

КЕМ

БЫТЬ

?!
○



$$1\Omega = \frac{1V}{1A}$$

Л.М.Серебряков Д.М.Лернер Ю.И.Максимов

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И КОРАБЛЬ

Л.М.Серебряков,
Д.М.Лернер, Ю.И.Максимов

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И КОРАБЛЬ



ЛЕНИНГРАД
♦СУДОСТРОЕНИЕ♦
1986

ББК 39.46

С 32

УДК [658.386 : 621.3] : 629.12(47 + 57)

СЕРИЯ «КЕМ БЫТЬ!»

Рецензент канд. техн. наук Ю. Н. КИРЕЕВ

Научный редактор инж. А. П. ЛЯЛИКОВ

Рисунки художника Л. Ф. БИРУЛИ

**Серебряков Л. М., Лернер Д. М.,
Максимов Ю. И.**

С 32 Электричество и корабль. Л.: Судостроение,
1986. 112 с, ил. — (Кем быть?)
ИСБН

О том, как на судах, плавучих сооружениях, кораблях монтируют, соединяют и налаживают электрические устройства и системы умелые, знающие люди, о настоящих мастерах своего дела популярно рассказывается в этой книге. Трудно найти профессию более широкого профиля, требующую более разнообразных навыков, умений и знаний, чем профессия судового электротехника.

Предназначена молодым людям, которые собираются овладеть этой профессией или делают в ней первые шаги.

С $\frac{3005030000-060}{048(01)-86}$ 58—86

39.46

© Издательство «Судостроение», 1986 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ

В нашей стране открыты широкие возможности для полной самоотдачи каждого в труде по выбранной профессии. Молодым сейчас часто подсказывают и помогают в ее выборе. Мы же, люди старшего поколения, профессию не выбирали, скорее, она нас выбирала. Трудились там, куда нас посылал Комсомол, куда направляла Партия. Трудовая жизнь нашего поколения, обобщенная биография каждого из нас — это работа, работа, и опять работа, пока хватит сил.

Я связал свою жизнь с судостроением в 1935 г., когда только закладывался могучий океанский флот страны Советов. Но начал работать еще до революции на заводе Рено в Петербурге. Прошел трудный, многоступенчатый путь от рабочего до главного конструктора, от рабфаковца до академика. Правильно ли выбрали профессию я и мои сверстники? Наша более чем полувековая биография говорит — правильно. Было трудно, но интересно работать, создавать новые суда и корабли, видеть собственными глазами как рос и укреплялся морской флот нашей страны.

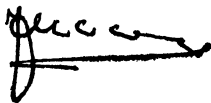
Сегодня техника шагнула далеко вперед. Просторы океанов и морей бороздят мощные суда, оснащенные современными системами автоматики. В космосе по своим орбитам движутся спутники, по которым ориентируются моряки, на сотнях заводов изготавливаются сложное оборудование, приборы для надежной и безопасной работы в море. Появилось много новых специальностей, да и старые обновились до неузнаваемости.

В происходящей сейчас перестройке техника, как таковая, конечно, очень важна, но при одном непременном условии, — если у станка, у мини-ЭВМ, в отсеке судна, на стенде будет действовать знающий, рачительный, мыслящий человек.

Чтобы выбрать работу по душе, по способностям, на всю жизнь, необходимо узнать как можно больше о своей будущей профессии. Эта книга поможет вам познакомиться с одной из очень интересных специальностей, связанной с применением на судах электричества, с одной из развивающихся областей техники — корабельной электротехникой. Без знаний и труда электромонтажников, настройщиков, инженеров и техников, специалистов по электрооборудованию невозможно ни построить, ни отправить в море современный корабль.

Дважды Герой Социалистического Труда,
лауреат Ленинской и Государственной премий,

академик АН СССР



Н. Н. Исанин

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА, ИСПЫТАННАЯ МОРЕМ

Современные суда буквально насыщены различными совершенными техническими средствами. Практически все они работают, используя электрическую энергию.

Широкое применение электроэнергии в судовых системах обусловлено доступностью и высоким качеством преобразования ее в другие виды энергии — механическую, тепловую, световую, химическую, а также передачи в любое место судна, где эти преобразования осуществляются. Электрооборудование по таким важным показателям, как надежность, компактность, безынерционность, энергетическая экономичность и удобство управления, в сравнении с другими устройствами в большинстве случаев «вне конкуренции».

Электроэнергетические системы современных судов отличаются высоким уровнем автоматизации. Для управления ими пользуются разнообразными автоматами — стабилизации частоты и напряжения, синхронизации генераторов, распределения нагрузок между параллельно работающими генераторными агрегатами, включения резерва, контроля и измерения изоляции и многими другими «умными» приборами и системами.

Судовое оборудование должно безотказно работать в сложных условиях — оно подвергается воздействиям вибрации и ударов, температуры и влаги, паров нефтепродуктов, солей. Надежная работа электрооборудования обеспечивается не только совершенными проектными решениями, правильной эксплуатацией, но во многом зависит и определяется качеством работы многочисленного отряда судовых электромонтажников, которые монтируют, настраивают, испытывают и сдают экипажу судовое электрооборудование.

Рост электроэнергетической вооруженности судов и связанное с ним широкое применение систем автоматизации обуславливает возрастание технической сложности электромонтажных, наладочных и слаточных работ. Естественно, в связи с этим повышается роль специалистов — электромонтажников, настройщиков и судовых электриков.

Современный уровень автоматизации судовых электроэнергетических установок требует от судового электромонтажника, настройщика отличного знания техники, владения передовыми методами и приемами монтажа, наладки и испытания электрооборудования. Практика показывает, что электромонтажнику постоянно приходится иметь дело с разнообразным электрооборудованием, выполненным на электромашинных, полупроводниковых и других элементах, работать с микроэлектроникой, в том числе и цифровой техникой.

Поэтому специальности судового электромонтажника, наладчика судового электрооборудования, судового электрика (электромеханика) требуют широкого кругозора, знания принципов работы судовых механизмов и электрооборудования, умения применять эти знания, т. е. свободно владеть приемами и методами монтажа и настройки электрооборудования, которые позволяют снизить трудоемкость выполняемых работ, повысить качество и производительность труда.

Перед Вами стоит сложная задача — какую специальность выбрать. Сложная, потому что нелегко определить профессию, которая именно Вам будет приносить удовлетворение. Только владея выбранной по душе специальностью, Вы непременно будете привносить в работу свои идеи, постоянно совершенствовать приемы работы, станете в конце концов специалистом высшей квалификации — мастером-профессионалом.

Прочтите эту книгу и может быть Вас заинтересует работа судового электротехника, поскольку, связав жизнь с этой профессией, Вам предоставится возможность применить свои способности и знания в одной из передовых отраслей промышленности нашей страны — судостроении, участвовать в создании новейших отечественных судов и кораблей и, как правило, в их испытаниях.

КАК ЭЛЕКТРИЧЕСТВО ПРИШЛО НА КОРАБЛЬ

Электричество нашло применение на судах свыше ста лет тому назад.

В 1878 г. на броненосцах «Петр Великий» (рис. 1) и «Вице-адмирал Попов» для освещения палуб и судовых помещений были установлены дуговые лампы П. Н. Яблочкова. Изобретение П. Н. Яблочковым «электрической свечи» позволило широко использовать новые источники света для палубного освещения, и в начале 80-х гг. прошлого века оно было внедрено на всех крупных судах и кораблях отечественного флота. На пароходах «Ильмень» и «Ижора» были впервые установлены прожекторы с дуговыми лампами. Для питания прожекторов были использованы «пародинамо» — паровые машины, приводившие во вращение электрические генераторы постоянного тока мощностью около 1 кВт при напряжении 50 В. Так было положено начало судовым электроэнергетическим установкам.

Русский академик Б. С. Якоби построил электродвигатель постоянного тока (рис. 2) и в 1838 г. использовал его в качестве привода колесной гребной установки на речном катере (рис. 3).

Изобретение А. Н. Лодыгиным лампы накаливания дало новый толчок развитию судовой электротехники, потребовало увеличения мощности судовых электроэнергетических установок.

Во второй половине 80-х гг. электрическая энергия использовалась уже не только для освещения, но и для привода вентиляторов судовых помещений, лебедок и подъемников в погребах боезапасов военных кораблей.

Преимущества электрической энергии при использовании ее для привода корабельных механизмов позволили существенно повысить тактико-технические характеристики боевых кораблей, поэтому внедрение ее на военном флоте шло опережающими темпами. Уже в начале 90-х гг. мощность генераторов на броненосце «Наварин» составляла 169 кВт, напряжение в судовой сети повысилось до 105 В. Для защиты электрических станций начинают применять плавкие предохранители, в целях повышения надежности электроснабжения в состав электростанции входят уже не один, а несколько генераторов

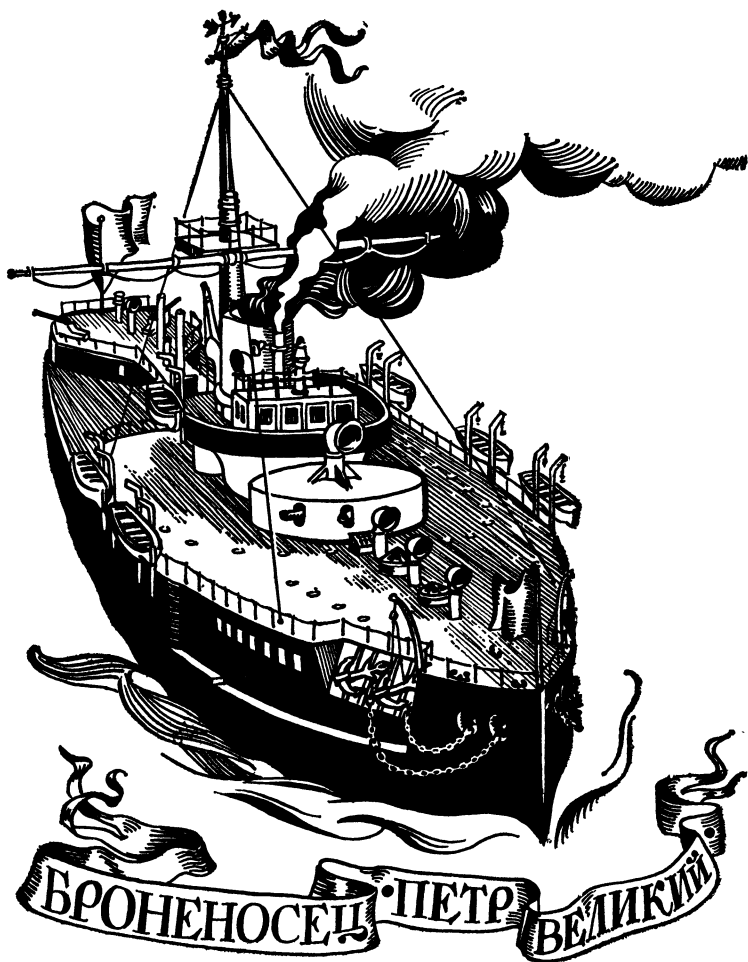


Рис. 1.

постоянного тока, работающих параллельно на общие шины.

В 1892 г. успешно проходят испытания электрического рулевого привода на крейсере «Двенадцать Апостолов». Электриком Николаевского порта А. В. Шубиным была предложена и разработана система генератор — двигатель, которая нашла применение не только в рулевых устройствах, но и в при-

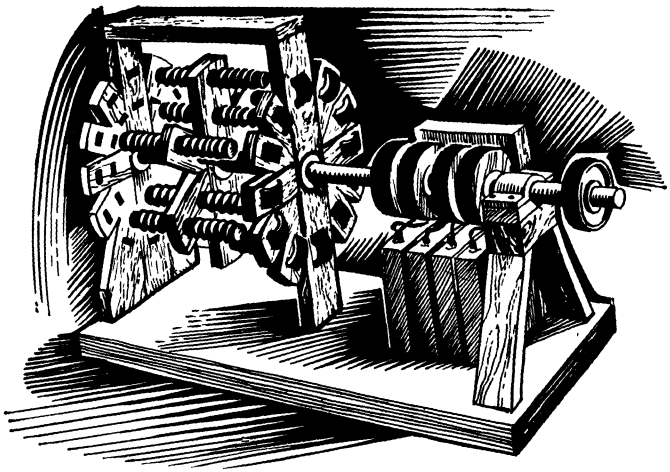


Рис. 2.



Рис. 3.

водах других судовых механизмов. Электрический привод используют в башенных артиллерийских установках. Паровые приводы сохраняются лишь у небольшого числа механизмов.

В качестве первичного двигателя в генераторах на место неэкономичных паровых машин приходят паровые турбины и дизели. Турбогенераторы используют в качестве основных источников, а дизель-генераторы — в качестве резервных.

На больших кораблях постройки 1911 г., таких, как линейный корабль «Севастополь», мощность корабельных электростанций достигла 2280 кВт. В качестве источников электрической энергии используют не только генераторы постоянного тока, но и разработанные русским инженером М. О. Доливо-Добровольским генераторы переменного тока. В 1913 г. линейный корабль «Императрица Мария» впервые в мире полностью оборудуется генераторными агрегатами переменного тока. Мощность его электроэнергетической установки составляла 1840 кВт при напряжении трехфазного тока 225 В. Для привода корабельных механизмов используют асинхронные электродвигатели.

Однако, несмотря на необходимость в техническом совершенствовании судовой электротехники, уровень электротехнической промышленности царской России был низким и сильно зависел от иностранных фирм, что задерживало электрификацию отечественного флота.

После победы Великой Октябрьской социалистической революции Коммунистическая партия и Советское правительство предприняли решительные меры по электрификации страны. В декабре 1920 г. VIII Всероссийский съезд Советов утвердил предложенный В. И. Лениным Государственный план электрификации России (ГОЭЛРО), который дал мощный толчок развитию электропромышленности страны и послужил основой роста электрификации судов.

Период 1920—1930 гг. характерен становлением отечественного судостроения. В это время ускоренными темпами восстанавливаются старые суда и начинают работать над проектами новых более совершенных. На судовых электростанциях применялись генераторные агрегаты постоянного тока с суммарной установленной мощностью в несколько сот киловатт.

В предвоенные годы в нашей стране строились новые транспортные суда и ледоколы. Флоту нужно было дать более мощное и совершенное электрооборудование. В эти годы реализуются первые проекты автономных электростанций на переменном токе, создаются новые типы генераторных агрегатов, разрабатываются новые средства защиты электроэнергетических установок. В Ленинграде, в Электротехническом институте им. В. И. Ульянова (Ленина) по инициативе основателя отечественной школы судовой электротехники проф. Б. И. Норневского открывается кафедра «Электрооборудование судов». Под руководством Б. И. Норневского на этой кафедре решались сложные задачи создания электроэнергетических установок. Были исследованы режимы коротких замыканий в судовых электростанциях постоянного тока, по результатам которых были созданы новые аппараты защиты. Во время Великой Отечественной войны была предложена очень простая система воздушного перемешивания электролита в аккумуляторах подводных лодок, позволившая значительно сократить время заряда. Тем самым было сокращено время пребывания подводной лодки в надводном положении, что затрудняло ее обнаружение противником. Сотрудники кафедры участвовали также в разработке защиты кораблей от неконтактных фашистских мин.

В послевоенные годы было построено много судов с электроэнергетическими установками на переменном токе, которые отличались от своих предшественников значительно большей мощностью (танкеры типа «София» — 1800 кВт, сухогрузы типа «Ленинский комсомол» — 1200 кВт, атомный ледокол «Ленин» — 6000 кВт) и высокой степенью автоматизации.

Создание многочисленных и разнообразных по конструкции судов не могло быть реализовано с помощью существовавших технологий, которые основывались на большом применении ручного труда, чем сдерживали темпы строительства судов.

В начале 50-х годов судовое электромонтажное производство выделилось в самостоятельный вид работ. В это время была разработана и получила широкое применение параллельная технология выполнения электромонтажных работ, заключающаяся в том, что монтаж, настройка и испытания судового

электрооборудования ведутся одновременно во всех помещениях судна. В результате творческого поиска рабочих и инженеров были созданы разнообразные приспособления, механизмы, устройства, приборы, позволившие облегчить труд электромонтажника, сделать его более производительным, отказаться в ряде случаев от ручного труда. В решении этой сложной проблемы принимали участие известные инженеры — судовые электротехники: Ю. С. Пулято, А. В. Галин, А. А. Паршинов, лауреаты Государственной премии СССР проф. Г. И. Китаенко, М. С. Лебедев.

Электроэнергетические установки современных судов представляют новый, более совершенный класс электроэнергетических установок. Несмотря на значительную мощность, превышающую иногда 10 000 кВт, они, благодаря применению комплексной автоматизации судовых механизмов и систем и микропроцессорной техники, легки в управлении. Введение в систему управления ЭВМ позволяет обеспечить высокое качество электроэнергии, надежную работу всего электрооборудования. С помощью чутких диагностических приборов и систем можно предсказать, а значит, заранее предупредить «заболевание» того или иного устройства системы, находящегося в самом удаленном уголке судна.

Но сегодняшние успехи судовой электротехники заставляют задуматься о ее завтрашнем дне: выдвигаются новые задачи, которые должны быть решены следующим поколением судовых электротехников-электромонтажников, инженеров-электриков. При существующих параметрах электроэнергии судовых источников питания нельзя повысить мощность судовых электроэнергетических установок — установка не помещается в отведенное для нее помещение. Стоит задача создания электроэнергетических установок с высокими параметрами, имеющих экономичные преобразователи энергии.

Увеличение надежности работы электроэнергетической установки в целом будет достигнуто за счет повышения надежности отдельных элементов, применения новых типов защиты и повышения качества работ всего электромонтажного цикла. Для обнаружения дефектов и неисправностей судового оборудования будут использоваться диагностирующие приборы.

Ставится задача интенсификации труда на всех этапах создания электроэнергетической установки — от проектирования до сдачи. Для этого разрабатываются и внедряются системы автоматизации научных исследований, автоматизированного проектирования, управления технологическим процессом.

НЕМНОГО ФИЗИКИ

Когда хотят похвалить хорошего, изобретательного, догадливого наладчика электросистем, техника или инженера-электрика, часто говорят: он чувствует физику явлений. Это не означает, что специалист умеет подгонять процессы в установке под абстрактные понятия и стереотипы. Наоборот, это говорит о том, что он способен конкретно, осязательно представлять себе, что происходит именно в этой системе с главными участниками электромеханических процессов: энергией, импульсом (количеством движения), зарядом, магнитным потоком. Такое представление особенно полезно в электротехнике сильных токов.

Конечно, «понимание физики явлений» приходит, как результат учебы, любви к своему делу, опыта работы, проб и ошибок. Но есть еще одно совершенно необходимое условие. Для понимания существа фактов нужно свободно оперировать несколькими основными физическими законами. А поскольку язык физики — это язык количественных соотношений, законы выражаются формулами. Формулы законов сохранения энергии и количества движения, формулы законов Ома, Ампера и Фарадея, зависимости, которые следуют из этих законов — вот надежная путеводная нить в сложных сплетениях причин и следствий в системах судовой электроэнергетики (СЭЭС).

Функции СЭЭС — вырабатывать электроэнергию и доставлять ее в нужной форме и в необходимом количестве многочисленным потребителям во всех точках корабля, буквально — от киля до клотика, от форштевня до ахтерштевня, от правого до левого борта. Структура СЭЭС такова: первичные тепловые двигатели, обычно дизеля или турбины (чаще паровые, иногда газовые) вращают роторы синхронных генераторов, которые через защитно-коммутационную аппаратуру питают судовую сеть переменного тока

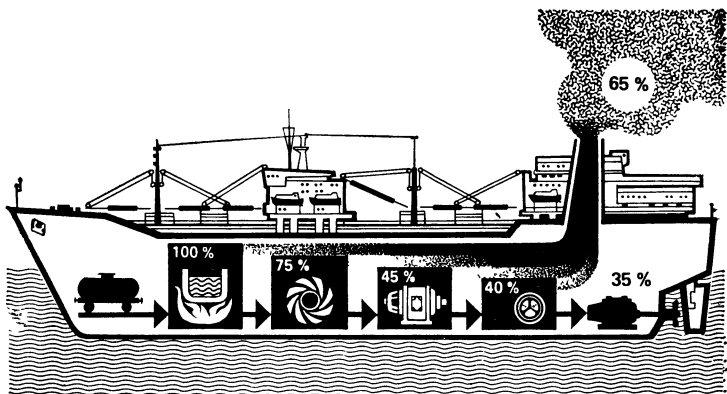


Рис. 4.

напряжением 380, 900 или даже 6300 В, частотой 50 Гц.

Если рассмотреть процесс превращения энергии по ее пути к электрической, то получится следующая цепочка переходов, наглядно представленная на рис. 4: скрытая химическая энергия топлива — тепловая энергия продуктов сгорания — тепловая энергия перегретого пара — кинетическая энергия струи расширяющегося пара — кинетическая энергия рабочих колес турбины — энергия упругой деформации вала в системе турбина — генератор — энергия вращения ротора генератора — электрическая энергия, поступающая из обмоток статора в судовую электроэнергетическую систему.

На каждой ступеньке-переходе часть энергии безвозвратно теряется, необратимо превращаясь в тепло. Это тепло рассеивается в металле судовых конструкций, в охлаждающей воде и выхлопных газах, переходя от них в атмосферу и в море. Каждое последующее звено цепочки превращений «тоньше» предыдущего, т. е. содержит меньше энергии. До гребного вала доходит примерно одна треть, как показано на рис. 4.

Граница владений, за которые отвечает электрик, монтирующий, испытывающий или эксплуатирующий электрооборудование, начинается там, где энергия переходит к генератору — на предпоследней стадии превращений. Поэтому дальнейшее изложение будет бо-

лее подробным и точным. Одними словесными описаниями при этом не обойтись: обязательно понадобятся количественные соотношения — формулы. Правда, только самые простые и необходимые. Пусть читатель постарается не упустить ни одной из них, — каждая, удержавшись в памяти, многократно пригодится.

В школьных учебниках физики чаще всего движутся поступательно и вращательно простые тела — материальные точки. В технике — мощные, объемные, тяжелые конструкции. Рассмотрим основные соотношения, определяющие энергетику и динамику массивного ротора, жестко связанного с вращающимся валом. (Здесь уместно вспомнить, что слово «ротор» — производное от лат. *rotare* — вращать.)

Прежде всего необходимо подсчитать количество энергии и мощность, передаваемую через вал к ротору. Эта энергия равна работе, совершаемой против сил, стремящихся затормозить вращение. При равномерном прямолинейном движении, когда скорость и сила постоянны — это произведение силы на путь:

$$A = Fr. \quad (1)$$

На рис. 5 изображен диск, к любой точке которого может быть приложена сила F , постоянная по величине и направленная все время по касательной к окружности диска. Диск вращается с постоянной угловой скоростью ω . За единицу времени каждая точка диска перемещается на различное расстояние, но поворачивается на один и тот же угол φ . Поэтому удобнее ввести в формулы не r , а φ . Представим формулу (1) в таком виде:

$$A = Fr = FR \frac{r}{R}. \quad (2)$$

Отношение дуги $r = \varphi R$ к радиусу R — это и есть угол φ , а произведение силы F на расстояние от точки приложения силы до оси вращения R — это момент M . Таким образом,

$$A = M\varphi. \quad (3)$$

Моменты сил, приложенных к разным точкам, складываются. Их сумма — это полный момент вращения тела. Поэтому, суммируя работу всех сил и вынося за скобки общее угловое перемещение φ , получим ту же формулу

$$A = \sum F_i r_i = \sum M_i \varphi = M\varphi, \quad (4)$$

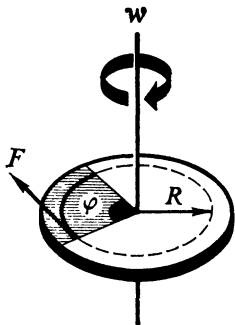


Рис. 5.

где M — суммарный момент вращения, который для турбогенератора складывается из моментов всех сил, передаваемых струями пара на лопатки турбины.

Этот суммарный момент — не абстрактная величина. Его можно непосредственно измерить. Делается это путем измерения деформации вала, который обязательно немного скручивается под действием двух приложенных к его концам противоположных моментов: вращающего момента и момента сопротивления. Если частота вращения постоянна, то оба момента равны между собой. Измерить малую деформацию можно многими способами. Например, тензодатчиком — небольшой гибкой полоской из проводящего ток материала, наклеенной на поверхность вала. Сопротивление такой полоски электрическому току изменяется в зависимости от степени растяжения.

Итак, выведенная выше формула позволяет подсчитать или измерить энергию, поступившую к генератору. Однако, что может сказать о характеристиках агрегата переработанная им энергия? Зная только значение энергии, невозможно определить, какая машина (маленькая или мощная) и какое время (сутки или несколько минут) работала. Нужно учитывать время, поэтому не энергия, а мощность, т. е. работа, выполненная в единицу времени, является важнейшей характеристикой энергетических систем и агрегатов.

Разделим обе части формулы (4) на время t . Слева получится мощность, а в правой части вместо угла поворота появится угловая скорость ω . Таким образом,

$$N = A/t = M\varphi/t = M\omega. \quad (5)$$

Формулы (4) — (5) справедливы не только для вращающейся точки, но и для любого агрегата, имеющего вращающийся вал: турбины, дизеля, генератора, электродвигателя, гребного винта, буровой установки и т. п.

В предыдущих рассуждениях предполагалось, что частота вращения постоянна. Они не вполне пригодны для расчета режимов разгона и торможения агрегата, когда частота вращения изменяется. Действительно, в этом случае подводимая энергия затрачивается не только на совершение работы по преодолению момента сопротивления, но и на изменение кинетической энергии вращающихся масс. Как подсчитать ее? Можно воспользоваться приемом преобразования формул, известных для поступательного движения. Кинетическая энергия точечного тела, имеющего массу, определяется, как известно, выражением

$$W = mv^2/2. \quad (6)$$

Подставим в эту формулу выражение для линейной скорости через угловую $v = \omega R$:

$$W = \frac{m\omega^2 R^2}{2} = mR^2 \frac{\omega^2}{2} = J \frac{\omega^2}{2}. \quad (7)$$

Теперь видно, что множителем при половине квадрата угловой скорости выступает параметр J , аналогичный массе в выражении (6). Это так называемый *момент инерции*. Он зависит не только от массы, но и от того, на каком расстоянии от оси вращения она находится. Для точечной массы момент инерции равен

$$J = mR^2. \quad (8)$$

Для тонкого обода (такого, как велосипедное колесо) будем иметь

$$J = \pi R^2 \sigma, \quad (9)$$

где σ — масса единицы длины обода.

Понятно, что момент инерции массивного тела зависит от распределения его массы относительно оси вращения. Для сплошного диска или массивного цилиндра, вращающихся вокруг оси симметрии, как показано на рис. 6, момент инерции получают суммированием моментов инерции всех элементарных ободов, толщиной ΔR , на которые его можно разбить. Получится важная формула:

$$J = \pi R^4 \rho l / 4, \quad (10)$$

где ρ — плотность, а l — длина цилиндра.

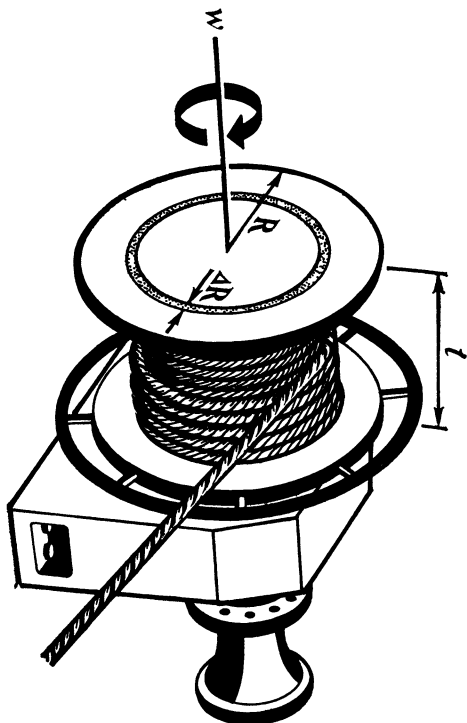


Рис. 6.

Теперь имеется все необходимое, чтобы написать основное уравнение динамики вращательного движения по аналогии со вторым законом Ньютона для поступательного движения. Итак, место массы займет момент инерции, место силы — момент, вместо линейного ускорения нужно взять угловое ускорение, т. е. скорость изменения частоты вращения. Получим

$$J \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = M_n - M_s. \quad (11)$$

Это выражение описывает процесс разгона или торможения любого вращающегося агрегата. Здесь M_n — момент вращения, а M_s — момент сопротивления, который в данном случае создается взаимодействием электрических токов, текущих в обмотках генератора. В нормальных режимах работы агрегата M_n больше, чем M_s , причем эти моменты направлены

навстречу друг другу. Так бывает не всегда. Может оказаться, что электромагнитный момент изменит свой знак, тогда генератор перейдет в режим электродвигателя и начнет разгонять вал с турбиной. В таком случае может произойти авария (если не срабатывает специальная защита).

Для лучшего запоминания выведенных формул сведем их в таблицу, где указаны также единицы измерения всех входящих в эти формулы величин (в системе СИ).

Величина	Обозначение или расчетная формула (размерность)	
	Поступательное движение	Вращательное движение
Мера инерции	m (кг)	J (кг · м ²)
Перемещение	r (м)	φ (рад)
Скорость	v (м/с)	ω (1/с)
Ускорение	$\Delta v/\Delta t$ (м/с ²)	$\Delta\varphi/\Delta t$ (1/с ²)
Импульс	mv (кг · м/с)	$J\omega$ (кг · м/с)
Обобщенные силы	F (Н)	M (Н · м)
Кинетическая энергия	mv^2/r (Дж)	$J\omega^2/r$ (Дж)
Мощность	Fv (Вт)	$M\omega$ (Вт)

Не все единицы СИ удобно употреблять. Так, джоуль — очень маленькая порция энергии, не удобная для описания многих процессов. В обиходе чаще всего пользуются киловатт-часами. Киловатт-час — это 36 000 000 000 Дж, или 36 ГДж. Единица момента в СИ — ньютон на метр — тоже мала. Поэтому часто применяют «старые» единицы: кГ · м, равный примерно 9,8 Н · м или Тм = 9,8 МН · м.

Угловая скорость в системе СИ измеряется в радианах в секунду. Однако в технике повсеместно используется другая, примерно в 10 раз меньшая единица — обороты в минуту. Частота вращения, измеренная в об/мин, обозначается буквой n . С угловой скоростью, измеренной в рад/с, она связана простым соотношением $\omega = \pi n/30 \approx 0,1047 n$.

Частота вращения и терминологически и физически тесно связана с другой величиной — частотой колебательного процесса f , которая измеряется в герцах. Герц — это одно колебание в секунду.

Простые формулы, выведенные выше, весьма содержательны. Кажется бы, что может сказать

выражение (5), о размерах агрегата, предположим, при заданной мощности? Из соотношения следует: чем больше частота вращения, тем меньше момент. Силы, движущие или тормозящие вращающийся агрегат, будь то рабочее колесо турбины, ротор двигателя, барабан лебедки, бур, приложены к цилиндрической поверхности вращения. Это значит, что при прочих равных условиях момент пропорционален диаметру агрегата. Следовательно, чем быстрходнее турбина и генератор, тем меньше их габаритные размеры и, следовательно, масса. Поэтому на самолетах, где оборудование должно быть как можно легче, частоту берут в 8 раз выше, чем на корабле (400 Гц вместо обычных 50).

Рассмотрим формулу (7). Из нее видно, что, увеличив скорость вращения в 8 раз и тем самым уменьшив диаметр генератора примерно в $\sqrt{8} = 2,8$ раза, мы уменьшаем момент инерции в 64 раза. Что это значит?

Маленький момент инерции означает, что разгон и торможение агрегата при изменении нагрузки, когда появляется неуравновешенный момент, происходят быстро. Казалось бы, неплохо — большая «приемистость». Но если частота в электрической сети будет «плавать» при малых колебаниях нагрузки (при включении или отключении, скажем, духовки электрокамбуза), то дело плохо. Что лучше — легкий, малогабаритный, но неустойчивый в работе, нуждающийся в регуляторе агрегат, или тяжелый, большой, но стабильный? В аналогичной форме эта проблема характерна и для многих других областей техники.

Итак, механическая энергия передана в генератор, чтобы, совершив там работу, превратиться в электрическую. Какую работу? Работу вращения ротора против приложенного к нему момента электромагнитных сил. Разберемся, как они появляются.

Для определенности следует договориться, о какой электрической машине пойдет речь. Вначале на судах безраздельно господствовал постоянный ток. Он и сейчас незаменим, когда нужны двигатели, работающие в широком диапазоне скоростей вращения: для лебедок, шпилей и брашпилей, приводов гребных винтов ледоколов и подводных лодок. Однако все больше на судах появляется устройств (потреби-

телей), работающих при различных напряжениях. Дробить и преобразовывать легче энергию переменного тока. Генераторы и двигатели переменного тока описать математически сложнее, зато они сами проще, легче и надежнее машин постоянного тока. Современные рыбоперерабатывающие суда и суда для освоения других богатств океана больше похожи на плавучие заводы и горнодобывающие предприятия, и там повсюду — переменный ток.

Попробуем рассказать об обоих типах машин. Проще устроен синхронный генератор переменного тока, поэтому и начнем с него.

Ротор синхронной электрической машины — это один или несколько электромагнитов, жестко соединенных с валом. Вместе с магнитами вращается окружающее их, создаваемое ими, «сцепленное с ними» магнитное поле. Магнитное поле... электрическое поле... На самом деле разделение условно. Есть единое электромагнитное поле. Перемещаясь относительно электрического поля, мы обнаружим и магнитное. Так объясняется появление магнитного поля при протекании тока. А если перемещаться относительно магнитного поля, то окажемся в электрическом поле.

Неправильно думать, что электродвижущая сила (ЭДС) наводится только в проводниках, пересекаемых магнитными силовыми линиями. Прибор, чувствительный к электрическому полю, обнаружит его во всем окружающем ротор пространстве. Но только в обмотках статора (от лат. *sto* — стою) проводники уложены и соединены между собой так, что на концах обмоток, выведенных наружу, возникает существенная ЭДС. Переменная или постоянная? Чтобы ответить на этот вопрос, нужно описать электромагнитную индукцию. Вот ее закон:

$$E = -\Delta\Phi/\Delta t,$$

где E — ЭДС в замкнутом контуре; Φ — магнитный поток внутри этого контура. Из формулы видно, что постоянная ЭДС в контуре возникнет только тогда, когда скорость изменения магнитного потока, сцепленного с ним, будет постоянной, другими словами, когда магнитное поле равномерно «втекает» или «вытекает» из контура. Но бесконечно возрастать или уменьшаться поток не может. Поэтому, если контур неподвижен и не изменяет своей формы (в синхрон-

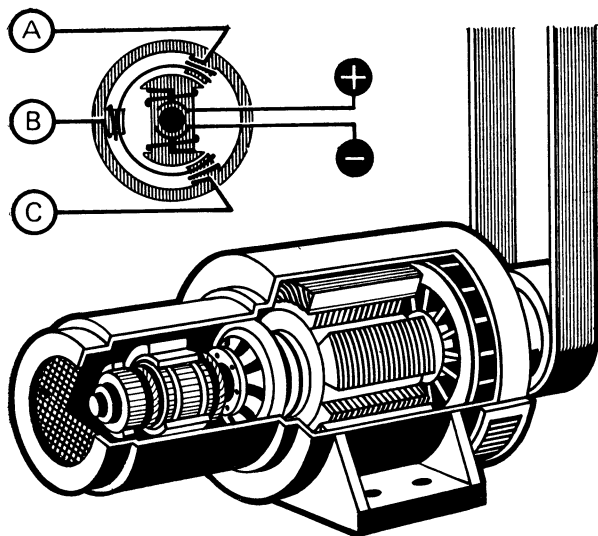


Рис. 7.

ной машине контур обмотки статора именно таков), то ЭДС будет переменной. С какой частотой она будет колебаться?

Если на роторе смонтирован один электромагнит, имеющий два полюса, то каждый оборот машины будет соответствовать одному периоду колебаний напряжения. Если на роторе будет несколько пар полюсов, то частота напряжения соответственно возрастет.

Таким образом, синхронный генератор вырабатывает переменный ток частотой

$$f = pn/60,$$

где p — число пар полюсов ротора.

Итак, на обмотках статора образовалась переменная ЭДС. Но это еще не означает, что появилась энергия. Для того, чтобы механическая энергия стала превращаться в электрическую, необходимо замкнуть выводы, к которым изнутри присоединены обмотки статора (рис. 7), на внешнюю нагрузку, например, на электронагревательные элементы. Тогда в обмотке статора появится электрический ток и возникнет электромагнитный момент сопротивления. Турбина, вращая ротор против этого момента, будет совершать

работу, равную электрической энергии, передаваемой в замкнутой электрической цепи к элементам нагревателей, чтобы превратиться там в теплоту, создать полезный эффект, а потом — необратимо рассеяться в окружающей среде. Так замкнется цепочка превращений энергии: от скрытой в нефти химической энергии до тепловой энергии, «размазанной» в пространстве и уже неспособной к дальнейшим превращениям, а потому непригодной к использованию.

Электромагнитный момент генератора, как и у всех других электрических машин и аппаратов, — результат взаимодействия тока статора и тока ротора и пропорционален произведению их значений. Однако момент синхронной машины характеризуется одной особенностью: он зависит также от угла между направлениями магнитных потоков ротора и статора, который называют *углом нагрузки*. Момент изменяется так, как будто статор и ротор связаны между собой упругими растяжимыми нитями. На самом деле это магнитная индукция. Более точно, момент пропорционален синусу угла нагрузки. Совершенно такая же зависимость связывает восстанавливающую силу и угол отклонения физического маятника. Эта аналогия говорит о том, что ротор синхронной машины может колебаться относительно вращающегося поля статора.

Действительно, такие колебания возникают при изменениях нагрузки в электрической сети. Они проявляются в затухающих качаниях ротора с частотой и напряжением около некоторых средних значений и могут привести к нежелательным последствиям. Особенно опасны они при параллельной работе нескольких синхронных машин. Обеспечение устойчивой работы СЭС, быстрого затухания колебательных процессов — одна из важных проблем судовой электротехники.

Кроме рассмотренных затухающих колебаний частоты и напряжения в сетях переменного тока постоянно совершаются незатухающие колебания энергии с частотой 100 Гц. Энергия дважды за один период накапливается в реактивных элементах цепи и передается обратно в сеть. Реактивные элементы — индуктивности, емкости — и сами синхронные машины в особых режимах работы потребляют реактивную, кажущуюся мощность.

Реактивная мощность не требует дополнительного расхода топлива, не совершает работы и не превращается в тепло. Однако ее приходится учитывать при выборе сечения кабелей переменного тока, при определении «установочной мощности», паспортной мощности машин и аппаратов. Ведь все элементы цепи выбираются прежде всего по значению допустимого тока, которое определяет тепловыделение и установившийся в цепях температурный режим. Реактивный ток, переносящий реактивную мощность, нагревает обмотки и кабели так же, как и активный, совпадающий по фазе с напряжением. Поэтому наличие реактивной мощности ведет к увеличению массы и габаритов электрооборудования.

Отношение активной мощности, «производящей» работу (и тепло), к полной в цепях, содержащих только линейные элементы, пропорционально косинусу угла сдвига между напряжением и током, обозначаемому обычно греческой буквой φ . Поэтому проблема снижения реактивной мощности часто называется у электриков «проблемой $\cos \varphi$ ». Для того чтобы определить, о какой мощности идет речь, в электротехнике введены условные единицы измерения: активную мощность измеряют, как обычно, в киловаттах (кВт); когда говорят о полной мощности, употребляют киловольтамперы (кВ·А); для измерения реактивной мощности используют киловольтамперы реактивные (квар). Ниже приведены выражения для подсчета мгновенной мощности, где r — сопротивление, на котором рассеивается энергия, e — противоЭДС в проводнике, на который действует приложенная сила:

Активная мощность Вт:

рассеяния	$i^2 r$
электрохимическая	ie

Реактивная мощность. вар:

индуктивности	$Li \frac{\Delta i}{\Delta t}$
конденсатора	$Cu \frac{\Delta u}{\Delta t}$

Полная мощность, В·А ui

Вместо колеблющейся по значению мгновенной мощности электрики предпочитают оперировать постоянной величиной — средней мощностью за пери-

од Т. В нелинейных цепях, включающих, например, тиристоры или насыщающиеся ферромагнитопроводы, мгновенные значения токов и напряжений становятся несинусоидальными, и понятия разности фаз, а также угла φ теряют смысл. На рис. 8 показаны кривые тока i , напряжения u и мгновенной мощности в активно-индуктивной цепи с тиристором.

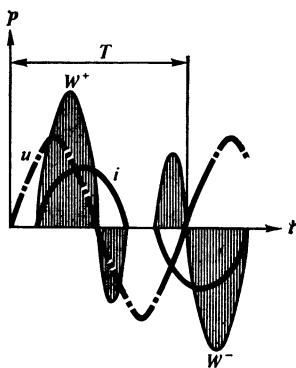


Рис. 8.

Средняя активная мощность P_a в этой и более сложных схемах может быть подсчитана по общей формуле

$$P_a = 1/T (W^+ + W^-),$$

где W^+ и W^- — площади участков между кривой мгновенной мощности и осью абсцисс, на которых мгновенная мощность положительна и отрицательна соответственно.

В заключение приведем выражения, определяющие силу, действующую на прямолинейный проводник длиной l , и ЭДС, наведенную в нем, если этот проводник движется со скоростью v в однородном магнитном поле с индукцией B (Тл) перпендикулярно силовым линиям индукции. Все величины в этих

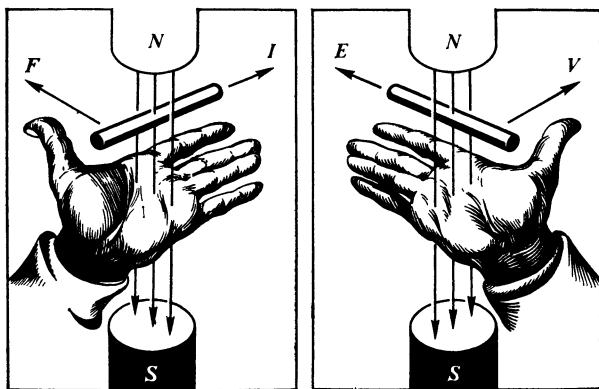


Рис. 9.

формулах должны быть выражены в единицах СИ:

$$F = IBl; \quad E = -Blv.$$

Направление ЭДС определяется правилом правой руки, а направление электромагнитной силы — правилом левой руки. Силовые линии входят в ладонь, как показано на рис. 9.

ГДЕ НА КОРАБЛЕ РОЖДАЕТСЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ

Если обойти все помещения судна, то и при самом внимательном осмотре мы не обнаружим «кладовки», где хранились бы запасы электрической энергии. Можно увидеть большие резервуары — танки, в которых находятся запасы питьевой воды для экипажа и технической для паровых котлов, танки с мазутом, используемым как топливо в паровых котлах, танки с соляром — топливом для двигателей внутреннего сгорания. Однако помещения судна освещены электрическими лампочками, из машинного отделения слышен гул работающих электрических моторов, с мостика сигнальщик подает прожектором сигналы другому кораблю, а в кают-компании свободные от вахты члены экипажа смотрят телевизионную передачу. Электричество на судне есть. Но где оно хранится?

Вспомним школьный курс физики. Электрический ток есть упорядоченное движение зарядов (свободных электронов металлического проводника) под действием разности потенциалов, которая создается источником электрического тока. Предположим, что мы сумели создать на концах проводника разность потенциалов, например, «сняли» с левого конца проводника некоторое количество свободных электронов (затратив некоторое количество энергии на эту операцию) и «перенесли» их (опять необходима энергия) на правый конец проводника. Тогда между слоями зарядов внутри проводника возникнет электрическое поле. На каждый электрон будет действовать сила, «толкающая» его к положительному концу, поэтому все электроны начнут движение справа налево, и в проводнике потечет электрический ток.

Что будет дальше? Электроны нейтрализуют положительный заряд, разность потенциалов исчезнет и ток прекратится. Следовательно, для получения постоянного, не прерывающегося тока в проводнике требуется все время поддерживать разность потенциалов на концах проводника, для чего необходимо затрачивать энергию.

Таким образом, для создания тока в электрической цепи необходимо подсоединить к ней устройство, которое за счет непрерывно подводимой энергии создавало бы и поддерживало на ее зажимах заданную разность потенциалов. Такими устройствами могут быть гальванические элементы и аккумуляторы, в которых разность потенциалов создается за счет химической энергии веществ, а также электромеханические преобразователи — в них за счет механической энергии вращения на зажимах генератора индуцируется ЭДС, определяющая разность потенциалов.

В машинном отделении судна находятся генераторные агрегаты, обеспечивающие электрической энергией большое количество самых разнообразных потребителей. Электрическая энергия подается генератором в судовую сеть только в том случае, если генератор работает (т. е. в нашем случае вращается).

А откуда берется необходимая механическая энергия, почему работает (вращается) генератор? Генераторный агрегат состоит из двух жестко соединенных между собой самостоятельных блоков — генератора и первичного двигателя. Именно первичный двигатель приводит во вращение генератор, именно его механическая энергия преобразуется генератором в энергию электрическую.

Чтобы понять, как работает первичный двигатель, напомним принцип работы паровой турбины. Топливо и окислитель, которым служит воздух, непрерывно поступают в топку парового котла. В качестве топлива используют мазут, хранящийся в танках в междудонном пространстве. За счет тепла, образующегося в результате сжигания топлива в паровом котле, вода превращается в пар с давлением более 10 МПа и температурой около 550 °С. Водяной пар поступает в паровую турбину, где тепловая энергия рабочего тела — водяного пара — преобразуется в механическую.

Водяной пар при выходе из парового котла обладает высокими давлением и температурой. Попадая в сопла турбины — металлические каналы,— поток пара разгоняется до больших, иногда сверхзвуковых скоростей. Струя пара непрерывно вырывается из сопла и толкает рабочие лопатки турбины, которые укреплены на диске, жестко связанном с валом. Вал турбины начинает вращаться с частотой порядка 10 000 об/мин. Для понижения частоты вращения до 1500 об/мин между валом турбины и генератором ставится редуктор, представляющий систему из двух или более шестерен с разным количеством зубцов. После паровой турбины водяной пар, имея более низкие, чем на входе давление и температуру, поступает в конденсатор. В нем под действием охлаждающей воды, прокачиваемой через конденсатор специальным насосом, пар превращается в воду, поступающую обратно в паровой котел через питательный насос. Цикл повторяется.

Следует отметить, что охлаждающей воды должно быть в десятки раз больше, чем конденсируемого пара. В этом легко убедиться, сделав простой расчет: для превращения 1 кг водяного пара в воду от него, как минимум, должно быть отведено тепло, равное скрытой теплоте парообразования. Эта величина составляет около 600 ккал/кг. В то же время 1 кг охлаждающей воды может быть нагрет в конденсаторе примерно на 10°C.

Таким образом, на 1 кг конденсируемого пара требуется около 60 кг охлаждающей воды. Для ее подачи необходима энергия (в виде электрической), которая поступает от генератора в электрические двигатели, вращающие насосы охлаждающей воды. Тем самым уменьшается величина полезной электрической энергии генератора, которую он может дать судовым потребителям.

В результате затрат энергии на собственные нужды и различного рода потерь КПД паровых турбин достигает не более 40 %. Итак, только 40 % начальной (от сгоревшего топлива) тепловой энергии превратились в электрическую, а 60 % безвозвратно теряются. В результате можно определить потребность в топливе. Его запасы на океанском судне велики и могут составлять сотни и даже тысячи тонн.

Паровая турбина имеет большое количество устройств и механизмов, обеспечивающих ее работу: паровые котлы, разнообразные насосы, конденсатор, вентиляторы. Кроме того, для ввода паровой турбины в действие требуется длительное время (несколько часов), а это далеко не всегда удобно и выгодно.

Для устранения этих недостатков изобретены и используются другие конструкции первичного двигателя, например, газовая турбина, рабочим телом которой являются продукты сгорания, поступающие непосредственно из топки (камеры сгорания) в сопла газовой турбины. В этой установке отсутствуют паровой котел, конденсатор и другие элементы, характерные для паровой турбины. В двигателе внутреннего сгорания (например, дизеле) камера сгорания совмещена с пространством, где тепловая энергия продуктов сгорания преобразуется в механическую энергию поступательного движения поршня. Стало возможным уменьшить время, необходимое на запуск двигателя внутреннего сгорания. Благодаря этому двигатели внутреннего сгорания по сравнению с другими первичными двигателями получили наиболее широкое применение в судовых электроэнергетических установках.

Таким образом, в судовых условиях электрическая энергия получается преобразованием химической энергии топлива в тепловую, тепловой — в механическую и, наконец, в электрическую (с помощью генератора).

Количество топлива на судне, конечно, ограничено и определяется его типом и водоизмещением. Для судовых электротехников всегда было важно получить из одного и того же количества топлива как можно большее количество электрической энергии. Каким образом уменьшить потери, возникающие в генераторных агрегатах?

Повысить КПД всех тепловых первичных двигателей можно увеличением начальной температуры рабочего тела (водяного пара в паровой турбине, продуктов сгорания в газовой турбине и двигателе внутреннего сгорания) до 1000—1500 °С. Чтобы это осуществить, необходимо располагать конструкционными материалами (прежде всего металлами), которые могли бы длительно и надежно работать при высокой температуре и больших механических нагруз-

ках в рабочих лопатках паровых и газовых турбин, в поршнях двигателей внутреннего сгорания. Однако такие материалы только начинают разрабатываться. Другим способом повышения КПД является устранение ненужных для конечной цели преобразований энергии. Действительно, зачем нужен преобразователь тепловой энергии в механическую, затем механической в электрическую? В каждом преобразователе происходит потеря энергии, а значит, неразумная трата энергии топлива. Известны ли способы преобразования химической энергии топлива в электрическую по более сокращенному пути?

Да, известны, и давно. Например, магнитогазодинамический способ основан на прямом преобразовании тепловой энергии в электрическую. В результате сжигания топлива в камере сгорания получают продукты сгорания с температурой не ниже 2500°C . При такой температуре происходит термическая ионизация молекул газа (в атомах от ядер «отрываются» электроны): газообразное вещество переходит в плазменное состояние, продукты сгорания становятся электропроводными. Чем выше температура, тем больше степень ионизации газа и, следовательно, его электропроводность. При температуре $10\,000^{\circ}\text{C}$ газ ионизируется полностью — состоит из свободных электронов и ядер атомов. Для того чтобы плазма, полученная из продуктов сгорания, имела достаточную электропроводность при температуре 2500°C , к ней добавляют легко ионизирующееся вещество (натрий, калий, цезий). Пары этих веществ ионизируются при более низких температурах, обеспечивая требуемую величину электропроводности плазмы.

Плазма поступает в канал магнитогазодинамического генератора (МГД-генератора), где расширяется (рис. 10) и за счет уменьшения тепловой энергии разгоняется до скорости, близкой к звуковой. Протекая по каналу, плазма пересекает силовые линии магнитного поля, создаваемого системой возбуждения. Если направление движения потока плазмы перпендикулярно силовым линиям магнитного поля, а электропроводность плазмы, скорость потока и индукция магнитного поля достаточно велики, то в соответствии с законом электромагнитной индукции в проводнике (роль которого выполняет движущаяся плазма) возникнет ЭДС, а при замыкании электродов МГД-

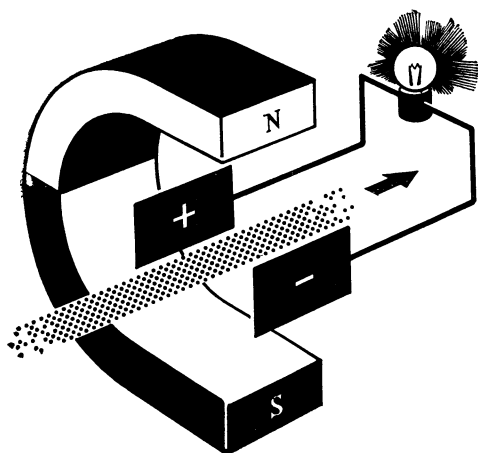


Рис. 10.

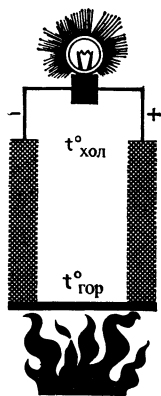


Рис. 11.

генератора на внешнюю нагрузку в образованной электрической цепи потечет ток.

Принцип работы МГД-генератора аналогичен принципу работы электромеханического генератора. В обоих случаях проводник пересекает силовые линии магнитного поля, в результате чего в проводнике индуцируется ЭДС. В электромеханическом генераторе проводниками являются обмотки якоря, а в МГД-генераторе — поток плазмы.

В чем преимущества МГД-генератора? Отсутствие каких-либо вращающихся или подвижных частей позволяет ему работать при высоких температурах рабочего тела, благодаря чему получают повышенный КПД.

Другой способ преобразования тепловой энергии в электрическую — термоэлектрический. Работа термоэлектрического генератора (ТЭГ) основана на хорошо известном в физике эффекте Зеебека, который заключается в том, что в электрической цепи, состоящей из различных электропроводных материалов, при условии, что контакты или спаи (рис. 11) между ними имеют различную температуру, возникнет ЭДС и при замыкании цепи в ней потечет ток. ЭДС на выходе ТЭГ будет пропорциональна разности температур на горячем и холодном спаях, также она зависит от термоэлектрических свойств использованных материалов. Обычно материалом для ТЭГ

служат проводники n — p -типов. ТЭГ является генератором постоянного тока.

Из принципа работы ТЭГ видно, что он представляет собой преобразователь тепловой энергии в электрическую и его конструкция также не содержит вращающихся частей.

ТЭГ могут работать на тепловой энергии, получаемой различными способами от сжигания органического топлива, от радиоизотопных источников, ядерных реакторов. Их применяют для утилизации тепловой энергии других тепловых источников: паровых турбин, двигателей внутреннего сгорания, МГД-генераторов. Наша страна была пионером в разработке ядерных ТЭГ, в которых тепловая энергия ядерной реакции подводится непосредственно к горячим спаям. В 1964 г.— впервые в мире! — в СССР заработал ядерный ТЭГ. В настоящее время ТЭГ используют в электроэнергетических установках, от которых требуются сравнительно небольшие мощности.

Если какое-либо твердое вещество, например металл, поместить в вакуум, то некоторое количество электронов металла «перейдет» в вакуум. Это явление называется *термоэлектронной эмиссией*, а твердое тело, испускающее электроны — *эмиттером*. Эмиссия электронов зависит от температуры эмиттера. В процессе эмиссии электронов эмиттер охлаждается. В термоэмиссионном генераторе имеются два электрода: катод, к которому непрерывно подводится тепловая энергия, и анод, от которого тепловая энергия отводится. Благодаря термоэлектронной эмиссии катод заряжается положительно, а анод отрицательно. При замыкании катода и анода на внешнюю нагрузку по цепи потечет ток. Термоэмиссионный генератор является источником электрической энергии постоянного тока.

В рассмотренных источниках энергии одним из основных является цикл преобразования химической энергии топлива в тепловую. Однако существуют преобразователи, в которых названный цикл отсутствует. В этих преобразователях химическая энергия топлива, минуя промежуточные циклы, может превращаться непосредственно в электрическую. Такие преобразователи называют *электрохимическими источниками электрической энергии*. К ним относятся широко из-

вестные аккумуляторы и недавно разработанные электрохимические генераторы (ЭХГ). Каков принцип работы ЭХГ, каково его устройство?

Если, например, сжечь водород в атмосфере кислорода — образуется вода и выделится тепловая энергия, которую можно использовать в тепловых двигателях. Но можно пойти и другим путем, как это делают в ЭХГ, разделить реакцию горения водорода на два процесса, протекающие на разных электродах.

Схема ЭХГ представлена на рис. 12. Он состоит из двух электродов, на один из которых подается водород, на другой — кислород. Имеется и электролит — для обеспечения ионной проводимости. Существенным отличием ЭХГ от аккумулятора является то, что запас топлива и окислителя в ЭХГ (в данном случае водорода и кислорода) непрерывно пополняется.

Водород, попадая на металлический электрод и находясь на границе раздела трех фаз — твердого электрода, электролита и газовой фазы, переходит в атомарное состояние (его двухатомная молекула разделяется на атомы), а атомы «поставляют» свободные электроны и ядра (ионы). Электроны уходят в металл, а ядра атомов — в раствор (электролит). В результате такого процесса электрод насыщается отрицательно заряженными электронами, а электролит — положительными ионами.

Аналогичный процесс происходит на втором электроде, к которому подается кислород. В результате происходящих у поверхности электрода процессов на нем появляются положительные электрические заряды. Образующиеся в процессе электрохимической реакции отрицательно заряженные ионы OH^- остаются в электролите, и, соединяясь с ионами водорода, образуют воду. Если подключить к электродам цепь нагрузки, то в ней потечет ток. Электрохимические генераторы являются источниками электриче-

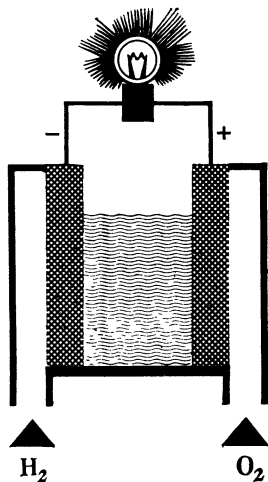


Рис. 12.

ской энергии постоянного тока и имеют высокий КПД (60—70 %). Практическое использование ЭХГ в судовой электротехнике требует решения ряда сложных технических проблем. К ним относятся: получение высоких скоростей протекания электрохимических процессов, создание электродов, имеющих как можно большую поверхность, возможность использования дешевых видов топлива. По-видимому, ЭХГ — источники электрической энергии ближайшего будущего.

КТО ПОТРЕБЛЯЕТ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ

На всех судах необходима электроэнергия для привода средств обслуживания главного двигателя (его охлаждения, смазки, подачи топлива, вентиляции и т. п.), погрузочно-разгрузочных работ (краны, лебедки). Энергия нужна для управления движением судна (рулевое устройство, навигационное оборудование, радиооборудование и связь), обеспечения безопасности судна и экипажа (пожарные и водоотливные системы и т. д.) и нормальных бытовых условий экипажа (освещение, вентиляция, холодильные установки, камбузы, подача горячей и холодной воды в каюты и т. д.). Существуют и специальные электроприводы. Рыболовные суда «несут на себе» рыбообрабатывающие заводы, мощные холодильные установки и специальные траловые лебедки, танкеры имеют мощные погрузочно-разгрузочные насосы, суда ледокольного флота — подруливающие устройства, креновые системы.

Тип, назначение и водоизмещение судна определяют количество, мощность и конкретную конструкцию потребителей электроэнергии.

Размещение механизмов на открытых палубах, в машинно-котельных отделениях, воздействие на них качки, вибраций, агрессивных сред (соленая вода, пары масла, топлива), различных температур (от 60°С в машинном отделении или на палубе при плавании в тропиках до —60°С при плавании в Арктике) — все должно учитываться при создании судовых электроприводов. Поэтому судовые электродвигатели выполняют в различных вариантах (исполнении): брызгозащищенные, водозащищенные, водонепроницаемые, погружные, взрывобезопасные.



Рис. 13.

Различное назначение приводов обуславливает режим их работы. Насосы, обслуживающие главный двигатель, и вентиляторы, как правило, работают в длительном режиме. Шпили, брашпили, швартовые и шлюпочные лебедки, валоповоротное устройство— в кратковременном (30 мин и менее).

В повторно-кратковременном режиме работают грузовые лебедки и краны, холодильники провизионных камер, буксирные лебедки, некоторые насосы.

На рис. 13 дана условная классификация судовых механизмов и устройств. Основные типы электродвигателей, применяемых на судах, показаны на рис. 14.

Сначала в приводах судовых механизмов и устройств использовались надежные, с хорошими возможностями регулировки частоты вращения паровые машины. Но к каждому механизму необходимо было тянуть паропровод, рассчитанный на температуру 200—300 °С и давление до 1—2 МПа. Расход пара на вспомогательные механизмы составлял 10—20 %,

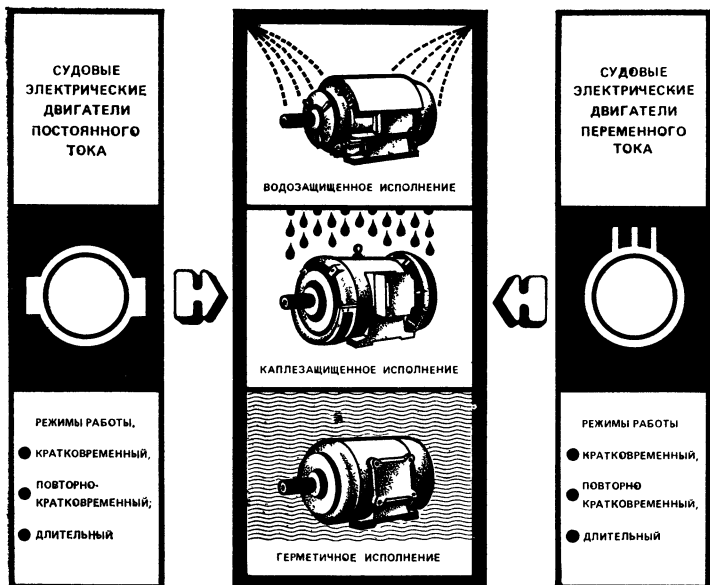


Рис. 14.

а при некоторых режимах и до 30 % расхода пара на главные машины. Поэтому, несмотря на двойное преобразование энергии (механической в электрическую и электрической в механическую) после транспортировки к месту потребления, внедрение электропривода дало значительный экономический эффект.

Естественно, что высокие требования к надежности судового электропривода затрудняли внедрение его на судах. Так, например, выход из строя электропривода рулевого устройства при плавании в узкостях или задержка снятия с якоря при начинающемся шторме грозят судну серьезной аварией; остановка масляного насоса и прекращение подачи смазки могут вызвать повреждение главной машины с самыми тяжкими последствиями.

Неоспоримыми преимуществами судового электропривода являются: удобство передачи и распределения энергии, отсутствие громоздких трубопроводов, готовность к немедленному действию, простота и удобство пуска, возможность дистанционного управления, автоматизации пуска и управления работой

в зависимости от условий, в которых находится судно. Все это дает возможность сократить обслуживающий персонал. Численность экипажа торгового судна 50—60 лет назад составляла 60—80 чел., а в настоящее время на автоматизированных судах — 26—30 чел. Проектируются суда с численностью экипажа 12—16 чел.

Применение электропривода, относительная простота транспортировки электроэнергии позволили распределить судовые потребители этой энергии по всем помещениям, т. е. рационально использовать весь объем судна. Количество потребителей электроэнергии на судах достигает нескольких тысяч единиц. Наибольшее число потребителей электроэнергии (80—90 %) составляют электродвигатели — преобразователи электрической энергии в механическую. Остальная часть потребителей — преобразователи электрической энергии в тепловую: камбуз (плиты, нагревательные устройства), а также осветительные приборы.

Почему десятки лет постоянный ток на судах не уступал место более экономичному переменному току?

Если в начальный период внедрения электропривода на судах безоговорочное преимущество имел постоянный ток, то в 50—60-х гг. благодаря повышению надежности и расширению номенклатуры электродвигателей и средств регулирования частоты вращения началось широкое внедрение переменного тока. Тем не менее специалисты при разработке схем электропитания стремились сохранить и использовать лучшие качества электроприводов постоянного тока.

Постоянный ток имеет ряд преимуществ над переменным. Основное из них, которое и сдерживало внедрение переменного тока на судах, — возможность плавного регулирования частоты вращения двигателя. Такое регулирование необходимо палубным механизмам: шпилям, брашпилям, грузовым устройствам. Но и недостатки постоянного тока весомы: повышенная стоимость эксплуатации по сравнению с переменным током и меньшая надежность электродвигателей из-за коллектора и щеточного устройства. Применение постоянного тока повышает пожароопасность, так как электрическая дуга, возникающая при коммутации

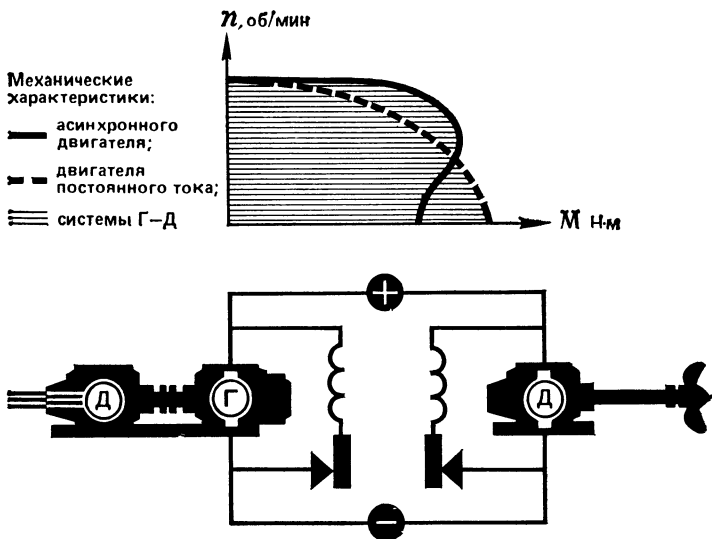


Рис. 15.

постоянного тока, весьма устойчива. Но главное в том, что напряжение постоянного тока сложно преобразовать.

Все это предопределило широкое внедрение на судах переменного тока. Переменный ток легко трансформируется, обеспечивая нужное напряжение, электроприводы (асинхронные двигатели) достаточно надежны и не требуют трудоемкого обслуживания.

Но на судах с электростанцией переменного тока для отдельных мощных потребителей, когда требуется плавное регулирование частоты вращения, иногда создавались устройства, работающие по схеме генератор — двигатель (Г — Д). Устанавливался отдельный генератор постоянного тока с приводом двигателя переменного тока (рис. 15).

Регулирование частоты вращения двигателя постоянного тока происходит за счет изменения возбуждения генератора, т. е. напряжения двигателя постоянного тока, что приводит к изменению его вращающего момента. Регулирование возможно во всем диапазоне частоты вращения, и сколь угодно плавно. Основной недостаток такой системы — необходимость в двух дополнительных машинах, а это — «лишняя» масса, увеличение габаритных размеров и стоимости.

С появлением полупроводниковой техники — управляемых (тиристоры) и неуправляемых (диоды) выпрямительных устройств — стало возможным от судовой электростанции переменного тока (СЭС) получать с незначи-

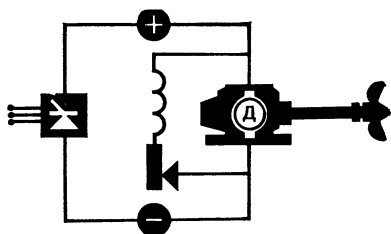


Рис. 16.

тельными потерями постоянный ток. Схема такого преобразования показана на рис. 16.

Дальнейшее совершенствование управляемых тиристорных преобразователей позволило при наличии СЭС трехфазного переменного тока частотой 50 Гц на электродвигатели переменного тока подавать напряжение с плавно изменяющейся частотой и за счет этого плавно регулировать их частоту вращения.

Асинхронные двигатели переменного тока обычно считают двигателями с практически постоянной угловой скоростью, так как они работают от источника переменного тока постоянной частоты. Скорость вращения асинхронного двигателя пропорциональна частоте приложенного к статору напряжения, а вращающий момент зависит от магнитного потока статора. Таким образом, путем регулирования частоты и амплитуды приложенного к статору напряжения в таком соотношении, чтобы поддержать постоянным номинальный магнитный поток, можно обеспечить регулировку частоты вращения двигателя практически от нуля до номинальной при любом моменте сопротивления.

Характеристики привода такого типа идентичны внешним характеристикам двигателя постоянного тока в схеме Г — Д.

Схема частотного преобразователя с асинхронным электродвигателем приведена на рис. 17.

Однако, как это всегда бывает в технике, решение одного вопроса — лишь постановка ряда новых задач.

Тиристорные преобразователи искажают форму кривой напряжения и вызывают появление высших гармоник в сети, которые создают помехи работе радиооборудования и систем автоматики, а также

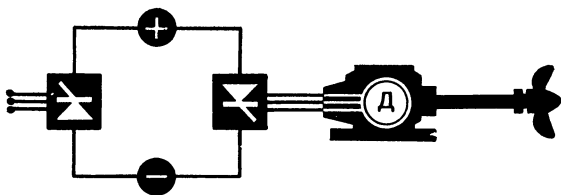


Рис. 17.

вызывают дополнительный нагрев электрооборудования. Поэтому величина искажения синусоидального напряжения регламентируется. Она зависит от соотношения мощностей генератора и преобразователей, а также от величин их углов открытия. С целью снижения искажений в СЭС устанавливают различного рода фильтры, поглощающие высшие гармоники.

Асинхронные двигатели, обладая индуктивностью, потребляют большую реактивную мощность и реактивный ток, что снижает $\cos \varphi$ судовой сети. Для поддержания $\cos \varphi$ не ниже 0,8 принимают специальные меры.

Одним из путей снижения массы и габаритов судового электропривода является повышение частоты и напряжения питающей сети. Применение повышенного напряжения уменьшает массу меди в электрооборудовании за счет снижения значения тока, но увеличивает массу и объем изоляции. Повышение частоты напряжения сети до 400 Гц увеличивает частоту вращения электродвигателя в соответствии с выражением

$$n = 60f/p.$$

Здесь n — частота вращения электродвигателя; f — частота изменения напряжения, подведенного к электродвигателю; p — число пар полюсов; 60 — число секунд в минуте. Максимальная частота вращения электродвигателя при этом может достигать 24 000 об/мин, что позволяет уменьшить в 2,5—3,5 раза массу и габаритные размеры генераторов и электродвигателей.

При повышенной частоте вращения необходимы материалы, способные длительное время выдерживать значительные перегрузки. Снижение частоты вращения с помощью редуктора не уменьшает общую массу оборудования.

Если увеличение напряжения сети пожароопасно, то повышение частоты тока в сети, наоборот, способствует электробезопасности. Использование повышенной частоты напряжения в сети и тиристорных преобразователей является перспективным направлением в развитии судового электрооборудования.

КАК ПЕРЕДАВАТЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ И КАК УПРАВЛЯТЬ ЕЮ

Для экономичной работы судовой электростанции необходимо, чтобы генераторные агрегаты были всегда загружены не менее чем на 80—90 % номинальной мощности. Учтем, что потребление электроэнергии в различных режимах работы судна меняется, поэтому такая загрузка агрегатов может быть достигнута путем дробления мощностей СЭЭС, т. е. обеспечения заданной мощности СЭЭС несколькими генераторами.

Условно состояние судна, а, следовательно, и работу электростанции можно разделить на следующие режимы: ходовой, маневренный, аварийный, стоянка с погрузкой или без погрузки. Для рыбопромысловых судов дополнительно можно ввести режим работы на промысле, для ледоколов — ход во льдах и т. д.

Режим работы судовой электростанции меняется в зависимости от «спроса» на электроэнергию со стороны потребителей. Так, например, при стоянке судна работают некоторые бытовые насосы, камбуз, освещение, частично — вентиляция. Потребление энергии минимальное. При стоянке судна с погрузкой работают еще и грузовые средства — краны, лебедки. В ходовом режиме «спрос» на электроэнергию еще более возрастает и для его обеспечения необходимо генераторные агрегаты включать на параллельную работу.

Таким образом, с учетом требований экономичной работы во всех режимах на судне должно быть установлено несколько агрегатов — источников электроэнергии.

Как с минимальными потерями и высокой надежностью выработать, передать и распределить электроэнергию для всех потребителей судна? Задача непростая, если учесть большое число потребителей, часть из которых требует практически непрерывного

питания электроэнергией даже в аварийных режимах (рулевое устройство, навигационное оборудование, система управления атомным реактором и т. д.), поддержания стабильного напряжения и частоты (качество электроэнергии) во всех режимах работы электростанции.

При решении поставленной задачи следует также учитывать ограниченные объемы судна и значительные мощности источников электроэнергии. Мощность судовых электростанций в настоящее время достигает 10—15 МВт. Этого достаточно для снабжения электроэнергией города с населением 50—70 тыс. чел. Задача усложняется еще и тем, что защитно-коммутационная аппаратура на судах не позволяет принимать на шины электростанции мощность более 3000 кВт при напряжении 400 В, так как при возможных аварийных режимах (например, короткое замыкание на шинах) динамические усилия, возникающие в этих аппаратах, превышают допустимые.

При разработке судовой электростанции учитывается необходимость обеспечения параллельной работы 4—6 генераторных агрегатов. Появляются дополнительные системы регулирования и автоматики, увеличивается число элементов СЭС, что снижает ее надежность.

На судах различают вспомогательные и единые СЭС. Из самого названия видно, что единые судовые электростанции, в отличие от вспомогательных, обеспечивают электроэнергией не только вспомогательные устройства и механизмы, но и основные — например, гребную установку. Структура СЭС показана на рис. 18.

Можно заметить, что ряд потребителей получает питание по отдельным фидерам, некоторые — от распределительных щитов, а часть получает питание от двух источников: с главного распределительного щита *ГРЩ* и аварийного распределительного щита *АРЩ*.

Естественно, что питание потребителей по отдельным фидерам повышает надежность снабжения потребителей электроэнергией, а питание через *РЩ*, наоборот, ее уменьшает. Однако расход кабеля в первом случае значительно возрастает по сравнению со вторым. Практически на судах применяют питание электропотребителей как по первой схеме (фидер-

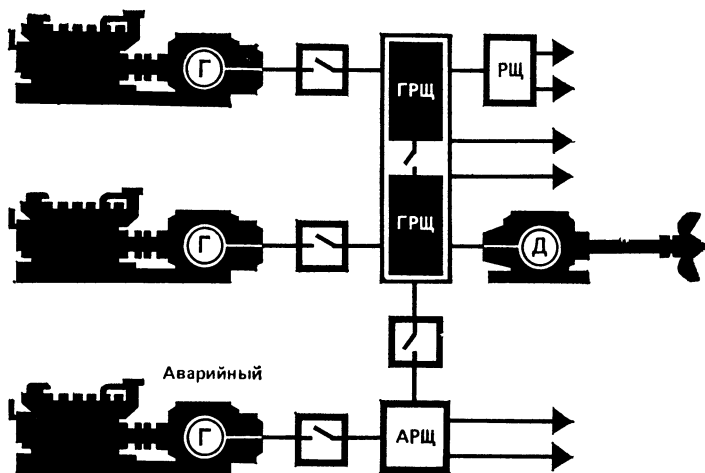


Рис. 18

ная система), так и по второй (кольцевая), или же пользуются их комбинацией.

Таким образом, конструктор СЭС в этом случае решает противоречивые задачи.

Для увеличения надежности снабжения потребителей электроэнергией шины ГРЩ секционируют на случай возможного выхода части ГРЩ из строя. В нормальных эксплуатационных режимах АРЩ получает питание от ГРЩ. И только в случае исчезновения напряжения на ГРЩ автоматика отключает между щитами связи перемычки, запускает аварийный дизель-генератор (АДГ) и через 30 с аварийный щит готов принять нагрузку. На судовых электростанциях большой мощности, чтобы избежать разрушения коммутационной аппаратуры в аварийных режимах, приходится усложнять структуру СЭС. Так, схема СЭС мощностью 8000 кВт плавбазы «Восток», представленная на рис. 19, состоит из четырех генераторов Г по 1500 кВт и двух генераторов по 1000 кВт.

Работа трех и четырех генераторов на общие шины предусмотрена только через длинные кабельные перемычки. Такие перемычки, естественно, вносят дополнительное сопротивление, а, следовательно, и потери активной мощности, но зато ограничивают

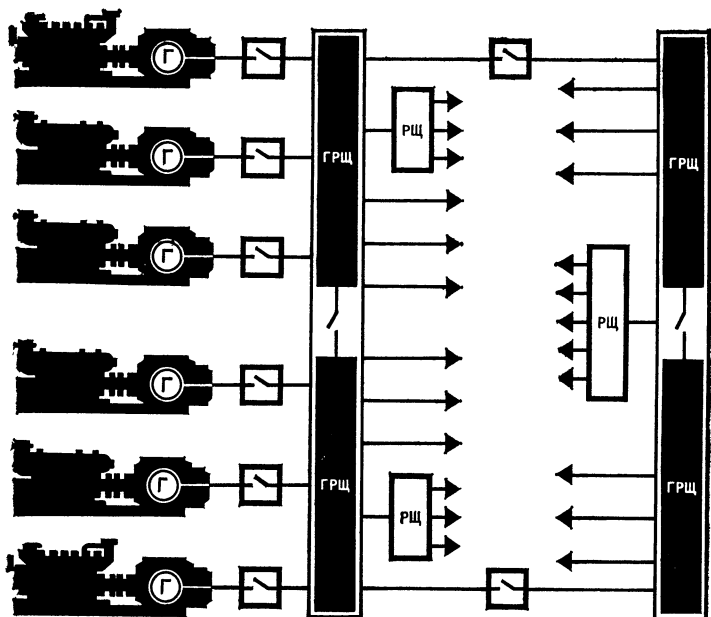


Рис. 19.

тока короткого замыкания (КЗ) до допустимого значения.

С целью ограничения токов КЗ применяют также специальные токоограничивающие реакторы, которые практически не увеличивают потери активной мощности, но значительно уменьшают токи КЗ.

Как известно, КПД главного двигателя не превышает 40—45%. В целях увеличения экономичности, снижения расхода топлива, повышения КПД всей энергетической установки стараются сделать так, чтобы утилизировать хотя бы часть из 55—60% энергии, «выбрасываемой» за борт. Для этого создают утилизационные котлы, которые работают на энергии выхлопных газов главного двигателя. Температура выхлопных газов составляет 350—400°C. Пар, получаемый в таких утилизационных котлах, подают в турбину, которая в свою очередь вращает генератор.

Чтобы обеспечить полную загрузку главного двигателя во всех режимах работы судна (при этом, как правило, достигается его наивысший КПД), главный

двигатель вращает не только гребной винт, но и вспомогательный генератор для питания электроприводов (СЭС собственных нужд). Такими валогенераторами обычно обеспечиваются рыбопромысловые суда, при работе на промысле движение с тралом не требует от гребной установки полной мощности.

Поскольку режим главного двигателя изменяется (при волнении моря и изменении хода судна), а частота тока СЭС должна быть постоянной, используются различные варианты гребного привода: винт регулируемого шага (ВРШ), муфты с переменным передаточным отношением и др.

Как же управлять «рекой» электрической энергии, направлять ее ко всем потребителям, во все точки судна, да еще и во всех возможных режимах, в том числе и аварийных?

В первую очередь необходимо позаботиться о качестве электроэнергии, т. е. о постоянстве значений частоты и напряжения. На судовых электростанциях это требование выполнить сложнее, чем на береговых, — судовые потребители электроэнергии соизмеримы по мощности с источниками электроэнергии. При пуске таких мощных потребителей резко возрастают ток и потребляемая мощность, происходит уменьшение напряжения и частоты генератора. Поэтому, если не подать в первичный двигатель дополнительное количество энергоносителя и не увеличить ток возбуждения в генераторе, то отклонения частоты и напряжения от своих номинальных значений могут вызвать уменьшение частоты вращения у всех электродвигателей. При неизменном моменте сопротивления на валу электродвигателя ток двигателя увеличится, а напряжение и частота в сети еще более уменьшатся. Произойдет, как говорят специалисты, «опрокидывание» электростанции.

Для того чтобы частота и напряжение на шинах генераторов остались неизменными, используют большое количество регуляторов, которые обеспечивают заданную точность поддержания частоты и напряжения в статических и динамических режимах. Эти же регуляторы следят, чтобы участие в создании электроэнергии генераторными агрегатами было пропорционально их мощности, а загрузка была равномерной.

Для обеспечения электроэнергией потребителей во всех режимах, локализовать, не дать развиваться возможным аварийным ситуациям призваны различного вида защиты и системы автоматизации. Так, генераторный агрегат необходимо защитить: от перегрузки, короткого замыкания и перехода его в двигательный режим, когда агрегат начинает потреблять энергию от другого генератора, работающего параллельно с ним. Существует также ряд видов защит от различных повреждений внутри генераторов и первичного двигателя.

Специальные устройства сетей и потребителей должны не только обеспечить защиту от короткого замыкания и перегрузки, но и в сотые доли секунды выявить поврежденный участок.

Требования, предъявляемые к защите сетей и потребителей, настолько противоречивы, что выполнить их условия чрезвычайно тяжело. Защита сетей и потребителей должна быть селективна, надежна, с высоким быстродействием и чувствительностью. Для обеспечения селективности необходимо увеличивать чувствительность и быстродействие, но с их увеличением ухудшается надежность срабатывания защиты. Защиту можно настраивать на заданное время срабатывания автоматов защиты (рис. 20), заданное значение тока КЗ, или по обоим параметрам сразу.

Защита по времени срабатывания более надежна, имеет хорошую селективность, но длительный период собственного срабатывания (иногда до 1 с).

Токовая защита имеет хорошее быстродействие, но низкую надежность и селективность

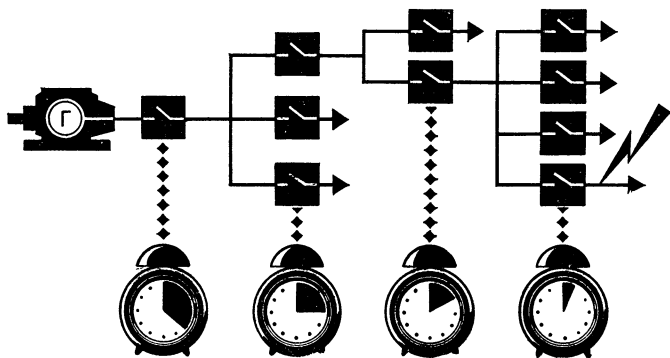


Рис. 20.

Защита и управление электрическими сетями и распределением электроэнергии производятся с помощью так называемых *селективных* и *установочных автоматов*, в которые встроены устройства для отключения автомата при перегрузках и коротких замыканиях.

Для обеспечения надежного снабжения электроэнергией используются сложные системы автоматического запуска резервного и аварийного дизель-генераторов, которые стали широко применяться начиная с 60-х гг.

Система автоматического запуска резервного генератора самостоятельно определяет необходимость запуска (либо остановки) генераторного агрегата, осуществляет автоматический пуск первичного двигателя по довольно сложному алгоритму, возбуждение генератора, подгонку значений частоты и напряжения, синхронизацию и прием нагрузки на генератор. При снижении нагрузки эта же система производит остановку агрегата, действуя в обратной последовательности. Система обычно включает в себя устройство измерения мощности, элемент сравнения с заданной установкой мощностью, устройства программного запуска первичного двигателя, автосинхронизатор с блоками подгонки частоты и напряжения, устройствами распределения активных и реактивных нагрузок.

За разработку и внедрение системы автоматизации такого типа под названием «Залив-М» группа судостроителей и разработчиков были удостоены Государственной премии СССР.

СЭС состоит из сотен различных элементов, поэтому нужны устройства звуковой и световой сигнализации о режиме работы и о появлении отказов. Необходимость быстро и точно найти неисправность в СЭС вызвала появление на судах систем диагностики.

Увеличение мощности СЭС и степени их автоматизации с использованием элементов управления на аналоговых элементах сдерживают автоматизацию энергетической установки из-за неприемлемо больших масс и объемов аналоговых систем, а также ограниченных технических возможностей по обработке информации в заданное время.

Пришла эра широкого внедрения на судах цифровых вычислительных машин (ЦВМ). Считают, что по

уровню судостроения страны можно судить об ее научном потенциале и техническом развитии. Что может быть интереснее, чем разрабатывать, создавать и «обучать» такие умные машины и устройства?

ЭЛЕКТРОДВИЖЕНИЕ СЕГОДНЯ И ЗАВТРА

13 сентября 1838 г. 11 пассажиров плыли по Неве в гребном боте. Но гребцов в нем не было. Скорость бота была невелика — 4,4 км/час. Это короткое плавание стало событием в истории техники, потому что впервые в мире силу упора создавал гребной электродвигатель постоянного тока мощностью примерно 550 Вт. Таким образом, электродвигатели начали использовать на судах 150 лет назад, на заре электротехники, задолго до того, как электрические машины пришли на промышленные предприятия.

С момента появления двигателей, преобразующих тепло в механическую энергию, и применения их для движения судна, постоянно возникает вопрос: как более экономично и целесообразно передать энергию на движитель (например, винт) с учетом типа и назначения судна, условий его плавания и других факторов.

Создатели судов всегда стремились создать такую механическую установку, которая по возможности позволила бы совместить противоречивые требования: минимальные массу и габаритные размеры, значительную мощность, большой моторесурс, плавную регулировку частоты вращения винта, надежный, простой первичный двигатель и т. д.

В ряде случаев это совмещение достигается применением электродвигателя в качестве гребной машины. Если судно оборудовано гребной электрической установкой (ГЭУ), его называют *электроходом*. В ГЭУ несколько первичных двигателей (дизели, газовые или паровые турбины) вращают генераторы, мощность которых через шинопроводы или кабель передается одному или нескольким гребным электродвигателям. При этом как генераторы, так и двигатели могут соединяться между собой последовательно, параллельно, или последовательно-параллельно. Это повышает живучесть ГЭУ и ее экономичность.

Основные преимущества ГЭУ, несмотря на низкий КПД (из-за дополнительного цикла преобразования энергии) по сравнению с дизельными или турбинными гребными установками, состоят в возможности применения высокооборотных первичных двигателей с малыми габаритными размерами.

Для получения приемлемого КПД винта (обычно в пределах 0,5—0,73) требуются низкие скорости вращения, так как в этом случае уменьшается скольжение винта, хотя уменьшение частоты вращения и вызывает увеличение диаметра и шага винта. Снижение скорости ведет к увеличению массогабаритных характеристик первичного двигателя, а следовательно, и объема машинного отделения. Так, например, при номинальной частоте вращения первичного двигателя (типа дизель) 125 об/мин его удельная масса составляет примерно 60 кг/кВт, а при 800 об/мин она уменьшается при одинаковых мощностях почти в 6 раз.

Повышение частоты вращения первичного двигателя — дизеля уменьшает его моторесурс. При использовании турбин моторесурс остается практически неизменным, независимо от их мощности. За счет повышения частоты вращения первичных двигателей, несмотря на двойное преобразование энергии — механической в электрическую и электрической обратно в механическую — и появления двух «лишних» машин, масса и стоимость ГЭУ могут оказаться более, чем на 25 % ниже массы и стоимости других вариантов гребных двигателей.

Одним из преимуществ ГЭУ является возможность применения нереверсивных первичных двигателей, что позволяет значительно упростить их конструкцию, отказаться от громоздких пусковых устройств баллонов сжатого воздуха, необходимых для торможения, остановки и реверса первичного двигателя типа дизель.

При изучении причин износа дизелей выявилось, что один реверс дизельного двигателя равнозначен по износу 16 ч работы при номинальной нагрузке. При швартовке в сложных условиях и движении во льдах количество реверсов может достигать нескольких десятков в час. В случае применения турбины в качестве гребного двигателя для реверса и обеспечения заднего хода кроме основной устанавливается

специальная турбина заднего хода, так как менять направление вращения турбины невозможно. Кроме того, при ГЭУ возможно применение высокооборотных машин без установки понижающих редукторов.

ГЭУ позволяет получить высокие маневренные качества за счет легкого реверса гребного двигателя. Поэтому ГЭУ наиболее целесообразно использовать на судах ледокольного типа и речных судах, где количество реверсов и изменений частоты вращения винта может достигать сотни в течение часа.

Живучесть ГЭУ повышается за счет нескольких первичных агрегатов и гребных электродвигателей. ГЭУ позволяет создать двух-, трех- и четырехвальную установку, что значительно повышает надежность всей установки. Это особенно важно на ледоколах большой мощности. При снижении скорости хода часть первичных агрегатов может быть остановлена, что повышает экономичность работы судна, так как все агрегаты будут работать при нагрузке, близкой к номинальной, т. е. в оптимальном режиме.

ГЭУ позволяет увеличить КПД гребного винта, вала и всей установки за счет поддержания оптимальной скорости вращения винта и уменьшить длину гребного вала. Кроме того, в случае заклинивания винта при плавании во льдах вероятность выхода из строя всей установки мала, так как наиболее уязвимое звено — первичный двигатель — остается защищенным от внезапной остановки.

При наличии ГЭУ питание судовых потребителей может осуществляться от единой судовой электростанции, что позволяет отказаться от двух отдельных СЭС. Несмотря на это, доля судов с гребными электрическими установками в мировом гражданском флоте невелика: всего 7 % от общего количества судов. Так получилось потому, что для транспортных и пассажирских судов, которые основную часть плавания проходят на полном ходу при постоянном курсе, система электродвижения сложнее и тяжелее, а главное — дороже, чем прямая передача первичный двигатель — гребной винт.

Но есть такие суда, для которых работа в море — непрерывная смена режимов, реверсы, маневрирование. Прежде всего, это, как мы уже говорили, ледоколы. Вперед, назад, самый полный, малый ход, а то и длительный упор корпусом в ледяное поле. Под вин-

том ледокола может оказаться не только вода, туда может затянуть ледяную глыбу, да так, что винт заклинит. Но и в этом случае на валу должен сохраняться необходимый момент, а остановка винта не должна вредно сказываться на двигателе.

Только гибкая, послушная электромеханическая система сможет удовлетворить всем разнородным требованиям, которые диктуют условия эксплуатации ледокола. Поэтому здесь электродвижение — «вне конкуренции».

Преимущества электродвижения важны и для судов, осваивающих минеральные ресурсы океана. Среди них 30 % — электроходы.

Если требуется высокая маневренность, т. е. обеспечение плавного регулирования частоты вращения в широком диапазоне и частых реверсов гребных винтов, то в этом случае применяют гребные электродвигатели постоянного тока, хотя это и повышает стоимость оборудования и его эксплуатации, а также несколько снижает надежность всей электромеханической установки.

В ГЭУ, где основным качеством является экономичность и не требуется высокая маневренность, используют электрические машины переменного тока — синхронные генераторы и электродвигатели.

Совместить достоинства ГЭУ постоянного и переменного тока позволяет применение единой судовой электростанции, в которой производится электроэнергия переменного тока, причем все потребители судна работают на переменном токе, а гребные электродвигатели и потребители, которые требуют плавной регулировки частоты вращения, получают питание через управляемый (или неуправляемый) выпрямитель. Классификация ГЭУ показана на рис. 21—22.

В ГЭУ постоянного тока (рис. 21) применяют схемы последовательного, параллельного, параллельно-последовательного соединений машин, схемы неизменного тока и др. Выбор определяется требованиями к регулировке частоты вращения, частоте реверса, поддержанию постоянства мощности генераторных агрегатов, автоматическому распределению мощности между потребителями и т. д.

В ГЭУ переменного тока (рис. 22) по сравнению с ГЭУ постоянного тока сложнее реверсировать гребной электродвигатель и плавно регулировать частоту

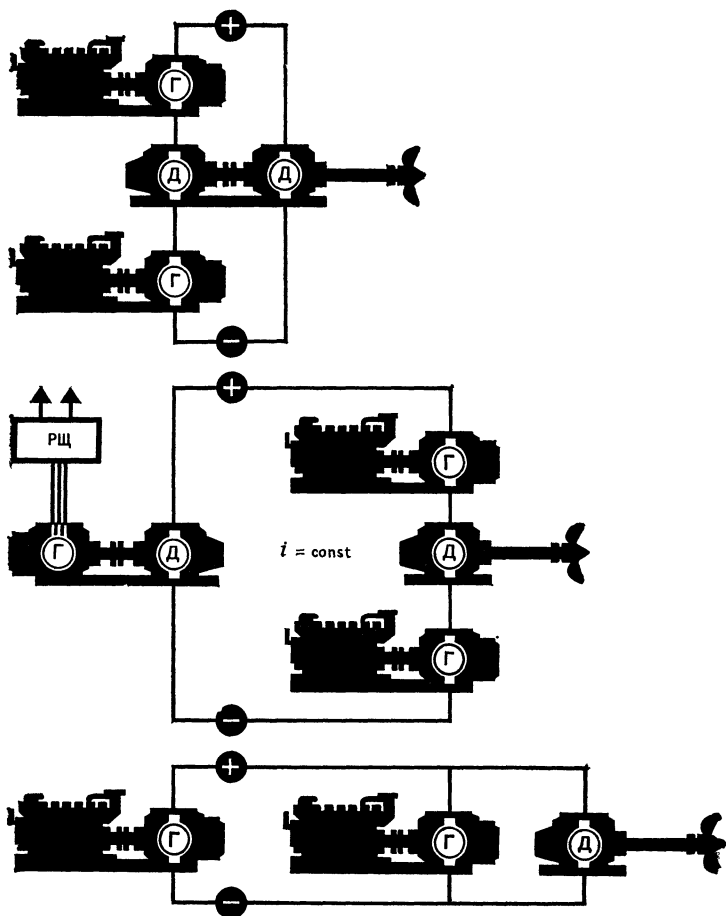


Рис. 21.

его вращения. Для реверса гребного электродвигателя применяется специальный переключатель, с помощью которого изменяют фазировку питания.

Регулирование частоты вращения в такой ГЭУ производится регулированием частоты напряжения в сети или изменением (переключением) числа пар полюсов в синхронном гребном электродвигателе, а также значения напряжения. В случае, когда невозможно регулировать частоту напряжения в сети (при единой электростанции), применяют гребной электродвигатель с фазным ротором.

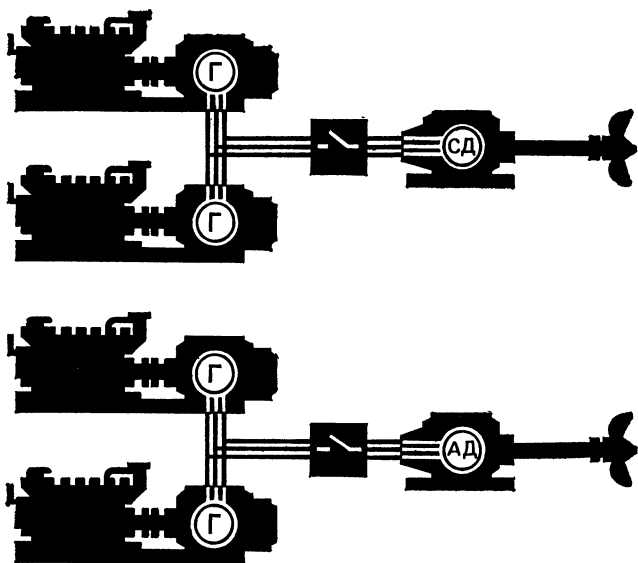


Рис. 22.

Мощность машин переменного тока может быть практически любой, но они тяжелее запускаются, хуже регулируются и имеют менее выгодные механические характеристики. Более тяжелые и сложные машины постоянного тока имеют почти идеальные пускорегулировочные свойства, но их мощность ограничена. Создать машину мощностью более 10 МВт не позволяет коллектор.

Судовая электротехника наметила два пути разрешения этих противоречий. Первый — создание статических преобразователей электроэнергии на замечательных кремниевых приборах — тиристорах. Маленький, размером не более теннисного мяча, тиристор способен коммутировать сотни киловатт.

Тиристор как бы открывает дверь электрическому току в ту ветвь цепи, в которой он установлен. Закрыть эту дверь управляющим импульсом уже нельзя, нужно, чтобы ток стал равен нулю, тогда тиристор закроется, восстановит свое сопротивление. Сегодня тиристор — кремниевый прибор. Но через несколько лет появятся арсенид-галлиевые тиристоры. Прибор на номинальный ток 1,25 кА и напряжение до 3,5 кВ будет в два раза меньше и дешевле крем-

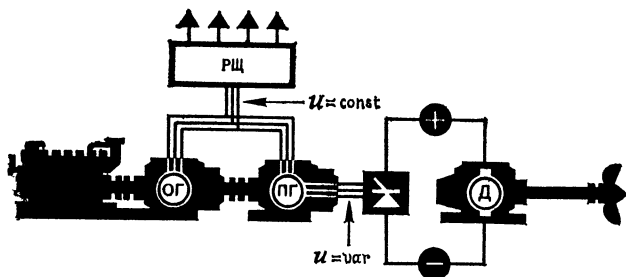


Рис. 23.

нивого, а производство станет более технологичным и экологически чистым. Преобразователи частоты и напряжения на таких тиристорах будут компактными и надежными, управлять ими смогут микроэлектронные устройства.

На рис. 23 показана схема со вдвоенным синхронным генератором и неуправляемым выпрямителем. Такая схема позволяет подводить к гребному электродвигателю любое напряжение — от нуля до двойного напряжения одного генератора, и тем самым регулировать частоту вращения гребного двигателя сколько угодно плавно путем изменения возбуждения проходного генератора ПГ. Напряжение на опорном генераторе ОГ при этом остается неизменным и от него питаются судовые потребители электроэнергии. Оба генератора связаны не только электрически, но и механически одним валом.

Схема ГЭУ с управляемым выпрямителем показана на рис. 24. С помощью управляемого выпрямителя изменяется значение напряжения, подводимого к гребному электродвигателю.

На рис. 25 показана удобная для судов технического флота схема питания гребных электродвигателей от последовательно соединенных выпрямителей, которые питаются от синхронных генераторов. Такая схема позволяет применять разнотипные генераторные агрегаты практически с любой частотой и напряжением.

Недавно открыта другая возможность — создать электрические машины с обмотками из сверхпроводящих материалов, что позволит резко уменьшить габариты и улучшить все другие характеристики агрегатов. Сверхпроводники открывают дорогу в судо-

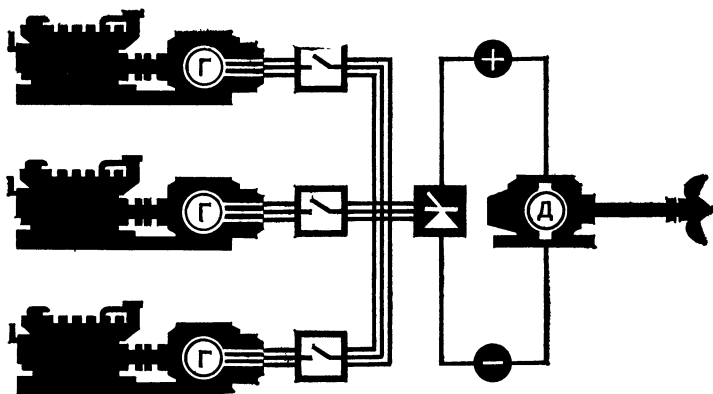


Рис. 24.

вую энергетику интереснейшим униполярным машинам, которые со времен Фарадея оставались лабораторными экспонатами.

Сверхпроводники второго рода позволяют надеяться на практическое воплощение еще одной заманчивой идеи: получить реактивную силу упора, не используя гребной винт или любое другое устройство, преобразующее вращательное движение вала в поступательное движение масс воды. Речь идет о магнитогидродинамических двигателях — бесшумных,

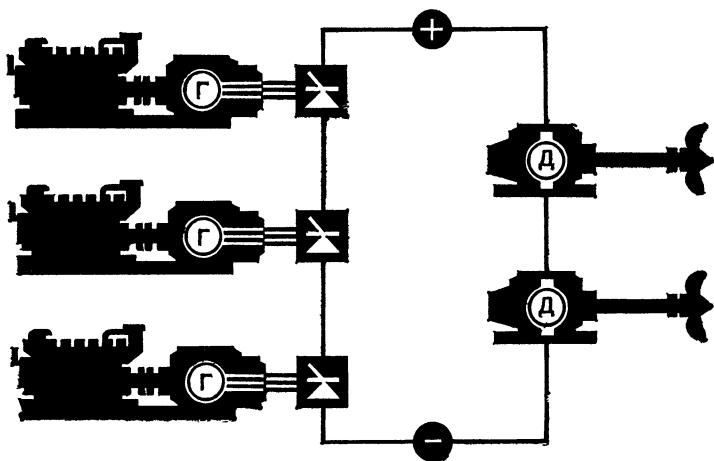


Рис. 25.

конструктивно привлекательных, неограниченно мощных.

Традиционные системы электродвижения построены по такой схеме: первичный двигатель (дизель или турбина), генератор, система передачи и преобразования электроэнергии, гребной электродвигатель, и, наконец, собственно движитель, чаще всего гребной винт, создающий упор или тягу. Вода, как известно, жидкость, «упереться в нее», как в землю, нельзя, поэтому судовая тяга, по существу, реактивная.

Сила, движущая судно вперед, создается за счет отбрасывания струй воды назад.

Если судно движется с постоянной скоростью v_c , то сила упора движителя равна силе сопротивления воды. В соответствии с законом сохранения количества движения эта сила численно равна количеству движения, которое движитель сообщает в единицу времени струе, отброшенной им назад.

Таким образом, можно записать равенство:

$$T = Q\rho(v_2 - v_c),$$

где Q — объем воды, прошедшей через движитель за 1 с; ρ — плотность воды; T — сила упора; v_2 — скорость, с которой отбрасывается вода.

Отсюда получается выражение для полезной мощности:

$$P_1 = Q\rho(v_2 - v_c)v_c = Tv_c.$$

Вычислим КПД движителя как отношение полезной мощности к полной. Чтобы получить полную мощность, нужно к полезной добавить ту, которая затрачивается на отбрасывание воды назад со скоростью v_2 .

Эта мощность численно равна кинетической энергии, сообщаемой струе в 1 с:

$$P_2 = \frac{Q\rho(v_2 - v_c)^2}{2}.$$

КПД движителя определяется формулой

$$\eta = \frac{P_1}{P_1 + P_2} = \frac{Q\rho(v_2 - v_c)v_c}{Q\rho(v_2 - v_c)v_c + 0,5Q\rho(v_2 - v_c)^2}$$

Сокращая на $Q\rho(v_2 - v_c)$, получим окончательно:

$$\eta = \frac{v_c}{v_c + 0,5(v_2 - v_c)} = \frac{2}{1 + v_2/v_c}.$$

Из этой формулы видно, что КПД тем выше, чем меньше отношение скорости отбрасываемой воды к скорости судна. Это определяет преимущество движителей с большим эффективным сечением. Расскажем об одной необычной возможности создания таких движителей.

Лопасть гребного винта, рабочего колеса водомета, ласты на ногах пловца, хвост рыбы или дельфина — все эти движители, такие разные внешне, работают по одному принципу — «надавить» на воду так, чтобы отбросить ее назад, создав реактивную тягу. Казалось бы, для этого обязательно нужна какая-то сравнительно жесткая поверхность, движущаяся в сочленениях. Но это не так.

Существуют насосы, в которых ничего не движется, кроме жидкости, которую они перекачивают. Эти экзотические устройства предназначены для перекачки хорошо проводящих жидкостей, таких, как ртуть или расплавленные металлы. Насос, по сути дела, представляет собой электрическую машину постоянного или переменного тока, в которой роль ротора выполняет проводящая жидкость. В нее вводится, или в ней наводится электрический ток. Взаимодействие этого тока с магнитным полем статора и создает силу, движущую жидкость.

Вода — тоже проводник, конечно, если она не дистиллированная. В отличие от металлов носителями тока в воде являются не электроны, а ионы веществ, растворенных в ней. Любая встречающаяся в природе вода — раствор, и поэтому, хорошо или плохо, но проводит электрический ток.

Так, проводимость пресной водопроводной воды составляет 0,01 Сим/м, черноморской — 2 Сим/м, а в очень теплом и соленом Красном море — до 6 Сим/м. В среднем проводимость воды Мирового океана — 4 Сим/м. По сравнению с проводимостью металлов (6×10^7 Сим/м для меди) эта величина ничтожно малая.

Малая проводимость — это малый ток, но не обязательно малая сила электромагнитного взаимодействия. Ведь полная сила — это результат взаимодействия двух токов. И если один из них — ток ротора — мал, то, может быть, можно увеличить второй — ток статора? Да, такая возможность есть. Она связана с открытием и техническим применением сверхпро-

водников второго рода, способных без потерь проводить токи плотностью до 200 MA/m^2 .

После того, как ток «заведен» в сверхпроводящую обмотку, мощность затрачивается только на поддержание низкой (гелиевой) температуры криостата — резервуара с жидким гелием, температура которого не превышает $4,2 \text{ K}$. Такая температура необходима, чтобы обмотка не оказывала никакого сопротивления току. Как правило, стенки криостата выполнены с использованием лучшего теплоизоляционного «материала» — вакуума, поэтому поток тепла, который нужно отводить от гелия, не превышает нескольких десятков ватт. Мощность холодильных устройств, необходимых для этого, не идет ни в какое сравнение с мощностью потерь в обычной обмотке, создающей такие же магнитные поля.

Представим себе, что под кормой судна вместо гребного винта установлены криостаты с заключенными в них сверхпроводящими обмотками. Между криостатами укреплены легкие электроды, к которым подведено постоянное напряжение от мощного генератора, находящегося на судне. Обмотки и электроды расположены так, что электрическое и магнитное поля в пространстве между электродами направлены перпендикулярно друг другу. При этом сила взаимодействия токов обмотки и токов, протекающих в воде от одного электрода к другому, приложенная к воде, направлена от носа к корме, а равная ей и противоположно направленная сила приложена к сверхпроводниковым обмоткам и через них — к корпусу судна. И вот без малейшей вибрации, без рокота вращающихся деталей, без бурунов и пузырей за кормой судно плавно движется вперед... При этом КПД магнетогидродинамического движителя (МГДД) будет не меньше, а может быть, и больше, чем у самых совершенных гребных винтов. Винты современных гигантских судов достигают огромных размеров. Например, один из супертанкеров 70-х гг. «Батиллус» водоизмещением свыше 500 тыс. т имел винт диаметром более 16 м. Отсюда его огромная осадка, создающая трудности для судовождения. Разместить на днище МГДД с каналом эквивалентного сечения, наверное, проще, а мощность в этом случае практически не ограничена.

Реально ли создание таких движителей? Сегодня уже можно ответить на этот вопрос утвердительно. Есть сообщения об испытаниях танкера с МГДД тягой 7 т. Так что в принципиальной возможности МГДД со сверхпроводниковым возбуждением нет сомнений. Другое дело, оправданы ли усилия, которые придется затратить на преодоление множества технических трудностей: предотвращение коррозии электродов и электролиза воды, уменьшение внешних магнитных полей, решение проблем надежности и прочности криостатов и т. п. Пока еще не определен класс судов, для которых преимущества МГДД окажутся настолько существенными, чтобы стимулировать эти работы.

Создание МГДД, пожалуй, самый необычный, но далеко не единственный путь совершенствования гребных электрических установок. Рассмотрим возможное будущее всех трех частей ГЭУ: источника энергии, устройства ее передачи и преобразования, движителя. На смену господствующим сейчас дизелям, газотурбинным и паротурбинным агрегатам готовятся прийти другие источники электроэнергии. Это, прежде всего, топливные элементы, или, как их по-другому называют, электрохимические генераторы. Они предполагают повышение значения КПД до 0,6—0,8, не будут загрязнять окружающую среду, так как их продукты сгорания не газы, а жидкости. Правда, ожидаемые мощности ЭХГ не слишком велики.

Другим новым источником электроэнергии для ГЭУ могут стать магнетогидродинамические генераторы (МГДГ). У них нет верхнего предела мощности. Постоянный ток, который они дают, как нельзя лучше приспособлен для питания каналового МГДД, описанного выше. Такая магнетогидродинамическая система генератор — двигатель — движитель с соединяющим их сверхпроводящим шинопроводом будет, возможно, самой эффективной силовой установкой для гигантских надводных и подводных транспортных судов будущего.

А что же небольшие суда? Возможна ли для них замена традиционной пары гребной двигатель — винт каким-либо другим, более эффективным устройством? Есть интересные возможности, связанные с преобразованием электроэнергии, — но не в энергию

вращения, а в энергию механических колебаний. Речь идет о создании плавниковых электродвигателей.

Как установили исследования в области бионики, самый эффективный движитель, созданный природой, движитель так называемого угревидного типа (тело плывущей рыбы гибко, движение волнообразно и как бы ввинчивается в воду). Несколько меньшим КПД, но значительно большей удельной мощностью обладают «двигатели» крупных рыб и морских животных. В таких скобродных или плавниковых движителях, работающих по принципу машущего крыла, колеблется только хвостовой плавник.

Бесшумные, экономичные, обеспечивающие легкое управление не только величиной упора, но и его направлением плавниковые движители давно привлекают конструкторов. Однако сложность и малая надежность привода, преобразующего вращение в колебания, сводит пока на нет все их преимущества. Возможность использования сильных магнитных полей, созданных сверхпроводниковыми катушками, открывает путь к созданию простых устройств, раскачивающих плавник непосредственно электромагнитными силами.

В последнее время возродился интерес к использованию для движения судов энергии ветра — экологически самой чистой. Но и здесь новые «паруса», будь то вращающиеся цилиндры (турбопаруса), создающие тягу за счет эффекта Магнуса, или жесткие металлические конструкции типа крыла не могут работать без электроприводов и электронных систем управления движением.

ДВИЖЕНИЕ БЕЗ ДВИЖЕНИЯ

Свежий ветер. Море бело от пены. Берега не видно, да и не может быть видно — до него почти двести миль. Но вот на горизонте в открытом море показались две буровые вышки, поставленные как будто прямо на морской поверхности. Это не буровые платформы, стоящие на дне или полупогруженные: в этом районе слишком глубоко для них — около 500 м. Если подойти ближе, видно, что вышки стоят на судах, только очень необычных (рис. 26). В носу у такого судна — белоснежная пятиэтажная жилая над-

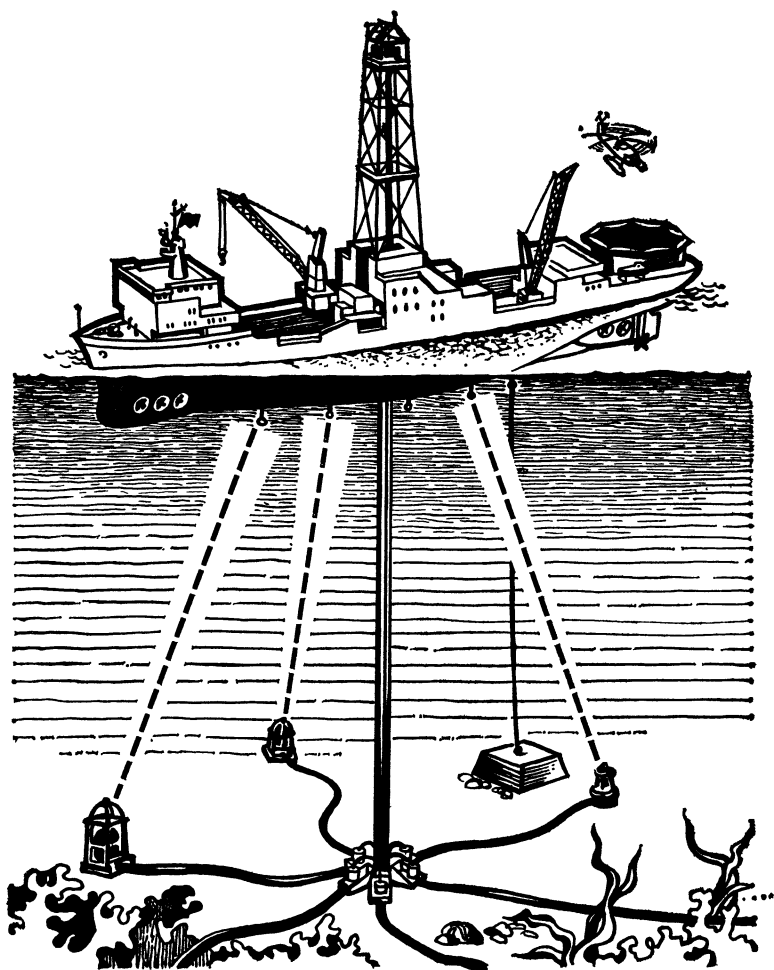


Рис. 26.

стройка с рубкой наверху. В центре — 50-метровая буровая вышка, в корме — широкая площадка, на которой стоит вертолет.

Тяжело переваливаясь на волнах, к буровому судну осторожно подходит морской буксир. Теперь видно, что судно с вышкой стоит, как вкопанное, будто на мели, хотя глубина под ним полкилометра. Взгляд невольно тянется к клюзам, ожидая увидеть полого уходящие под воду якорные цепи. Но якоря

на месте. Если подойти к судну совсем близко, то можно заметить, что буровая установка работает и за кормой — водовороты, как будто винты все время работают. Такие же водовороты видны и около носа — то с одной, то с другой стороны. Да, там тоже есть винты — это подруливающие устройства, или «подрули», как их здесь называют. Вот почему судно стоит на месте без якорей. Его удерживают все эти движители, создающие силу, действующую в любом заданном направлении, и момент, разворачивающий судно.

Но управляет движителями не моряк. Даже самый опытный штурман окажется здесь бессилён. Угадать капризы волн и ветра, почувствовать силу, сносящую судно с заданной точки, момент, уводящий его с заданного курса, и скомпенсировать эти возмущающие воздействия, управляя сразу тремя группами движителей, способна лишь быстродействующая вычислительная машина. Человек только контролирует ее работу.

Кроме обычной ходовой рубки на этом судне есть еще одна — рубка СДП, или, как говорят, «ди пи». «Ди пи» — эта аббревиатура образована от двух начальных букв выражения динамическое позиционирование (англ. — *dynamic positioning*).

Днем и ночью в рубке ДП дежурят двое: оператор и электромеханик — «диписты», как их здесь называют. Перед ними пульт со множеством экранов, кнопок с подсвеченными или темными надписями, тумблеров и ручек управления. Вот экран акустической системы ориентации. На нем в центре светятся зеленые линии, очерчивающие условный контур корпуса судна, а сбоку от него вспыхивают треугольники, квадратики, кружочки с цифрами под ними. Это сигналы положения акустических датчиков, установленных на дне моря. Каждый из них обозначен своим условным знаком. Расстояние от центра судна до датчика (его называют транспондер) можно либо оценить визуально (на экране сохраняется масштаб), либо прочесть цифру под значком, если нужна большая точность. Цифры и положения значков все время меняются, ведь судно немного смещается относительно датчиков, как бы хорошо ни работала автоматическая система стабилизации положения. Каждое измерение делается с какой-то ошибкой, поскольку

искажается путь звуковой волны в воде: к полезному сигналу добавляются помехи от шума винтов и от другого движущегося и вибрирующего оборудования. Метка датчика каждый раз вспыхивает немного в другом месте.

Рядом, на черном экране светится пятиугольник красных лампочек, который небольшими скачками поворачивается то вправо, то влево. Это — прибор, показывающий в наглядной форме отклонение судна от заданного курса. Около него на цифровом индикаторе крупными красными цифрами высвечивается текущее значение курсового угла. Выше — экран доплер-лага, на котором можно увидеть цифры, означающие скорости перемещения судна вдоль его диаметральной плоскости и перпендикулярно к ней, а также полное расстояние, пройденное за время отсчета. Скорость, как это принято в морской практике, исчисляется в узлах, а расстояние — в милях.

На пульте оператора есть еще много других экранов и индикаторов. Здесь и дисплей подводного телевизора, наблюдающего за устьем скважины, и прибор, показывающий направление и скорость ветра. Целая группа приборов отражает состояние движителей: оператор видит, на сколько процентов загружаются подрули и главные гребные винты. Глядя на все эти шкалы и экраны, опытный оператор в принципе мог бы удерживать судно на точке в течение некоторого времени «вручную». Так и бывает, когда возникают аварийные ситуации.

В нормальном режиме работы оператору не обязательно держать под неослабным контролем весь разноцветно светящийся пульт, достаточно наблюдать за главным дисплеем СДП. Изображение, которое формирует на нем вычислительная машина, вбирает в себя всю информацию о системе, но в компактном и наглядном виде.

В центре — стилизованный контур судна, ориентированный по сторонам света. Наверху дисплея — север, внизу — юг. Около судна — стрелка, длина и направление которой соответствуют значению и направлению результирующей силы от ветра, волн и течения, воздействующей на судно. Квадратик в центре — это маркер, обозначающий заданное положение судна над скважиной. При идеальном позиционировании маркер должен находиться точно в центре си-

луэта. На втором таком же дисплее, расположенном рядом с главным, можно увидеть все необходимые дополнительные данные о системе, сгруппированные в удобные для обозрения таблицы или графики. Для вызова нужной «страницы» достаточно нажать соответствующую ей кнопку.

Глядя на главный дисплей СДП, оператор может управлять судном с помощью вычислительной машины гораздо эффективнее, чем по приборам. Так, в сотрудничестве оператора с ЭВМ проводится один из наиболее ответственных режимов — повторный ввод бурового инструмента в скважину.

В центре судна, под буровой вышкой — вырезанный в корпусе широкий колодец. В морскую воду уходит колонна с закрепленным на ней инструментом (компоновка — на языке буровиков). Рядом с этим колодцем другой, поменьше, туда погружается оранжевый водолазный колокол. Там трое наблюдателей. Включив подводные прожектора, они видят инструмент, плиту, лежащую на дне, расширитель скважины, в которую нужно ввести инструмент. В рубке ДП слышна команда: «диписты, два метра вправо, один вперед». Оператор легонько наклоняет рукоятку на пульте вправо. Зеленый квадратик маркера, обозначающий заданное положение судна, смещается вправо на два шажка. Потом рукоятка наклоняется вперед и маркер занимает требуемое положение.

Еще дважды нажата кнопка, чтобы показать машине серьезность намерений человека и избежать случайной ошибки, и ЭВМ начинает обрабатывать приказ: выйти к новому заданному положению и удерживать в нем судно. Поворотные лопасти всех винтов (их семь!) начали по командам ЭВМ изменять свой угол наклона так, чтобы как можно быстрее и точнее выполнить приказ. Вот начали сближаться на дисплее центр силуэта судна и маркер, вот на экране подводного телевизора, среди беспорядочно порхающих, как хлопья снега, пятен, отражений рыб, показались контуры устья скважины и приближающегося к нему инструмента. Теперь «дипист» и сам может поставить судно точно над расширителем. Второй дисплей и второй экран показывают то же самое буровикам, которые управляют лебедкой, поднимающей и опускающей буровой инструмент. Вот наконец он погружается в скважину. Началось буре-

ние, а система динамического позиционирования продолжает работу в автоматическом режиме под присмотром двух вахтенных специалистов. Теперь «думает» программа.

Попробуем разобраться в том, как она это делает. Для простоты ограничимся тем, что из трех основных движений судна (вдоль по продольной оси, вбок и разворота по курсу) рассмотрим какое-нибудь одно, например, первое. Для управления им достаточно в каждый данный момент времени знать положение судна, скорость его изменения, значение силы, которая сносит судно с заданной точки вперед или назад. Тогда можно рассчитать, на какой угол следует разворачивать лопасти непрерывно вращающихся винтов регулируемого шага (ВРШ), чтобы судно оставалось на месте. Это делается расчетным путем, на основе теории управления.

Задача динамического позиционирования представляет собой частный случай одной из старейших, традиционных задач теории управления — задачи стабилизации. *Стабилизировать* — значит сделать устойчивым, т. е. добиться того, чтобы стабилизируемая система, случайно или закономерно отклонившаяся от своего заданного равновесного положения, вернулась в него и делала бы так сколь угодно долго. Иногда применяют более широкое толкование свойства устойчивости: системе разрешается колебаться около положения равновесия, лишь бы амплитуда колебаний была ограничена. Впрочем, на практике системы колеблются чаще всего «без разрешения», и борьба с этими так называемыми автоколебаниями — одна из актуальных задач техники.

Судно, рассматриваемое с точки зрения качки, хороший, устойчивый объект, стремящийся всегда вернуться к своему естественному положению — без крена, на ровный киль. Но по отношению к положению относительно дна — это объект неустойчивый, а еще точнее — нейтральный. Любой курс, любое положение на поверхности моря для него одинаково безразличны. Ведь нет такой силы, которая возвращала бы его к какой-либо определенной, равновесной точке. Проще всего создать такую точку, поставив туда якорь. Но на длинной «привязи» судно будет беспорядочно перемещаться вокруг якоря, как коза, привязанная к столбу, а короткая «привязь» — почти

вертикальная якорная цепь не в состоянии противостоять даже незначительной силе сноса.

Но есть другой способ стабилизации, не использующий механического крепления к дну. Этот способ основан на принципе «обратной связи». В самом деле, что может быть менее устойчивым, чем тонкий стержень с грузом наверху, опертый нижним концом. Такой перевернутый маятник должен немедленно упасть. Однако, если он стоит на пальце жонглера, то, как многие видели в цирке, он покоится, чуть колеблясь, хотя на его верхнем конце могут вращаться тяжелые шары или тарелки. Артист, запрокинув голову, внимательно смотрит наверх и чутко улавливает малейшее перемещение верхней точки. Тотчас, почти без запаздывания, он перемещает точку опоры стержня так, чтобы этот перевернутый маятник снова оказался в состоянии неустойчивого равновесия, или, точнее, около него — но с другой стороны. Это нужно, чтобы погасить скорость перемещения верхней точки.

Согласно теории управления, здесь происходит следующее: маятник характеризуется двумя переменными — смещением вбок верхнего конца относительно точки опоры и скоростью этого перемещения. Требуется стабилизировать значения переменных состояния (так их называют) около нулевых значений. Наблюдения текущих значений переменных обрабатываются с помощью быстродействующего вычислительного устройства (глаз — мозг). В результате вырабатываются сигналы управления исполнительным устройством (рука), которое создает управляющие воздействия. Таким образом, силы, управляющие системой, определяются ее отклонениями от заданного положения. Это и есть обратная связь.

В простейшем случае она линейна, т. е. управляющие воздействия прямо пропорциональны отклонениям от заданного состояния. Поскольку и положение маятника и скорость его изменения являются равноправными переменными состояния, то в закон управления должны обязательно входить отклонение от заданного положения и отклонение скорости, которая в равновесном состоянии равна нулю. Термин «закон управления» — один из основных в теории и практике автоматических систем. Так называют соотношение, связывающее отклонения с величиной уп-

равляющего воздействия, которое должно компенсировать эти отклонения. Самый простой закон управления, конечно, линейный, но это не означает, что он может быть недостаточно хорош. Напротив, во многих случаях такой линейный регулятор оказывается наилучшим.

Здесь необходимо сделать одно важное отступление, чтобы рассказать, в каком смысле можно понимать слово «наилучший». Это ведь очень неоднозначное понятие. Можно понимать его, например, так: в кратчайший срок ликвидировать возникшее отклонение. Тогда получится закон управления, как говорят, оптимальный по быстродействию. Он нелинейный. Но критерий оптимального быстродействия оправдан лишь тогда, когда процесс регулирования протекает импульсами и нет необходимости экономить энергию, затрачиваемую на управление. Если возмущения действуют непрерывно и нужно так же непрерывно управлять объектом, чтобы скомпенсировать их нежелательное действие, тогда естественно определить понятие «наилучший» несколько иначе. Критерий оптимальности в этом случае должен учитывать как желание получить наименьшую среднюю ошибку стабилизации, так и желание сэкономить ресурсы системы управления, ограничив, например, среднее значение силы управляющего воздействия, в данном случае упора подруливающих устройств.

Вот для этих случаев и оказывается оптимальным линейное управление. Таким образом, достаточно вычислить заранее (правда, довольно сложным путем) коэффициенты, на которые следует умножить отклонения, затем сложить полученное, чтобы определить величину и направление управляющего воздействия в данный момент времени.

Что сложного в алгоритмах динамической стабилизации? — может спросить читатель. Введи масштаб для отклонений, сложи их, вот и получишь нужную величину управляющего воздействия. А сложность состоит в том, что исходная информация для этой простой операции либо недостоверна, либо ее не хватает. Конкретно для бурового судна это выглядит так: смещение измеряется с ошибкой, скорость его изменения, если и измеряется, то очень неточно, а силы воздействия волн, ветра и течения, которые должны точно скомпенсироваться упором винтов, вообще не измеряются.

Поэтому самая сложная и ответственная часть процесса управления — уточнение «неточных» и восстановление по измеряемым «неизмеряемым» переменных, или, как принято говорить, фильтрация. В алгоритмы фильтрации должны быть заложены уравнения движения, т. е. математическая модель движения судна. Тогда, задаваясь в начальный момент времени значениями всех переменных, можно предсказать, какие значения примут они через определенное, интересующее нас время. Сравнивая предсказанные и измеренные в этот момент времени величины, можно вычислить разумные поправки к оценкам и повторить процедуру. Доказано, что при определенном выборе численных коэффициентов и выполнении некоторых требований эта процедура обязательно приблизит нас к истинным значениям переменных.

Системы динамической стабилизации нужны не только для буровых судов. Все суда и морские подвижные сооружения, работающие на океаническом шельфе, остро нуждаются в этих системах, чтобы «общаться» друг с другом. Динамическая стабилизация одного судна относительно другого позволяет исключить опасную, а часто и невозможную (при ручном управлении) операцию швартовки в открытом море. Переход людей и перегрузка оборудования, если суда сохраняют взаимное положение постоянным, могут производиться краном со стрелой достаточной длины. Системы стабилизации необходимы также при спасательных и судоподъемных работах.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ЩИТ КОРАБЛЯ

Электричество греет, светит, движет, считает — это уже давно стало привычным. Но на корабле у электричества есть еще одна необычная роль: защита. Защита от коварного, невидимого врага, который десятилетиями может ждать, затаившись на дне, а когда-нибудь, в самый неожиданный момент, ударить по корпусу страшным взрывом. Этот враг — неконтактная мина.

Никто не знает точно, сколько мин было поставлено на морских путях во время второй мировой войны и для скольких из них война еще не кончи-

лась. Ведь срок жизни мины практически неограничен, ее неконтактные датчики не устают ждать сигнала — «приглашения» к взрыву (вся надежда только на ограниченный «срок жизни» источников питания). Один из таких датчиков реагирует на магнитное поле корабля. До тех пор, пока корпуса кораблей будут делать из стали, которая неизбежно намагничивается полем Земли, корабль всюду будет «носить с собой» свое собственное магнитное поле. Оно невелико, но четко обнаруживается приборами на расстоянии нескольких десятков метров. А если этот прибор соединить со взрывателем мины, получится скрытное и безотказное оружие.

На это и рассчитывали немецкие минеры, которые применили подобное оружие против нашего Черноморского флота, оборонявшего в 1941 г. героический Севастополь. Вызов врага приняли советские ученые и инженеры. Среди них были будущие академики А. П. Александров, И. К. Курчатов и будущие доктора технических наук Н. М. Хомяков и О. Б. Брон. В кратчайший срок была создана и внедрена защита: комплекс приемов и технических средств, составивших новую область корабельной электротехники — размагничивание кораблей.

Успех советских ученых был не случайным — магнитные мины не застали их врасплох. Еще в 1919 г. проф. В. Я. Павлинов разгадал принцип действия разоруженной им, оказавшейся на суше, магнитной мины. Их устанавливали на фарватерах Северной Двины английские интервенты.

За 5—6 лет до войны один из ведущих научных институтов страны — Ленинградский физико-технический (ЛФТИ) — начал вести работы для обороны страны. В 1934 г. по инициативе руководителя ЛФТИ академика А. Ф. Иоффе были начаты работы по защите кораблей от магнитных мин. До войны, в 1941 г., прошли успешные испытания, и к осени 1942 г. на всех флотах и флотилиях были организованы службы размагничивания. Ни один защищенный средствами размагничивания советский корабль не погиб во время войны от подрыва на неконтактной мине.

В основе разработок лежали две главные идеи: уменьшить постоянное магнитное поле корабля и скомпенсировать переменное поле.

Чтобы разобраться в том, откуда берутся и в чем различаются постоянные и переменные магнитные поля корабля, обратимся к физике магнитных материалов. Строго говоря, все материалы в природе — магнетики — намагничиваются, если их поместить во внешнее магнитное поле. Магнитные свойства веществ создаются вездесущими электронами. Каждый электрон обладает собственным магнитным моментом — спином. Кроме того, вращаясь вокруг ядра атома, электрон, подобно витку с током, создает еще и орбитальный магнитный момент. Интересно, что реакция этих двух моментов на внешнее магнитное поле различна. Под действием внешнего поля орбитальное движение электрона изменяется, он начинает, как говорят, прецессировать вокруг направления внешнего поля. При этом появляется дополнительное магнитное поле, направленное против внешнего. Эффект ослабления, выталкивания магнитного поля, называется *диамагнитным*, а вещество, в котором он проявляется, — *диамагнетиком*. Диамагнитный эффект есть во всех веществах, но количественно он очень мал. В большинстве веществ диамагнитный эффект перекрывается противоположным ему, но более сильным *парамагнитным* эффектом. Парамагнетизм обязан своим существованием собственным, спиновым моментам электронов. Если спины всех электронов в атоме компенсируются не полностью, то атом обладает небольшим собственным магнитным моментом, становится маленьким магнетиком. Во внешнем магнитном поле этот магнетик ориентируется по направлению внешнего поля, тем самым усиливая его внутри вещества — *парамагнетика*.

И парамагнитные, и диамагнитные эффекты очень незначительны. В отсутствие внешнего поля элементарные магнитные моменты и в диамагнетиках, и в парамагнетиках расположены совершенно хаотично. Но есть очень важный для электротехники класс веществ, в которых без участия внешнего магнитного поля возникает самопроизвольная намагниченность. Это *ферромагнетики*: железо, кобальт, никель, тербий, диспрозий, гадолиний и другие редкоземельные элементы — металлы, их всевозможные сплавы и соединения. Внутренние электронные оболочки атомов этих веществ не заполнены, спины электронов не компенсируются, и поэтому атомы имеют определен-

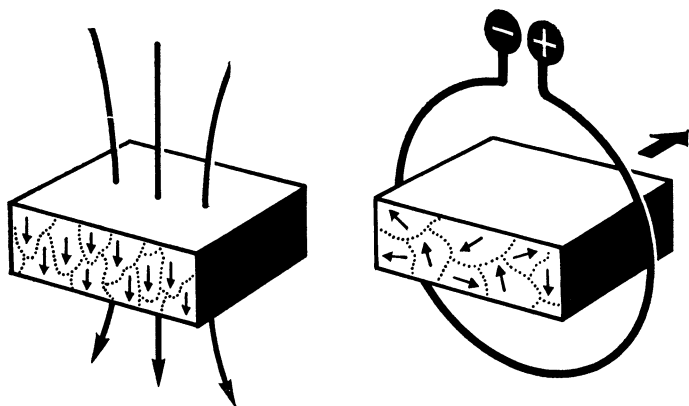


Рис. 27.

ный магнитный момент. Но, в отличие от других материалов, распределение этих магнитных моментов уже не хаотично. Соседние атомы как бы обмениваются электронами, между ними возникают так называемые обменные силы, имеющие квантовую природу, и магнитные моменты в какой-то области кристалла ориентируются параллельно друг другу. Так возникают области сильного самопроизвольного намагничивания, так называемые *домены*. В отсутствие внешнего магнитного поля ферромагнетик самопроизвольно «разбивается» на домены так, чтобы его энергия была минимальна, а результирующий магнитный момент был близок к нулю.

Если теперь внести такой ферромагнетик в магнитное поле, то энергия доменов по отношению к внешнему полю окажется неодинаковой и начнется процесс перераспределения объема вещества между доменами, начнут изменяться границы между ними (рис. 27). Те из них, которые ориентированы вдоль или почти вдоль поля, будут расти, а те, вектор магнитного момента которых направлен против или почти против направления вектора индукции внешнего поля, будут уменьшаться в объеме. До тех пор, пока внешнее поле достаточно мало, эти изменения обратимы: сняли поле — домены возвратились в свои прежние границы.

В более сильных полях изменение объемов доменов становится уже необратимым: объем энергетиче-

ски «невыгодных» доменов уменьшается до нуля, они исчезают вовсе. Наконец, когда внешнее поле возрастает еще больше, начинают поворачиваться магнитные моменты внутри самих доменов, и постепенно магнитные моменты всех доменов устанавливаются вдоль силовых линий намагничивающего поля. Происходит насыщение и дальнейшее увеличение внешнего поля не изменит намагничивание ферромагнетика.

Исчезнет ли намагничение, если теперь снять намагничивающее поле? Нет, достаточно сильно намагниченный ферромагнитный материал сохранит остаточное намагничение, превратится в постоянный магнит, имеющий собственный момент. Исключения составляют только такие магнитомягкие материалы, как пермаллой, очень чистое железо. Однако это не конструкционные материалы.

Вернемся к кораблям. Если он не строился, как немагнитный, из пластика, дерева и специальных немагнитных сплавов, то для его корпуса основным материалом служит сталь различных марок, имеющая очень большую магнитную проницаемость и коэрцитивную силу. Магнитная проницаемость показывает, во сколько раз усиливается внешнее поле в ферромагнетике благодаря его намагничиванию, а коэрцитивная сила характеризует остаточную намагниченность. В процессе постройки части корпуса, находясь в магнитном поле Земли и подвергаясь разнообразным механическим и другим воздействиям, постепенно намагничиваются. Так намагничиваются любые достаточно большие изделия из стали, долго находящиеся в одном и том же положении относительно силовых линий поля Земли.

Таким образом, выходя с верфи, судно уносит с собой невидимую «оболочку» — окружающее его собственное магнитное поле, которое можно обнаружить на расстоянии десятков (а чувствительным прибором и до сотни) метров от корпуса. Казалось бы, снять постоянное намагничение можно, поместив корпус в поле, противоположное тому, которое его намагнитило. Однако это невозможно, да и не нужно. Постоянное поле уничтожают совсем иначе.

Рассмотрим, например, что делает грамотный инженер с механическими наручными часами со стальным механизмом, которые хозяин забыл снять,

работая около сильного магнита. (Часы намагнитились и остановились, так как «новые» магнитные силы между деталями мешают колебаниям механизма, задающего режим хода.) Он поднесет испорченные часы к электромагниту, включит его, а потом станет медленно удалять часы от него туда, где магнитное поле спадает практически до нуля. И часы пойдут нормально.

Попробуем разобраться, что произошло. Сначала домены, оказавшись в сильном поле, амплитуда которого колеблется, меняя свой знак, стали с той же частотой поворачиваться вслед за направлением поля. При этих качаниях домены как бы «забывали» первоначальное направление постоянного намагничивания. По мере удаления от электромагнита внешнее поле, в котором находились часы, становилось все меньше, домены, которые к этому времени уже основательно «перемешали» направления своих магнитных моментов, перестали поворачиваться. В слабом поле их границы перемещались все меньше и меньше по мере того, как поле уменьшалось с увеличением расстояния от магнита. Наконец в исчезающе-слабом поле установилось распределение доменов, соответствующее минимуму внутренней энергии магнитного поля, при котором, как мы помним, намагничение и собственный магнитный момент тела близки к нулю.

Итак *размагничивание* — это обработка намагниченного тела переменным магнитным полем, амплитуда которого постепенно уменьшается. Подбор оптимальной частоты и амплитуды импульсов — сложная научно-техническая задача. Ее решение определяется формой и материалом намагниченного тела, но принцип остается неизменным. Технические средства ее решения могут быть различными.

Корабль, тем более большой, — это, конечно, не часы. Нет такого электромагнита нужной мощности, чтобы провести около него размагничиваемый корабль. Такой магнит можно сделать специально, уложив на дне в подходящей неглубокой акватории гигантские рамки из водостойкого кабеля, питаемые мощным источником переменного тока достаточно низкой частоты. Небольшие корабли могут размагничиваться, проходя над такими катушками или даже сквозь них (если они установлены вертикально).

Однако для кораблей большого водоизмещения стационарные размагничивающие устройства будут либо слишком дороги, либо не эффективны. Проще сделать иначе: наложить временные обмотки непосредственно на палубу судна или обмотать вокруг корпуса, заведя кабель под днище. Такие обмотки уже нельзя будет медленно относить от судна, а чтобы уменьшать амплитуду размагничивающих импульсов, нужно питать их переменным током, колебания которого затухают по заранее заданному закону. Амплитуда размагничивающих токов может составлять несколько килоампер. Когда по кабелям, свободно лежащим на палубе, проходит ток такого значения, они начинают извиваться, как живые, под действием электромагнитных сил. Для того, кто видел это зрелище, закон Ампера уже не абстракция.

Временные размагничивающие обмотки должны получать питание от своего собственного источника. Чаще всего это мощные генераторы постоянного тока, обмотки возбуждения которых управляются сложными устройствами, обеспечивающими оптимальную форму импульсов тока. Эта электростанция устанавливается на специальном судне службы размагничивания. Контроль процесса размагничивания ведется измерением магнитного поля на определенной глубине, которая называется *глубиной защиты*. Измерительные приборы — *магнитометры* — регистрируют либо одну из составляющих индукции в данной точке, либо модуль вектора индукции, т. е. его длину. Чувствительность этих приборов очень высока. В системе СИ индукция магнитного поля измеряется в теслах. В воздушном зазоре электрических машин напряженность поля порядка 1 Тл, а магнитного поля Земли — 30 мкТл. При измерении земного магнитного поля часто используется внесистемная единица напряженности — гамма, соответствующая в воздухе индукции 10^{-9} Тл, так что напряженность поля Земли в этих единицах составляет около 30 тыс. гамм. Современные магнитометры чувствуют изменение поля на единицы или даже доли гамм.

Но вот приборы, установленные под кораблем на глубине защиты, показали, что магнитное поле его уменьшилось и находится в пределах нормы, что постоянное намагничение снято. Корабль может спокойно идти в любой район мирового Океана... если

этому не помешает другое его магнитное поле — индуцированное.

Ферромагнитные массы корабля всегда находятся в поле Земли, он всегда пронизан силовыми линиями магнитной индукции. Там, где они входят в корпус, образуется северный магнитный полюс, а там, откуда выходят, — южный. Результирующее магнитное поле корабля искажается, перестает быть однородным. Около полюсов оно станет сильнее, чем земное, между ними — слабее. Это происходит потому, что под действием поля Земли границы доменов ферромагнетика перемещаются так, что растут, увеличиваются в объеме те домены, момент которых параллелен вектору внешнего поля. Таким образом, переменное намагничение «привязано» не к кораблю, а к вектору намагничивающего поля. Корабль меняет курс, качается на волне, а магнитные полюса перемещаются по его корпусу. Но поскольку при разных направлениях намагничения расстояния между полюсами оказываются различными, интенсивность намагничения в разных направлениях неодинакова. Сильнее намагнитится корабль, расположенный вдоль линий поля, слабее, — если вектор земного поля перпендикулярен борту.

В разных широтах поле Земли направлено по-разному относительно горизонтальной плоскости: вблизи магнитных полюсов Земли оно направлено вертикально, у магнитного экватора — горизонтально (рис. 28). Модуль вектора поля увеличивается с широтой. Все это делает компенсацию индуцированного магнитного поля нелегкой задачей. Решается она следующим образом.

Поле компенсируют с помощью постоянных намагничивающих обмоток. Эти обмотки всегда подключены к отдельной электростанции постоянного тока, размещенной на борту корабля. Сила токов в намагничивающих обмотках автоматически регулируется в зависимости от курса корабля и широты места. Намагничение от каждой составляющей земного поля компенсируют своей обмоткой. Основная горизонтальная обмотка компенсирует поле от вертикального намагничения, курсовая горизонтальная — от намагничения, вызванного составляющей земного поля, направленной вдоль корабля, курсовая батоксовая компенсирует поле от поперечного намагничения. Каждая

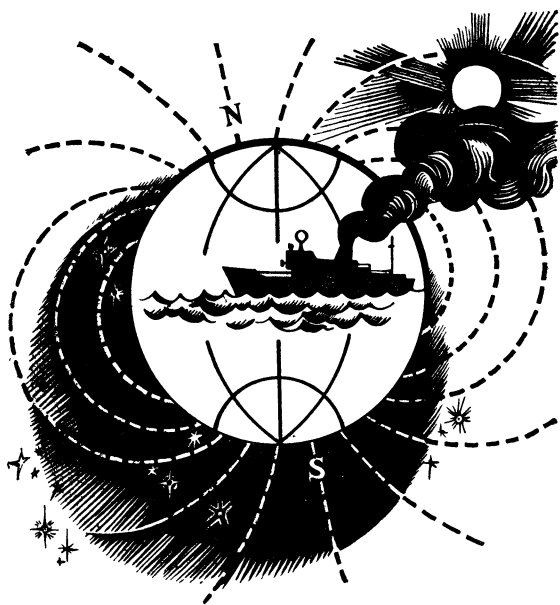


Рис. 28.

обмотка разделена на секции, число витков которых подобрано так, чтобы поле обмотки возможно точнее компенсировало поле корабля. Ток обмоток регулируется иногда не только в зависимости от широты и курса, но и от напряженности поля, измеренного в определенных точках на корабле. Сложная система. Но там, где индуцированное поле достаточно велико, например на военных бронированных кораблях, без нее не обойтись.

В послевоенные годы на рейде одного из портов Прибалтики встала канонерская лодка «Аргунь». После трех дней стоянки команда была отпущена на берег, и дежурный разрешил остановить дизель-генераторы, питавшие обмотку размагничивания. Сразу после отключения питания под кормой прогремел взрыв. Магнитной миной была разрушена кормовая оконечность, но, к счастью, никто из команды не пострадал.

Во время войны советские боевые корабли были оборудованы размагничивающими устройствами. Были созданы и активные средства борьбы с магнитными минами — электромагнитные неконтактные тралы.

С помощью этих тралов обезврежено более тысячи неконтактных мин. Однако они обезврежены еще не все. Время от времени в разных районах морей и океанов на неконтактных минах подрываются суда и корабли.

Работа продолжается.

НАМ ПОМОГАЕТ ЭВМ

На судне находятся сотни различных систем, механизмов, агрегатов, работа которых должна обеспечивать не только движение судна, технологическую переработку, сохранность груза, но и безопасность экипажа и перевозимого груза. Все эти системы и механизмы должны работать совместно или отдельно, страхуя и резервируя работу друг друга, в сложной взаимосвязи, в нормальных и аварийных ситуациях, с минимальными возможными эксплуатационными издержками и наилучшими техническими характеристиками.

Автоматическая работа большей части устройств, систем, механизмов достигается локальной автоматизацией с помощью аналоговых или цифровых элементов управления. Но сведение в единый комплекс даже одной электроэнергетической системы судна с учетом бесперебойного распределения и питания потребителей качественной энергией без помощи ЭВМ практически невозможно. Без помощи ЭВМ трудно выбрать в короткое время наилучшее решение в предаварийных или аварийных ситуациях, могущих возникнуть как в энергетических установках, так и в судовождении. Следует иметь в виду, что ЭВМ чаще всего не принимает окончательных решений, хотя мы и можем доверить ей выбор решения в определенных ситуациях, не слишком ответственных, в основном она является советчиком оператора, помогая ему принять наилучшее решение из нескольких возможных в конкретной ситуации.

Количество ситуаций может быть очень велико, полностью проанализировать последствия всех решений для оператора практически невозможно и нецелесообразно. ЭВМ освобождает оператора от рутинных расчетов, в ограниченный промежуток времени проигрывая возможные ситуации. Но для этого

ЭВМ нуждается в полной информации о состоянии системы.

Если не автоматизированы локальные системы, то ЭВМ, естественно, применять нельзя. ЭВМ может быть использовано только для комплексной автоматизации, при достаточном уровне автоматизации отдельных устройств, агрегатов, механизмов. Поэтому необходимо отличать *частичную* автоматизацию, при которой автоматизируются отдельные процессы (например, быстрые переходные), от *комплексной*, при которой вся энергетическая установка, или все средства судовождения, или, наконец, все вообще системы судна действуют как единый автоматизированный комплекс. В первом случае применение ЭВМ нецелесообразно, во втором — необходимо. Стоимость комплексной автоматизации судна с применением обычных средств автоматизации и автоматизации на основе ЭВМ примерно одинакова.

Неоценимую помощь оказывает ЭВМ не только при эксплуатации судна, но, что не менее существенно, при его создании. С помощью ЭВМ можно производить расчеты, получать готовые чертежи и схемы, разрабатывать конструкторскую и технологическую документацию, объем которой огромен.

Масса документации — чертежей, схем, расчетов и т. д., необходимой для постройки среднего судна, составляет несколько тонн. Освободить создателя судна от многих повторяющихся расчетов, сократить объем чертежных работ, выполнить не один, а несколько конкурирующих вариантов — призвана ЭВМ. Система автоматизированного проектирования (САПР) построена на базе современных ЭВМ. Наиболее трудной задачей в создании системы автоматического проектирования является «обучение» ЭВМ.

Дело в том, что ЭВМ не понимает человеческого языка (пока), и человек не может общаться с ней без «переводчика». Выпущенная заводом ЭВМ представляет собой «мозг», который еще не имел (если мы заранее не попросили изготовителя ЭВМ «защитить» в ее «память» определенную информацию) никаких связей с внешним миром, т. е. не имел абсолютно никакой информации. Ее так же, как и человека, необходимо обучать. Обучить машину — значит найти с ней общий язык, разработать так называемые «сервисные» программы, т. е. программы, позво-

ляющие обращаться к различным режимам ее функционирования, например, по вводу информации, ее выдачи, о порядке работы ЭВМ.

Необходимо разработать алгоритмы, т. е. порядок выполнения тех функций (расчетов или управления), которые мы хотим возложить на ЭВМ. Понятно, что для этого необходимо расчет (действие) разбить на отдельные элементы и формализовать.

При этом необходимо выбрать один из машинных языков, которому мы хотим научить машину и который в наибольшей степени соответствует нашей задаче. Кроме того, мы должны подумать и о том, чтобы машина выдавала нам информацию, удобную или привычную для нашего чтения, т. е. чтобы машина сделала обратный перевод. Все это занимает очень большие силы и средства. Так, например, математическое обеспечение ЭВМ (так называются программы различных алгоритмов) для расчетов и управления даже средней трудности стоят на порядок больше или, по крайней мере, сопоставимы со стоимостью ЭВМ.

Математическое обеспечение («банк» программ) в настоящее время стал важнейшим техническим секретом и дорогостоящим товаром.

Все сказанное относится и к ЭВМ, применяемым для комплексной автоматизации судна с учетом того, что ЭВМ, устанавливаемая на судне, должна быть «бортовая», т. е. помехоустойчива к судовым условиям: вибрации, качке, магнитным и электрическим полям, повышенной влажности, а также иметь приемлемые массогабаритные характеристики.

Система управления судном может быть выполнена с использованием единой ЭВМ или нескольких ЭВМ для различных судовых комплексов. На рис. 29 показан пример функциональной схемы комплексно-автоматизированной системы управления судном (КАСУС).

ЭВМ-1 используется для целей судовождения. Через датчики навигационной информации (гироскоп, радиолокатор, пеленгатор, гидроакустическая станция, спутниковая навигационная система) сигналы о существующей опасности поступают в ЭВМ-1, которая определяет, например, скорость и курс встречных судов и возможную точку встречи с учетом своих значений курса и скорости. ЭВМ может прово-

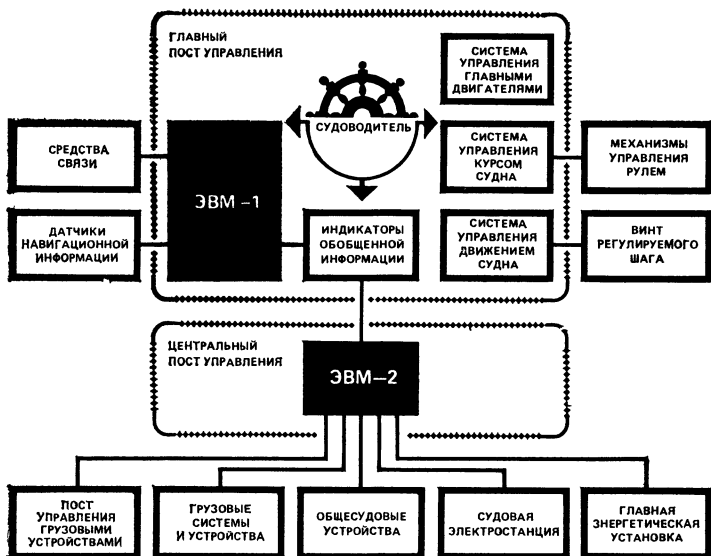


Рис. 29.

дальше расчет для нескольких встречных судов. На основании расчета ЭВМ-1 дает информацию судоводителю о наилучших вариантах расхождения со встречными судами, а после принятия судоводителем решения о выборе через цифроаналоговые преобразователи (ЦАП) и усилители воздействует на механизм управления рулем и скоростью хода, реализуя безопасное расхождение судов.

Вся поступающая информация, как правило, регистрируется, т. е. записывается на магнитную ленту, либо выдается на печатающее устройство.

ЭВМ-2 обычно располагается в центральном посту управления (ЦПУ) и управляет работой всей электроэнергетической установки, общесудовых и грузовых систем.

На ЭВМ-2 возложена задача по автоматическому поддержанию оптимальных характеристик главного двигателя и контролю его параметров. Кроме того, ЭВМ-2 обеспечивает работу систем, обслуживающих главную электроэнергетическую установку, подготавливает топлива и масло, контролирует давление и

температуру охлаждающей воды, наличие пускового воздуха, следит за надежным и экономичным обеспечением электроэнергией всех судовых механизмов в любых режимах, в том числе и аварийных. ЭВМ-2 контролирует также работу всех общесудовых систем: пожарной, креново-дифференциальной, водоотливной, кондиционирования воздуха и т. п. В случае аварийных ситуаций ЭВМ-2 дает рекомендации оператору в ЦПУ или на главный пост управления, а при необходимости может принимать некоторые решения. Все зависит от того, какие задачи возложил на ЭВМ разработчик, т. е. от ее положения в системе управления судном и программы.

Контроль и диагностику электроэнергетической установки и самой ЭВМ может выполнять ЭВМ — эта же или специальная.

Чем сложнее система, чем выше уровень ее автоматизации, тем более ответственная роль отводится системе диагностирования. Вовремя обнаружить или даже предугадать отказ элемента, выявить слабое место системы — такова главная задача технических средств диагностики. При этом не только экономится кропотливый труд по проверке и обслуживанию СЭС. Главное в том, что создаются условия для предотвращения аварий, последствия которых в море могут стать непоправимыми.

Перспективные системы диагностирования СЭС основаны на обработке данных от большого числа разнообразных датчиков в бортовых цифровых вычислительных машинах (БЦВМ).

При проектировании систем с ЭВМ возникает ряд вопросов по определению объема локальной автоматизации, выбору алгоритма управления, согласованного с возможностями ЭВМ, наличием и типом устройств сопряжения. Вместе с тем применение ЭВМ для управления всегда требует решения общих для всех систем автоматизации вопросов.

Разработчики систем управления с помощью ЭВМ решают следующие проблемы:

1. Определение задач и объемов регулирования управляемых объектов (и подсистем судна), разработка словесного (описательного) алгоритма регулирования.

2. Определение последовательности и подчиненности связей элементов системы управления между со-

бой, разработка модели объекта и законов управления.

3. Разработка алгоритмов управления, контроля и защиты объектов, определение объемов информации, вида ее представления (передачи).

4. Выбор ЭВМ, разработка структуры управления и иерархии подчинения, опроса и регулирования.

5. Техническое обеспечение автоматизации с помощью ЭВМ, которое включает:

— локальную автоматизацию объектов регулирования;

— подключение датчиков состояний и текущей информации автоматизируемого объекта;

— устройство сопряжения датчиков с коммутатором управляющего комплекса ЭВМ или с аналогоцифровым преобразователем (АЦП);

— устройства сопряжения ЭВМ с периферийными устройствами ввода и вывода, регистрации и индикации (представления оператору) информации;

— устройства сопряжения ЦАП с регулирующими органами объектов.

6. Разработка программ регулирования объектов, сервисного обслуживания.

7. Разработка программ диагностики объектов регулирования и самой ЭВМ.

8. Разработка систем регистрации, индикации текущей и оперативной информации и устройств передачи обобщенной информации в главный пост управления.

На рис. 30 дана функциональная схема ЭВМ на судах.

Часть информации, необходимой для регулирования объекта, в связи с быстротечностью регулируемых процессов доставляется от датчиков в АЦП непрерывно, через так называемые нормализаторы *Н*. Другая часть информации передается в ЭВМ через АЦП посредством коммутатора.

Нормализаторы или устройства сопряжения необходимы для того, чтобы с датчиков температур, давления, частоты вращения, положения устройства или механизма получать не просто любой электрический сигнал, а с ограничением, например, амплитуды напряжения (обычно 1,5 или 10 В), т. е. только такой сигнал, на работу с которым АЦП рассчитан.

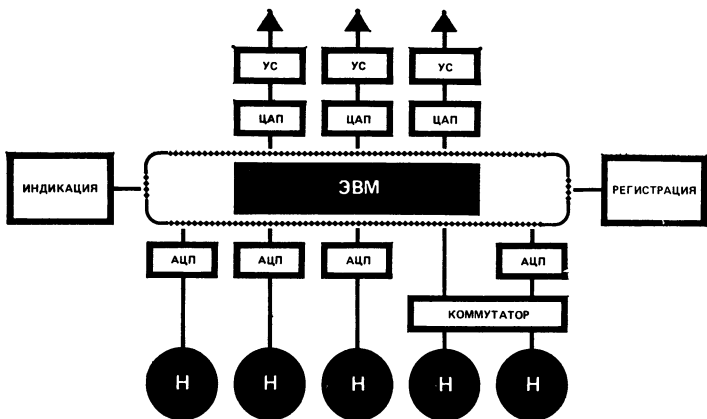


Рис. 30.

Сигналы от датчиков медленно протекающих процессов, длительность которых составляет 5—20 с (изменение температур охлаждающей воды и масла, давления в некоторых системах), через нормализаторы и коммутатор также поступают на АЦП, который последовательно считывает информацию и передает ее в ЭВМ для последующей обработки.

Поступившая в ЭВМ информация перерабатывается по заранее заданным алгоритмам, результаты через ЦАП и устройства сопряжения передаются на регулирующие органы объекта через усилители УС.

Одновременно необходимая информация о состоянии объекта может быть передана на регистрацию и индикацию. На регистрацию, по желанию оператора, как правило, передается текущая информация или отклонения параметров объекта от заданных значений. Частота регистрации параметров зависит от ее важности для безопасности судна. Индикация, как правило, осуществляет допусковый контроль, т. е. сигнализирует о нормальной работе управляемого объекта или отклонении параметра от нормы.

ЭВМ и судоводитель (оператор) вместе с судном составляют систему человек — машина (СЧМ). Проблемы оптимального «поведения» СЧМ еще далеки от окончательного решения. Поэтому речь шла только об автоматизации управления судном, а не об автоматическом управлении этим сверхсложным объектом. Последнее — дело будущего.

ВЕЗДЕСУЩАЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКА

Электротехнике, чтобы стать вездесущей, потребовалось примерно 100 лет. Микроэлектроника, как подросток-акселерат, достигла этого за 15 лет и не собирается останавливаться.

Одному из авторов в 1959 г. посчастливилось: он стал слушателем редкостных тогда еще курсов программистов. Лекции по вычислительной математике и вычислительной технике должны были подготовить слушателей к сознательной творческой работе на ЭВМ «Урал». Она была смонтирована в огромном просторном зале с мощной вентиляцией, предотвращающей перегрев блоков и производила сильное впечатление. Сами блоки в шкафах выше человеческого роста излучали тепло и посверкивали красными отсветами накала сотен электронных ламп. У пульта располагалось главное устройство машины — вращающийся цилиндр магнитного барабана, содержащего оперативную память объемом в 1024 числа. Быстродействие вычислительной машины ограничивалось предельно допустимой скоростью вращения магнитного барабана и составляло около 100 операций в секунду.

Кроме математики, которая очень пригодилась и несколько не устарела за эти годы, и вычислительной схемотехники, которая устарела, не успев пригодиться, слушателям рассказывали о блестящих и ближайших перспективах кибернетики. Тогда всех занимал вопрос: может ли электронная вычислительная машина «мыслить и творить». Самые восторженные приверженцы всемогущества ЭВМ, признавая, что в принципе она все может, с сожалением подсчитывали немислимо огромный объем и мощность машины, хотя бы отдаленно напоминающей по своим возможностям мозг человека. Даже эти энтузиасты не могли предвидеть грядущих, а для нас уже реальных достижений технологии микроэлектроники.

Сегодня воплощением этих достижений является сверхбольшая интегральная схема (СБИС), в которой минимальный размер элемента составляет примерно 1 мкм, так что на одном кристалле размещаются до 1 млн элементов. Стоимость *чипов* — так называют кремниевые пластинки, несущие СБИС, — становится с каждым годом все меньше, надежность

их все выше, а область применения решительно не имеет границ.

Предсказывают, что по окончании происходящей сейчас технической революции, на каждого работающего будет приходиться несколько микропроцессоров, встроенных в различные машины и устройства, и, по крайней мере, одна персональная микро-ЭВМ.

Обладая скоростью порядка 100 тыс. операций в секунду, оперативной памятью объемом в десятки тысяч байт, возможностью сопряжения с разнообразными внешними устройствами для приема и воспроизведения информации, микроэлектронные приборы изменят не только функционирование технических систем, способы их производства и проектирования, но и характер труда инженера, техника, квалифицированного рабочего. Конечно, судовая электротехника — одна из наиболее развитых областей техники — не будет здесь исключением.

В ближайшее время необходимо создать полностью автоматизированные системы производства и распределения энергии на судне, базирующиеся на микропроцессорах, разработать цифровые системы контроля, диагностирования и управления практически для всех элементов судового электрооборудования. Автоматизировать нужно не только судовые системы и устройства, но и все звенья технологической цепочки: разработку, проектирование, изготовление, монтаж и испытания электрооборудования.

ЭВМ становится неременной частью технологической оснастки. Участие вычислительной техники начинается на этапе подготовки исходных данных для проектирования, в расчете оптимального размещения кабельных трасс и заканчивается обработкой результатов испытаний электрооборудования, которые позволят сократить сроки, объем и стоимость испытаний, повысить их достоверность.

Понимание принципов работы ЭВМ, «компьютерная грамотность» необходимы сегодня каждому квалифицированному рабочему. Поэтому с 1985—1986 учебного года во всех производственно-технических училищах Ленинграда введен предмет «Основы информатики и вычислительной техники». В вузах и техникумах этот предмет введен уже давно.

Информатика — сравнительно новый термин. Он четче и точнее, чем необъятно расширившее свой

смысл слово «кибернетика». Информатика занимается проблемами и средствами обработки информации, не вдаваясь в вопросы ее использования, например для управления. Это уже предмет *кибернетики* — науки об управлении.

Что нужно для того, чтобы перерабатывать информацию? Прежде всего, микроэлектронные вычислительные приборы, которые иногда, для краткости, обозначают английским термином «хардвер» (*hardware* — твердый товар). Сегодня — это большие и сверхбольшие интегральные схемы, на которых реализуются микропроцессоры, аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи и другие устройства, составляющие микроэлектронные ЭВМ, а также их интерфейс — входные и выходные устройства.

Но для того, чтобы ЭВМ заработала, мало подключить ее к источнику питания. Она оживет, если заложить в нее *программу*, определяющую процессы переключения сотен тысяч микроскопических транзисторов, составляющих интегральную схему. Совокупность программных средств, или софтвер (от англ. *software* — мягкий товар) задает режимы работы системы, в которую встроен микропроцессор, и позволяет получить тот результат, ради которого в системе применена ЭВМ. Именно программа осуществляет требуемое преобразование входной информации в заданный конечный результат.

Однокристалльный микропроцессор может поместиться в спичечный коробок. Трудоемкость его изготовления измеряется человеко-часами высокоавтоматизированного труда. А программа? Она представляет собой последовательность символов на одном из машинных языков. Ее физическим носителем могут быть обычные бумажные бланки, перфолента, перфокарты, различные магнитные накопители, запоминающие устройства ЭВМ. Разработка, отладка и ввод программы — процесс трудоемкий, на который порой затрачиваются человеко-месяцы или даже человеко-годы, потому что эти операции в отличие от изготовления самой ЭВМ выполняются вручную. Программа — не индустриально-промышленное, а ремесленно-штучное изделие, несущее на себе отпечаток личности автора — программиста. Потребность в программах заметно опережает скорость их изготовления. Программирование — узкое место в процессе внедре-

ния ЭВМ в производство. Поэтому индивидуальный творческий труд по составлению программ должен стать массовым.

Однако содержание информатики не исчерпывается ее техническими и программными средствами. Машина слепо следует программе, и если программа не адекватна задаче, ошибочна (или даже бессмысленна), то таким же будет и результат. Все определяется алгоритмом, положенным в основу программы. Поэтому так важен третий компонент информатики — алгоритмические средства. Академик А. А. Дородницын предложил обозначить их термином брейнвер (от англ. *brainware* — мозг).

Понятие *алгоритма* стало одним из центральных для всего круга дисциплин, использующих ЭВМ и методы математического моделирования. Алгоритм — искаженное арабское слово, происшедшее от имени средневекового математика IX в. Мухаммада ибн Мусы абу Абдалла аль Хорезми аль Маджуси аль Кутрубули. Для краткости его называли просто по названию города Хорезм, где он жил и работал, — Аль Хорезми. Это имя, трансформировавшись в слово «алгорифм» стало обозначать определенный способ вычислений, как правило, многошаговый.

Исходные данные принадлежат некоторому четко описанному множеству, процесс вычислений состоит из отдельных дискретных шагов. Должны быть исчерпывающе сформулированы правила остановки процесса и определен результат для всех возможных случаев разветвления алгоритма. Он может быть записан на естественном языке, на языке математических символов, на каком-либо из многочисленных алгоритмических языков высокого уровня, таких, как ФОРТРАН, АЛГОЛ, ПЛ-1, БЕЙСИК и др.

Алгоритм отличается от программы, представляющей собой произвольный текст, который можно ввести в память электронно-вычислительной машины, общностью, т. е. не зависит от типа ЭВМ, на которой будет программно реализован. Главное в нем — путь от исходных данных к результату, описание которого строго регламентировано. Содержание алгоритма не изменяется при переходе от одних обозначений к другим, от одного языка к другому. Удобнее всего записывать алгоритмы на лексиконе, предложенном академиком А. П. Ершовым. *Лексикон* — это

смесь слов и понятий естественного языка, математических символов, удачно найденных графических обозначений, операторов алгоритмических языков. Лексикон дает возможность компактно, легко и просто переводить записи любого алгоритма.

Самая массовая и доступная ЭВМ сегодня — программируемый микрокалькулятор (ПМК). ПМК может оказать немалую пользу в практической работе с судовым электрооборудованием. Приведем кратко характеристики отечественных ПМК.

Базовым программируемым микрокалькулятором является калькулятор «Электроника БЗ-34». Этот ПМК и аналогичные ему «Электроника МК-54» и «Электроника МК-56» выполняют около двухсот операций, имеют оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) на 14 ячеек, т. е. запоминают до 14 чисел. Кроме того, в них имеется так называемая стековая память на 4 ячейки. Программное запоминающее устройство (ПЗУ) позволяет записать и выполнить программу с числом команд до 98.

Модель «Электроника МК-61» имеет ОЗУ емкостью 15 ячеек и ПЗУ на 105 команд. Оперативные возможности этой модели несколько шире, чем у БЗ-34. В ней предусмотрены операции выделения целой и дробной части числа, определения его знака и модуля (абсолютной величины). Введены поразрядные логические операции, операция выбора числа, наибольшего из двух данных. Вычисление псевдослучайного числа также производится одной командой. Все это позволяет записывать программы примерно в полтора раза короче, чем в «Электронике БЗ-34».

Более совершенным калькулятором является «Электроника МК-52». В ней имеется полупостоянное запоминающее устройство (ППЗУ) емкостью 512 команд. ППЗУ способно длительно (до 5000 ч) хранить записанные в нем программы при отключенном питании, что освобождает от необходимости при включении заново вводить программы с клавиатуры. В МК-52 предусмотрен вход для подключения сменных модулей ПЗУ. В этих маленьких пластмассовых кубиках на магнитном носителе хранятся наборы стандартных программ, охватывающих различные области применения. Меняя модули, можно превращать МК-52 в специализированное вычислительное

устройство, не тратя времени на ввод и отладку стандартных программ.

Разрабатываются такие модели ПМК, как «Электроника МК-72», которые можно будет подключать к бытовому кассетному магнитофону и телевизору.

Создание разнообразных микрокалькуляторов открывает большие возможности для индивидуального творческого и повседневного труда во всех областях техники и технологии.

АВТОМАТИЗАЦИЯ — СРЕДСТВО, А НЕ ЦЕЛЬ

Судно, как и любое изделие, человек стремится создать лучше, быстрее, дешевле.

Это значит, что судно должно качественно, с полной сохранностью и в срок, несмотря ни на какие внешние и внутренние события и условия (шторм, резкую смену температуры от тропической жары до арктического холода, повышенную влажность и вибрацию, ограничения по габаритам для перевозимых грузов и пр.), доставить груз по назначению.

Без «умных» помощников — устройств автоматизации, которые следят за температурой, влажностью, вентиляцией, предотвращают возгорание или самовозгорание груза, его затопление водой, перевозка груза была бы очень сложной и потребовала бы многочисленного экипажа. Для значительного уменьшения себестоимости эксплуатации судов необходимо применение различных систем автоматизации как в судовой энергетике, так и в устройствах, следящих за сохранностью груза.

Рост интенсивного судовождения, стремление с минимальными издержками доставить груз по назначению, обусловили необходимость создания средств автоматизации управления судовождением.

Сегодня судовая энергетика, судовождение и технология перевозки грузов уже просто не могут обойтись без применения автоматических средств. Основные объекты комплексной автоматизации показаны на рис. 31.

Системы автоматизации на судах позволяют:

1) автоматизировать быстродействующие процессы, управление которыми для судоводителя (оператора) затруднительно



Рис. 31.

2) повысить комфортность судна для экипажа и пассажиров;

3) снизить эксплуатационные расходы.

К первой группе относятся процессы длительно-стью от десятых долей до нескольких секунд, а именно: регулирование частоты вращения и поддержание мощности гребного двигателя; регулирование частоты и напряжения на шинах судовой электростанции; отключение поврежденных участков электрической сети при коротких замыканиях и другие быстро протекающие процессы, от которых зависит безопасность работы судна, людей, сохранность груза.

Ко второй группе процессов следует отнести такие, которые позволяют обслуживающему персоналу не находиться постоянно у механизма или устройства для управления им, а контролировать по приборам в центральном посту управления (ЦПУ) или на мостике и, в случае необходимости, вмешиваться в управление. К таким системам автоматизации в энергетической установке относятся: дистанционное автоматическое управление (ДАУ) главным двигателем с ходового мостика; устройства автоматического запуска и остановки резервного генератора СЭЭС; поддержание уровня воды и давления пара главного

или вспомогательного котла; регулирование температуры охлаждающей воды и масла первичных двигателей; системы автоматизации погрузочно-разгрузочных работ, управления средствами судовождения, швартовными устройствами и т. п.

К третьей группе относят такие процессы, которые позволяют не только оптимизировать (минимизировать) расходы по эксплуатации судна, но значительно сократить его экипаж.

Для сокращения численности экипажа необходимо:

— сосредоточить на ходовом мостике управление механизмами и устройствами. На единый пульт должно быть выведено управление рулем, главной машиной, вспомогательной электростанцией, швартовными устройствами, системами пожаротушения, осушения и т. д.;

— использовать систему промышленного телевидения, обеспечивающую обзор машинного отделения и других помещений судна, а также пространства вокруг судна;

— использовать палубные механизмы и устройства с электрогидравлическим приводом, оборудованные дистанционным автоматическим управлением;

— автоматизировать управление люковыми закрытиями и аппарелью;

— дистанционно управлять системами и устройствами бункеровки;

— дистанционно управлять балластной системой для выравнивания крена и дифферента;

— автоматизировать работы по подготовке топлива и масла для главного двигателя, пускового воздуха;

— применять средства механизации мойки танков, покраски палуб и переборок;

— применять новые лакокрасочные покрытия для защиты от коррозии;

— повышать надежность судовых устройств и механизмов, использовать различные диагностические средства.

В соответствии с требованием Правил Регистра СССР все гражданские суда имеют три класса автоматизации: А1, А2, А3.

Неавтоматизированное судно на класс А3 предполагает постоянную вахту в машинном отделении

на постах управления. Управление главным двигателем, судовыми системами и агрегатами производится вручную. Имеется минимальный объем дистанционного контроля и сигнализации. Среднее количество экипажа 45—55 чел.

Автоматизация на класс А2 предполагает постоянную вахту в ЦПУ, периодическое обслуживание механизмов в машинном отделении, управление главным двигателем, запуск аварийных пожарных и балластных насосов, управление вентиляцией с мостика. В ЦПУ находится резервный пост управления главным двигателем, управление всей балластно-осушительной, топливной, масляной системами, судовой электростанцией, механизмами машинно-котельного отделения, текущий и допусковый контроль с индикацией и регистрацией по главной и вспомогательной установкам. Так, например, современная система контроля представляет оператору по вызову данные о состоянии свыше 500 параметров различных систем. С заданной оператором периодичностью основные параметры регистрируются на бумажную или магнитную ленту и выводятся на монитор (дисплей). Экипаж на таких судах составляет от 25 до 30 чел.

Автоматизация судна на класс А1 предполагает возможность работы всей электроэнергетической установки без вмешательства человека в течение 24 ч. Контроль за работой установки и судовыми системами производится с мостика и из кают членов экипажа.

При выборе уровня автоматизации судна и определении количества экипажа обычно руководствуются типом и назначением судна, величиной грузопотока, для которого предназначены суда, наличием ремонтных береговых баз и многих других факторов.

При этом следует учитывать, что возможность сокращения экипажа, как правило, ограничивает не степень автоматизации судна, а требования к борьбе за живучесть судна в случае пожара или затопления, т. е. те обстоятельства, когда без человека обойтись нельзя.

При рассмотрении вопросов автоматизации и сокращения экипажа следует учитывать распределение его трудозатрат на современных судах во время плавания. Ориентировочно такие трудозатраты определяются отдельно для палубной и машинной команд, а также по двум категориям: для работников, свя-

занных с эксплуатацией или техническим обслуживанием и ремонтом. Палубная команда около 60 % своего рабочего времени тратит на ремонт и техническое обслуживание, причем 50 % его тратится на борьбу с коррозией.

Машинная команда на ремонт и техническое обслуживание затрачивает только 30 % всего времени, здесь сказывается более высокий уровень механизации.

Эти цифры наглядно показывают «узкие» места в технической эксплуатации судна и возможные перспективные направления работ по совершенствованию судового оборудования.

Современное состояние науки и техники позволяет строить суда, имеющие минимальный экипаж (10—5 чел.), а также такие, которые могли бы эксплуатироваться полностью без вмешательства человека, находящегося на борту. Однако подобные суда в настоящее время с учетом построечных затрат и мер повышения надежности экономически невыгодны. Оценки показывают, что увеличение затрат на повышение надежности (безаварийной эксплуатации) значительно превзойдет расходы на содержание экипажа. Ведь катастрофа в океане приводит не только к потере груза, но и к миллионным убыткам за счет нарушения экологии — например, при аварии танкера или судна, перевозящего химически активные вещества.

На пути комплексной автоматизации должны решаться технические, экономические и социальные задачи.

При комплексной автоматизации рассматриваются три уровня.

Высший уровень иерархии автоматизации включает задачи обеспечения движения, живучести (непопляемость, пожаробезопасность, обеспечение жизнедеятельности экипажа), технологии обработки и сохранения груза.

Второй уровень иерархии автоматизации состоит в обеспечении бесперебойной работы главного двигателя, судовой электростанции, управления судном, судовыми системами, рефрижераторными трюмами, их вентиляцией.

Третий уровень заключается в автоматизации главной машины, системы охлаждения и смазки,

вспомогательной СЭС и котельной установки, локальной автоматизации различных устройств и механизмов судовождения и технологических процессов транспортировки грузов.

Сложность создания судовых систем автоматического регулирования состоит в широком диапазоне и номенклатуре регулируемых величин. Необходимо регулировать напряжение и частоту вращения генераторных агрегатов в десятые доли секунды, температуру, давление смазочного масла и охлаждающей воды, пара замедленно — в течение десятков минут.

В связи с широкой номенклатурой регулируемых величин на судах применяют непрерывные и дискретные регуляторы, автоматические и автоматизированные, работающие по отклонению регулируемых величин и по возмущающему воздействию, самонастраивающиеся и инвариантные.

Построение систем автоматического регулирования основано на двух принципах: измерении отклонения регулируемой величины (т. е. сравнение ее с заданной установкой), усилении сигнала и подаче его в исполнительный орган. В этом случае причина, вызвавшая отклонение регулируемой величины, не определяется. Так строят системы регулирования по отклонению.

Второй принцип построения систем автоматического регулирования состоит в компенсации возмущающих воздействий на систему регулирования. Определяют все основные причины, которые приводят к отклонению регулируемых величин, и создают устройства для их компенсации. Для стабилизации работы систем регулирования в статических и динамических режимах вводят жесткие и гибкие обратные связи.

Основой всех систем регулирования являются датчики, которые должны преобразовывать изменения температуры, давления, напряжения, силы тока, мощности, влажности, концентрации пыли, паров масла или топлива и другие электрические или механические сигналы, подаваемые в систему регулирования.

Широкий диапазон назначений и типов регуляторов, применяемых на судах, требует от их создателей и настройщиков разнообразных и глубоких знаний.

МОНТИРУЕМ, ПРОВЕРЯЕМ, НАСТРАИВАЕМ, СДАЕМ

Огромное количество устройств — потребителей электроэнергии, систем их автоматизации, измерительных устройств, главных и вспомогательных распределительных щитов, панелей сигнализации, связи, приборов и устройств управления,— все это на судне нужно смонтировать, установить на своем месте, закрепить. Кроме того, все приборы и устройства нужно соединить в строго указанном порядке не только внутри блока, устройства, но и между собой в единую «разумную» систему. Но этого мало. Конструктор рассчитывает и создает конструкцию, устройство в «голове» и на бумаге, чертеже, а электромонтажник должен все это «оживить», произвести пробный запуск, настроить и дать путевку в жизнь.

На десятках и сотнях заводов различных отраслей производится металл: алюминий, сталь, медь; на химических предприятиях — разные изоляционные материалы. Электротехнические заводы и предприятия создают генераторы, электродвигатели, усилители, управляющие и автоматические устройства, кабели разных сечений и марок, бортовые мини-ЭВМ и многое другое. На машиностроительных заводах изготавливают первичные двигатели, паровые и газовые турбины, двигатели внутреннего сгорания, различные насосы и вентиляторы, лебедки, краны, трубы — еще сотни и тысячи наименований элементов, из которых на судне будут собраны устройства, механизмы и системы.

Как судостроителю — монтажнику, электромонтажнику не потеряться в таком обилии судового оборудования? Достигают этого целым рядом сложных мероприятий.

Конструктор, проектируя «разумные» судовые устройства и механизмы, системы автоматики и автоматизации, разрабатывает «путеводитель», в котором показывает и описывает путь: как из сотен тысяч различных элементов сделать устройство или механизм с нужными свойствами, затем из этих устройств и механизмов сделать высокоорганизованную систему и из отдельных агрегатов и систем создать энергетическую установку — все судно.

Такой «путеводитель» содержит большое количество технологической документации, необходимой для выполнения на судне всех, в том числе и электромонтажных работ. Но ни один «путеводитель» не может помочь, если мы его не умеем читать. Чтобы научиться его понимать, нужно много знать, например, условные обозначения — азбуку чертежа.

Судовая технологическая документация определяет принципы проведения электромонтажных и наладочно-сдаточных работ в цехе и на судне, порядок выполнения и контроля технологических операций, необходимое количество комплектующих изделий, кабеля, материалов, методы и способы выполнения технологических операций, нормирование и организацию электромонтажных работ.

Электромонтажные работы на судах можно проводить различными методами, выбор которых зависит от многих факторов: типа судна, его водоизмещения, мощности судостроительного завода и длины стапеля, квалификации монтажников.

После определения метода постройки судна, разработки сетевых графиков, подготовки блоков, модулей корпусных частей, в которых установлены фундаменты для крепления устройств и механизмов, происходит насыщение судна электрооборудованием. Большая часть оборудования (до 15 % от всего объема) подготавливается в цехе. Расконсервируются готовые агрегаты, производится заготовка кабеля и опрессовка наконечников, подготавливается технологическая оснастка.

Одной из наиболее трудоемких электромонтажных работ на судах является прокладка кабеля — ее чрезвычайно трудно полностью механизировать. Кабелем, магистральным или местным, связано все электрооборудование, распределительные щиты, электродвигатели, устройства управления и связи.

В настоящее время на судне укладывают до 1500 км различного кабеля сечением от нескольких десятых квадратного миллиметра до 240 мм². Масса уложенного кабеля достигает сотен тонн. Чтобы воочию представить объем только кабелеукладочных работ, напомним, что длина судна колеблется от 150 до 250 м. Поскольку местные отрезки кабеля, прокладываемые в одном отсеке, имеют незначительную длину, на судне укладывается 10 тыс. отрезков ка-

беля. Масса кабеля на судне в настоящее время соизмерима с массой всего устанавливаемого электрооборудования. Суммарное сечение кабельных трасс на судах достигает десятков квадратных метров.

Рассматривают разные пути и изыскивают материалы, способные пропускать большие количества электроэнергии и информации при меньших сечениях и объемах кабеля. Предлагаются совершенно новые принципы передачи сигналов управления и информации с помощью волоконной оптики. Возможности этой новой техники огромны. Волоконно-оптический кабель в несколько раз легче металлического, он также прочен, гибок и надежен. Волоконно-оптические кабели дешевые, так как их изготавливают из сравнительно дешевого сырья — кварцевого стекла. Волоконно-оптические линии связи совершенно нечувствительны к электромагнитным и гальваническим помехам, которых так много на судне. Поэтому отпадает необходимость в их экранировании и других сложных, дорогостоящих средствах подавления помех. Но самое главное, — их практически неограниченная пропускная способность. По металлическим кабелям, в том числе коаксиальным и волноводным линиям, передаются сигналы частотой от нескольких десятков герц до сотен мегагерц. Оптические линии связи обеспечивают переход к сигналам с несущей частотой в десятки и сотни гигагерц, что позволяет передавать по кабелю информацию со скоростью до нескольких миллиардов бит в секунду. Аппаратура оптико-волоконной связи совсем не похожа на электромагнитную. Ее базой являются устройства квантовой электроники — лазеры, свето- и фотодиоды и пр.

Но для передачи электроэнергии волоконная техника не годится. Рассматриваются вопросы передачи электроэнергии с помощью шинпроводов, широкое внедрение которых сдерживается пока еще нерешенными проблемами их электропожаробезопасности и надежности.

Закончив монтаж электрооборудования, подготовив все системы и механизмы к пробному запуску, на ГРЩ с берега принимают электроэнергию, загружают на судно топливо и смазочные материалы для первого запуска машин, устройств и агрегатов. Производят «оживление», первую попытку вдохнуть

жизнь в оборудование, агрегаты, устройства, над которыми трудились сотни и тысячи людей. Производится проверка и запуск устройств и систем вспомогательных механизмов, обеспечивающих работу агрегатов в СЭС, запуск первичных двигателей, осуществляется проверка работы всех устройств автоматики и управления вспомогательной электростанцией. Параллельно с этим производят пуск других систем и механизмов, обслуживающих главный двигатель.

И вот начались швартовные испытания! Их называют швартовными потому, что в это время судно неподвижно и с помощью швартовных приспособлений оно крепко связано с берегом. Во время швартовных испытаний приходится все проверять снова, тратить время, энергию, расходовать материальные и трудовые ресурсы. Время швартовных испытаний на некоторых судах достигает нескольких месяцев, трудоемкость их соизмерима с трудоемкостью всего электромонтажа.

И все-таки швартовные испытания энергетической установки судна — не перестраховка. Такие испытания перед выходом судна в море обязательны по многим причинам, и главная из них — необходима уверенность в работоспособности оборудования. Слишком велики могут быть потери в случае выхода из строя какого-либо механизма или узла при эксплуатации судна. Однако даже самый прекрасный проект, лучшая технология изготовления и монтажа оборудования, проверки на заводах не могут гарантировать надежную работу энергетической установки. Это происходит по следующим причинам:

- возможны ошибки в документации, по которой создается электроэнергетическая установка;
- изменяются характеристики и параметры оборудования в процессе транспортировки и хранения;
- возможны ошибки при монтаже на судне.

Кроме того, ряд механизмов и устройств судна в общей системе «встречаются» впервые: совместная работа генераторных агрегатов между собой и с ГРЩ, рулевой машины и авторулевого и т. д. и т. п.

Во время швартовных испытаний необходимо не только запустить механизмы и устройства, но и произвести настройку элементов, обеспечивающую получение оптимальной настройки всей системы в целом.

Настройка и поиск неисправностей являются одним из основных, ответственных и наиболее сложных этапов ввода электрооборудования в эксплуатацию. Поэтому эту работу выполняют наиболее высококвалифицированные специалисты со средним и высшим специальным образованием и опытом настроечно-сдаточных работ.

Критериями настройки и сдачи судового оборудования являются требования Правил Регистра СССР. Регистр СССР — орган наблюдения за качеством постройки и эксплуатацией судна от начала и до конца его жизненного цикла. Представители инспекции Регистра СССР ведут наблюдение и контроль за всеми устройствами и системами, материалами, из которых создается судно и его оборудование, на всех электромашиностроительных и судостроительных предприятиях нашей страны и за рубежом. Ни одно устройство или механизм, ни один материал не может попасть на судно, не получив одобрения инспекции Регистра СССР.

Когда все оборудование судна будет настроено и будут проверены все характеристики на соответствие требованиям Правил Регистра СССР и формулярам-паспортам заводов-изготовителей, сданы представителям заказчика и Регистра СССР все системы, агрегаты и механизмы, только после этого судно готово к ходовым испытаниям — выходу в море для проверки мореходных качеств и работы всего оборудования по прямому назначению.

Проверкой работы электроэнергетической установки в море во всех режимах, вспомогательных устройств, навигационного оборудования заканчиваются ходовые испытания.

После контрольного освидетельствования — вскрытия и осмотра устройств и механизмов — Государственная комиссия принимает судно. Судно построено, обучено, живет и может работать. Счастливого плавания!

Как сократить столь сложный и трудоемкий путь рождения судна? Как совершенствовать, сокращать сроки постройки, повышать надежность работы оборудования и всего судна?

Надеемся, что читатель понял, — такая проблема комплексна, ее решение зависит не только от судостроительной отрасли промышленности, но и от тех-

нического развития всей страны, ибо судно создают десятки различных отраслей.

Наиболее перспективными направлениями в совершенствовании судостроения являются: разработка и внедрение САПР; механизация и роботизация всех трудоемких процессов; развитие блочно-модульной постройки судов, применение агрегатных методов монтажа; унификация и стандартизация устройств и механизмов; перенос монтажа в цех, поточное изготовление блоков, модулей.

Все эти мероприятия позволяют повысить производительность труда, сократить сроки постройки и затраты трудовых и материальных ресурсов на постройку судна.

ДОРОГИ В ПРОФЕССИИ

Все, что создано сегодня на нашей земле, — результат творческого труда рабочего человека. Современный рабочий в нашей стране имеет высокие профессиональные знания, широкий кругозор, активно участвует в управлении производством, в общественной жизни своего коллектива.

Вы познакомились с профессией судового электрика, с основными задачами, которые решает судовая электротехника при создании современных судов. Если вы решили связать свою жизнь с этой профессией, то, естественно, возникает вопрос: где получить специальность судового электрика, каковы условия приема, учебы?

Профессия судового электрика и электромонтажника необходима на предприятиях, где строят или ремонтируют суда. Поэтому естественно, что соответствующие учебные заведения группируются вокруг портов, расположенных на берегах морей и рек. Архангельск, Владивосток, Горький, Калининград, Керчь, Комсомольск-на-Амуре, Мурманск, Николаев, Новороссийск, Одесса, Рига, Севастополь — трудно перечислить все города, где нужны эти профессии и где можно их получить. Расскажем только об учебных заведениях Ленинграда.

В Ленинграде, крупнейшем центре судостроения, и в Ленинградской области шесть профтехучилищ, в которых можно получить специальность судового

электромонтажника. Училища имеют современную материальную базу и тесно связаны с ленинградскими судостроительными заводами. Учащиеся проходят практику непосредственно на строящихся судах, участвуют в монтаже судового электрооборудования. Это позволяет учащимся овладеть опытом передовиков судостроительного производства. Сегодня успешно действует новая форма сотрудничества между училищами и производством: договор между учебной группой и производственной бригадой. Выпускников ПТУ направляют на работу в те бригады и рабочие коллективы, где они проходили производственную практику, что способствует быстрейшему становлению и закреплению молодых рабочих на производстве.

Полученные знания проверяют на конкурсах профессионального мастерства (более 95 тыс. учащихся ПТУ в 1984 г. приняли участие в конкурсах «Лучший по профессии»), смотрах технического творчества, рационализации и изобретательства. Многие училища и их воспитанники награждены дипломами и медалями ВДНХ СССР.

В училищах созданы все условия для занятий физкультурой и спортом, за период обучения учащиеся сдают нормы Всесоюзного физкультурного комплекса «Готов к труду и обороне СССР», получают звания общественных инструкторов, тренеров и судей по различным видам спорта, многие учащиеся становятся разрядниками, мастерами спорта. Для повышения спортивного мастерства при Ленинградском совете Всесоюзного Добровольного общества «Трудовые резервы» созданы специализированные школы олимпийского резерва. В некоторых училищах, в том числе и готовящих судовых электромонтажников, организованы учебные группы со спортивным уклоном: по футболу, боксу, биатлону, прыжкам на лыжах с трамплина и лыжному двоеборью.

Большое внимание в училищах уделяется эстетическому воспитанию учащихся: работают разнообразные кружки художественной самодеятельности.

В училищах работают факультативы по математике, физике, предметные кружки, которыми руководят ученые и студенты многих вузов Ленинграда.

В средние профессионально-технические училища, подготавливающие квалифицированных рабочих со средним образованием, принимаются граждане

СССР, окончившие восьмилетнюю общеобразовательную школу, а в технические училища — окончившие среднюю общеобразовательную школу.

Прием молодежи в училища осуществляется путем конкурсного отбора по оценкам в аттестатах.

Обучение в училищах бесплатное. Успевающим учащимся выплачивается стипендия. Учащимся, получившим отличные и хорошие оценки по всем предметам и активно участвующим в общественной работе, размер стипендии повышается на 15—20 %.

Уволенные в запас из Вооруженных Сил СССР принимаются в училища в группы с сокращенным сроком обучения и выплатой во время обучения стипендии в размере тарифной ставки 1-го разряда.

Учащимся, сдавшим выпускные квалификационные экзамены, выдается диплом о присвоении соответствующей квалификации по профессии.

Выпускники училищ, получившие диплом с отличием, пользуются преимущественным правом при распределении на работу, при поступлении в высшие и средние специальные учебные заведения непосредственно после окончания училища, где имеют такие же преимущества, как и выпускники средних общеобразовательных школ, награжденные золотой медалью. Выпускники, имеющие в дипломе о среднем образовании оценки 5 и 4, а также средний балл не ниже 4,5 и сдавшие два вступительных экзамена по специальности не ниже, чем на 9 баллов, освобождаются от дальнейшей сдачи экзаменов.

Теперь познакомимся с ПТУ, где Вы можете получить квалификацию судового электромонтажника.

Среднее городское профессионально-техническое училище № 23 (198 147, Можайская ул., 49). Училище создано в 1943 г. Оно подготовило свыше 15 тыс. специалистов-электриков. В училище имеется 31 учебный кабинет, 7 производственных мастерских, библиотека, физкультурный зал. Базовое предприятие — трест № 45 «Электромонтаж» Главзапстроя.

Среднее городское профессионально-техническое училище № 25 (198096, Кронштадтская ул., 5). В 1980 г. училище отпраздновало 100-летний юбилей, это одно из первых в стране учебных заведений для подготовки кадров отечественного судостроения. Базовым предприятием училища является Ленинградское Адмиралтейское объединение. Училище многие

годы поддерживает дружеские связи с родственным училищем ЧССР.

Среднее городское профессионально-техническое училище № 30 (199226, ул. Кораблестроителей, 18). Училище готовит квалифицированных рабочих разнообразных специальностей, в том числе и судовых электромонтажников на базе Балтийского судостроительного завода им. Серго Орджоникидзе. Учащиеся и выпускники училища участвовали в строительстве таких знаменитых судов, как атомные ледоколы «Леонид Брежнев», «Сибирь», корабля науки «Космонавт Юрий Гагарин», стали инициаторами шефства над строительством атомохода «Россия».

Среднее городское профессионально-техническое училище № 36 (199050, В. О., 13-я Линия, 6). Училище готовит судовых электромонтажников, монтажников радиоаппаратуры, слесарей-сборщиков радиоаппаратуры. Училище создано в 1922 г., подготовило более 15 тыс. квалифицированных специалистов. Шефами училища являются Военная академия тыла и транспорта, факультет журналистики Ленинградского университета им. А. А. Жданова.

Среднее городское профессионально-техническое училище № 54 (194018, пр. Шверника, 43). Училище основано в 1945 г., расположено в новом комплексе с хорошо оборудованными учебными кабинетами, мастерскими, лабораториями. Имеются спортивный зал, стадион.

Среднее городское профессионально-техническое училище № 84 (198096, Кронштадтская ул., 15). Базовым предприятием является судостроительный завод им. А. А. Жданова. Учебные кабинеты и мастерские оснащены современным оборудованием и приборами. Учащиеся в период производственного обучения и практики участвуют вместе с рабочими промышленного предприятия «Эра» в создании сложных судовых электроэнергетических комплексов.

После окончания училища начинаются годы самостоятельной работы на судостроительных предприятиях нашего города, где в рабочих коллективах происходит становление молодого человека как гражданина и специалиста. Но наступает момент, когда молодой рабочий начинает чувствовать, что знаний, полученных в училище, ему уже недостаточно. Необходимо совершенствовать свое образование, чтобы не

застыть на месте. Для этого имеются различные формы технического образования. Некоторые квалифицированные рабочие предпочитают самообразование путем изучения специальной литературы по интересующим вопросам. В Ленинграде имеется ряд техникумов и институтов, где можно продолжить свое образование в области судовой электротехники.

Ленинградский политехнический техникум (193015, ул. Красной Конницы, 7). Техникум готовит техникув-электромехаников по проектированию, монтажу и эксплуатации контрольно-измерительных и регулировочных приборов. Техникум имеет дневную и вечернюю форму обучения.

Ленинградский техникум морского приборостроения (191187, ул. Чайковского, 11). Техникум имеет дневное и вечернее отделения и готовит специалистов по разработке и производству радиоэлектронных, радиолокационных и гидроакустических устройств, систем автоматического управления, электронно-вычислительных машин. Окончившие техникум в зависимости от избранной специальности получают квалификацию техника-электрика, техника-радиоэлектроника, техника-гидроакустика, техника-математика-программиста.

Ленинградский ордена Знак Почета судостроительный техникум (198020, Курляндская ул., 39). Техникум готовит специалистов в области судостроения, в том числе по электрооборудованию судов и судовой автоматике. После окончания техникума выпускники направляются на судостроительные заводы, в проектные и конструкторские организации судостроительной промышленности.

Получить специальность инженера-электрика по электрооборудованию и автоматизации судов можно в Ленинградском ордена Ленина электротехническом институте им. В. И. Ульянова (Ленина) (197022, ул. проф. Попова, 5). Институт является старейшим электротехническим учебным заведением страны, он основан в 1886 г. и отметил свое столетие. Институт располагает современной материально-технической базой. В учебном процессе заняты более 100 профессоров и докторов наук, около 600 доцентов и кандидатов наук. Институт имеет шесть дневных и два вечерних факультетов, в том числе факультет кора-

белой электрорадиоавтоматики, который создан в 1966 г.

Кафедры факультета «Электрооборудование и автоматизация судов» и «Корабельные системы управления» ведут подготовку инженеров-электриков по специальности «Электрооборудование и автоматизация судов»; кафедра «Радиооборудование кораблей» готовит инженеров-радиостов, которые будут разрабатывать сложные радиотехнические комплексы для судов различного назначения; кафедра «Автономные системы навигации и управления» выпускает инженеров-автоматчиков по специальности «Конструирование комплексов автономных систем навигации и управления». Подготовка специалистов по всем специальностям осуществляется как по дневной, так и по вечерней формам обучения с учетом запросов предприятий.

Факультет располагает базовыми кафедрами на ряде передовых предприятий отрасли, на которых студенты знакомятся с конкретной современной судовой техникой, участвуют в разработке и испытании сложных судовых электроэнергетических комплексов. В процессе обучения студенты широко используют вычислительную технику, участвуют в научно-исследовательских работах, выполняемых по заказам предприятий судостроительной промышленности, что позволяет им в дальнейшем быстро ориентироваться в условиях производства.

В Ленинградском ордена Ленина кораблестроительном институте (Лоцманская ул., 3) можно получить высшее образование по специальности «Электрооборудование судов» на заочном факультете института.

Если Вы выбрали для себя специальность судового электротехника и хотите участвовать в создании современных, оснащенных по последнему слову техники судов самого различного назначения, крайне нужных народному хозяйству страны,— знайте, что для этого требуются грамотные высококвалифицированные специалисты, что полученные знания необходимо непрерывно пополнять, чтобы быть на уровне требований, предъявляемых к специалисту, работающему в судостроительной промышленности. Для этого в нашей стране созданы все необходимые условия.

ЕСЛИ ТЕРМИН НЕПОНЯТЕН

Автомат (от греч. *automatos* — самодействующий) — устройство, выполняющее заданные функции без участия человека-оператора. Применение автоматов, освобождающих человека от непосредственного участия в процессах преобразования энергии, вещества и информации, называют *автоматизацией*. Направленное воздействие на работу технической системы называется *управлением*. Различают автоматизированное управление, которое происходит с участием человека или по его команде, и автоматическое.

Адекватность (от лат. *adaequatus* — приравненный, равный) — верное отображение всех существенных черт объектов в его модели (в пределах поставленной задачи).

Аккумулятор — многократно возобновляемый источник электрической энергии. При разряде химическая энергия веществ электродов преобразуется в электрическую энергию в цепи нагрузки. При заряде электроэнергия, поступающая от источника постоянного тока, восстанавливает электроны.

Аналоговый элемент — часть системы автоматического управления, обрабатывающая информацию в непрерывной форме. Сигналы на входе и выходе аналогового элемента (чаще всего ток или напряжение) непрерывны во времени.

Аппарель (от франц. *appareil* — въезд) — наклонный въезд в трюм судна с горизонтальным способом погрузки.

Асинхронная электрическая машина — машина переменного тока, в которой ток в обмотке ротора наводится вращающимся полем токов обмотки статора. ЭДС ротора может появиться только тогда, когда скорость вращения ротора отлична от скорости вращения поля статора. В режиме двигателя ротор вращается со скоростью, немного ниже синхронной.

Байт — часть машинного слова, состоящая из 8 двоичных разрядов. Используется как единица количества информации. Емкость памяти современных мини-ЭВМ может достигать 2 Мбайт.

Бионика — научное направление, которое использует живую природу в качестве источника новых технических идей, изучает биологические системы в целях создания новых машин, приборов, процессов, характеристики которых приближаются к характеристикам живых систем.

Брашпиль — судовая лебедка с двумя барабанами на горизонтальном валу для подъема якоря и швартовки.

Бункер (от англ. *bunker* — подвал) — помещение на судне для хранения топлива, питьевой или технической воды.

Бункеровка — прием топлива или воды на судно.

Винт регулируемого шага (ВРШ) — гребной винт, снабженный специальным устройством для разворота лопастей. Дистанционное управление разворотом (шагом винта) позволяет без

изменения частоты вращения главного двигателя изменять упор и тем самым скорость движения судна от «полного вперед» до «полного назад».

Волновод — канал, вдоль которого распространяются без существенного ослабления электромагнитные или звуковые волны.

Волоконно-оптический кабель — пучок световодов для передачи оптических сигналов.

Высшие гармоники — составляющие переменного тока или напряжения, изменяющиеся по синусоидальному закону с частотами в целое число раз большими, чем частота сети (частота первой гармоники). Характеризуют отклонение формы кривой тока или напряжения от синусоиды и вызывают дополнительные потери в элементах электрооборудования.

Главная машина — двигатель внутреннего сгорания (паровая или газовая турбина), предназначенный для приведения судна в движение. Главная машина вращает гребной винт, водометный или любой другой движитель (непосредственно или через электрическую передачу).

Гребной электродвигатель — электрическая машина постоянного или переменного тока, которая вращает гребной винт.

Двигатель с фазным ротором — асинхронный двигатель переменного тока, в котором обмотка ротора не замкнута накоротко, а выведена с помощью щеточного аппарата и контактных колец во внешнюю цепь. Такой двигатель сложнее короткозамкнутого, но имеет улучшенные механические характеристики.

Диагностика — методы и средства определения технического состояния различных устройств с помощью специальных технических приборов.

Дисплей (от англ. *display* — показ) — устройство отображения знаковой (алфавитно-цифровой) и графической информации, применяемое в *видеотерминалах* — устройствах ввода и вывода данных в ЭВМ.

Инвариантные системы — это системы автоматического управления, в которых ошибка, вызванная внешними возмущающими воздействиями, может быть полностью компенсирована (исправлена).

Исполнение судового электрооборудования — специальная конструкция элемента электрооборудования, обеспечивающая защиту от попадания внутрь элемента влаги, воды и взрывоопасных газов. Различают брызгозащищенное, водозащищенное, водонепроницаемое, погружное, взрывобезопасное исполнения.

Кабель магистральный — кабель, проходящий через одну или несколько водонепроницаемых переборок.

Квантовая природа явления (квантовый эффект) — термин, указывающий, что данное явление или эффект можно объяснить только с помощью квантовой механики (раздел физики, изучающий волновые свойства элементарных частиц).

Коаксиальный кабель — кабель из двух цилиндрических проводников, один из которых находится внутри другого. Проводники коаксиальны (т. е. имеют общую ось) и разделены слоем изоляции. Предназначен для передачи высокочастотных сигналов.

Коллектор — узел электрической машины постоянного тока, предназначенный для выпрямления и съема с помощью щеточного устройства тока с вращающейся обмотки якоря.

Креновая система — устройство, состоящее из насосов, трубопроводов, цистерн. Предназначено для управления креном судна или для раскачивания ледоколов.

Линейная цепь — электрическая цепь, состоящая из элементов, свойства которых не зависят от значений приложенного к ним напряжения и протекающего через них тока (резисторы и конденсаторы, катушки индуктивности без сердечника).

Магнитная индукция — векторная величина, характеризующая силу воздействия магнитного поля на ток. Измеряется в теслах (Тл).

Магнитный момент — векторная величина, характеризующая магнитные свойства тела и создаваемое им магнитное поле. Магнитный момент плоского контура, например, рамки с током в измерительном приборе — это вектор, перпендикулярный плоскости контура и равный произведению силы тока на площадь контура. Единица измерения магнитного момента $A \cdot m^2$.

Миля (морская) — мера длины, равная 1852 м. Определяется как средняя длина 1' (одной минуты) земной широты, так что 1° по меридиану содержит в среднем 60 морских миль.

Нелинейная цепь — электрическая цепь, в которой есть хотя бы один элемент, характеристики которого изменяются в зависимости от силы тока, протекающего по элементу, или от приложенного к нему напряжения (катушки со стальным или ферритовым сердечником, нелинейные резисторы и конденсаторы, полупроводниковые приборы и электровакуумные лампы).

Параметры источников электрической энергии — количественные характеристики мощности напряжения и частоты электроэнергии, используемой на судне.

Переменный ток — род тока, при котором мгновенные значения токов и напряжений изменяются по закону, близкому к синусоидальному.

Переход генератора в двигательный режим — процесс, при котором электрический генератор, работающий параллельно с другими генераторами на общую нагрузку, перестает вырабатывать электроэнергию и начинает потреблять ее из сети.

Подруливающее устройство — винт или другой движитель для бокового перемещения судна при маневрах и швартовке.

Прецессия (от лат. *praecedo* — предшествую) — движение оси вращения твердого тела, при котором эта ось описывает поверхность кругового конуса. Так движется, например, тяжелый волчок, ось вращения которого отклонена от вертикали.

Разность потенциалов (электрическое напряжение) — работа, отнесенная к единице электрического заряда, которую совершит этот заряд, перемещаясь от большего потенциала к меньшему. Разность потенциалов — причина возникновения электрического тока в проводнике.

Реверс (от англ. *reverse* — перевертывать) — изменение направления вращения. В электрических двигателях постоянного тока реверс осуществляется путем изменения направления тока возбуждения или тока якоря. В трехфазных двигателях переменного тока реверс осуществляется переключением любых двух фаз обмотки статора.

Регистрация — процесс документальной записи измеряемых физических величин.

Регулятор — устройство для автоматического поддержания заданного значения какой-либо регулируемой величины, напри-

мер, частоты вращения. Различают аналоговые и цифровые регуляторы.

Сверхпроводники первого рода — материалы, сохраняющие сверхпроводимость при очень низких температурах (4—9 К) и в слабых магнитных полях (0,1—0,2 Тл) (ртуть, свинец, чистый ниобий).

Сверхпроводники второго рода — вещества, сохраняющие сверхпроводимость в сильных магнитных полях (до 30 Тл), при температурах до 23 К. Допустимая плотность тока в этих материалах составляет до 1 кА/мм² (для сравнения: в обычных проводниках порядка 10 А/мм²). Эти вещества не обладают диамагнитными свойствами — магнитное поле проникает в них дискретными порциями (квантами магнитного потока).

Сверхпроводимость — скачкообразное исчезновение электрического сопротивления у металлов и сплавов при охлаждении их ниже определенной (критической) температуры.

Селективная защита — система защиты электрической сети, которая должна отключать только поврежденный участок. Селективность (избирательность) защиты обеспечивается автоматическими выключателями, которые коротко называют автоматами.

Сервисные средства ЭВМ — программы и средства управления вспомогательными устройствами и режимом работы ЭВМ.

Сим/м — единица удельной проводимости материала (проводимость куба со стороной 1 м). Сименс — единица измерения проводимости в системе СИ (соответствует проводимости участка цепи сопротивлением в 1 Ом).

Синхронизация — процесс согласования двух взаимосвязанных колебаний. В судовой электротехнике — уравнивание частоты и амплитуды напряжения, а также углов нагрузки параллельно работающих генераторов.

Сопротивление изоляции — показатель, характеризующий качество изоляции судового электрооборудования (отношение постоянного напряжения, приложенного к участку изоляции, к установившемуся току утечки). Допускаются к эксплуатации участки с сопротивлением изоляции не менее 0,5 МОм.

Сопротивление электрическое — сопротивление, которое оказывает участок цепи движущимся по ней электрическим зарядам. Сопротивление постоянному току является активным (омическим), сопротивление переменному току имеет активную и реактивную составляющие и называется полным. Активное сопротивление вызывается взаимодействием носителей тока с ионами вещества. Оно характеризует рассеяние электрической энергии в проводнике, переход ее в тепловую. Полное сопротивление характеризует, кроме того, переход электрической энергии в энергию магнитного поля индуктивных элементов цепи и в энергию электрического поля в емкостных элементах. Сопротивление измеряется в омах.

Стековая память (от англ. *stack* — кипа, стопка) — участок оперативной памяти ЭВМ, организованный так, что числа из него можно извлекать только в порядке, обратном порядку занесения их в память. Позволяет экономно программировать вычисления по формулам, не используя адреса ячеек, где хранятся исходные и промежуточные результаты вычислений.

Танк (от англ. *tank* — цистерна) — емкость для жидких или сыпучих грузов.

Технологическая оснастка — орудия производства, добавляемые к технологическому оборудованию, для выполнения опреде-

ленной части технологического процесса (приспособления, контрольные и защитные устройства, повышающие эффективность и безопасность производства).

Тиристор (от греч. *thyra* — дверь и англ. *resistor* — сопротивление) — полупроводниковый прибор, обладающий свойствами управляемого электрического вентиля. Открывание тиристора происходит при подаче сигнала на управляющий электрод.

Управляемый выпрямитель — устройство для преобразования переменного тока в постоянный, собранное на управляемых вентилях — приборах, которые во включенном состоянии пропускают ток только в одном направлении (тиристоры, тиратроны, игнитроны, транзисторы). Управляя моментом включения вентиля, можно плавно регулировать значение выпрямленного напряжения.

Фидер (англ. *feeder* — питатель) — линия передачи, кабель, по которому электроэнергия передается к отдельному приемнику.

Швартовые устройства — совокупность приспособлений и механизмов (швартовы, клюзы, кнехты, лебедки и др.) для удержания судна у причала или у борта другого судна.

Шельф (от англ. *shelf* — полка) — материковая отмель, подводная равнина вокруг материков, простирающаяся от береговой линии до глубины, на которой отмечается резкое увеличение крутизны. Площадь шельфа — 26,6 млн кв. км (что составляет 7,4 % поверхности Мирового океана), средняя глубина — 130 м, ширина — 65 км. Сегодня шельф — наиболее перспективная для добычи полезных ископаемых часть морского дна.

Шпиль (кабестан) — лебедка с барабаном на вертикальном валу для выбирания якорных и швартовых канатов.

Электромагнитное поле — одно из физических полей, носитель взаимодействия электрических зарядов. Характеризуется двумя векторными функциями координат: напряженностью электрического поля и индукцией магнитного поля. Частные случаи электромагнитного поля — электрическое поле неподвижных зарядов и магнитное поле неподвижных проводников с постоянными токами.

Электроэнергетическая система судна — совокупность электростанций, распределительных устройств, приемников электроэнергии, связанных линиями передачи и объединенных процессом выработки и потребления электрической энергии на судне в целом.

Электромагнитные помехи — воздействие электромагнитного поля на различное электрооборудование (в первую очередь на радиооборудование), влияющее на качество его работы. Электромагнитные поля на судах появляются при электрических разрядах, искрении электрооборудования, электрических дугах, быстрых изменениях больших величин токов. Одним из способов защиты от электромагнитных полей является экранированный кабель, т. е. кабель в металлической оболочке.

Энергия (от греч. *en* — внутри, *ergon* — работа, т. е. содержащий в себе работу) — общая количественная мера всех форм движения, характеризующая их способность совершать работу.

Язык программирования — набор символов и правил, управляющих соединением этих символов, предназначенный для описания процессов решения задач на ЭВМ. Различают языки высокого уровня (АЛГОЛ, ФОРТРАН, БЭЙСИК и др.), в которых запись программы не зависит от системы команд конкретной ЭВМ, и машинно-ориентированные языки, в которых программа записывается в терминах команд данной ЭВМ (например, язык программируемых микрокалькуляторов БЗ-34).

СОВЕДУЕМ ПРОЧИТАТЬ

- Абчук В. А.** Теория риска в морской практике. Л., Судостроение, 1983.
- Владимиров И. Н.** Стража на океане. М., Молодая гвардия, 1984.
- Вэсьер Р.** Человек и подводный мир. Л., Гидрометеониздат, 1971.
- Ершов А. П.** Человек и машина. М., Знание, 1985.
- Залманзон Л. А.** Беседы об автоматике и кибернетике. М., Наука, 1985.
- Захаров О. Г.** Настройка аппаратуры и систем судовой электроавтоматики. Л., Судостроение, 1982.
- Иванов С. М.** Человек среди автоматов. М., Знание, 1982.
- Кириллин В. А.** Энергетика сегодня и завтра. М., Педагогика, 1983.
- Китаенко Г. И. и др.** Перспективы развития судовой электротехники. Л., Судостроение, 1980.
- Кичаев В. Е.** Электротехника с основами промышленной электроники. М., Высшая школа, 1985.
- Кринецкий И. И.** Автоматы несут вахту. Л., Судостроение, 1985.
- Криницкий Н. А.** Алгоритмы вокруг нас. М., Наука, 1984.
- Любимов К. В., Новиков С. М.** Знакомимся с электрическими цепями. М., Наука, 1981.
- Ляликов А. П., Саруханов В. А.** Корабли, автоматы, роботы. Л., Судостроение, 1985.
- Максимов Ю. И.** Новые источники и преобразователи электрической энергии на судах. Л., Судостроение, 1980.
- Манойлов В. Е.** Электричество и человек. Л., Энергониздат, 1982.
- Мнеян М. Г.** Новые профессии магнита. М., Просвещение, 1985.
- Нарусбаев А. А.** Катастрофы в морских глубинах. Л., Судостроение, 1982.
- Нелепин Р. А., Соболев Л. Г., Волков А. А.** Автоматизация морских судов. Л., Судостроение, 1983.
- Попилов Л. Я.** От кия до клотика — всюду химия. Л., Судостроение, 1977.
- Ракицкий Б. В.** Судовая энергетика. Введение в специальность. Л., Судостроение, 1984.
- Рудерман Л. З., Константинов В. Н., Никитичев М. М.** Микроэлектроника в управлении судовой энергетикой. Л., Судостроение, 1984.
- Сюбаев М. А., Хайкин А. Б., Шейнцев Е. А.** Аварии и неисправности в судовых электрических установках. Л., Судостроение, 1980.
- Функельман В. Л.** Жизнь корабля. Л., Судостроение, 1978.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Электротехника, испытанная морем	5
Как электричество пришло на корабль	7
Немного физики	13
Где на корабле рождается электроэнергия	26
Кто потребляет электроэнергию	34
Как передавать электроэнергию и как управлять ею	41
Электродвижение сегодня и завтра	48
Движение без движения	60
Электромагнитный щит корабля	68
Нам помогает ЭВМ	77
Вездесущая микроэлектроника	84
Автоматизация — средство, а не цель	89
Монтируем, проверяем, настраиваем, сдаем	95
Дороги в профессии	100
Если термин непонятен	106
Советуем прочитать	111

СЕРИЯ «КЕМ БЫТЬ!»

**Леонид Маркович Серебряков
Дмитрий Матвеевич Лернер
Юрий Иванович Максимов**

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И КОРАБЛЬ

Заведующий редакцией А. Д. Старков
Редактор А. И. Голикова
Художественный редактор О. П. Андреев
Технические редакторы Р. К. Чистякова и Т. Н. Павлюк
Корректор А. И. Оныщак

ИБ № 1218

Сдано в набор 31.03.86. Подписано в печать 25.07.86. М-35483.
Формат 84×108^{1/32}. Бумага кн.-журн. импорт. Гарнитура литератур-
ная. Печать высокая. Усл. печ. л. 5,88. Усл. кр.-отт. 6,09. Уч.-изд.
л. 6,0. Издательский № 4100-85. Тираж 22 000 экз. Заказ № 122.
Цена 30 коп.

Издательство «Судостроение». 191065, Ленинград, ул. Гоголя, 8.

Ленинградская типография № 2 головное предприятие ордена
Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Тех-
ническая книга» им. Евгении Соколовой Союзполиграфпрома
при Государственном комитете СССР по делам издательств, по-
лиграфии и книжной торговли. 198052, г. Ленинград, Л-52, Из-
майловский проспект, 29.

30 коп.



Где на корабле рождается электроэнергия, почему сегодня без нее невозможно мореплавание, кто электрифицирует корабли — это и многое другое Вы узнаете, когда прочитаете книгу.

