подъемных приспособлений, как видели выше, требуются многократные пуски и остановки электродвигателей, причем торможение электродвигателя должно давать наименьший выбег максимального груза при спуске его с полной скоростью (нормальный выбег груза лежит в пределах 0,2—0,6 м) и обеспечивать удержание груза на любой высоте.

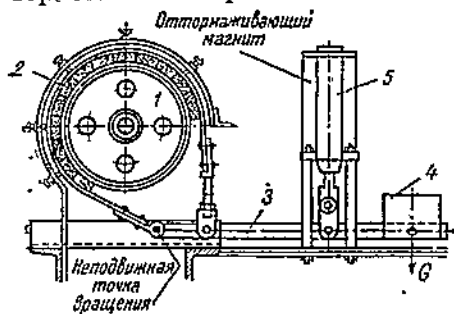
При снижении напряжения в судовой сети до 50% поднятый груз не должен стравливаться, и в то же время требуется иметь приспособления, позволяющие в этом случае производить опускание груза.

Интенсивность работы грузовых устройств требует и напряженной работы тормозных приспособлений. В грузовых лебедках постоянного тока легко использовать самый электродвигатель в качестве тормозного приспособления, замедляющего скорость движения перед остановкой. Использование электродвигателя для производства так называемого электрического торможения позволяет облегчить работу собственно тормозных устройств, уменьшая их габариты и стоимость. Наиболее распространенным видом специального тормозного приспособления в подъемных механизмах является электромагнитный тормоз, а за последнее время стал находить широкое применение и дисковый тормоз. Эти тормоза обычно вступают в действие, когда электродвигатель или переводится на положение выключения, или имеет место прекращение или снижение до недопустимых пределов напряжения, подводимого к электродвигателю. Катушки электромагнитных тормозов бывают шунтовые, серийные и компаундные. Наличие тормозов с серийными обмотками также предохраняет от возможности падения груза вследствие случайных разрывов в цепи главного тока электродвигателя при невыключенном контроллере.

Принцип действия электромагнитного тормоза представлен на фиг. 127 и сводится к следующему. Тормозная шайба 1, насаженная неподвижно на вал электродвигателя, обхватывается стальной лентой 2, снабженной тормозной облицовкой из специальных материалов. Тормозная лента прикреплена к рычагу 3, на конце которого висит груз 4. С этим рычагом соединен якорь-сердечник 5 электромагнитного тормоза, который при питании катушки током поднимает рычаг 3, благодаря чему лента 2 ослабляется и шайба 1 может свободно вращаться. При прекращении питания током катушки сердечника 5

рычаг под действием груза 3 натягивает ленту 2, которая и за-  
тормаживает шайбу 1.

Завод «Динамо» для подъемных приспособлений изготавливает  
тормозные электромагниты постоянного тока типа КМП. Внутрен-



Фиг. 127. Устройство ленточного электромагнитного тормоза.

якоря к полюсу крышки между ними применяются латунные  
прокладки.

Для определения втягивающего усилия электромагнита на осно-  
вании опытных данных можно пользоваться следующей американской  
формулой:

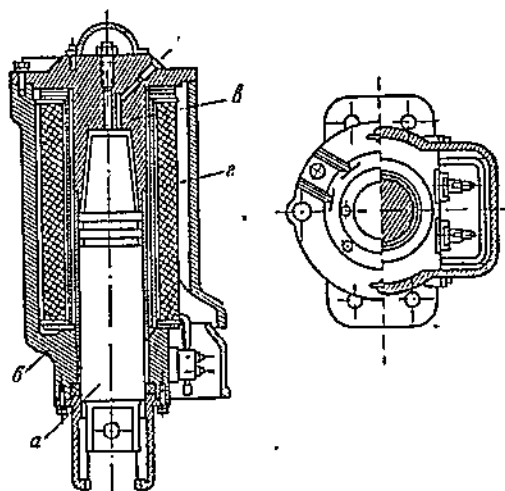
$$F = \frac{5NI}{6,35} \left[ \frac{NI}{l_a C^2} + \frac{K}{l} \right] \text{ кг.} \quad (11)$$

В формуле принято:

$S$  — площадь сечения сердеч-  
ника в кв. см,  
 $N$  — число витков катушки,  
 $I$  — сила тока в амперах,  
 $l_a$  — длина воздушного зазора  
между полюсом крышки  
и сердечником в см,  
 $l$  — высота катушки в см,  
 $C = 2600$  и  $K = 0,0096$  — по-  
стоянные.

Каталожные данные элект-  
ромагнитов типа КМП при-  
ведены в приложении, табл. 9.

Для крановых установок  
трехфазного тока применя-  
ются тормозные электромаг-  
ниты типа КМТ. Вид этого  
электромагнита представлен  
на фиг. 129. Трехфазный электромагнит состоит из трех катушек и  
тройного подвижного сердечника, соединенного тягой с рычагом тор-  
моза. Обмотки катушек электромагнита соединяются звездой или  
треугольником.



Фиг. 128. Разрез электромагнита типа КМП.

Тяговое усилие, развиваемое трехфазными тормозными электромагнитами, согласно исследованиям Ясса, можно определить по формуле:

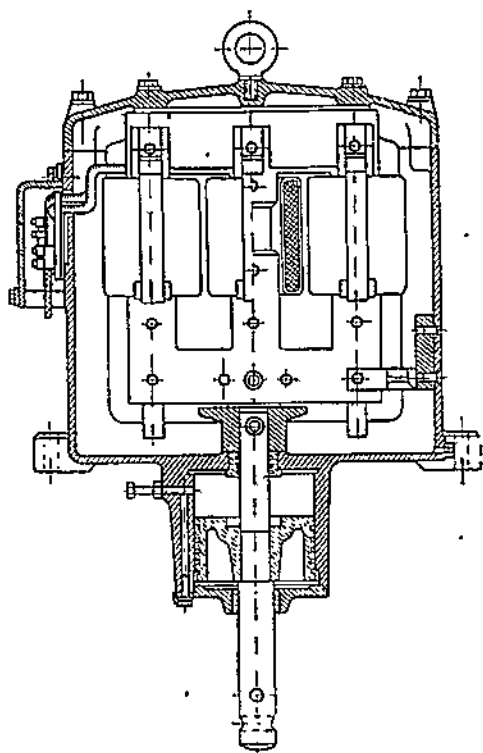
$$F_m = \frac{3 V^2 \cdot 10^{11}}{710 N^2 \omega^2 q} \text{ кг,} \quad (12)$$

где  $V$  — линейное напряжение в вольтах,  
 $N$  — число витков одной катушки,  
 $\omega = 2\pi f$  — угловая частота переменного тока,  
 $q$  — сечение сердечника в см<sup>2</sup>.

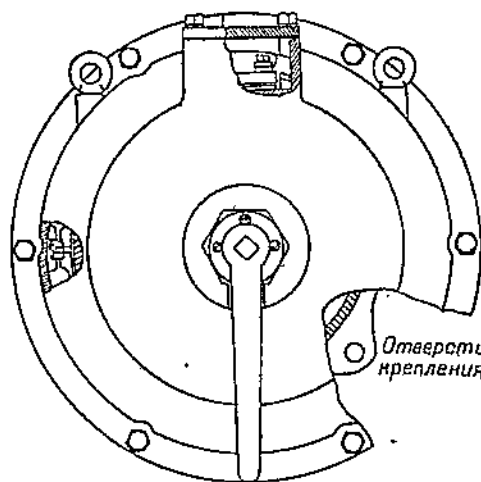
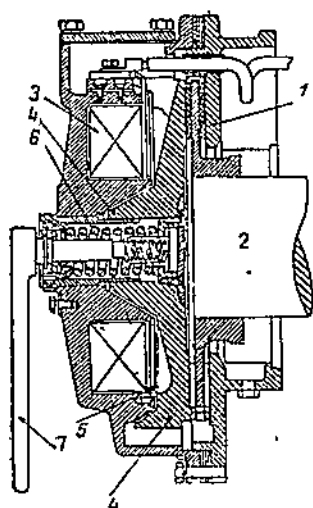
Каталожные данные тормозных электромагнитов типа КМТ приведены в приложении, табл. 10.

Дисковый электромагнитный тормоз, выполненный заводом «Динамо» (фиг. 130), крепится непосредственно к подшипниковому щиту электродвигателя, обычно со стороны коллектора.

Тормозный диск 1 с прикрепленными к нему с обеих сторон тормозными прокладками насаживается на конец вала 2 электродвигателя. При обесточенной катушке 3 якорь 4



Фиг. 129. Разрез электромагнита типа КМТ.



Отверстие для крепления тормоза

Фиг. 130. Разрез дискового электромагнитного тормоза завода «Динамо».

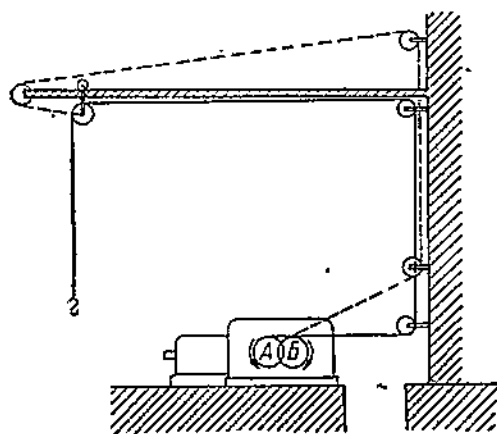
электромагнита 5 под действием пружины 6 давит на диск 7, чем и создается торможение электродвигателя. При прохождении тока по катушке 3 электромагнита 5 последний притягивает якорь 4, преодолевая давление пружины 6, и растормаживает электродвигатель. На случай необходимости срабатывания груза вручную предусматривается рукоятка 7, поворотом которой якорь 4 отжимается от тормозного диска 7.

Подобными тормозами, имеющими серийную обмотку, снабжаются лебедки завода «Динамо». Лебедки, изготовляемые на Балтийском заводе, снабжаются дисковыми тормозами с компаундной обмоткой.

### § 30. Рассмотрение выполненных схем электрических лебедок и крана

Ввиду большого разнообразия схем, применяемых для управления лебедками, рассмотрению подлежат наиболее интересные и характерные системы управления.

На постоянном токе будут разобраны:



Фиг. 131.

А — барабан для подъема и опускания груза, Б — барабан для перемещения тележки при одновременном противоположном вращении барабана А.

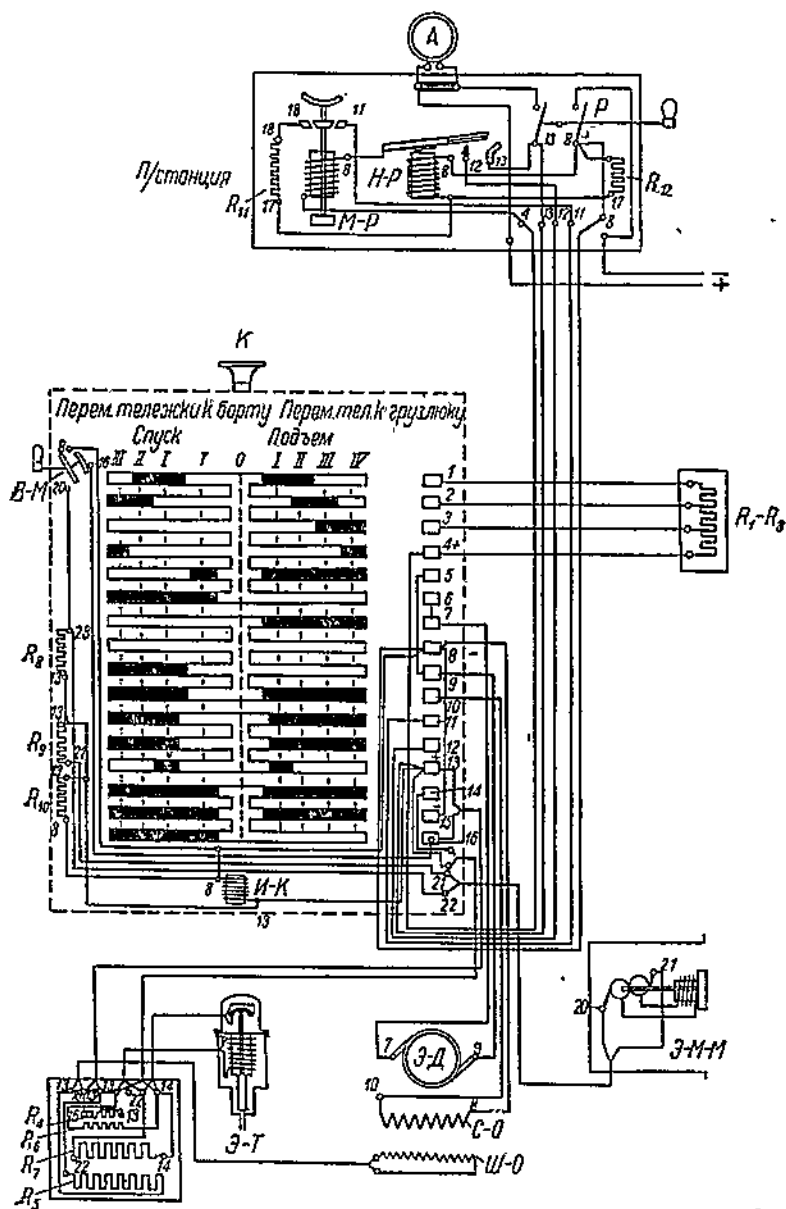
а) судовая лебедка с контроллерным управлением, в которой от одного электродвигателя можно производить подъем груза и перемещение грузовой катушки тележки,

б) лебедка с контакторным управлением, имеющая автоматическую блокировку при пуске, с автоматическим переключением на повышенную скорость при половинной нагрузке, а также автоматическую блокировку при спуске и торможении.

На переменном токе будет разобрана схема берегового портального крана, оборудованного электродвигателями трехфазного тока.

а) Лебедка с контроллерным управлением. Примером судовых лебедок с контроллерным управлением являются лебедки теплоходов Крымско-Кавказской линии, установленные по 4 шт. на судно. Эти лебедки двухбарабанные, из них один барабан служит для подъема груза, другой — для передвижения тележки. Грузоподъемность лебедки 0,5 т. Скорость подъема с грузом 30,5 м/мин., без груза — 60 м/мин. Подъем груза и передвижение тележки производятся от одного электродвигателя мощностью 6,5 л. с. при 900 об/мин. Электродвигатель серийный; с легкой шунтовой обмоткой. Включение барабана для передвижения тележки осуществляется с помощью электромагнитной муфты.

Лебедки со стрелами расположены в лазбортных выгородках. Эскиз общего вида этого грузоподъемного устройства см. на фиг. 131.



Фиг. 132.

Р — двухполюсный рубильник,  
 К — контроллер,  
 В-М — выключатель электромагнитной муфты,  
 М-П — максимальное реле,  
 Н-П — нулевое реле,  
 И-К — пскрогасительная катушка,

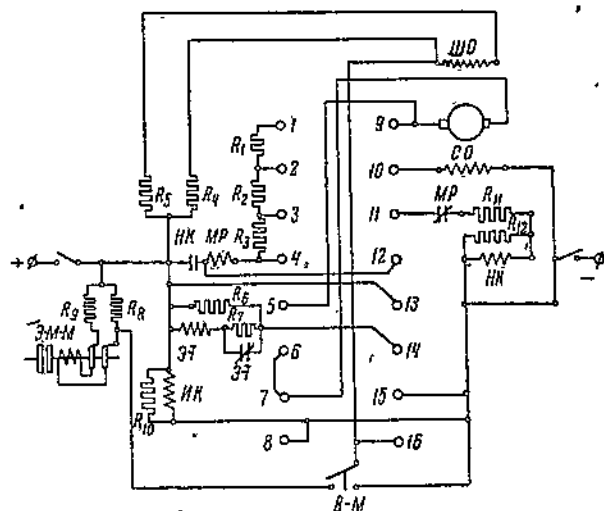
Э-Т — электромагнитный тормоз,  
 Э-М-М — электромагнитная муфта,  
 Э-Д — якорь электродвигателя,  
 С-О — серияная обмотка,  
 Ш-О — шунтовая обмотка,  
 R — сопротивления.

Схема электрических соединений лебедки представлена на фиг. 132. Для упрощения понимания схемы дана ее развертка, представленная на фиг. 133 (обозначения и нумерация на схемах приняты одни и те же).

По включении рубильника, при нулевом положении контроллера под током только *И-К*.

**Подъём. 1 положение.** Замыкание контактов, согласно приложенной таблице, создает следующий путь тока:

а) Вспомогательная цепь: положительный клемм, контакты 13 и 11, нормально-закрытый блок-контакт максимального реле (*МР*), *R<sub>11</sub>*, катушка напряжения *НК* и отрицательный клемм. Катушка *НК* включает контактор *НК* в цепи главного тока и блокирует дальнейшее свое питание через контакты 12 и 11 помимо контакта 13. Замыкание контактов 14 и 15 дает ток в катушку *Э-Т* и тормоз освобождает электродвигатель.



| Перемещатели к борту | Спуск |   |   |   | Подъем |   |   |   |
|----------------------|-------|---|---|---|--------|---|---|---|
|                      | Ш     | П | Т | О | П      | Ш | П |   |
| 1                    | ×     | × |   |   | ×      | × |   |   |
| 2                    | ×     | × |   |   |        | × | × |   |
| 3                    |       |   |   |   |        |   | × | × |
| 4                    | ×     |   |   |   |        |   |   | × |
| 5                    |       |   | × |   | ×      | × | × | × |
| 6                    | ×     | × | × | × |        |   |   |   |
| 7                    |       |   |   |   |        | × | × | × |
| 8                    |       |   |   |   |        |   |   |   |
| 9                    | ×     | × | × |   |        |   |   |   |
| 10                   | ×     | × | × |   |        | × | × | × |
| 11                   | ×     | × | × |   |        | × | × | × |
| 12                   | ×     | × | × |   |        | × | × | × |
| 13                   |       |   | × |   |        | × |   |   |
| 14                   | ×     | × | × | × |        | × | × | × |
| 15                   | ×     | × | × | × |        | × | × | × |
| 16                   | ×     | × | × | × |        | × | × | × |
|                      | Ш     | П | Т | О | П      | Ш | П |   |

Фиг. 133.

При подъеме сердечника тормоза размыкается нормально-закрытый блок-контакт *Э-Т*, включая последовательно сопротивление *R<sub>7</sub>*, ограничивающее нагрев катушки.

б) Путь главного тока: положительный клемм, замкнутый контактор *НК*, катушка максимального реле *МР*, пусковые сопротивления *R<sub>1</sub> — R<sub>3</sub>*, контакты 1 и 5, якорь *Э-Д*, контакты 7 и 10, серийная обмотка и отрицательный полюс.

Действие схемы при всех остальных положениях контроллера легко проследить по развертке, пользуясь таблицей замыкания контактов.

б) С контакторным управлением. Примером контакторной системы управления, использующей возможность автоматического переключения электродвигателя для ускорения при пуске, а также и автома-

тического переключения электродвигателя с помощью дискриминатора на повышенную скорость при половинной и меньших нагрузках, могут служить трехтонные лебедки, применительно к системе Laurence Scott.

Лебедки этой системы установлены на многих судах торгового флота (у нас, например, на балтийских рефрижераторных теплоходах) и при эксплуатации работают вполне удовлетворительно и бесперебойно.

Завод «Динамо» по заказу Наркомморфлота разработал и провел в 1939 г. удовлетворительные испытания электрооборудования новой трехтонной лебедки, предназначенной к установке на судах Наркомморфлота.

Лебедка имеет контакторную систему управления с использованием, как и у лебедок Балтийского завода им. С. Орджоникидзе, возможности автоматического разгона и автоматического переключения на повышенную скорость при нагрузке в  $1\frac{1}{2}$  т и меньше.

Для ознакомления с контакторной системой управления новой 3— $1\frac{1}{2}$ -тонной судовой лебедки «Динамо» на фиг. 134 приводится развертка принципиальной электрической схемы.

Приведенная на схеме таблица положений и замыканий контактов командо-контроллера и указанные обозначения оборудования позволяют легко проследить работу электродвигателя.

Замыкание контактов командо-контроллера при различных его положениях обозначено в таблице крестом X.

Нулевое положение командо-контроллера. По включении рубильника Р под током находится только катушка РН, которая и замыкает свои контакты РН. Благодаря этому обеспечивается дальнейшее питание цепи управления, помимо К1, через замкнутые контакты РН. Катушка РН может замкнуть свои контакты РН при напряжении сети не менее 85% от нормального напряжения и размыкает контакты РН, когда напряжение сети исчезает или упадет до 60%.

Контакты К7, К8, К9 хотя замкнуты, но они получают питание через контакт К10, который разомкнут. Цепь якоря электродвигателя замкнута на сопротивление  $R_3$ .

Подъем. I положение командо-контроллера производит следующие замыкания:

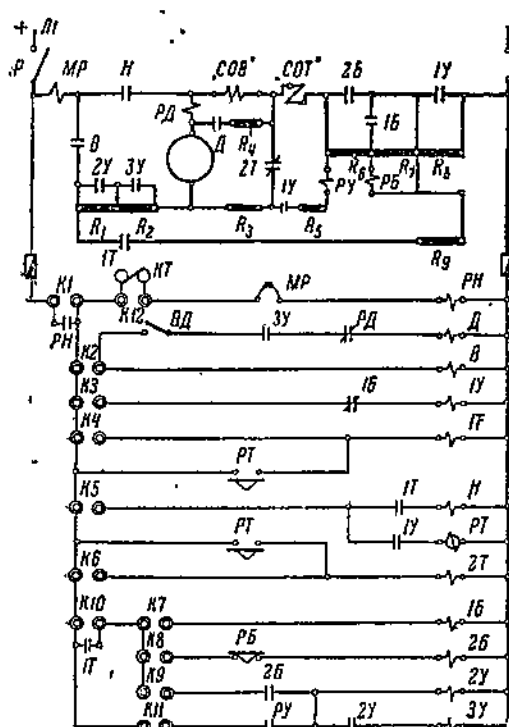
Контакт — К2 дает ток в катушку контактора В и последний включается.

Контакты К10 и К8 пропускают ток в катушку контактора 2В, замыкая его. Электродвигатель приключен на работу. Путь тока цепи якоря: положительный полюс, нож рубильника, катушка МР, контактор В, сопротивления  $R_1$  и  $R_2$ , обмотки: якоря электродвигателя РД, СОВ, СOT, сопротивление  $R_8$ , нож рубильника и отрицательный полюс. Сопротивление  $R_3$  шунтирует обмотку якоря электродвигателя и СОВ (серийную обмотку возбуждения). Обмотка тормозного магнита СOT получает суммарный ток якоря и шунтирующего его  $R_3$ . Тормоз освобождает вал якоря, и электродвигатель начинает работать.

Контакт К12 шунтирует выключатель КТ, связанный с ножным тормозом, и поэтому только при положениях командо-контрол-

лера I как подъема, так и спуска ножной тормоз не вызовет остановки электродвигателя при нажатии педали. При всех других положениях командо-контроллера нажатие педали ножного тормоза разомкнет питание катушки *РН*, а следовательно, и цепи управления, что повлечет остановку электродвигателя.

II положение. Кроме контактов  $K2$ ,  $K10$  и  $K8$  замыкается контакт  $K3$ , через который подается ток в катушку  $1Y$ , которая замыкает



Примечание Контейнеры В-17 и 19-16  
полностью механически заблокированы

| Контроллер (тип, марка) | Контакты                  |   |   |   |   | Спуски |   |   |   |   | Нобблен |   |   |   |   |
|-------------------------|---------------------------|---|---|---|---|--------|---|---|---|---|---------|---|---|---|---|
|                         | 1                         | 2 | 3 | 4 | 5 | 1      | 2 | 3 | 4 | 5 | 1       | 2 | 3 | 4 | 5 |
| К1 00                   |                           |   |   |   |   |        |   |   |   |   | X       |   |   |   |   |
| 00K2 В                  |                           |   |   |   |   |        |   |   |   |   |         | X | X | X | X |
| К3 00                   | 1У                        | X |   |   |   |        |   |   |   |   |         |   | X | X | X |
| 00K4 1Т                 |                           | X | X | X | X |        |   |   |   |   |         |   |   |   |   |
| К5 00                   | Н                         | X | X | X | X |        |   |   |   |   |         |   |   |   |   |
| 00K6                    |                           |   | X | X | X |        |   |   |   |   |         |   |   | X | X |
| К7 00                   | 16                        |   | X | X | X |        |   |   |   |   |         |   |   |   |   |
| 00K8 2Б                 |                           |   | X | X | X | X      | X | X | X | X | X       | X | X | X |   |
| К9 00                   | 2У-3У                     |   |   |   |   | X      | X |   |   |   |         |   |   |   |   |
| 00K10                   |                           | X | X | X | X |        |   |   |   |   | X       | X | X | X |   |
| К11 00                  | 2У-3У                     | X |   |   |   |        |   |   |   |   |         |   |   |   |   |
| 00K12                   |                           |   |   |   |   | X      | X | X | X |   |         |   |   |   |   |
| X                       | Контакты замкнутой        |   |   |   |   |        |   |   |   |   |         |   |   |   |   |
| X                       | Перекрыывающиеся контакты |   |   |   |   |        |   |   |   |   |         |   |   |   |   |

| Обозначения аппаратов |                          |
|-----------------------|--------------------------|
| В                     | Контактор подъема        |
| Н                     | — — — — — спуска         |
| 1Т-2Т                 | Тормозные контакторы     |
| 1У, 2У, 3У            | Контакторы ускорения     |
| 1Б, 2Б                | — — — — — возбужден      |
| Д                     | Контактор шунтир. поля   |
| МР                    | Максимальное реле        |
| РН                    | Реле напряжения          |
| РУ                    | — — — — — ускорения      |
| РТ                    | — — — — — торможения     |
| РБ                    | — — — — — замедления     |
| РД                    | — — — — — дискриминатор  |
| КТ                    | Выключатель педали       |
| ВД                    | — — — — — дискриминатора |

тродвигателя достаточно возрастет, то реле  $PY$ , приключенное теперь на разность потенциалов, почти равную противозлектродвижущей силе якоря, сработает и замкнет свой контакт  $PY$  в цепи  $K11$ .

**Положение IV.** Дополнительно замыкается контакт  $K11$ . Замыкание контакта  $K11$  даст питание катушке контактора  $2Y$  и замкнет его главный контакт и блок-контакт. Замыкание последнего обеспечит питание катушки контактора  $3Y$  и вызовет замыкание его главного контакта и блок-контакта в цепи  $K2$ . Включение контакторов  $2Y$  и  $3Y$  шунтирует сопротивления  $R_1$  и  $R_2$ , что обусловит нормальный режим электродвигателя, т. е. без дополнительных сопротивлений.

В случае малой нагрузки (не свыше  $1\frac{1}{2}$  т груза) электродвигатель повысит число оборотов, а это, в силу мягкой характеристики серийного электродвигателя повлечет снижение тока в цепи якоря, а следовательно, и в катушке реле дискриминатора  $PD$ . Последний замкнет свои контакты  $PD$  в цепи  $K2$ .<sup>1</sup> Это замыкание при включенном  $ВД$  создает питание катушки контактора  $D$  и замыкание его главного контакта  $D$ , благодаря чему происходит шунтирование  $СОВ$  сопротивлением  $R_4$  и электродвигатель, за счет ослабления магнитного потока, дополнительно увеличивает скорость.<sup>2</sup>

При быстром переводе рукоятки командо-контроллера из положения 0 до положения IV пуск электродвигателя протекает автоматически, с последовательным переходом через все разобранные стадии.

Разобрав подробно подъем, при работе на спуск остановимся только на наиболее характерных моментах.

Прежде всего нужно отметить, что при спуске электродвигатель переводится на шунтовой режим, т. е. его обмотка возбуждения  $СОВ$  и обмотка якоря, через соответствующие сопротивления, приключаются на параллельную работу.

Реверс электродвигателя осуществляется за счет изменения направления тока в якоре.

**С п у с к — I положение.** Путь тока.

а) в системе возбуждения: нож рубильника положительного полюса, катушка  $MP$ , замкнутый контакт контактора  $H$ , обмотка возбуждения  $СОВ$ , обмотка дискового тормоза  $СOT$ , замкнутый контакт контактора  $2B$ , сопротивление  $R_8$  — отрицательный полюс;

б) в цепи якоря: нож рубильника, катушка  $MP$ , контакт  $H$ , катушка  $PD$ , обмотка якоря электродвигателя, замкнутые контакты контакторов  $3Y$ ,  $2Y$  и  $1T$ , сопротивления  $R_9$  и  $R_8$  — отрицательный полюс. Включение контактов контакторов протекает в следующем порядке: одновременно включаются контакты  $1T$ ,  $1B$ ,  $2B$  и выключается контакт  $2T$ .

Через промежуток времени, равный длительности включения соответствующих контакторов, включаются контакты  $H$  и  $2Y$  и спустя еще такой же промежуток времени включается контакт  $3Y$ .

<sup>1</sup> Контакты  $PD$  нормально замкнуты, но во время пуска двигателя, под действием больших пусковых токов, они размыкаются.

<sup>2</sup> Выключатель  $ВД$  позволяет не вводить в работу дискриминатор, если при малых нагрузках не желают работать на повышенных скоростях.

*II положение* — размыкание контакта  $K9$  вызывает дополнительно последовательное включение в цепь якоря двух сопротивлений  $R_1 + R_2$ . Электродвигатель снижает скорость.

*III положение* — размыкание контакта  $K8$ , влечет размыкание контактора  $2Б$  и введение в цепь возбуждения сопротивления  $R_6$ . Электродвигатель увеличивает обороты.

*IV положение* — размыкание контакта  $K7$  влечет выключение контактора  $1Б$  с последующим замыканием его блок-контакта в цепи  $K3$ . Включение  $K3$  вызывает замыкание контактора  $1У$ . Обмотка возбуждения  $СОВ$  после этого получает питание через  $R_6 + R_7$ . Падение напряжения в  $R_7$  создает разность потенциалов на концах обмотки  $РБ$ , благодаря чему оно сработает и разомкнет свои нормально-замкнутые контакты  $РБ$  в цепи  $K8$ . Включение контактора  $1У$  замыкает его блок-контакты в цепи  $K5$ , благодаря чему вступает в работу реле времени (реле торможения)  $РТ$ , замыкая свои контакты  $РТ$  в цепях  $K4$  и  $K6$  через 0,85 сек., шунтируя  $K4$  и  $K6$ . Катушка реле  $РУ$  также получает питание, достаточность которого, как видели выше, зависит от скорости электродвигателя. Когда скорость электродвигателя будет достаточна, реле  $РУ$  сработает и замкнет свои контакты в цепи  $K11$ , вследствие чего сработают контакторы  $2У$  и  $3У$ . После этого электродвигатель будет работать с сопротивлением в цепи якоря  $R_9$ , а в цепи возбуждения с обмоткой тормоза  $СОТ$  и сопротивлениями  $R_6 + R_7$ .

Цепи якоря и возбуждения — независимы.

**Т о р м о ж е н и е** как при подъеме, так и при спуске достигается путем перевода рукоятки командо-контроллера в положение 0.

Торможение происходит как электрическое, т. е. приключением якоря электродвигателя на сопротивление, так и электромеханическое, за счет дискового тормоза. Кроме того, механическое торможение можно производить при любом положении командо-контроллера, за исключением положения I, путем воздействия на выключатель  $КТ$  при нажатии ножного тормоза.

Плавное электрическое торможение в случае быстрого перевода рукоятки командо-контроллера из положения IV в положение 0 при спуске происходит автоматически. В этом случае имеем одновременное размыкание контакторов  $Н$ ,  $1У$ ,  $2У$ ,  $3У$ .

Прекращается подача тока в катушки реле  $РУ$  и  $РТ$ , их контакты размыкаются, причем размыкание контактов реле  $РТ$  с выдержкой времени замедляет отключение  $1Т$  и включение  $2Т$  на 0,85 сек. Благодаря замедлению отключения контактора  $1Т$  и его блок-контактов в цепи  $K10$ , в пределах выдержки времени (0,85 сек.), электродвигатель работает, как генератор с самовозбуждением, сначала на контуре: якорь электродвигателя,  $СОВ$ ,  $СОТ$ ,  $R_6$ ,  $R_7$ ,  $R_9$ ,  $1Т$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  — якорь электродвигателя, а затем, по включении контактора  $1Б$ ,  $R_7$ , шунтируется; реле  $РБ$  через 0,35 сек. замыкает свои контакты в цепи  $K8$  и включает контактор  $2Б$ , что шунтирует сопротивление  $R_6$ . Включение  $2Б$  в цепи  $K9$  влечет замыкание  $2У$  и  $3У$ , которые шунтируют  $R_1$  и  $R_2$ .

После отключения  $1Т$  и замыкания  $2Т$  электродвигатель работает на контур — якорь,  $СОВ$ ,  $R_3$  — якорь и одновременно с этим электродвигатель затормаживается дисковым тормозом.

в) Портальный кран трехфазного тока. Переменный ток для грузовых лебедок на судах, как отмечалось выше, до настоящего времени почти не находит применения. Поэтому ограничимся рассмотрением береговой крановой установки трехфазного тока, представленной на схеме фиг. 135.

На приводимой схеме дано электрооборудование портального крана грузоподъемностью 10 т.

Электрооборудование крана выбрано в соответствии с продукцией завода «Динамо», изготавливаемой для подъемно-транспортных механизмов трехфазного тока напряжением 380 в.

Кран имеет 3 электродвигателя, каждый из которых снабжен электромагнитным тормозом и самостоятельным контроллерным управлением, с набором пусковых сопротивлений.

Реверсирование электродвигателей портала и тележки осуществляется верхней частью контроллеров (верхние 6 контактов) путем переключения двух фаз обмоток статора электродвигателя, что легко проследить по схеме.

Нижние 6 контактов контроллера этих электродвигателей служат для вывода пусковых сопротивлений  $P-C$  из обмотки ротора при разгоне электродвигателя, причем для уменьшения габаритов контроллера вывод сопротивлений производится по очереди, по одной ступени в каждой фазе, путем замыкания контроллерными пластинами контактов сопротивлений, соединенных соответственно нумерации с неподвижными контактами контроллера (соединения между контактами контроллера и клеммами сопротивлений на схеме опущены).

Торможение электродвигателей портала и тележки происходит по их выключению, т. е. при нулевом положении контроллера.

Электродвигатель для подъема запускается помощью главного барабана контроллера  $\Gamma-B$ , неподвижные контакты которого соответственно нумерации соединены с клеммами пускового сопротивления  $P-C$ . Для реверса электродвигателя установлен вспомогательный барабан контроллера  $B-B$  (переключающий барабан), после включения которого только и можно производить пуск электродвигателя. Верхние три контакта у  $B-B$  обслуживают питание катушки нормально-открытого линейного контактора  $L-K$  после того, как последний замкнет свои блок-контакты  $K-G_0$ . Включение линейного контактора происходит при включенном  $B-B$  и после перевода  $\Gamma-B$  из положения 0 в положение 1.

Линейный контактор играет роль нулевого реле, т. е. при исчезновении напряжения в сети отключает электродвигатель. Кроме линейного контактора установка для подъема снабжена контактором для замедления  $K-Z$ , управляемым ножной кнопкой. Контактор замедления (противотока) используется для точной остановки груза, что требует пониженной скорости подъема или спуска груза. Так, например, при подъеме  $\Gamma-B$  ставят на положение 1 и с помощью кратких нажатий ножной кнопки включают и выключают электродвигатель, подтягивая груз до требуемого положения. Для замедленного спуска гака или легких грузов, которые не могут сами стравливаться, устанавливают  $\Gamma-B$  на положение 1 спуска и кратковременными прерывистыми нажатиями ножной кнопки производят спуск точно до

требуемого места. Для замедления спуска самостравливающих грузов Г-Б ставят на положение 1 или 2 подъема и спуск производят при нажатой ножной кнопке; опускание кнопки производит замедление спуска груза включением электродвигателя на противоток. При нажатиях ножной кнопки тормозной электромагнит все время остается под током, чем избегаются резкие удары в лебедке, особенно на быстром ходу.

Защита электрооборудования крана осуществляется плавкими предохранителями, установленными на распределительном щитке, находящемся в кабине крановщика. Питание щитка производится от троллейных проводов, расположенных вдоль путей крана.

## Глава X

### ЭЛЕКТРОНАСОСЫ И ПРОЧИЕ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫЕ МЕХАНИЗМЫ

#### § 31. Типы и классификация электронасосов, применяемых на судах

Насосы являются одним из распространенных видов механического оборудования на судах всех типов. На паровых судах для привода насосов в большинстве случаев используется пар, хотя нередко на современных паровых судах для насосов так же применяют и электропривод. Что касается теплоходов, то всевозможные насосы этих судов имеют электрический привод точно так же, как и палубные механизмы этих судов. Область применения насосов довольно широка и разнообразна. В этом отношении судовые насосы можно подразделить на а) насосы специального назначения и б) насосы вспомогательного и общего обслуживания.

К насосам специального назначения в первую очередь относятся перекачивающие и зачистные насосы нефтеналивного флота, предназначенные для работы со всевозможными видами жидкого горючего и смазочных масел; затем водоотливные насосы спасательных судов и доков; насосы для обслуживания рулевых устройств и насосы для питания котлов, особенно имеющих дело с горячей питательной водой, а также насосы рефрижераторных установок.

К насосам вспомогательного назначения принадлежат все насосы, обеспечивающие работу главных двигателей и силовых вспомогательных агрегатов; к этой категории относятся, например, охлаждающие насосы дизелей, конденсационные или циркуляционные насосы турбинных установок, топливные и масляные насосы.

К насосам общего обслуживания можно отнести пожарные, трюмно-балластные, санитарные, пресной воды и т. п. насосы. Наиболее распространенными насосами на судах являются водяные насосы (для работы с чистой и грязной, холодной и горячей, соленой и пресной водой) и насосы для жидкого горючего и масел.

Из огромного разнообразия конструктивного выполнения насосов на судах распространены два основных типа — насосы поршневые и центробежные. Поршневые насосы обладают самовсасываемостью,

а центробежные насосы при нахождении их выше уровня забираемой жидкости требуют заливки всасывающего трубопровода.

Центробежные насосы за последнее время начинают находить все более широкое применение благодаря удобству их непосредственного соединения с приводными электродвигателями и специфике судовых условий, часто не требующих самовсасывания насосов, при соответствующем их размещении.

Возможность использования насосов с электрическим приводом помимо в большинстве случаев экономических преимуществ позволяет устанавливать эти насосы и в наиболее удобных местах, не снижая при этом надежности их работы и быстроты ввода в действие из-за подвода к ним энергии на большом расстоянии, чего трудно достигнуть в паровых насосных установках.

Поршневые насосы, требующие возвратно-поступательного движения, нуждаются в специальных приспособлениях для привода их электродвигателями. Хотя эти насосы и менее эффективно используют преимущества электропривода по сравнению с центробежными насосами, но все же и для этих насосов нередко употребляется электродвигатель.

Из менее распространенных типов насосов, встречающихся на судах, можно указать на зубчатые и ротативно-поршневые, главным образом, масляные насосы, небольшой сравнительно производительности, и на специальные насосы большой производительности пропеллерного типа, применяемые в качестве водоотливных. Последние два типа насосов, требующие вращательного движения, могут непосредственно приводиться и экономично работать при соединении их с электродвигателями.

На основании изложенного, наиболее распространенные насосы, применяемые на судах, можно классифицировать следующим образом:

1) по роду перекачиваемой жидкости:

а) водяные,

б) нефтяные (жидкого горючего) и масляные,

2) по конструктивному выполнению,

а) поршневые,

б) центробежные.

Дальнейший разбор и рассмотрение электропривода насосов ограничим применительно к указанной классификации.

## § 32. Принцип действия, производительность и напор насосов

Насосы имеют своим назначением перемещение жидкости, связанное большею частью и с ее подъемом. Работа насоса заключается в создании в нем разрежения и давления, под действием чего происходит перемещение и подъем жидкости. Количество жидкости, подаваемой насосом в единицу времени, называется его производительностью.

Разрежение в поршневых насосах создается в результате увеличивающегося объема цилиндра, а давление вследствие уменьшения объема цилиндра при движениях поршня.

Поршневые насосы разделяются на насосы простого действия и на насосы двойного действия.

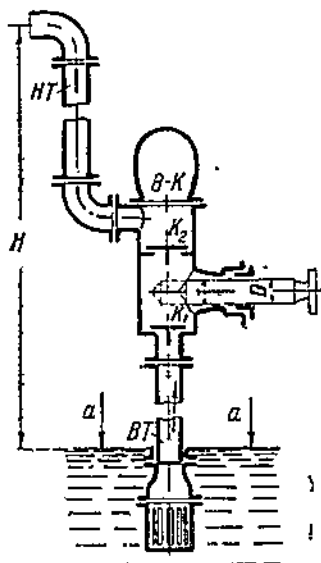
В насосах простого действия одна сторона поршня участвует в работе, т. е. в изменении объема цилиндра. Эскиз насоса простого действия см. на фиг. 136.

В насосах двойного действия обе стороны поршня используются для работы насоса. Эскиз насоса двойного действия см. на фиг. 137.

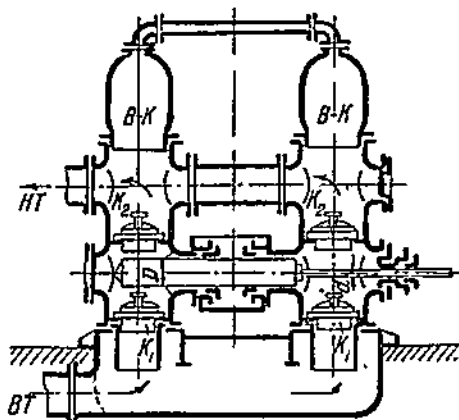
В центробежных насосах разрежение и напор создаются путем использования центробежной силы, сообщаемой жидкости при вращении рабочего колеса.

Центробежные насосы разделяются на простые, одноколесные насосы и на многоколесные насосы, обычно турбинного типа, т. е. с направляющим аппаратом.

Для напоров до 25—30 м и небольших сравнительно производительностей (порядка до 0,5 м<sup>3</sup>/сек.) применяют большую часть простые центробежные насосы, т. е.



Фиг. 136.



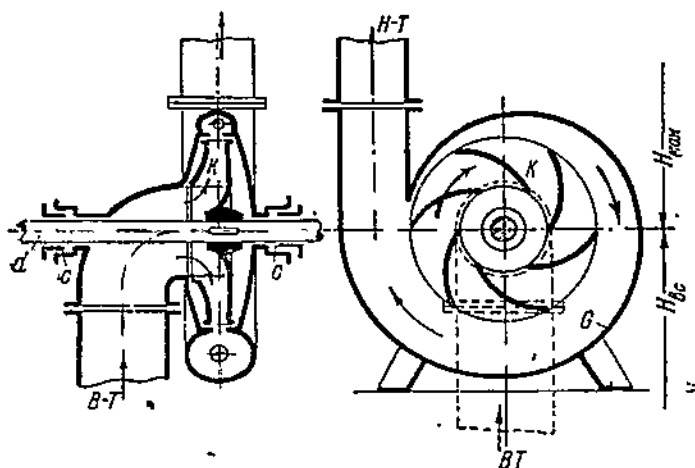
Фиг. 137.

$a$  — давление атмосферы, В-Т — всасывающий трубопровод, Н-Т — нагнетательный трубопровод, В-К — воздушный колок,  $K_1$  — клапан всасывания,  $K_2$  — клапан нагнетания, D — поршень, H — высота подъема (геометрический напор), d — приводной шток.

без направляющего аппарата, с одним рабочим колесом. Эскиз простого центробежного насоса см. на фиг. 138.

Для больших производительностей или же для больших напоров прибегают к многоколесным центробежным насосам, причем для увеличения производительности заставляют колеса работать параллельно, а для увеличения напора — последовательно, т. е. жидкость постепенно проходит через все рабочие колеса (отчего последние насосы и называются многоступенчатыми). Производительность современных центробежных насосов достигает огромных значений. Так, например, заводом Hilpert'a построен для доков центробежный насос производительностью 180 м<sup>3</sup>/мин. Напор многоступенчатых центробежных насосов турбинного типа (т. е. насосов, снабженных направляющим

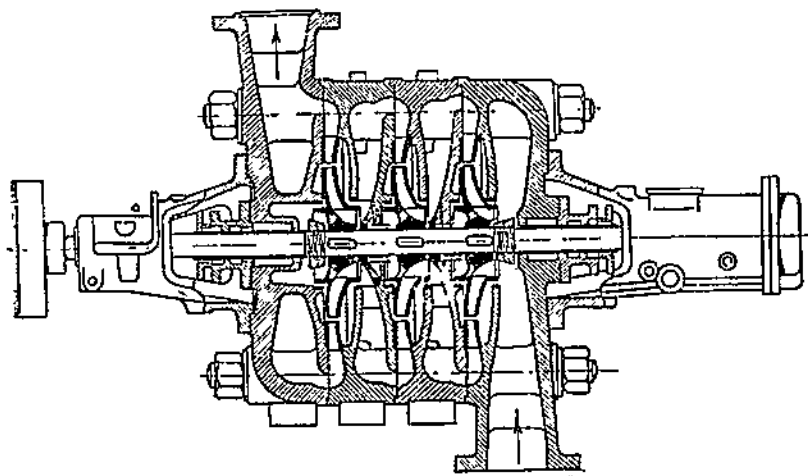
аппаратом по выходе воды из колеса) доведен заводом фирмы Египри 20 ступенях до 200 атм., т. е. 2000 м водяного столба. Эскиз много ступенчатого (трехступенчатого) центробежного насоса приведен на фиг. 139.



Фиг. 138.

$G$  — кожух (корпус) насоса,  $K$  — рабочее колесо насоса,  $d$  — вал рабочего колеса,  $C$  — сальники,  $B-T$  — всасывающий трубопровод,  $H-T$  — нагнетательный трубопровод,  $H_{вс}$  — высота (напор) всасывания,  $H_{ман}$  — напор нагнетания или манометрический напор.

В результате разрежения, образующегося в насосах, жидкость, обычно под действием атмосферного давления, поступает в насос или всасывается им по приемной, так называемой всасывающей,



Фиг. 139.

части трубопровода. Под действием давления, развиваемого насосом, жидкость подается в нагнетательную часть трубопровода, по которому и подводится к месту назначения.

При движении жидкости по трубопроводу насос должен преодолеть геометрическую высоту подъема, т. е. расстояние по вертикали от уровня жидкости в приемном резервуаре до уровня жидкости в напорном резервуаре, куда она подается. Кроме того, насос также должен преодолеть и те сопротивления, которые встречает жидкость при своем движении в трубопроводах, в приемных решетках и клапанах, в закруглениях, при особенно резких изменениях сечения трубопровода, а также при входе и выходе.

Потери от движения жидкости в трубопроводе называются потерями трения жидкости —  $h_{тр}$ , а все остальные потери называются местными потерями —  $h_{мест.}$

Как потери от трения жидкости, так и местные потери зависят от квадрата скорости течения жидкости и выражаются обычно давлением, измеряемым высотой столба жидкости.

Таким образом полная высота или полный напор, преодолеваемый насосом при подаче жидкости, должен складываться из геометрической высоты или высоты подъема жидкости плюс высота, учитывающая все потери при движении жидкости в трубопроводе и его арматуре. Следовательно:

$$H_n = H_{geom} + H_{потерь} \quad (1)$$

$H_n$  — полный напор, развиваемый насосом.

$$H_{потерь} = h_{тр} + \sum h_{мест.}$$

$$h_{тр} = \lambda \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \text{ м} \quad (2)$$

$$h_{мест.} = K \frac{v^2}{2g} \text{ м} \quad (3)$$

В приведенных формулах:

$v$  — скорость движения жидкости по трубопроводу в м/сек.; обычно скорость движения жидкости принимают для всасывающей части —  $v$  от 1 до 2 м/сек., для нагнетательной — части  $v$  от 2 до 3 м/сек.,

$g$  — ускорение силы тяжести = 9,81 м./сек.<sup>2</sup>,

$L$  — длина трубопровода в м,

$D$  — диаметр трубопровода в м,

$\lambda$  и  $K$  — коэффициенты, значения которых берутся по справочникам.

Полный напор насосной установки необходимо разбить на две части: 1) напор или высоту всасывания —  $H_{вс}$  и 2) напор нагнетания или манометрический напор —  $H_{ман.}$

Высота всасывания, создаваемая атмосферным давлением, при заборе жидкости из открытых резервуаров строго ограничена как связанная с величиной атмосферного давления (нормальное значение атмосферного давления  $H_{ат}$ , как известно, соответствует 10,3 м водяного столба).

Величина  $H_{вс}$  зависит:

а) от величины атмосферного давления  $H_{ат}$ ,

б) от удельного веса жидкости  $\gamma$ ,

в) от температуры жидкости, или, вернее, от упругости ее паров  $h'$ , при данной температуре.

Если  $H_{ат}$  и  $h'$  выражены в метрах водяного столба, то высоту всасывания можно определить из следующего уравнения:

$$\frac{H_{ат}}{\gamma} = H_{вс} + \frac{h'}{\gamma},$$

откуда

$$H_{вс} = \frac{H_{ат} - h'}{\gamma}. \quad (4)$$

Средние значения  $\gamma$  жидкого топлива при  $15^{\circ}\text{C}$  можно принимать:

|                                |                                                   |
|--------------------------------|---------------------------------------------------|
| а) Бензин . . . . .            | $\gamma_{ср} = 0,73$ при $t = 15^{\circ}\text{C}$ |
| б) Керосин . . . . .           | $\gamma_{ср} = 0,83$ " $t = 15^{\circ}\text{C}$   |
| в) Нефть легкая . . . . .      | $\gamma_{ср} = 0,80$ " $t = 15^{\circ}\text{C}$   |
| "    тяжелая . . . . .         | $\gamma_{ср} = 0,95$ " $t = 15^{\circ}\text{C}$   |
| г) Минеральные масла . . . . . | $\gamma_{ср} = 0,92$ " $t = 20^{\circ}\text{C}$   |

Высота всасывания расходуется: 1) на преодоление геометрической высоты,  $H_{геом. вс}$ , т. е. расстояние от поверхности жидкости до центра оси поршня или рабочего колеса (у горизонтальных насосов), а у вертикальных насосов до высшего положения поршня, и 2) на преодоление потерь во всасывающей части трубопровода,  $H_{потерь вс}$ , т. е.

$$H_{вс} = H_{геом. вс} + H_{потерь вс}$$

или

$$H_{вс} = H_{геом. вс} + h_{тр. вс} + \sum h_{мест. вс}. \quad (5)$$

Практически наибольшая допустимая высота всасывания водяных насосов на судах, в зависимости от температуры, не должна превосходить значений, определяемых на основании прилагаемых кривых, приведенных на фиг. 140.

Что касается манометрического напора, то современные насосы могут удовлетворять всем напорам, которые требуются на судах.

Высота нагнетания выражается в метрах и определяется по уравнению:

$$H_{ман} = H_{геом. нагн.} + H_{потерь нагн.}$$

или

$$H_{ман} = H_{геом. нагн.} + h_{тр. нагн.} + \sum h_{местн. нагн.} \quad (6)$$

Полный напор, развиваемый насосом, будет

$$H_{п} = H_{вс} + H_{ман} \dots, \text{ м.} \quad (7)$$

### § 33. Рабочие диаграммы насосов и выбор электродвигателя

Чтобы удовлетворить требованиям, которым должны отвечать приводные электродвигатели насосов, обратимся к характеристикам работы насосов.

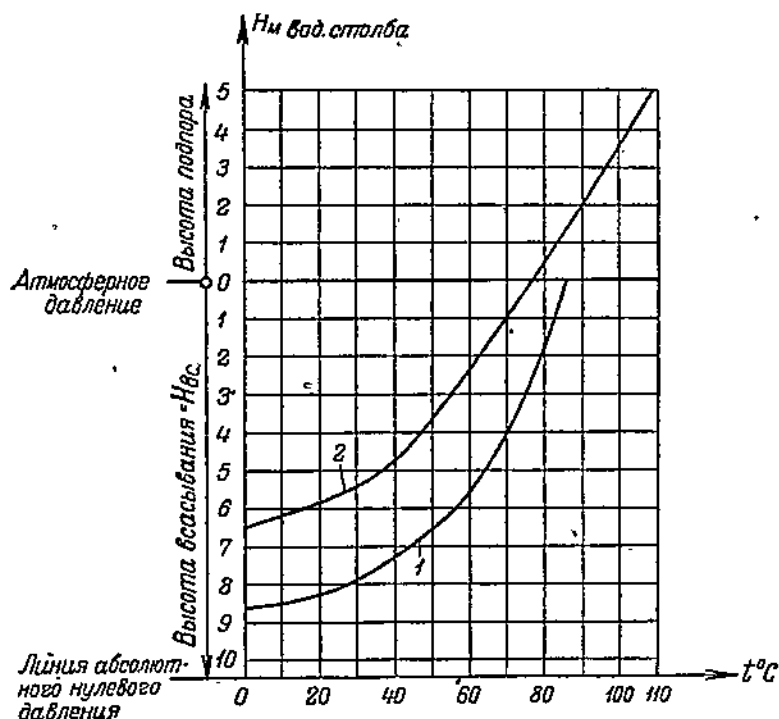
**А. Поршневые насосы.** Индикаторная диаграмма работы поршневого насоса за время одного оборота кривошипа представлена на фиг. 141. Обозначая диаметр поршня насоса —  $D$  м, длину хода поршня насоса —  $l$  м, число оборотов кривошипа в минуту  $n$  об/мин.,<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Значение  $n$ : от 40 до 150 об/мин. для насосов нормальной быстротходности и от 150 до 250 об/мин. у быстротходных насосов.

теоретическая производительность одноцилиндрового поршневого насоса простого действия выразится:

$$Q'_T = \frac{\pi D^2 l n}{4 \cdot 60} \text{ м}^3/\text{сек.}$$

Фактическая подача насоса будет несколько меньше, за счет так называемого коэффициента подачи  $\eta_c$ , учитывающего утечку от неплотностей в сальниках, клапанах и трубопроводах.



Фиг. 140. Кривые наибольшей, практически допустимой, высоты всасывания —  $H_{вс}$  в зависимости от температуры воды  $t^\circ \text{C}$ .

1 — для поршневых насосов, 2 — для центробежных насосов.

Значение  $\eta_c$  для судовых насосов можно принимать: для воды от 0,8 до 0,9, для масел от 0,75 до 0,85.

Следовательно, производительность поршневых насосов будет:

а) простого действия

$$Q_1 = S Q'_T \eta_c = S \frac{\pi D^2 l n}{4 \cdot 60} \eta_c \text{ м}^3/\text{сек.} \quad (8)$$

б) двойного действия (применительно к фиг. 137, где  $d$  — диаметр приводного штока в м)

$$Q_2 = S Q''_T \eta_c = S \frac{\pi (2D^2 - d^2) l n}{4 \cdot 60} \eta_c \text{ м}^3/\text{сек.} \quad (9)$$

$S$  — число цилиндров в насосе.

Мощность приводных электродвигателей поршневых насосов определяется:

а) для насосов простого действия:

$$P_1 = \frac{Q_1 H_{\text{п}} \gamma \cdot 1000}{102 \cdot \eta_c \eta_{\text{мех}}} \text{ кВт}, \quad (10)$$

б) для насосов двойного действия,

$$P_2 = \frac{Q_2 H_{\text{п}} \gamma \cdot 1000}{102 \cdot \eta_c \eta_{\text{мех}}} \text{ кВт}, \quad (11)$$

где  $P$  — мощность электродвигателя в кВт,

$Q$  — производительность насоса в м<sup>3</sup>/сек.,

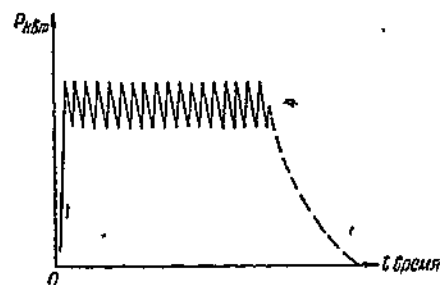
$H_{\text{п}}$  — полный напор, развиваемый насосом, в м,

$\gamma$  — удельный вес перекачиваемой жидкости,

$\eta_c$  — коэффициент подачи, значение которого указано выше,

$\eta_{\text{мех}}$  — к. п. д., учитывающий потери трения насоса, кривошипно-шатунной и зубчатой передач.

Для насосов с зубчатой передачей среднее значение  $\eta_{\text{мех}}$  можно считать  $\eta_{1 \text{ мех}} = 0,90$  для одинарной зубчатой передачи,  $\eta_{2 \text{ мех}} = 0,80$  для двойной зубчатой передачи.



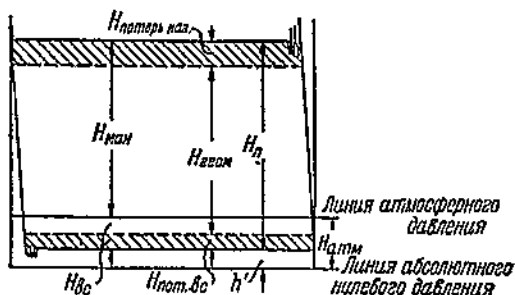
Фиг. 142.

нагрузки. Поэтому электродвигатель поршневых насосов предпочтительнее иметь со значительным маховым моментом ротора, чтобы обеспечить работу насоса с коэффициентом неравномерности не выше  $1/80 \div 1/100$ .

Нормальное число оборотов электродвигателей выбирается в соответствии с числом оборотов насосов и коэффициентом передачи.

Пределы нормального числа оборотов поршневых насосов были указаны выше. Электродвигатели предпочтительнее иметь менее быстроходные.

<sup>1</sup> Для уменьшения пусковых токов, что особенно важно для электроприводов переменного тока, поршневые насосы применяются с перепускными клапанами, понижающими напор при пуске; после доведения насоса до нормальной скорости перепускной клапан закрывают.

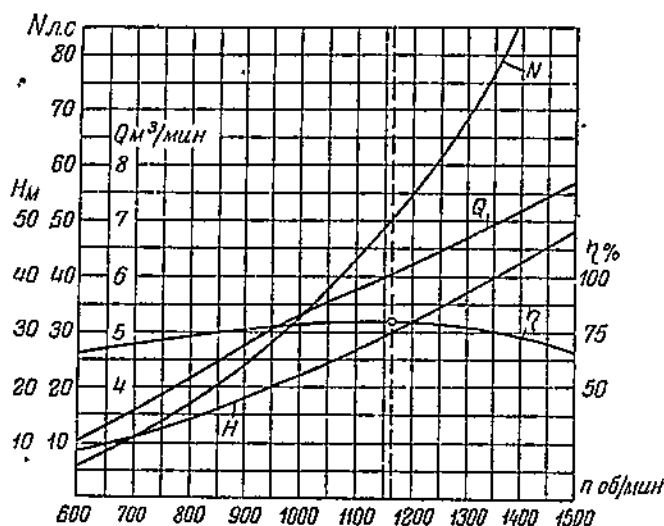


Фиг. 141.

Обращаясь к индикаторной диаграмме поршневых насосов, видно, что пуск этих насосов в рабочем состоянии, при нормальном напоре, должен протекать с учетом полной их нагрузки.<sup>1</sup>

Нагрузочная диаграмма поршневого насоса, представленная на фиг. 142, и по своему виду относится к диаграммам пульсирующей

**Б. Центробежные насосы.** Центробежные насосы для своей работы требуют вращательного движения их рабочего колеса. Нормальное число оборотов центробежных насосов обычно лежит в пределах от 500 об/мин. (низконапорные насосы большой производительности) до 3000 об/мин. (многоступенчатые насосы высокого давления). Число оборотов наиболее распространенных центробежных насосов небольшой и средней производительности ( $Q$  от 5 до 500 л/сек.) обычно лежит в пределах 1500—500 об/мин., т. е. как раз в пределах нормального числа оборотов электродвигателей, выпускаемых заводами. Благодаря этому центробежные насосы и выгодно соединять непосредственно с приводными электродвигателями.



Фиг. 143. Кривые зависимости  $H$ ,  $Q$ ,  $N$  и  $\eta$  центробежного насоса при изменении  $n$ .

По законам гидравлики напор, создаваемый движущейся жидкостью, находится в квадратной зависимости от скорости течения жидкости:

$$H = Kv^2, \quad (12)$$

т. е. напор пропорционален квадрату скорости течения жидкости. В центробежных насосах скорость, сообщаемая жидкости, зависит от скорости рабочего колеса. Поэтому скорость жидкости будет прямо пропорциональна скорости или числу оборотов рабочего колеса, т. е.

$$v = K_1 n.$$

Следовательно, напор, развиваемый центробежным насосом, при различных числах его оборотов будет выражаться следующей зависимостью:

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{Kv_1^2}{Kv_2^2} = \frac{Cn_1^2}{Cn_2^2}$$

или

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{n_1^2}{n_2^2}. \quad (13)$$

Таким образом напор, создаваемый центробежным насосом, находится в квадратной зависимости от числа его оборотов.

Производительность центробежного насоса будет зависеть от скорости выхода жидкости из рабочего колеса насоса.

Скорость выхода жидкости зависит от окружной скорости рабочего колеса или от его оборотов.

Таким образом изменение производительности центробежного насоса при изменении числа его оборотов можно выразить следующим уравнением:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{K_2 v_1}{K_2 v_2} = \frac{C_1 n_1}{C_1 n_2}$$

или

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2}. \quad (14)$$

В приведенных выражениях  $K$ ,  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $C$  и  $C_1$  — значения постоянных коэффициентов пропорциональности.

Мощность, потребляемая насосом, будет зависеть от его производительности  $Q$ , развиваемого им напора  $H$  и к. п. д.  $\eta$ :

$$P = K_3 \frac{QH}{\eta}.$$

Принимая неизменность к. п. д.  $\eta$  насоса, можем теоретически определить изменение потребляемой насосом мощности при изменении его оборотов:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{Q_1 H_1}{Q_2 H_2} = \frac{n_1^3}{n_2^3}, \quad (15)$$

т. е. мощность, потребляемая центробежным насосом, пропорциональна кубу его оборотов.

В подтверждение приведенных теоретических выкладок работы центробежного насоса при различных его оборотах приводится на фиг. 143 график, снятый при испытании центробежных насосов с направляющим аппаратом (турбинного типа) завода Amag Hilpert.

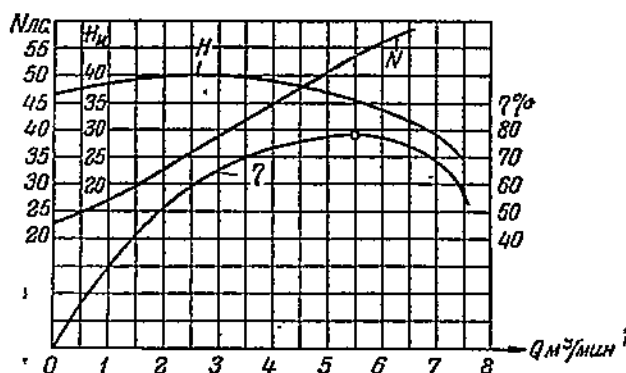
Из приведенного графика заключаем, что в случае пуска насоса с открытым шибером (запорной задвижкой на напорном трубопроводе), что может иметь место в автоматических насосных установках, пусковой реостат электродвигателя насоса необходимо выбирать для условий так называемой пропеллерной нагрузки.

Для условий работы центробежных насосов с переменной производительностью выбор регулировки числа оборотов приводных электродвигателей (без учета изменения к. п. д. насоса) можно производить, руководствуясь приведенным уравнением (14), учитывая при этом и соответствующее изменение напора насоса, а следовательно, и вращающего момента насоса, пропорционального его напору.

Нормально работа центробежных насосов обычно протекает при постоянном числе оборотов, а регулировка производительности

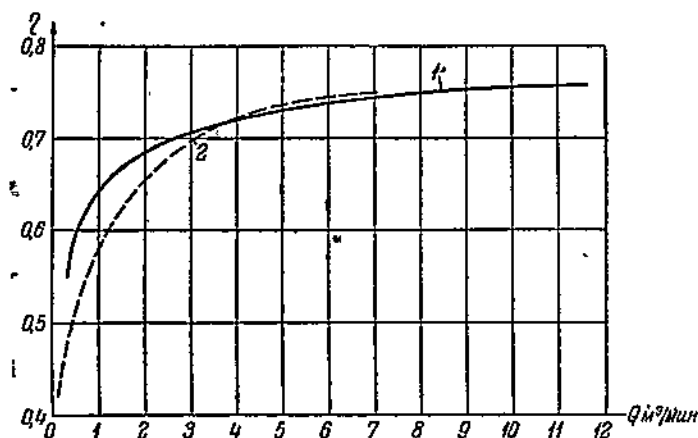
насосов производится шибером. Рабочая характеристика подобных условий работы центробежного насоса приведена на фиг. 144.

Из приведенной характеристики видно, что напор насоса в пределах нормальной его производительности почти постоянен, и изме-



Фиг. 144. Рабочая характеристика одноколесного, центробежного насоса турбинного типа, дающая изменение  $H$ ,  $N$  и  $\eta$  в зависимости от  $Q$ .

нение потребной мощности находится приблизительно в линейной зависимости от его производительности.



Фиг. 145.

Пуск центробежных насосов нормально производится при закрытом шибере и в этих условиях пусковой реостат электродвигателя можно брать на половинную пусковую мощность.

Мощность электродвигателей для привода центробежных насосов можно определять по выражению

$$P = \frac{QH_n \gamma \cdot 1000}{102\eta} \text{ кВт}, \quad (16)$$

где  $Q$  — производительность насоса в  $\text{м}^3/\text{сек.}$ ,

$H_n$  — полный напор, развиваемый насосом, в м,

( $H_n$  подсчитывается по вышеприведенным формулам (5), (6) и (7), причем значение  $H_{\text{вс}}$  не должно превышать значений, приведенных на кривых фиг. 140).

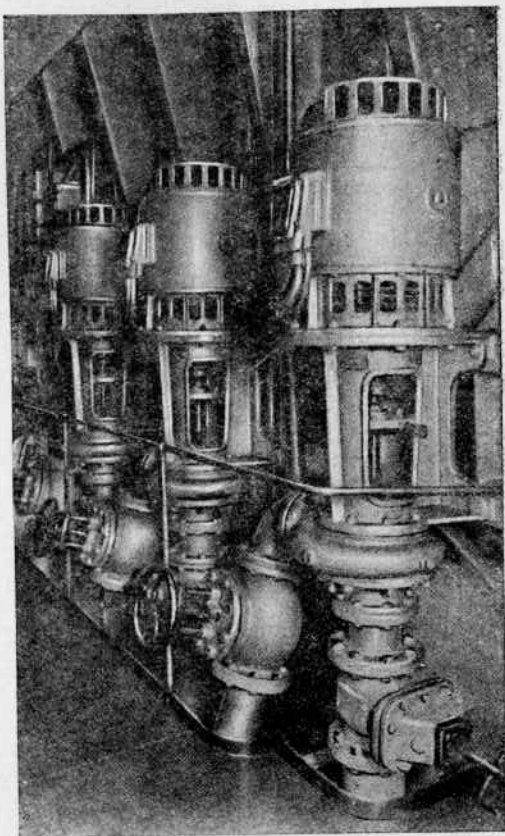
Приближенное значение к. п. д. для центробежных водяных насосов обычно лежит в пределах от 0,4 до 0,75.

Для ориентировочного выбора к. п. д. новых водяных, турбинного типа, центробежных насосов, с рабочими колесами из бронзы, в зависимости от средней производительности насосов можно руководствоваться приводимыми на фиг. 145 кривыми: кривая 1 — для одноколесных насосов при  $H_{\text{ном}}$  до 25 м, кривая 2 — для многоступенчатых, от 2 до 10 ступеней, насосов с напором от 25 до 450 м.

Что касается других насосов, с вращающейся рабочей частью (ротативных и зубчатых), то приближенное значение к. п. д. их можно считать от 0,6 до 0,8. Подсчет потребной мощности электродвигателя для этих насосов можно производить по формуле (16).

В отношении конструктивного выполнения электродвигателей, применяемых для привода насосов, нужно заметить, что нижняя часть их должна снабжаться водонепроницаемыми кожухами для защиты электродвигателя от непосредственного попадания влаги, что может иметь место при всплесках трюмной воды. Электродвигатели, расположенные на уровне пола трюмных помещений, должны иметь и верхнюю часть закрытой.

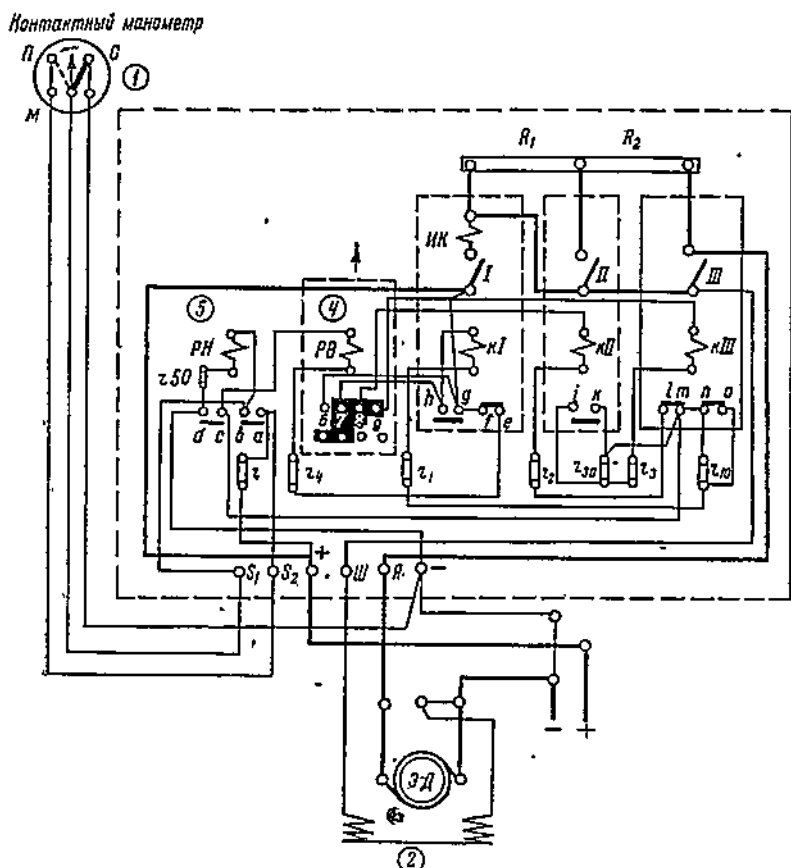
Для привода судовых насосов применяются как электродвигатели постоянного тока, так и электродвигатели переменного тока. На фиг. 146 представлена судовая электронасосная установка, оборудованная электродвигателями трехфазного тока.]



Фиг. 146. Три вертикальных центробежных водяных насоса, приводимые синхронными электродвигателями, установленные на дизель-электроходе „Wuppertal“.

### § 34. Разбор схемы автоматического управления электронасосной установкой

Использование изменения гидравлического напора в насосных установках сравнительно легко позволяет осуществить автоматическое управление приводного электродвигателя насоса. Надежность автоматического управления электронасосной установкой является дополнительным положительным фактором в пользу применения электродвигателей для насосов. При автоматическом управлении насосных



Фиг. 147.

установок отсутствует прямая необходимость в обслуживающем персонале при работе их, особенно там, где установки снабжены аварийными сигналами.

Примером автоматического управления электронасосных установок на судах нашего флота могут служить помпы санитарной и пресной воды теплохода «Крым». С установкой санитарного электронасоса этого теплохода ознакомимся более подробно.

На фиг. 147 дана схема автоматического управления контакторной системы электронасосной санитарной установки.

Основные элементы установки:

- 1) контактный манометр  $M$ , управляющий пуском и остановкой электродвигателя,
- 2) шунтовой электродвигатель Э-Д мощностью 3,7 квт,
- 3) контакторы цепи главного тока  $KI$ ,  $KII$ ,  $KIII$ , обеспечивающие включение электродвигателя и шунтирование его пусковых сопротивлений; эти контакторы снабжены блок-контактами, а контактор  $KI$ , кроме того, имеет и искрогасительную катушку  $ИК$ ,
- 4) реле с механическим приспособлением для выдержки времени, управляющее последовательностью включения контакторов,
- 5) реле напряжения, управляющее питанием цепи вспомогательного тока,
- 6) две ступени пускового сопротивления:  $R_1$  и  $R_2$ ,
- 7) набор ограничивающих сопротивлений:  $r_1, r_2, r_3, r_4, r_{10}, r_{30}$  и  $r_{50}$ .

Действие установки сводится к следующему. Изменение давления воды в напорном баке вызывает соответственно и перемещение стрелки манометра  $M$ . При опорожненном баке стрелка замыкает контакт  $\Pi$  манометра, что влечет пуск насоса, а при наполненном баке стрелка манометра замыкает контакт  $C$ , благодаря чему шунтируется катушка реле напряжения  $РН$  и электронасос останавливается.

Реле времени  $РВ$  состоит из барабана, с контактной поверхностью, и четырех неподвижных контактов 6—9. В момент оживления током катушки  $РВ$  под ее действием барабан поворачивается до положения, когда два неподвижных контакта 6 и 7 замыкаются нижней частью контактной поверхности барабана. За счет этого поворота барабана происходит натяжение пружины, под действием которой, при обесточенной катушке  $РВ$ , барабан возвращается в исходное положение, указанное на схеме.

Замыкание стрелкой манометра его контакта  $\Pi$  вызывает следующее движение тока: положительный полюс, сопротивление  $r$ , контакт  $\Pi$ , стрелка манометра, катушка  $РН$ , сопротивление  $r_{50}$ , отрицательный полюс. Питание током  $РН$  вызывает замыкание его нормально-открытых контактов, благодаря чему обеспечивается через контакты  $a—b$  питание катушки  $РН$  помимо контакта манометра, а через контакты  $c—d$  питание остальной цепи вспомогательного тока.

По включении  $РН$  катушка  $РВ$  получает питание от положительного полюса, через клемм  $g$ , нормально закрытый блок-контакт  $f—e$ , сопротивление  $r_4$  и замкнутые контакты  $c—d$ . Катушка  $РВ$  благодаря втягиванию сердечника вызовет поворот барабана и замкнет контакты 6—7. Замыкание этих контактов дает питание катушке  $KI$  по следующему направлению: положительный полюс, клемм  $g$ , контакты 6—7, клемм  $h$ , катушка  $KI$ , сопротивление  $r_1$ , нормально-закрытый блок-контакт  $o—n$ , перемычка  $n—m$ , контакты  $c—d$  и отрицательный полюс.

Главный контакт  $I$  контактора  $KI$  замыкается, что вызывает питание током якоря электродвигателя через  $R_1$  и  $R_2$  с одновременным питанием шунтовой обмотки электродвигателя, благодаря чему последний начинает работать. Включение главного контакта  $I$  размыкает блок-контакт  $f—e$  и замыкает блок-контакт  $g—h$ . Размыкание первых блок-контактов прекращает питание током катушки  $РВ$  и

барабан возвращается, с требуемой выдержкой времени, в исходное положение. Замыкание блок-контакта  $g-h$  обеспечивает дальнейшее питание катушки  $KI$  помимо контактов  $b-7$ , которые вследствие обратного вращения барабана размыкаются.

Вращающийся барабан сначала замыкает контакты  $7-8$ . Замкнутый блок-контакт  $g-h$  и замкнутые контакты  $7-8$  дадут питание катушке  $KII$  через сопротивление  $r_2$ , замкнутые блок-контакты  $l-m$  и  $c-d$ . Контакт  $KII$  включит главный контакт  $II$ , что зашунтирует  $R_1$ , и замкнет блок-контакт  $i-k$ .

Дальнейший поворот барабана  $PB$  замкнет контакты  $7-8-9$ ; благодаря этому оживится током катушка контактора  $KIII$ , замкнется его главный контакт  $III$  и разомкнутся, нормально закрытые, блок-контакты  $l-m$  и  $n-o$ . Замыкание контакта  $III$  приключает электродвигатель на нормальную работу, а размыкание  $l-m$  выключает  $KII$ , а следовательно, и блок-контакты  $i-k$ . Катушка  $KIII$  получает питание через два последовательно-включенных ограничивающих сопротивления  $r_3 + r_{30}$ . Размыкание блок-контактов  $n-o$  ослабляет ток в катушке контактора  $KI$ , которая теперь питается через два последовательно приключенных ограничивающих сопротивления  $r_1 + r_{10}$ .

Введение дополнительных ограничивающих сопротивлений в цепи катушек  $KI$  и  $KIII$  необходимо как в отношении ограничения нагрева катушек, так и в отношении уменьшения расхода электроэнергии на их питание.

При заполнении бака стрелка манометра  $M$  замкнет контакт  $C$ , благодаря чему катушка  $PH$  зашунтируется, разомкнет свои контакты  $a-b$  и  $c-d$ . Размыкание последних контактов повлечет разрыв питания катушек  $KI$  и  $KIII$  и электродвигатель остановится. Новый пуск электронасоса произойдет, когда стрелка манометра  $M$  вновь замкнет контакт  $P$ , что и наступит при опорожненном баке.

### § 35. Прочие электрифицированные судовые механизмы

К другим судовым механизмам, часто применяющим электропривод для своей работы, прежде всего относятся электроventильторы и электрокомпрессоры. Общий вид судового электроventильтора представлен на фиг. 148, а на фиг. 149 дан общий вид судового электрокомпрессора.

Электроventильторы по характеру своей нагрузки наиболее близко подходят к рассмотренным выше центробежным насосам.

Что касается компрессоров, то на судах преимущественно распространены поршневой тип компрессоров, который по условиям своего пуска ближе всего подходит к поршневым насосам.

Для привода ventильторов, график нагрузки которых при постоянной скорости и производительности практически можно считать прямой линией, параллельной оси абсцисс, выбирают электродвигатель на длительную мощность.

Допустимая температура перегрева электродвигателей ventильторов на судах обычно лежит в пределах  $40-50^{\circ}\text{C}$  в зависимости от места установки и класса судна.

Потребную мощность электродвигателя для вентилятора приближенно можно определить по формуле:

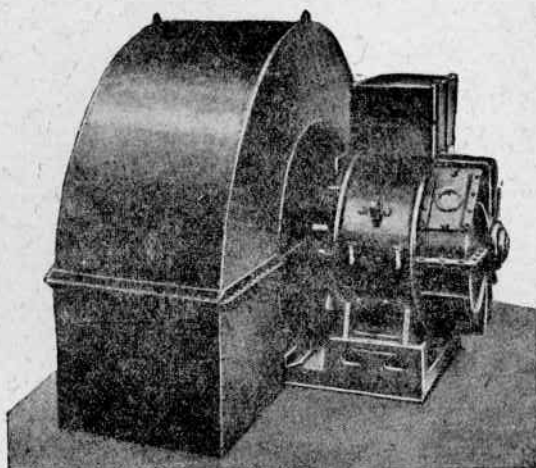
$$N = \frac{Qh}{5200\eta} \text{ л. с.} \quad (17)$$

где:  $N$ —мощность электродвигателя в л. с.,

$Q$ —производительность вентилятора в м<sup>3</sup>/мин.,

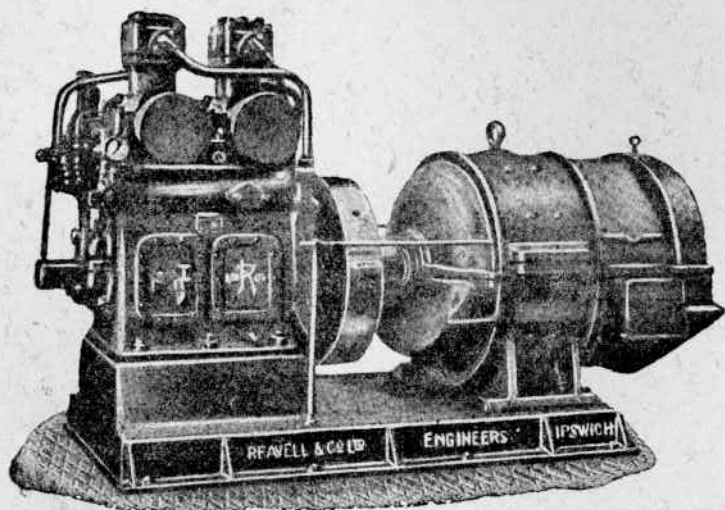
$h$ —давление, создаваемое вентилятором, в мм водяного столба,

$\eta$ —к. п. д. вентилятора; значение  $\eta$  можно брать для обычных вентиляторов 0,35—0,4, для вентиляторов типа Сирокко 0,5—0,6.



Фиг. 148. Один из четырех электровентиляторов типа „Сирокко“ главного и вспомогательного машинных отделений теплохода „Capetown Castle“.

Из менее распространенных судовых механизмов, использующих электроэнергию для своей работы, можно отметить электросепараторы



Фиг. 149. Двухступенчатый воздушный электрокомпрессор давлением в 30 атм., установленный на теплоходе „Brastagi“. Подобные компрессоры установлены на наших теплоходах-лесовозах „А. Андреев“ и др., построенных в Амстердаме в 1936 г.

топлива и масла, с обслуживающими их электрическими подогревателями, валоповоротные электроприводы, электроприводы станков мастерских, различные мелкие вспомогательные подъемные электро-механизмы, а на больших пассажирских судах, и в особенности на электроходах, широко начинает внедряться применение мелкомоторной нагрузки по обслуживанию камбузов и бытовой нагрузки.

В заключение нужно отметить, что область электродвижения современных судов с применением электроэнергии для вспомогательных механизмов, бытового обслуживания и потреблением электричества для точных инструментов, навигационных приборов и приборов связи все больше и больше начинает приближать судовые электростанции к современным крупным береговым электроустановкам как по применению высокого напряжения и по роду тока (с расширяющимся внедрением трехфазного тока), так и по широте использования электроэнергии с внедрением ее до возможного предела на судах.

---

# П Р И Л О Ж Е Н И Е

Таблица 1

**Характеристика вооружения паротеплоходов станowymi якорями и цепями  
для них согласно правилам Морского Регистра СССР**

| Характеристика | Становые якоря |                   | Цепь для станowych якорей |                                      | Характеристика | Становые якоря |                   | Цепь для станowych якорей |                                      |
|----------------|----------------|-------------------|---------------------------|--------------------------------------|----------------|----------------|-------------------|---------------------------|--------------------------------------|
|                | число          | общий вес<br>в кг | длина<br>в м              | диаметр<br>цепного<br>железа<br>в мм |                | число          | общий вес<br>в кг | длина<br>в м              | диаметр<br>цепного<br>железа<br>в мм |
| 1              | 2              | 3                 | 4                         | 5                                    | 1              | 2              | 3                 | 4                         | 5                                    |
| 250            | 2              | 405               | 220                       | 17,5                                 | 2500           | 3              | 6 870             | 495                       | 49,0                                 |
| 300            | 2              | 490               | 220                       | 17,5                                 | 2600           | 3              | 7 100             | 495                       | 50,5                                 |
| 350            | 2              | 570               | 220                       | 19,0                                 | 2700           | 3              | 7 320             | 495                       | 50,5                                 |
| 400            | 2              | 650               | 250                       | 20,5                                 | 2800           | 3              | 7 530             | 495                       | 52,0                                 |
| 450            | 2              | 730               | 300                       | 22,0                                 | 2900           | 3              | 7 780             | 495                       | 52,0                                 |
| 500            | 2              | 810               | 300                       | 23,5                                 | 3000           | 3              | 8 060             | 495                       | 54,0                                 |
| 550            | 2              | 890               | 300                       | 23,5                                 | 3150           | 3              | 8 420             | 495                       | 54,0                                 |
| 600            | 3              | 1460              | 300                       | 25,0                                 | 3300           | 3              | 8 780             | 495                       | 55,5                                 |
| 650            | 3              | 1640              | 300                       | 27,0                                 | 3450           | 3              | 9 140             | 495                       | 55,5                                 |
| 700            | 3              | 1830              | 355                       | 28,5                                 | 3600           | 3              | 9 500             | 495                       | 57,0                                 |
| 750            | 3              | 2020              | 355                       | 30,0                                 |                |                |                   |                           |                                      |
| 800            | 3              | 2230              | 355                       | 30,0                                 | 3750           | 3              | 9 880             | 495                       | 57,0                                 |
| 850            | 3              | 2440              | 385                       | 31,5                                 | 3900           | 3              | 10 250            | 495                       | 58,5                                 |
| 900            | 3              | 2660              | 385                       | 33,0                                 | 4050           | 3              | 10 600            | 550                       | 60,0                                 |
| 950            | 3              | 2770              | 385                       | 35,0                                 | 4200           | 3              | 11 000            | 550                       | 60,0                                 |
| 1000           | 3              | 3120              | 385                       | 35,0                                 | 4400           | 3              | 11 500            | 550                       | 62,0                                 |
| 1050           | 3              | 3260              | 385                       | 35,0                                 |                |                |                   |                           |                                      |
| 1100           | 3              | 3400              | 385                       | 36,5                                 | 4600           | 3              | 12 000            | 550                       | 63,5                                 |
| 1150           | 3              | 3520              | 385                       | 36,5                                 | 4800           | 3              | 12 500            | 550                       | 65,0                                 |
| 1200           | 3              | 3660              | 385                       | 38,0                                 | 5000           | 3              | 12 950            | 550                       | 65,0                                 |
| 1250           | 3              | 3790              | 385                       | 38,0                                 | 5250           | 3              | 13 500            | 550                       | 66,5                                 |
| 1300           | 3              | 3910              | 440                       | 39,5                                 | 5500           | 3              | 14 100            | 605                       | 68,0                                 |
| 1375           | 3              | 4110              | 440                       | 39,5                                 | 5750           | 3              | 14 600            | 605                       | 69,5                                 |
| 1450           | 3              | 4310              | 440                       | 41,0                                 | 6000           | 3              | 15 250            | 605                       | 71,0                                 |
| 1525           | 3              | 4500              | 440                       | 41,0                                 | 6300           | 3              | 15 850            | 605                       | 73,0                                 |
| 1600           | 3              | 4700              | 440                       | 42,5                                 | 6600           | 3              | 16 600            | 605                       | 74,5                                 |
| 1675           | 3              | 4890              | 440                       | 42,5                                 | 6900           | 3              | 17 250            | 605                       | 76,0                                 |
| 1750           | 3              | 5070              | 440                       | 44,0                                 |                |                |                   |                           |                                      |
| 1825           | 3              | 5260              | 440                       | 44,0                                 | 7200           | 3              | 17 850            | 605                       | 77,5                                 |
| 1900           | 3              | 5440              | 440                       | 44,0                                 | 7550           | 3              | 18 600            | 605                       | 79,0                                 |
| 2000           | 3              | 5680              | 440                       | 46,0                                 | 7900           | 3              | 19 500            | 605                       | 81,0                                 |
| 2100           | 3              | 5920              | 440                       | 47,5                                 | 8300           | 3              | 20 250            | 605                       | 82,5                                 |
| 2200           | 3              | 6170              | 440                       | 47,5                                 | 8700           | 3              | 21 000            | 605                       | 84,0                                 |
| 2300           | 3              | 6410              | 440                       | 47,5                                 |                |                |                   |                           |                                      |
| 2400           | 3              | 6650              | 495                       | 49,0                                 | 9100           | 3              | 21 700            | 605                       | 85,5                                 |
|                |                |                   |                           |                                      | 9500           | 3              | 22 600            | 605                       | 87,0                                 |

Шкала Бофорта<sup>1</sup>

| Баллы<br>Бофорта | Предельные величины<br>скоростей в м/сек. | Словесная характеристика |
|------------------|-------------------------------------------|--------------------------|
| 0                | 0 — 0,5                                   | Штиль                    |
| 1                | 0,6—1,7                                   | Тихий ветер              |
| 2                | 1,8—3,3                                   | Легкий                   |
| 3                | 3,4—5,2                                   | Слабый                   |
| 4                | 5,3—7,4                                   | Умеренный                |
| 5                | 7,5—9,8                                   | Свежий                   |
| 6                | 9,9—12,4                                  | Сильный                  |
| 7                | 12,5—15,2                                 | Крепкий                  |
| 8                | 15,3—18,2                                 | Очень крепкий            |
| 9                | 18,3—21,5                                 | Шторм                    |
| 10               | 21,6—25,1                                 | Сильный шторм            |
| 11               | 25,2—29,0                                 | Жесткий шторм            |
| 12               | более 29                                  | Ураган <sup>2</sup>      |

Таблица 3

Значения относительной продолжительности включения в на основании опытных данных, рекомендованных F. Hartig<sup>1</sup>om

| № группы | Род механизма                                                                                       | Характер нагрузки    | Значение в зависимости от назначения составной части механизма |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------------------------------------------------|
| 1        | 2                                                                                                   | 3                    | 4                                                              |
| I—1      | Поворотные, катучие и порталные краны, а также разгрузочные мосты (при спуске груза без тока) . . . | Редко пускаемые      | Подъем, кран, тележка, поворот: 0,15                           |
| 2        | Большая часть приспособлений для движения . . . . .                                                 | Слабое использование |                                                                |
| 3        | Подъемники для груза и людей . . . . .                                                              | До 20 подъемов в час |                                                                |
| II—1     | Краны мастерских и складские краны . . . . .                                                        | Умеренно-напряженная | Подъем, тележка: : 0,15<br>кран : 0,15 ÷ 0,25                  |
| III—1    | Почти все краны для штучных грузов в портах . . . . .                                               | —                    | Подъем, кран: 0,15 ÷ 0,25                                      |
| 2        | Краны мастерских и краны на верфях . . . . .                                                        | Малое использование  | Тележка : 0,15                                                 |
| IV       | Краны в эллингах . . . . .                                                                          | —                    | Подъем: 0,15 ÷ 0,25<br>кран : 0,25<br>тележка : 0,15           |

<sup>1</sup> Согласно „Мореходным таблицам Гидрографического управления“. Изд. 1933 г.

| № группы | Род механизма                                                                                                                                            | Характер нагрузки          | Значение в зависимости от назначения составной части механизма   |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|------------------------------------------------------------------|
| 1        | 2                                                                                                                                                        | 3                          | 4                                                                |
| VI—1     | Большая часть поворотных, катящихся и порталных кранов для массовых грузов (уголь, руда, сталь и т. п.), краны в гаванях с небольшим грейфером . . . . . | Мало напряженный           | Подъем : 0,25<br>Кран, тележка, поворот : 0,15                   |
| 2        | Подъемники для людей и грузов на фабриках, в столовых, гостиницах и торговых помещениях . . . . .                                                        | От 20 до 30 подъемов в час | —                                                                |
| VII      | Тяжелые краны на верфях, исполнительские краны с большой высотой подъема . . . . .                                                                       | —                          | Подъем, поворот : 0,25<br>Тележка : 0,15 ÷ 0,25                  |
| IX       | Поворотные, катящиеся и порталные краны с грейферами средних и больших размеров . . . . .                                                                | —                          | Подъем : 0,25 ÷ 0,40<br>Кран, тележка, поворот : 0,15            |
| XI       | Разгрузочные мосты с грейферами для средних и больших мощностей . . . . .                                                                                | —                          | Подъем : 0,25 ÷ 0,40<br>Кран, тележка : 0,40<br>Платформа : 0,15 |

Таблица 4

Ориентировочные данные относительной продолжительности включения в %

| Род крана                           | Род движения               | в %     |              |
|-------------------------------------|----------------------------|---------|--------------|
|                                     |                            | по АЕД  | по НИС ЛЭВЭО |
| Поворотные краны для штучных грузов | Подъем . . . . .           | 25      | 25 ÷ 40      |
|                                     | Вращение . . . . .         | 25 ÷ 40 | 40           |
|                                     | Изменение вылета . . . . . | 25 ÷ 40 | 25           |
| Краны-тяжеловесы                    | Подъем . . . . .           | 25      | 15           |
|                                     | Вращение . . . . .         | 25      | 15           |
| Грейферные поворотные краны         | Подъем . . . . .           | 40      | 40           |
|                                     | Вращение . . . . .         | 25 ÷ 40 | 40           |
|                                     | Изменение вылета . . . . . | 25 ÷ 40 | 15           |
| Перегрузочные мосты                 | Подъем . . . . .           | 40      | —            |
|                                     | Тележка . . . . .          | 40      | —            |
|                                     | Изменение вылета . . . . . | 25 ÷ 40 | —            |
| Мостовые краны для леса             | Подъем . . . . .           | —       | 25           |
|                                     | Тележка . . . . .          | —       | 25 ÷ 40      |
|                                     | Мост . . . . .             | —       | 40           |

**Таблица 5**

**Таблица 5**

Крановые электродвигатели трехфазного тока типа КТО (открытые) для напряжений 127, 220, 380, 500 в

| Величина                       | Тип КТО   | Продолжительность включения в процентах |       |                  |                       |                  |             |                                     |                  |             |                  |                       |       |       |                                     |                  |             |                  |                       | Вес и кг около | Механич. момент<br>GD <sup>2</sup> в кгм <sup>2</sup> около |       |       |                                     |                  |             |     |       |                  |             |
|--------------------------------|-----------|-----------------------------------------|-------|------------------|-----------------------|------------------|-------------|-------------------------------------|------------------|-------------|------------------|-----------------------|-------|-------|-------------------------------------|------------------|-------------|------------------|-----------------------|----------------|-------------------------------------------------------------|-------|-------|-------------------------------------|------------------|-------------|-----|-------|------------------|-------------|
|                                |           | 15                                      |       |                  |                       |                  |             | 25                                  |                  |             |                  |                       |       | 40    |                                     |                  |             |                  |                       |                |                                                             |       |       |                                     |                  |             |     |       |                  |             |
|                                |           | мощность                                |       | число<br>об/мин. | M <sub>ток</sub> , Мн | ротор            |             | сила тока<br>в статоре<br>при 500 в | мощность         |             | число<br>об/мин. | M <sub>ток</sub> , Мн | ротор |       | сила тока<br>в статоре<br>при 500 в | мощность         |             | число<br>об/мин. | M <sub>ток</sub> , Мн |                |                                                             | ротор |       | сила тока<br>в статоре<br>при 500 в |                  |             |     |       |                  |             |
|                                |           | квт                                     | л. с. |                  |                       | напря-<br>жен. в | ток<br>амп. |                                     | напря-<br>жен. в | ток<br>амп. |                  |                       | квт   | л. с. |                                     | напря-<br>жен. в | ток<br>амп. |                  |                       |                |                                                             | квт   | л. с. |                                     | напря-<br>жен. в | ток<br>амп. | квт | л. с. | напря-<br>жен. в | ток<br>амп. |
|                                |           |                                         |       |                  |                       |                  |             |                                     |                  |             |                  |                       |       |       |                                     |                  |             |                  |                       |                |                                                             |       |       |                                     |                  |             |     |       |                  |             |
| Синхронное число оборотов 1000 |           |                                         |       |                  |                       |                  |             |                                     |                  |             |                  |                       |       |       |                                     |                  |             |                  |                       |                |                                                             |       |       |                                     |                  |             |     |       |                  |             |
| 2                              | 30/1 002  | 3,4                                     | 4,62  | 920              | 1,5                   | 142              | 14,7        | 3                                   | 4,1              | 930         | 1,8              | 142                   | 13    | 2,3   | 3,14                                | 945              | 2,5         | 142              | 10                    | 5,3            | 0,18                                                        | 105   |       |                                     |                  |             |     |       |                  |             |
| 2                              | 40/1 002  | 4,5                                     | 6,13  | 915              | 1,4                   | 190              | 14,3        | 4                                   | 5,4              | 925         | 1,95             | 190                   | 12,7  | 7,6   | 4,22                                | 940              | 2,1         | 190              | 9,8                   | 6,3            | 0,24                                                        | 117   |       |                                     |                  |             |     |       |                  |             |
| 3                              | 55/1 003  | 6                                       | 8,16  | 950              | 2                     | 180              | 28,4        | 5,5                                 | 7,5              | 955         | 2,2              | 180                   | 26    | 10    | 6,1                                 | 960              | 2,7         | 180              | 21,3                  | 9              | 0,46                                                        | 142   |       |                                     |                  |             |     |       |                  |             |
| 3                              | 75/1 003  | 8,5                                     | 11,5  | 940              | 2                     | 170              | 30,6        | 7,5                                 | 10               | 945         | 2,25             | 170                   | 27    | 18,5  | 6,5                                 | 8,85             | 950         | 2,6              | 170                   | 23,4           | 12                                                          | 0,60  | 166   |                                     |                  |             |     |       |                  |             |
| 4                              | 110/1 004 | 12,5                                    | 17    | 960              | 2,3                   | 105              | 72,5        | 11                                  | 15               | 965         | 2,5              | 105                   | 64    | 21    | 9,5                                 | 12,9             | 970         | 3,1              | 105                   | 55             | 18,8                                                        | 0,78  | 245   |                                     |                  |             |     |       |                  |             |
| 4                              | 150/1 004 | 17                                      | 23,1  | 970              | 2,35                  | 142              | 73,5        | 15                                  | 20               | 975         | 2,6              | 142                   | 65    | 27,5  | 12                                  | 16,3             | 980         | 3,4              | 142                   | 52             | 24                                                          | 1,6   | 290   |                                     |                  |             |     |       |                  |             |
| Синхронное число оборотов 750  |           |                                         |       |                  |                       |                  |             |                                     |                  |             |                  |                       |       |       |                                     |                  |             |                  |                       |                |                                                             |       |       |                                     |                  |             |     |       |                  |             |
| 5                              | 150/755   | 18                                      | 24,5  | 710              | 2                     | 78               | 142         | 15                                  | 20,4             | 720         | 2,5              | 78                    | 118   | 13    | 17,7                                | 725              | 3           | 78               | 102                   | 27             | 2,9                                                         | 334   |       |                                     |                  |             |     |       |                  |             |
| 5                              | 220/755   | 25                                      | 34    | 715              | 2,1                   | 102              | 151         | 22                                  | 30               | 720         | 2,4              | 102                   | 133   | 40    | 19                                  | 25,8             | 725         | 2,9              | 102                   | 115            | 36                                                          | 3,2   | 422   |                                     |                  |             |     |       |                  |             |
| 5                              | 300/756   | 34                                      | 46,2  | 715              | 2,2                   | 130              | 161         | 30                                  | 40,8             | 720         | 2,6              | 130                   | 142   | 53    | 26                                  | 35,4             | 725         | 3                | 130                   | 123            | 46                                                          | 5,8   | 480   |                                     |                  |             |     |       |                  |             |
| 5                              | 450/756   | 50                                      | 68    | 730              | 2,5                   | 195              | 158         | 45                                  | 61,2             | 735         | 2,9              | 195                   | 142   | 78    | 39                                  | 53               | 740         | 3,3              | 195                   | 123            | 71                                                          | 9     | 582   |                                     |                  |             |     |       |                  |             |
| Синхронное число оборотов 600  |           |                                         |       |                  |                       |                  |             |                                     |                  |             |                  |                       |       |       |                                     |                  |             |                  |                       |                |                                                             |       |       |                                     |                  |             |     |       |                  |             |
| 7                              | 450/607   | 50                                      | 68    | 570              | 2,2                   | 205              | 150         | 45                                  | 61,2             | 575         | 2,5              | 205                   | 135   | 39    | 53                                  | 580              | 3           | 205              | 117                   | 71             | 11                                                          | 794   |       |                                     |                  |             |     |       |                  |             |
| 7                              | 600/607   | 70                                      | 95,3  | 575              | 2,2                   | 284              | 161         | 60                                  | 81,6             | 580         | 2,6              | 284                   | 138   | 105   | 50                                  | 68               | 585         | 3,2              | 284                   | 115            | 93                                                          | 17,2  | 910   |                                     |                  |             |     |       |                  |             |
| 8                              | 800/608   | 90                                      | 122,5 | 575              | 2                     | 265              | 209         | 80                                  | 109              | 580         | 2,35             | 265                   | 186   | 134   | 70                                  | 95,3             | 585         | 2,7              | 265                   | 163            | 123                                                         | 18,5  | 980   |                                     |                  |             |     |       |                  |             |
| 8                              | 1050/608  | 120                                     | 163   | 580              | 2,25                  | 360              | 206         | 105                                 | 143              | 585         | 2,6              | 360                   | 180   | 185   | 85                                  | 115,5            | 590         | 3,2              | 360                   | 146            | 170                                                         | 22    | 1105  |                                     |                  |             |     |       |                  |             |
| 9                              | 1250/609  | 145                                     | 197   | 580              | 1,9                   | 352              | 274         | 125                                 | 170              | 585         | 2,2              | 352                   | 236   | 246   | 105                                 | 143              | 590         | 2,7              | 352                   | 198            | 220                                                         | 30    | 1485  |                                     |                  |             |     |       |                  |             |
| 9                              | 1550/609  | 180                                     | 245   | 580              | 2,2                   | 470              | 250         | 155                                 | 211              | 585         | 2,5              | 470                   | 216   | 294   | 130                                 | 177              | 590         | 3,0              | 470                   | 181            | 265                                                         | 37,5  | 1710  |                                     |                  |             |     |       |                  |             |
| 9                              | 1950/609  | 220                                     | 300   | 580              | 2                     | 530              | 253         | 195                                 | 266              | 585         | 2,25             | 530                   | 225   | 330   | 165                                 | 224              | 590         | 2,6              | 530                   | 190            | 298                                                         | 47    | 1910  |                                     |                  |             |     |       |                  |             |

Примечания. Роторные данные, как и все прочие величины в таблице, относятся ко всем нормальным напряжениям: 127, 220, 380, 500 в. Данные статорного тока относятся только к напряжению 500 в. Для других напряжений статорный ток получается из следующего выражения:

$$I_2 = \frac{500}{V_x} I_{500}$$

Крановые электроподъемники трехфазного тока типа КТ (закрытые) для напряжения 127, 220, 380, 500 в

| Вспышка                        | Тип КТ    | Продолжительность включения в процентах |       |               |                                 |               |               |                             |          |               |                                 |               |               | Вес в кг около 0,7 в кт около |                             |       |
|--------------------------------|-----------|-----------------------------------------|-------|---------------|---------------------------------|---------------|---------------|-----------------------------|----------|---------------|---------------------------------|---------------|---------------|-------------------------------|-----------------------------|-------|
|                                |           | 15                                      |       |               |                                 | 25            |               |                             |          | 40            |                                 |               |               |                               |                             |       |
|                                |           | мощность                                |       | число об/мин. | M <sub>max</sub> M <sub>н</sub> | напряж. жем.в | ротор ток эм. | сн. ток в статоре при 500 в | мощность | число об/мин. | M <sub>max</sub> M <sub>н</sub> | напряж. жем.в | ротор ток эм. |                               | сн. ток в статоре при 500 в |       |
|                                |           | квт                                     | л. с. |               |                                 |               |               |                             | квт      |               |                                 |               |               |                               |                             | л. с. |
| Синхронное число оборотов 1000 |           |                                         |       |               |                                 |               |               |                             |          |               |                                 |               |               |                               |                             |       |
| 2                              | 22/1002   | 2,65                                    | 3,6   | 880/1,7       | 145                             | 11,2          | 5,5           | 2,2                         | 3        | 1900/2        | 145                             | 9,3           | 4,5           | 1,6                           | 2,18/330                    | 105   |
| 2                              | 30/1002   | 3,9                                     | 5,3   | 885/1,75      | 192                             | 12,5          | 8             | 3                           | 4        | 1910/2,1      | 192                             | 9,6           | 6             | 2,1                           | 2,85/440                    | 117   |
| 3                              | 40/1003   | 4,8                                     | 6,55  | 900/2,1       | 134                             | 22,2          | 9             | 4                           | 5,6      | 920/2,5       | 134                             | 18,5          | 7,4           | 2,9                           | 3,95/445                    | 142   |
| 3                              | 55/1003   | 7                                       | 9,5   | 910/2,1       | 176                             | 24,6          | 12,5          | 5,5                         | 7,6      | 930/2,6       | 176                             | 19            | 10            | 3,9                           | 5,3/450                     | 162   |
| 4                              | 75/1004   | 9                                       | 12,3  | 940/2,3       | 97,5                            | 57            | 17,5          | 7,5                         | 10       | 950/2,75      | 97,5                            | 47,5          | 14            | 5,5                           | 7,5/465                     | 246   |
| 4                              | 110/1004  | 15                                      | 20,4  | 945/2,3       | 146                             | 63            | 28,5          | 11                          | 15       | 960/3,15      | 146                             | 46,5          | 21            | 8                             | 10,9/475                    | 295   |
| Синхронное число оборотов 750  |           |                                         |       |               |                                 |               |               |                             |          |               |                                 |               |               |                               |                             |       |
| 5                              | 110/755 * | 14                                      | 19    | 685/2,1       | 74                              | 11,6          | 26            | 11                          | 15       | 1700/2,75     | 74                              | 91            | 21            | 9                             | 12,3/710                    | 334   |
| 5                              | 150/755   | 19                                      | 26    | 700/2,1       | 97,5                            | 120           | 34            | 15                          | 20,4     | 1710/2,65     | 97,5                            | 95            | 27            | 12                            | 16,3/720                    | 422   |
| 6                              | 220/756   | 27                                      | 37    | 710/2,1       | 129                             | 129           | 44            | 22                          | 30       | 720/2,75      | 129                             | 105           | 36            | 17                            | 23,2/730                    | 480   |
| 6                              | 300/756   | 39                                      | 53    | 715/2,1       | 179                             | 134           | 65            | 30                          | 40,8     | 725/2,85      | 179                             | 103           | 49            | 24                            | 32,7/735                    | 582   |
| Синхронное число оборотов 600  |           |                                         |       |               |                                 |               |               |                             |          |               |                                 |               |               |                               |                             |       |
| 7                              | 300/607   | 40                                      | 54,5  | 550/2         | 180                             | 137           | 75            | 30                          | 40,8     | 565/2,6       | 180                             | 103           | 51            | 24                            | 32,6/575                    | 794   |
| 7                              | 400/607   | 52                                      | 70    | 560/1,8       | 227                             | 139           | 100           | 40                          | 54,5     | 570/2,75      | 227                             | 107           | 68            | 32                            | 43,5/580                    | 910   |
| 8                              | 530/608   | 67                                      | 91    | 570/2,1       | 213                             | 170           | 107           | 50                          | 68       | 580/2,75      | 243                             | 127           | 82            | 40                            | 54,5/585                    | 980   |
| 8                              | 640/608   | 83                                      | 113   | 580/2,1       | 310                             | 163           | 138           | 64                          | 87       | 585/2,95      | 310                             | 126           | 88            | 51                            | 62,4/590                    | 1105  |
| 9                              | 800/609   | 110                                     | 130   | 580/1,9       | 310                             | 217           | 180           | 80                          | 109      | 585/2,6       | 310                             | 158           | 136           | 65                            | 88,5/590                    | 1485  |
| 9                              | 1000/609  | 130                                     | 177   | 585/2         | 380                             | 210           | 200           | 100                         | 136      | 590/2,6       | 380                             | 162           | 160           | 80                            | 109/595                     | 1710  |
| 9                              | 1250/603  | 165                                     | 225   | 585/2,1       | 488                             | 203           | 276           | 125                         | 170      | 590/2,6       | 488                             | 154           | 210           | 100                           | 136/595                     | 1940  |

Примечание. Роторные данные, как и все прочие величины в таблице, относятся ко всем нормальным напряжениям: 127, 220, 380 и 500 в. Данные статорного тока относятся только к напряжению 500 в. Для других напряжений статорный ток получается из следующего выражения:

$$I_x = \frac{500 I_{600}}{V_x}$$

Контакты постоянного тока типа КП

| Тип  | Длительный режим (8 час.) ам. | Непрерывный режим (ам.) | Повторно-кратковремени. режимы для контактов ПВ=20—40%/о ам. |       | Включает ам. |       | Выключает ам. |        |
|------|-------------------------------|-------------------------|--------------------------------------------------------------|-------|--------------|-------|---------------|--------|
|      |                               |                         | 220 в                                                        | 500 в | 220 в        | 500 в | 220 в         | 500 в  |
| КП-0 | 20                            | 20                      | —                                                            | —     | —            | —     | —             | —      |
| КП-1 | 40                            | 30                      | 40                                                           | —     | 120          | —     | 200           | —      |
| КП-2 | 80                            | 60                      | 100                                                          | 100   | 320          | 320   | 1 000         | 1 000  |
| КП-3 | 150                           | 115                     | 200                                                          | 200   | 600          | 600   | 5 000         | 5 000  |
| КП-4 | 300                           | 230                     | 400                                                          | 400   | 1200         | 1200  | 10 000        | 10 000 |
| КП-5 | 600                           | 460                     | 800                                                          | 600   | 2500         | 2500  | 10 000        | 10 000 |
| КП-6 | 1500                          | 1500                    | —                                                            | —     | 5000         | 5000  | 40 000        | 40 000 |
| КП-7 | 2500                          | 2500                    | —                                                            | —     | 7500         | 7500  | 50 000        | 50 000 |

Таблица 8

Двух- и трехполюсные контакторы переменного тока типа КТ

| Тип             | Напря-<br>жение<br>вольт                      | Линейный контактор            |                                            |                                               |              |                              | Контактор<br>ускорения                      |              |        | Раз-<br>рывная<br>мощ-<br>ность<br>амп. | Величина контактора | Число полюсов контак-<br>тора |
|-----------------|-----------------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------|------------------------------|---------------------------------------------|--------------|--------|-----------------------------------------|---------------------|-------------------------------|
|                 |                                               | Нормальная нагрузка<br>в амп. |                                            |                                               |              |                              | Нормальная на-<br>грузка в амп.             |              |        |                                         |                     |                               |
|                 |                                               | длительный<br>режим (8 час.)  | непрерывный<br>режим                       | повт.-кратко-<br>врем. режим<br>ПВ=20—40%/о   | включает ам. | длительный<br>режим (8 час.) | повт.-кратко-<br>врем. режим<br>ПВ=20—40%/о | включает ам. |        |                                         |                     |                               |
| КТ-22 . . . . . | —                                             | —                             | —                                          | —                                             | —            | 75                           | 112                                         | 450          | —      | 2                                       | 2                   |                               |
| КТ-32 . . . . . | $\begin{cases} 220 \\ 380 \\ 500 \end{cases}$ | 75                            | $\begin{cases} 60 \\ 60 \\ 60 \end{cases}$ | $\begin{cases} 110 \\ 110 \\ 85 \end{cases}$  | 450          | 112                          | 165                                         | 675          | 3 000  | 2                                       | 3                   |                               |
| КТ-23 . . . . . | —                                             | —                             | —                                          | —                                             | —            | 150                          | 225                                         | 800          | —      | 3                                       | 2                   |                               |
| КТ-33 . . . . . | $\begin{cases} 220 \\ 380 \\ 500 \end{cases}$ | 150                           | 115                                        | $\begin{cases} 225 \\ 225 \\ 225 \end{cases}$ | 900          | 225                          | 340                                         | 1350         | 5 000  | 3                                       | 3                   |                               |
| КТ-24 . . . . . | —                                             | —                             | —                                          | —                                             | —            | 300                          | 450                                         | 1750         | —      | 4                                       | 2                   |                               |
| КТ-34 . . . . . | $\begin{cases} 220 \\ 380 \\ 500 \end{cases}$ | 300                           | 225                                        | $\begin{cases} 450 \\ 450 \\ 450 \end{cases}$ | 1750         | 450                          | 675                                         | 2700         | 7 000  | 4                                       | 3                   |                               |
| КТ-25 . . . . . | —                                             | —                             | —                                          | —                                             | —            | 600                          | 900                                         | 3000         | —      | 5                                       | 2                   |                               |
| КТ-35 . . . . . | $\begin{cases} 220 \\ 380 \\ 500 \end{cases}$ | 600                           | 450                                        | $\begin{cases} 850 \\ 850 \\ 850 \end{cases}$ | 3000         | 900                          | 1350                                        | 1500         | 10 000 | 5                                       | 3                   |                               |

**Тормозные электромагниты постоянного тока типа КМП  
(с шунтовой катушкой)**

| Величина | Тип | Ход якоря<br>в мм | Вес якоря<br>в кг | Тяговое<br>усилие<br>в кг<br>(вкл. вес<br>якоря) | Вес<br>магнита<br>в кг |
|----------|-----|-------------------|-------------------|--------------------------------------------------|------------------------|
| 1        | 2   | 3                 | 4                 | 5                                                | 6                      |

**Нормальный режим: ПВ=25%**

|    |             |     |      |      |       |
|----|-------------|-----|------|------|-------|
| 11 | КМП-11..... | 30  | 0,65 | 6,5  | 10,5  |
| 12 | КМП-12..... | 40  | 1,3  | 11,5 | 18,5  |
| 13 | КМП-13..... | 60  | 2,6  | 19   | 29,5  |
| 14 | КМП-14..... | 80  | 6,0  | 30   | 39,5  |
| 15 | КМП-15..... | 100 | 12,8 | 55   | 91,5  |
| 16 | КМП-16..... | 120 | 23,5 | 100  | 117,5 |
| 17 | КМП-17..... | 150 | 52,0 | 130  | 260   |

**Тяжелый режим: ПВ=40%**

|    |             |     |      |     |       |
|----|-------------|-----|------|-----|-------|
| 11 | КМП-11..... | 30  | 0,65 | 4,5 | 10,5  |
| 12 | КМП-12..... | 40  | 1,3  | 8   | 18,5  |
| 13 | КМП-13..... | 60  | 2,6  | 14  | 29,5  |
| 14 | КМП-14..... | 80  | 6,0  | 21  | 39,5  |
| 15 | КМП-15..... | 100 | 12,8 | 40  | 91,5  |
| 16 | КМП-16..... | 120 | 23,5 | 72  | 117,5 |
| 17 | КМП-17..... | 150 | 52,0 | 100 | 260   |

**Длительное включение: ПВ=100%**

|    |             |     |      |     |       |
|----|-------------|-----|------|-----|-------|
| 11 | КМП-11..... | 30  | 0,65 | 2,5 | 10,5  |
| 12 | КМП-12..... | 40  | 1,3  | 3,5 | 18,5  |
| 13 | КМП-13..... | 60  | 2,6  | 7   | 29,5  |
| 14 | КМП-14..... | 80  | 6,0  | 12  | 39,5  |
| 15 | КМП-15..... | 100 | 12,8 | 20  | 91,5  |
| 16 | КМП-16..... | 120 | 23,5 | 33  | 117,5 |

Тормозные электромагниты трехфазного тока типа КМТ

| Величина | Тип             | Тяговое усилие<br>в кг (включая вес<br>якоря) | Вес якоря в кг | Вес магнита в кг | Ход якоря в мм при<br>числе включений<br>в час |     |     |                  |     |     | Потребл. мощность<br>при вращении<br>сердечника в лг | Для выбора<br>главн. предохра-<br>нителей<br>нужно к силе<br>тока двигателя<br>прибавить<br>амп. |       |       |
|----------|-----------------|-----------------------------------------------|----------------|------------------|------------------------------------------------|-----|-----|------------------|-----|-----|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|
|          |                 |                                               |                |                  | для ПВ =<br>=25%                               |     |     | для ПВ =<br>=40% |     |     |                                                      | 220 в                                                                                            | 380 в | 500 в |
|          |                 |                                               |                |                  | 160                                            | 300 | 600 | 120              | 300 | 600 |                                                      |                                                                                                  |       |       |
| 0        | KMT-0 . . . . . | 8                                             | 1,6            | 12               | 20                                             | —   | —   | 20               | —   | —   | 30                                                   | 1                                                                                                | 1     | 1     |
| I        | KMT-1 . . . . . | 10                                            | 3,5            | 20               | 40                                             | 30  | 20  | 40               | 25  | 20  | 40                                                   | 3                                                                                                | 2     | 1     |
| II       | KMT-2 . . . . . | 20                                            | 5,4            | 31               | 50                                             | 35  | 25  | 50               | 35  | 25  | 50                                                   | 6                                                                                                | 4     | 3     |
| II       | KMT-3 . . . . . | 35                                            | 11,2           | 45               | 50                                             | 35  | 25  | 50               | 35  | 25  | 70                                                   | 9                                                                                                | 5     | 4     |
| IV       | KMT-4 . . . . . | 70                                            | 24,5           | 86               | 50                                             | 35  | 25  | 50               | 35  | 25  | 150                                                  | 19                                                                                               | 11    | 8     |
| VI       | KMT-6 . . . . . | 115                                           | 33,0           | 183              | 60                                             | 45  | 30  | 60               | 40  | 30  | 260                                                  | 35                                                                                               | 20    | 16    |
| VII      | KMT-7 . . . . . | 140                                           | 42,0           | 213              | 80                                             | 55  | 40  | 80               | 50  | 35  | 360                                                  | 55                                                                                               | 32    | 24    |

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

### А. Русская

- Ф. И. Холулянов, „Асинхронные двигатели трехфазного и однофазного тока“. 1927.
- В. И. Полонский, „Электродвижение судов“. 1929 г.
- М. В. Трофимов, „Сборник схем электрического управления судовыми вспомогательными механизмами“. 1930 г.
- А. П. Шершов, „Устройство и теория корабля“. 1930 г.
- В. К. Понов, „Применение электродвигателей в промышленности“. 1932 г.
- Гидрографическое управление — „Мореходные таблицы“. 1933 г.
- К. И. Шенфер, „Асинхронные машины“. 1934 г.
- К. И. Шенфер, „Динамо-машины и двигатели постоянного тока“. 1934 г.
- А. В. Фатеев, „Электрическое оборудование портовых механизмов“.
- В. Л. Поздунин „Судовые устройства“. 1935 г.
- И. А. Цономарев, „Судовые двигатели внутреннего сгорания“. 1935 г.
- В. Д. Воронин, „Электрическое оборудование судов“. 1935 г.
- Е. Н. Матвеев, „Курс судовой электротехники“. 1935 г.
- И. И. Дорофеев и С. П. Зефирев, „Электрификация исполнительных механизмов“. 1935 г.
- Р. Л. Аронов, „Элементы схем и их комбинирование“. 1935 г. §7
- А. А. Рывкин, „Электрическое оборудование подъемно-транспортных механизмов на водном транспорте“. 1937 г.
- Справочник по судостроению, т. 10. 1937 г.
- Б. И. Лобач-Жученко, „Теплоходы“. 1938 г.
- С. А. Ринкевич, „Теория электропривода“. 1938 г.
- А. Бюденмюллер, „Вспомогательные судовые механизмы“. 1938 г.
- Н. М. Хомяков, „Электрооборудование корабельных рулевых устройств“. 1939 г.
- Морской Регистр СССР, „Правила по электрооборудованию морских стальных судов“. 1940 г.
- Л. Кванц, „Современные центробежные насосы“. 1926 г.
- Г. Матиссен и Е. Фукслехер, „Насосы“. 1927 г.
- Журналы: „Электричество“, „Судостроение“ и „Вестник электропромышленности“.

### Б. Иностранная

- F. F. Fowle — „Standart Handbook for Electrical Engineer“ 1922—1934.
- H. W. King — „Handbook of Hydraulics“ — 1929.
- Lloyds Register of Shipping — Rules and Regulations — 1938—1939.
- Журналы за разные годы (1935—1940 гг.)
- „The Motor Ship“
- „The Shipbuilder and Marine Engine Builder“
- „Engineering“.
- „The Marine Engineer“.
- „Marine Engineer and Shipbuilding Review“.
- „Revue d'Electricite et de Mecanique“.
- „Werft Reederei Heffen“.
- „Electrotechnische Zeitschrift“.
- „Schiffbau Schiffart und Haffnenbau“.
- „V. D. S. Zelt“.
- „Brown Beveri Mitteilungen“.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

|                       |           |
|-----------------------|-----------|
| Предисловие . . . . . | Стр.<br>3 |
|-----------------------|-----------|

## Часть I

### ЭЛЕКТРОДВИЖЕНИЕ

|                                                                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Глава I. Общий обзор                                                                                                     |     |
| § 1. Введение . . . . .                                                                                                  | 5   |
| § 2. Ход развития и современное состояние электродвижения судов . .                                                      | 6   |
| Глава II. Основные параметры и требования электрогребных установок                                                       |     |
| § 3. Род тока и величина напряжения, применяемые на электроходах, и классификация последних . . . . .                    | 26  |
| § 4. Определение мощности гребных электродвигателей . . . . .                                                            | 34  |
| § 5. Основные требования, предъявляемые к гребным электродвигателям, и способы регулирования числа их оборотов . . . . . | 39  |
| Глава III. Реверсирование                                                                                                |     |
| § 6. Реверсирование гребных винтов . . . . .                                                                             | 51  |
| § 7. Рассмотрение типовых схем и разбор вопроса реверсирования гребных установок постоянного тока . . . . .              | 56  |
| § 8. Реверсирование электрогребных установок на переменном токе . . . . .                                                | 72  |
| § 9. Теория синхронной передачи применительно к гребным электроприводам . . . . .                                        | 91  |
| Глава IV. Технические усовершенствования и принципиальные схемы электродвижения                                          |     |
| § 10. Новые устройства дизель-электрических систем, используемые для гребных установок на переменном токе . . . . .      | 96  |
| § 11. Разбор принципиальных схем электродвижения . . . . .                                                               | 106 |
| Глава V. Разбор выполненных схем                                                                                         |     |
| § 12. На постоянном токе . . . . .                                                                                       | 121 |
| § 13. На переменном токе . . . . .                                                                                       | 126 |
| § 14. Заключение . . . . .                                                                                               | 140 |
| Глава VI. Обслуживание вспомогательных потребителей электрогребных установок и канализация электроэнергии                |     |
| § 15. Питание вспомогательных потребителей электрогребных установок . . . . .                                            | 141 |
| § 16. Канализация электроэнергии на судах . . . . .                                                                      | 148 |

## Часть II

### ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

|                                                                                                                                     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Глава VII. Рулевой электропривод                                                                                                    |     |
| § 17. Назначение рулевого устройства; основные типы рулей; определение вращающего момента. Классификация рулевых приводов . . . . . | 154 |
| § 18. Расчет и выбор рулевых электроприводов разных систем . . . . .                                                                | 162 |

|                                                                   | Стр. |
|-------------------------------------------------------------------|------|
| § 19. Рассмотрение выполненных схем рулевых электроприводов . . . | 186  |
| § 20. Рулевые комбинированные электрогидравлические приводы . . . | 202  |
| § 21. Указатели положения руля . . . . .                          | 208  |

## Г л а в а VIII. Якорные и швартовые устройства

|                                                                               |     |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----|
| § 22. Назначение и основные элементы якорных и швартовых устройств            | 210 |
| § 23. Определение усилий, действующих на брашпиль при подъеме якоря . . . . . | 214 |
| § 24. Определение мощности приводного электродвигателя . . . . .              | 219 |
| § 25. Классификация электробрашпелей и разбор выполненных схем                | 224 |

## Г л а в а IX. Судовые и портовые погрузочно-разгрузочные электромеханизмы

|                                                                                                            |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| § 26. Грузоподъемные устройства на судах и в портах и их классификации по электрическим признакам. . . . . | 235 |
| § 27. Работа грузоподъемных устройств и характерный график нагрузки . . . . .                              | 237 |
| § 28. Метод выбора электродвигателей грузовых лебедок . . . . .                                            | 239 |
| § 29. Основные пусковые и тормозные устройства . . . . .                                                   | 244 |
| § 30. Рассмотрение выполненных схем электрических лебедок и крана.                                         | 252 |

## Г л а в а X. Электронасосы и прочие вспомогательные электрифицированные механизмы

|                                                                                    |     |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| § 31. Типы и классификация электронасосов, применяемых на судах .                  | 260 |
| § 32. Принципы действия, производительность и напор насосов. . . .                 | 261 |
| § 33. Рабочие диаграммы насосов и выбор электродвигателя. . . . .                  | 265 |
| § 34. Разбор схемы автоматического управления электронасосной установкой . . . . . | 272 |
| § 35. Прочие электрифицированные судовые механизмы . . . . .                       | 274 |

|                      |     |
|----------------------|-----|
| Приложение . . . . . | 277 |
|----------------------|-----|

|                      |     |
|----------------------|-----|
| Литература . . . . . | 286 |
|----------------------|-----|

Издательство «Морской транспорт»

Ответственный редактор С. М. Таманцев.

Технический редактор К. М. Волчок.

Корректор П. С. Яснецкий.

Сдано в набор 1/VIII 1940 г.

Подписано к печати 13/XI 1940 г.

Изд. № ЛО-22. М 30422.

Формат бумаги 60×92 см (1/16). Бум. л. 9,75.

Печ. л. 18+3 вклейки. Авт. л. 22,46. Уч.-пзд. л. 24,52.

Тип. зап. в 1 печ. л. 48 800. Тираж 3000 экз.

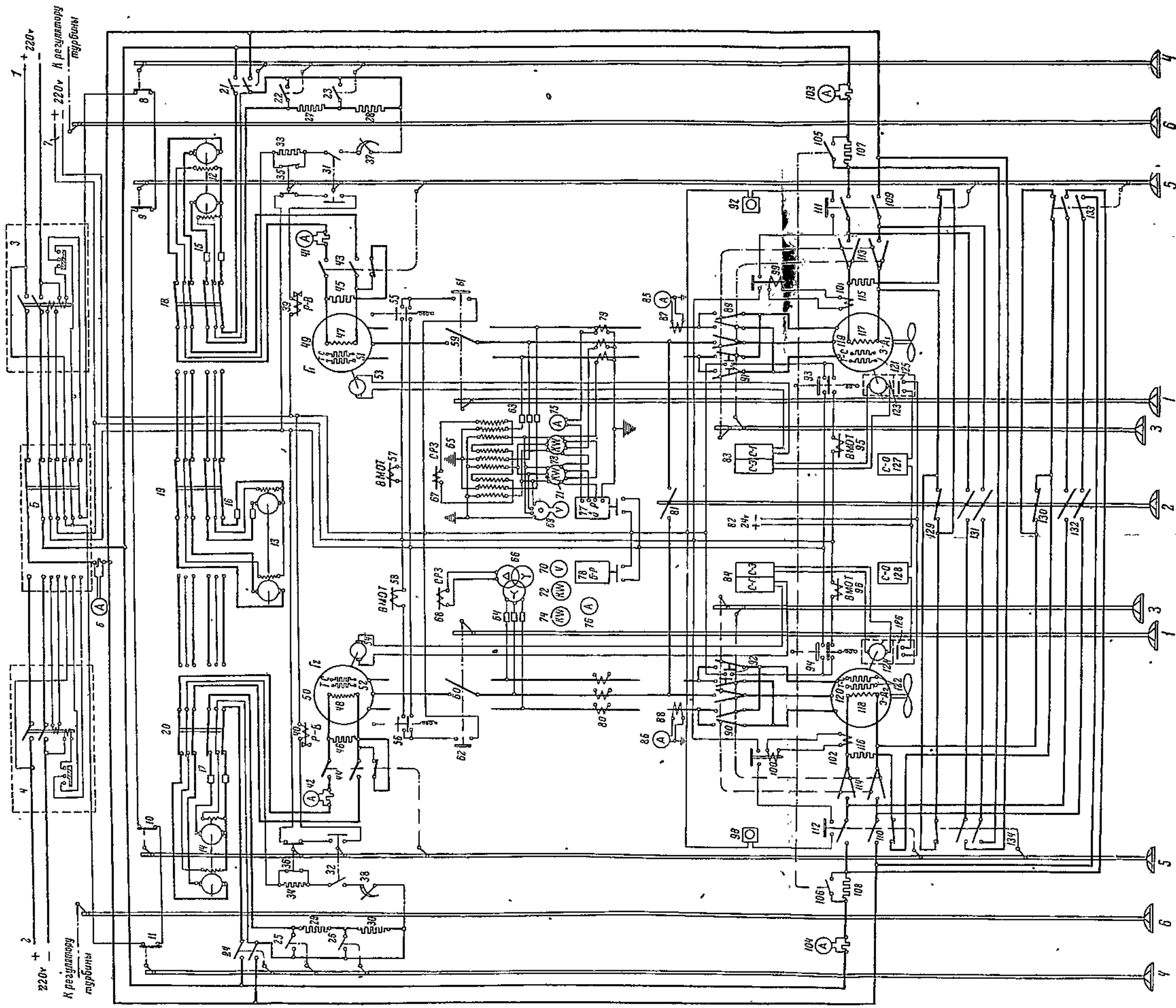
Заказ № 460.

Бумага Рижского бумкомбината.

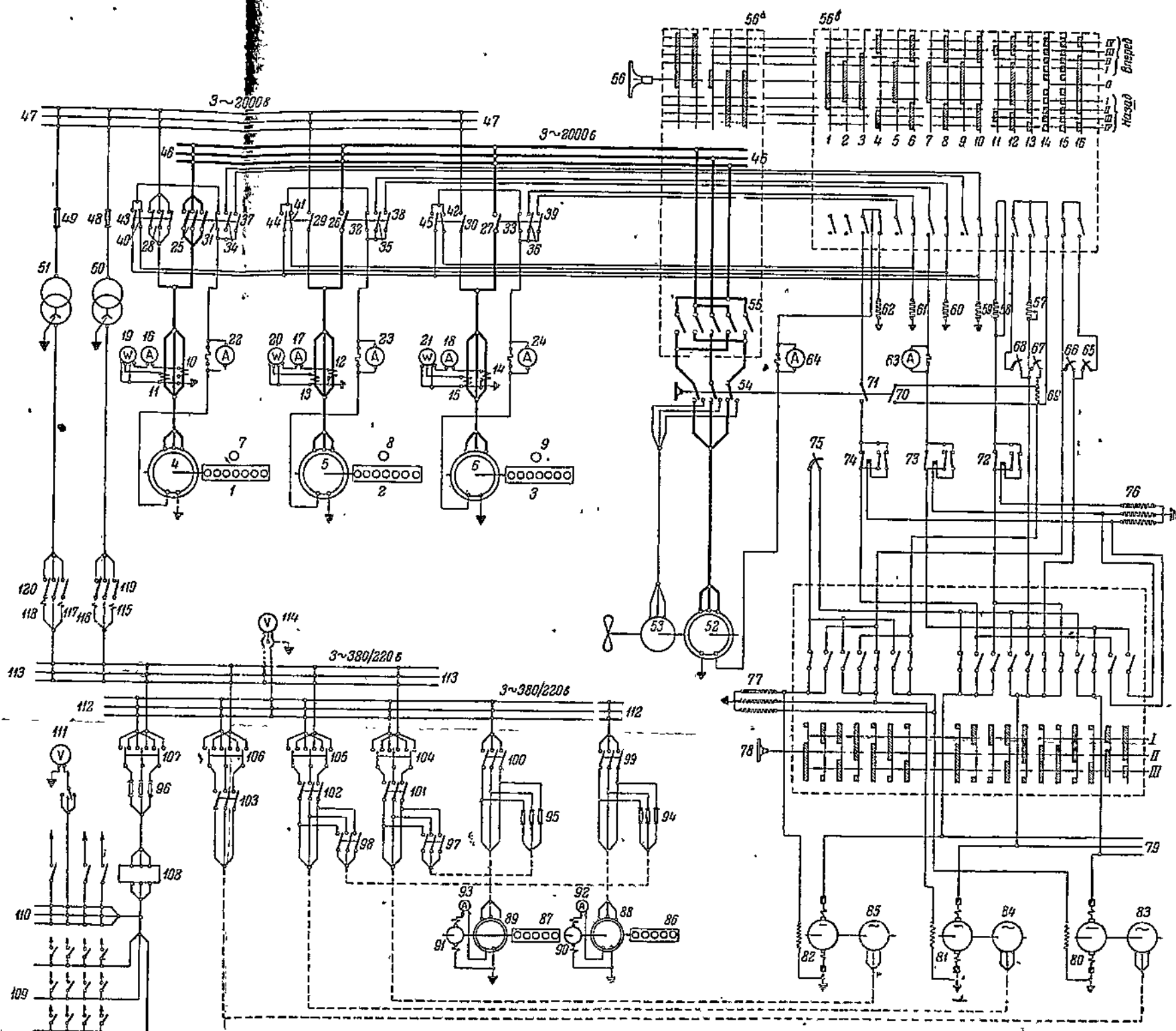
Для типографии ОГИЗа РСФСР треста «Полиграфкнига»

«Печатный Двор» им. А. М. Горького.

Ленинград, Гатчинская, 26.

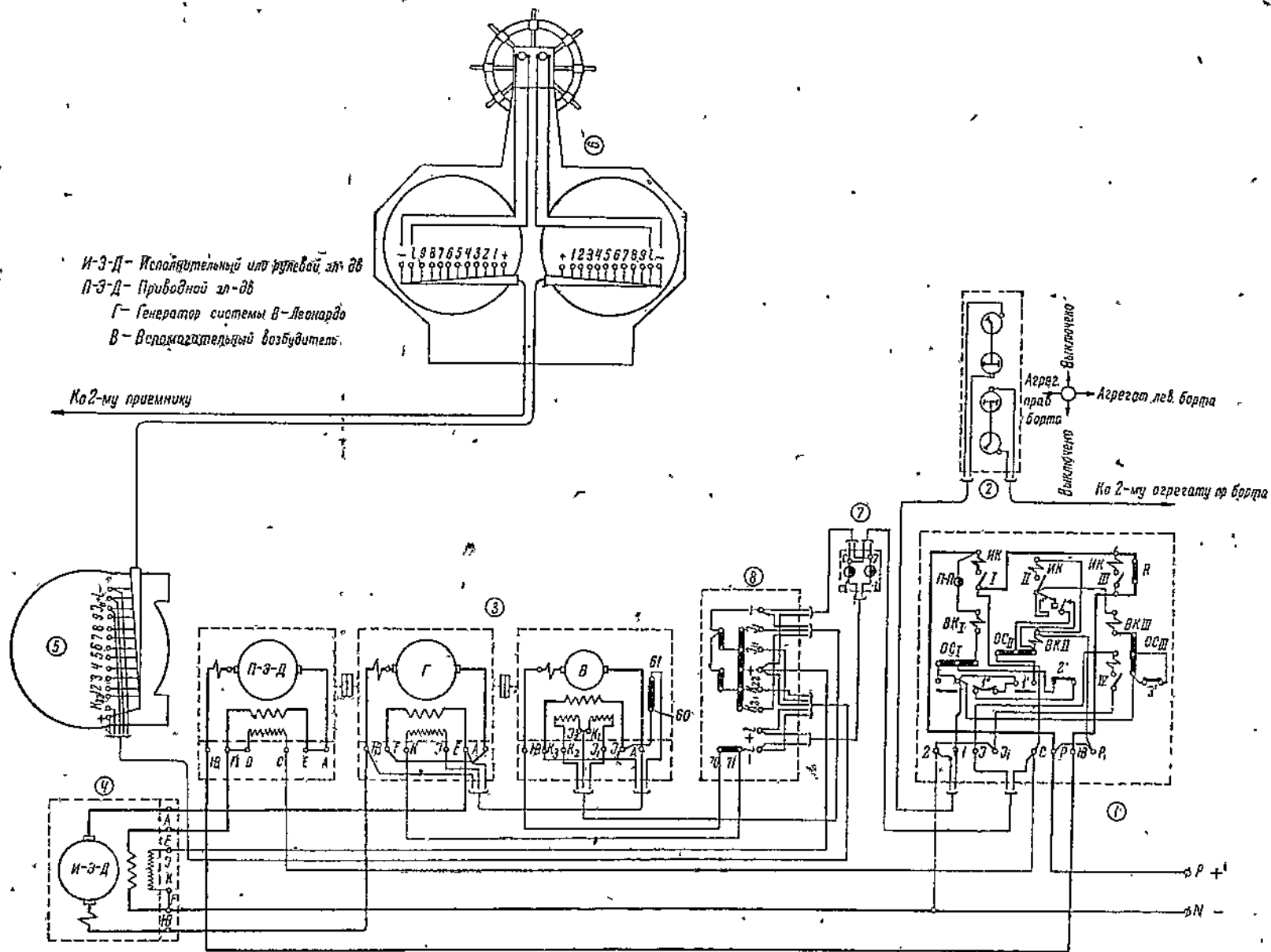


Фиг. 64. Упрощенная схема электроподогрева турбо-электроходов „И. Сталин“ и „В. Мологов“.

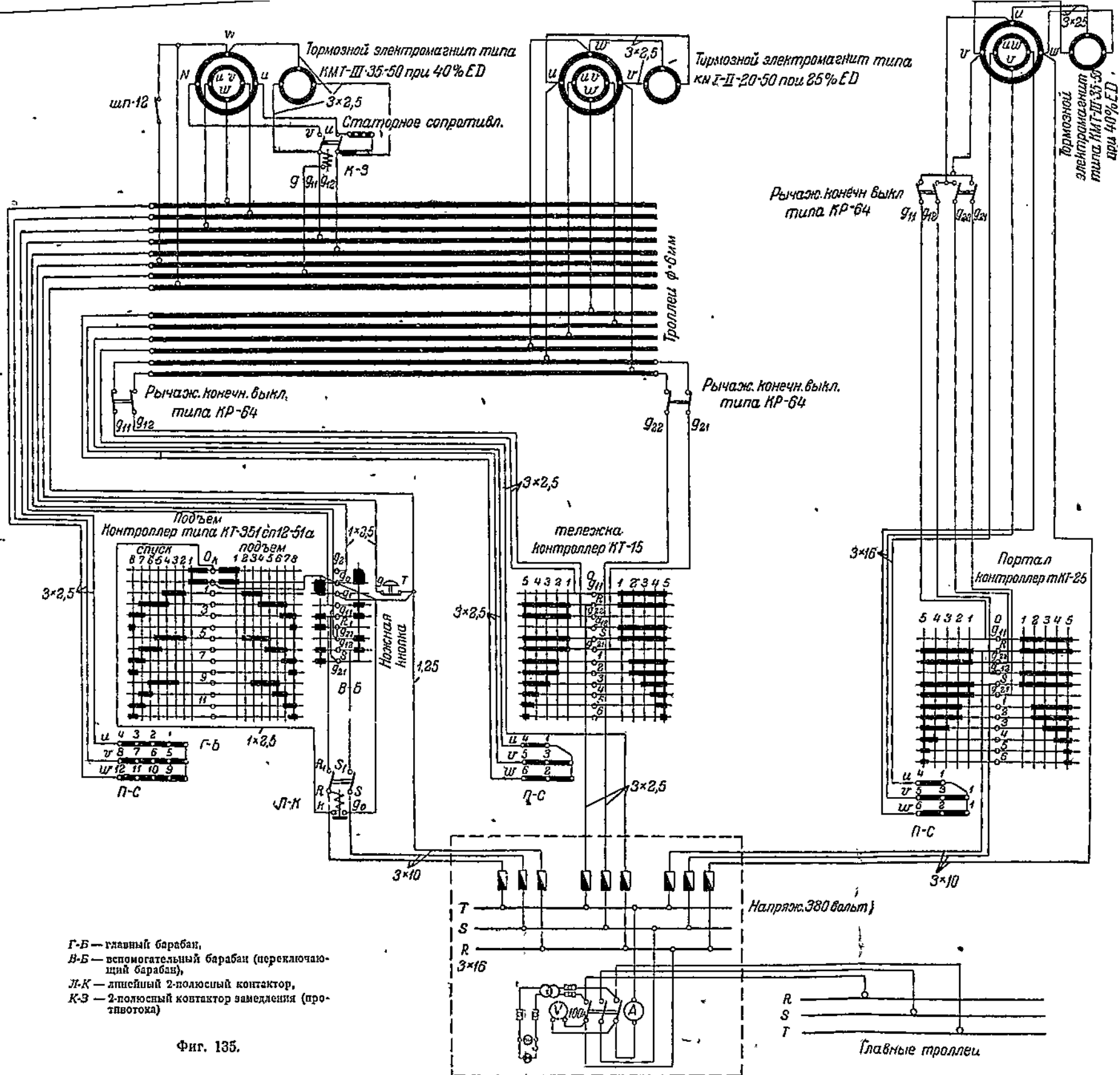


Фиг. 66. Схема распределения электроэнергии на дизель — электроходе „Wuppertal“.





Фиг. 96. Схема симпатического управления рулевого электропривода на турбоэлектроходах „И. Сталин“ и „В. Молотов“.



Фиг. 135.

Г-Б — главный барабан,  
В-Б — вспомогательный барабан (переключающий барабан),  
Л-К — лисийный 2-полюсный контактор,  
К-З — 2-полюсный контактор замедления (противоток)