



**МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО МОРСКОГО И РЕЧНОГО ТРАНСПОРТА
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА
ИМЕНИ АДМИРАЛА С. О. МАКАРОВА**

А. В. Григорьев

**СУДОВЫЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ**

*Рекомендовано Федеральным учебно-методическим объединением
в системе высшего образования по укрупненной группе специальностей
и направлений подготовки 26.00.00 «Техника и технологии
кораблестроения и водного транспорта» в качестве учебника
для реализации основной профессиональной образовательной
программы высшего образования по специальности 26.05.07
«Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики»*

**Санкт-Петербург
Издательство ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова
2025**

Оглавление

Список сокращений

Введение

1. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ПАРАМЕТРЫ И КЛАССИФИКАЦИЯ СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

1.1. Базовые термины и определения

1.2. Состав, классификация и основные характеристики СЭЭС

1.3. Условия эксплуатации, режим работы, основные параметры и показатели СЭЭС

1.4. Качество электроэнергии судовой сети

1.5. Судовые приемники электроэнергии

2. СУДОВЫЕ ИСТОЧНИКИ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

2.1. Базовые сведения

2.2. Дизель-генераторные агрегаты

2.3. Паротурбогенераторные агрегаты

2.4. Газотурбогенераторные агрегаты

2.5. Судовые электрические генераторы

2.6. Кислотные аккумуляторные батареи

2.7. Щелочные аккумуляторные батареи

2.8. Преобразователи электроэнергии. Источники бесперебойного питания

2.9. Электроснабжение судна от береговой сети. Электробезопасность

3. СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ СЭЭС

3.1. Структурная схема автономной СЭЭС

3.2. Структурная схема СЭЭС с отбором мощности от главной энергетической установки

3.3. Структурная схема единой электроэнергетической системы

3.4. Структурная схема СЭЭС судов с атомной энергетической установкой

4. РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ЧАСТОТЫ СУДОВЫХ ГЕНЕРАТОРНЫХ АГРЕГАТОВ

4.1. Регулирование частоты вращения судовых генераторных агрегатов

4.2. Характеристики синхронных генераторов

4.3. Принципы регулирования напряжения и системы возбуждения синхронных генераторов

4.4. Начальное возбуждение синхронного генератора

4.5. Автоматический регулятор напряжения, работающий по отклонению

4.6. Автоматический регулятор напряжения, работающий по принципу амплитудно-фазового компаундирования

4.7. Автоматический регулятор напряжения генератора комбинированного типа

4.8. Автоматический регулятор напряжения бесщеточного генератора

5. ЭЛЕКТРОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА И ЗАЩИТНО-КОММУТАЦИОННАЯ АППАРАТУРА

5.1. Назначение и виды электrorаспределительных устройств

5.2. Главные и вторичные распределительные щиты

5.3. Коммутационная аппаратура распределительных щитов

5.4. Защитная аппаратура распределительных щитов

6. СУДОВЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ

6.1. Схема распределения электрической энергии на судне

6.2. Системы распределения электрической энергии на судне

6.3. Судовые электрические кабели и провода

6.4. Выбор и проверка кабеля на потерю напряжения

6.5. Контроль состояния изоляции судовых электрических сетей

7. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ГЕНЕРАТОРНЫХ АГРЕГАТОВ

7.1. Преимущества и недостатки параллельной работы генераторных агрегатов

7.2. Включение синхронных генераторов на параллельную работу

7.3. Способы синхронизации генераторов переменного тока

7.4. Автоматическая синхронизация генераторов

7.5. Распределение активной нагрузки при параллельной работе генераторов

7.6. Распределение реактивной нагрузки при параллельной работе синхронных генераторов

7.7. Колебания параметров при параллельной работе

8. КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ В СЭЭС

8.1. Причины и типы коротких замыканий в судовых сетях

8.2. Короткое замыкание синхронных генераторов

8.3. Короткое замыкание генераторов постоянного тока

8.4. Электродинамические действия токов короткого замыкания

8.5. Термические действия токов короткого замыкания

8.6. Расчет токов короткого замыкания

9. ПРОЦЕССЫ ПРИ ВНЕЗАПНОМ ИЗМЕНЕНИИ НАГРУЗКИ И УСТОЙЧИВОСТЬ РАБОТЫ СЭЭС

9.1. Изменение напряжения генератора переменного тока при внезапном изменении нагрузки

- 9.2. Изменение напряжения генератора постоянного тока при внезапном изменении нагрузки
- 9.3. Статическая устойчивость параллельной работы синхронных генераторов
- 9.4. Динамическая устойчивость синхронных генераторов
- 9.5. Устойчивость работы асинхронного электродвигателя
- 10. ЗАЩИТА В СЭЭС
 - 10.1. Назначение и основные требования
 - 10.2. Построение система защиты генераторов
 - 10.3. Защита генератора от перегрузки
 - 10.4. Защита генератора от обратной мощности
 - 10.5. Защита генератора от минимального и повышенного напряжения
 - 10.6. Защита генератора от внутренних повреждений
 - 10.7. Защита генератора от токов короткого замыкания
 - 10.8. Защита приемников электроэнергии и электрических сетей
 - 10.9. Сертификации
 - 10.10. Контроль и оценка качества
- 11. СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И АВТОМАТИЗАЦИИ СЭЭС
 - 11.1. Основные термины и определения. Требования к системам автоматизации
 - 11.2. Принцип построения системы автоматизации СЭЭС
 - 11.3. Система автоматического управления и защиты приводного двигателя генераторного агрегата
 - 11.4. Система управления судовой электростанцией
 - 11.5. Микропроцессорные системы автоматического управления и защиты
- 12. ВАЛОГЕНЕРАТОРНЫЕ УСТАНОВКИ
 - 12.1. Общие сведения
 - 12.2. ВГУ на судах с винтом регулируемого шага
 - 12.3. ВГУ с планетарными передачами
 - 12.4. ВГУ с синхронным генератором и полупроводниковым преобразователем
 - 12.5. ВГУ с асинхронизированным генератором
- 13. ЕДИНЫЕ И ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ СЭЭС
 - 13.1. Общие сведения о ЕЭЭС
 - 13.2. ЕЭЭС с СЭД двойного рода тока
 - 13.3. ЕЭЭС с СЭД переменного рода тока
 - 13.4. Высоковольтные СЭЭС: состав и классификация
 - 13.5. Структурные схемы ЕЭЭС с СЭД
 - 13.6. Основные требования к высоковольтному электрооборудованию

ВВЕДЕНИЕ

Учебник по дисциплине «Судовые автоматизированные электроэнергетические системы» соответствует Федеральному государственному образовательному стандарту высшего образования (ФГОС ВО) и предназначен для курсантов (студентов) вузов, обучающихся по специальности 26.05.07 «Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматизации», для формирования универсальных / общепрофессиональных / профессиональных компетенций по уровню специалитета/:

– 260507.01 «Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики»;

– 260507.02 «Эксплуатация судового электрооборудования и автоматики судов с ядерными энергетическими установками.

Учебник состоит из тринадцати глав. В первой главе приведены основные термины и определения, рассмотрен состав назначение и классификация судовых электроэнергетических систем. Во второй главе рассмотрены судовые источники и преобразователи электроэнергии, включая генераторные агрегаты и аккумуляторные батареи. В третьей главе приведены структурные схемы СЭЭС. В четвертой главе рассмотрены вопросы регулирования напряжения и частоты в судовой сети. В пятой главе приведены назначение и принцип действия электрораспределительных устройств. Шестая глава посвящена вопросу распределения электроэнергии по судну. В седьмой главе рассмотрен режим параллельной работы генераторных агрегатов. В восьмой главе рассмотрены вопросы причин возникновения короткого замыкания в судовых сетях и влиянию токов короткого замыкания на судовое оборудование. В девятой главе рассмотрены процессы, возникающие при внезапном изменении нагрузки и устойчивость СЭЭС. Десятая и одиннадцатая главы посвящены вопросам защиты и управлению СЭЭС. В двенадцатой и тринадцатой главах рассмотрено назначение, принцип действия, состав валогенераторных установок и единых судовых электроэнергетических систем, в том числе высоковольтных.

Знания, полученные при изучении дисциплины, необходимы инженеру-электромеханику для грамотной технической эксплуатации судового электрооборудования и средств автоматизации.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

1.1. Базовые термины и определения

Судовая электроэнергетическая система (СЭЭС) представляет собой сложный электротехнический комплекс устройств, объединенных процессом производства, преобразования и распределения электроэнергии между приемниками, преобразующими электроэнергию в другие виды энергии (механическую, тепловую, световую и т.п.).

Основной частью СЭЭС является судовая электростанция (СЭС), состоящая из источников электроэнергии и главного электрораспределительного щита (ГРЩ), объединенных единым процессом производства и распределения электроэнергии.

Структурная схема СЭЭС — схема, на которой изображены генераторы электроэнергии, основные аппараты, преобразователи и схема распределения электрической энергии по приемникам (потребителям).

Приемник электрической энергии — устройство, в котором происходит преобразование электрической энергии в другой вид энергии для ее использования.

Потребитель электрической энергии — юридическое или физическое лицо, осуществляющее пользование электрической энергией.

1.2. Состав, классификация и основные характеристики судовых электроэнергетических систем

Основные СЭС обеспечивают электроэнергией все технические средства судна во всех эксплуатационных режимах, включая аварийный (пробоина, пожар).

Аварийная СЭС обеспечивает питание только особо важных потребителей в случае отказа основной СЭС. Аварийную СЭС размещают в помещении, находящемся выше главной палубы (палубы переборок) с выходом на открытую палубу.

Специальные СЭС могут использоваться на судах для электро-снабжения технических комплексов (буровая установка, рыбоперерабатывающий завод, гребная электрическая установка и др.). Между электростанциями в СЭЭС устанавливают перемычки.

Источниками электроэнергии на судах являются генераторные агрегаты (ГА). В качестве ГА применяют дизель-генераторы, турбогенераторы, валогенераторы (генераторы с приводом от гребного вала), утилизационные турбогенераторы (генераторы с приводом от утилизационной турбины).

По назначению источники электроэнергии подразделяют на основные, резервные и аварийные.

Основные источники электроэнергии предназначены для работы в любом нормальном режиме эксплуатации СЭЭС. Резервные источники электроэнергии предназначены для обеспечения резерва мощности, аварийные — для работы в аварийном режиме СЭЭС.

В СЭЭС допускается применение следующих систем распределения электрической энергии. Для переменного тока напряжением до 1 000 В:

- трехфазная трехпроводная изолированная сеть;
- трехфазная трехпроводная с нулевой точкой, заземленной через высокоомный резистор или реактор.

Дополнительно для напряжений до 500 В включительно используется:

- трехфазная четырехпроводная изолированная сеть;
- трехфазная четырехпроводная с нулевой точкой сеть, заземленная через высокоомный резистор или реактор;
- однофазная двухпроводная изолированная сеть;
- однофазная двухпроводная с нулевой точкой сеть, заземленная через высокоомный резистор или реактор.

Режим работы судна определяет количество и мощность приемников электроэнергии, создающих нагрузку у генераторных агрегатов СЭЭС. Судно может находиться в одном из следующих режимов эксплуатации: ходовом, маневренном, стоянке с грузовыми или без грузовых операций, аварийном.

Различают кратковременную и длительную параллельную работу генераторных агрегатов. Кратковременная работа — работа при переводе нагрузки с одного генераторного агрегата на другой. Длительная параллельная работа используется при нормальном состоянии СЭЭС в ходовых и маневренных режимах эксплуатации судна.

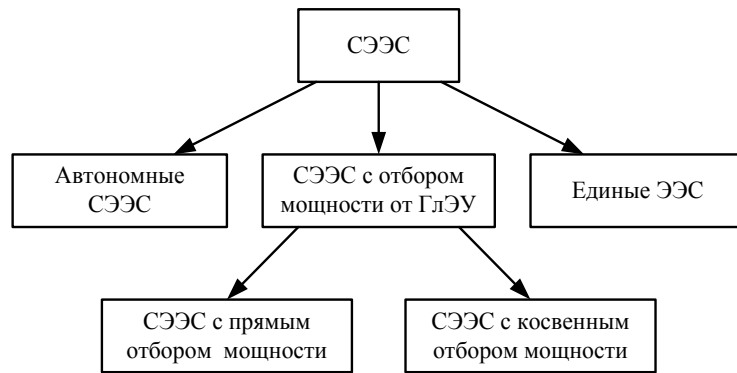
СЭЭС можно классифицировать по двум признакам:

- по количеству электростанций, входящих в состав СЭЭС;
- по связи с главной энергетической установкой (ГлЭУ), обеспечивающей движение (ход) судна.

По второму признаку СЭЭС делят:

- на автономные, не имеющие непосредственной связи с ГлЭУ;
- с отбором мощности от ГлЭУ;
- единые, обеспечивают питание общесудовых приемников и систему электродвижения судна.

Если СЭЭС одновременно обеспечивает электроэнергией гребные электродвигатели (ГЭД) и общесудовые приемники, то в этом случае судовую электроэнергетическую систему называют единой электроэнергетической системой (ЕЭЭС), классификация которая показана на рисунке.



Классификация СЭЭС
по типу связи с ГлЭУ

1.3. Условия эксплуатации, режим работы, основные параметры и показатели СЭЭС

Нормальный режим работы — режим, при котором функционирование СЭЭС осуществляется при заданных условиях работы. Ненормальный режим работы — режим, не соответствующий заданным условиям (КЗ, перегрузка и т. д.).

Если ненормальный режим работы связан с опасностью для жизни людей или материальным ущербом, он называется аварийным режимом работы.

Различают установившиеся и переходные режимы работы СЭЭС:

- установившиеся (стационарные) — параметры постоянны или очень медленно изменяются в заданных пределах;
- переходные — параметры изменяются быстро от одного установившегося режима к другому.

Частота напряжения в СЭЭС отечественных судов принята равной 50 Гц. На судах иностранной постройки она может составлять 60 Гц.

Повышение частоты напряжения ради снижения массогабаритных показателей электрооборудования является в настоящее время технически нецелесообразным.

1.4. Качество электроэнергии судовой сети

Под качеством электрической энергии понимается совокупность свойств электроэнергии, определяющих ее пригодность для питания судовых приемников.

Все приемники электроэнергии нормально работают только в том случае, когда они бесперебойно получают электроэнергию необходимого качества и в необходимом количестве.

Качество электроэнергии принято характеризовать рядом показателей. Под показателем качества электроэнергии понимается величина, характеризующая качество электрической энергии по одному или нескольким ее параметрам. Согласно требованиям Правил РС, для СЭЭС качество электроэнергии принято характеризовать следующими показателями.

В установившихся режимах:

1. Длительное (установившееся) отклонение напряжения от номинального значения:

$$\Delta U_{уст} = \frac{U - U_{ном}}{U_{ном}} 100\%,$$

где $\Delta U_{уст}$ — величина, равная разности между действительным U и заданным $U_{ном}$ значениями напряжений (выраженная в процентах).

2. Длительное (установившееся) отклонение частоты от номинального значения:

$$\Delta f_{уст} = \frac{f - f_{ном}}{f_{ном}} 100\%,$$

где $\Delta f_{уст}$ — величина, равная разности между действительным f и заданным $f_{ном}$ значениями частоты (выраженная в процентах).

3. Кратковременное отклонение напряжения ΔU_k , %, вычисляемое по формуле

$$\Delta U_k = 100(U_m - U_{ном}) / U_{ном},$$

где U_m — наибольшее или наименьшее значение напряжения в переходном процессе, определяемое путем осциллографирования напряжения.

4. Кратковременное отклонение частоты Δf_k , %, вычисляется по формуле

и время восстановления $t_{эф}$ частоты f .

5. Коэффициент гармонических составляющих кривой напряжения:

$$K_u = \sqrt{\sum_{k=2}^{40} \left(\frac{U_{p,k}}{U_{p,1}} \right)^2} 100 \%,$$

где $U_{p,k}$ — среднеквадратичное значение напряжения k -й гармоники;
 k — порядок гармоники.

Допустимые отклонения напряжения и частоты в судовых сетях

Характеристика	Отклонение от номинальных значений		
	Длительное, %	Кратковременное	
		%	время, с
Напряжение	+6 ... –10	± 20	1.5
Частота	± 5	± 10	5
Напряжение (постоянного тока)	±10	5 10	Циклически импульсное

Значение коэффициента нелинейных искажений напряжения не должно превышать следующих значений:

- на выводах генераторов — 5 %;
- на шинах распределительных устройств силовой сети — 8 %

По особому согласованию с РС допускается использование отдельных шин с $K_i > 8 \%$ для питания мощных источников гармонических составляющих напряжения и невосприимчивого к ним электрооборудования при условии, что указанные шины подключаются к основным шинам сети через развязывающие устройства.

1.5. Судовые приемники электроэнергии

Приемник электроэнергии — устройство, предназначенное для преобразования электроэнергии в другой вид энергии.

По степени важности приемники электроэнергии подразделяют на три группы:

1-я группа — особо ответственные приемники, перерыв в питании которых может привести к аварии судна и гибели людей.

2-я группа — ответственные приемники, обеспечивающие работу оборудования судовой энергетической установки (СЭУ), управление судном и сохранность груза.

3-я группа — малоответственные приемники, допускающие перерыв питания в аварийных ситуациях или при перегрузке СЭС – бытовая вентиляция, камбузное оборудование и др.

2. СУДОВЫЕ ИСТОЧНИКИ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

2.1. Базовые сведения о судовых источниках электроэнергии

Основными источниками электроэнергии на судах являются генераторные агрегаты и статические источники электроэнергии, к которым прежде всего следует отнести аккумуляторные батареи (АБ).

На каждом судне должен быть предусмотрен основной источник электрической энергии мощностью, достаточной для обеспечения питания всего электрического оборудования.

Число и мощность генераторов с независимым приводом и электрических преобразователей, входящих в состав основного источника электрической энергии, должны быть такими, чтобы при отказе любого из них оставшиеся обеспечивали выполнение следующих функций:

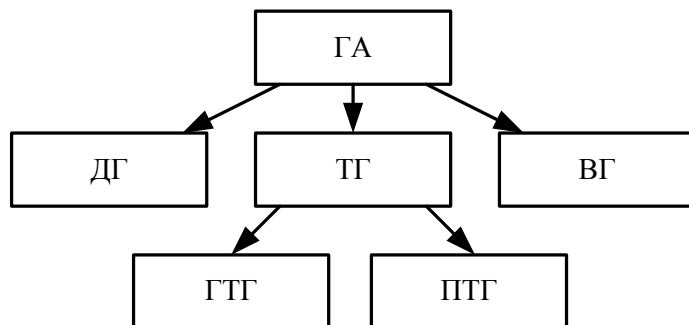
1. Питание необходимого электрического оборудования во всех режимах работы судна
2. Пуск самого мощного электродвигателя с наибольшим пусковым током.
3. Питание потребителей, необходимых для запуска пропульсивной установки при обесточенном состоянии судна.

Генераторные агрегаты классифицируются:

- по роду тока: переменного и постоянного тока;
- по назначению: основные, резервные, аварийные;
- по типу приводного двигателя.

Генераторные агрегаты в зависимости от типа приводного двигателя подразделяются на дизель-генераторы (ДГ), турбогенераторы (ТГ), газотурбогенераторы и валогенераторы.

К статическим источникам электроэнергии (СИЭ) относят источники, не имеющие подвижных (вращающихся) частей, т. е. использующие химическую, тепловую, световую и иные виды энергии. Традиционно наибольшее распространение на судах среди СИЭ получили кислотные и щелочные АБ.

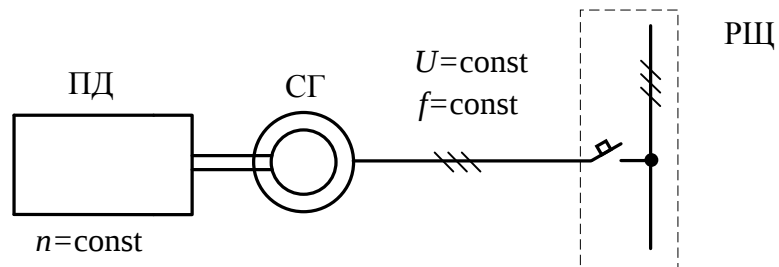


Классификация ГА
по типу приводного двигателя

2.2. Дизель-генераторные агрегаты

Наиболее предпочтительным приводом ДГА является дизель. Он имеет более высокий КПД (превышает 40 % при нагрузке, близкой к номинальной) по сравнению с газотурбинными установками и комплексом котел – паропровод – турбина.

Дизель является наиболее экономичным тепловым двигателем. Частота вращения приводных дизелей в составе ДГ составляет 500–1500 об/мин, мощность находится в пределах от 100 кВт до 15 МВт и более. КПД современных среднеоборотных дизелей может достигать 44 %.



Структурная схема ДГА: ПД — приводной двигатель;
СГ — синхронный генератор;
РЩ — распределительный щит

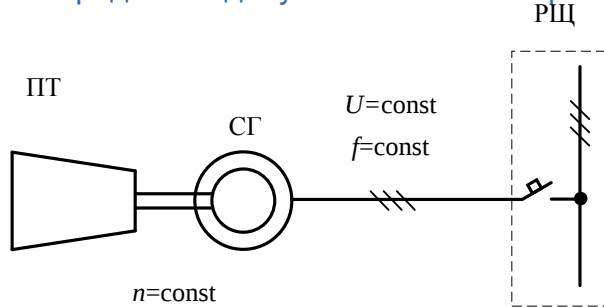
ДГА во всем диапазоне изменения нагрузки работает с постоянной частотой вращения, что значительно снижает экономичность и повышает удельный расход топлива и масла при работе на долевой нагрузке.

Среди недостатков ДГ следует выделить их меньший моторесурс по сравнению с турбинами, более высокую массу и габариты, чем у других ГА, высокую шумность. Период между моточистками ДГА составляет 4–10 тыс. ч.

2.3. Паротурбогенераторные агрегаты

Паротурбогенераторные агрегаты имеют большой срок службы, чем ДГА, выше надежность могут выполняться как на малые, так и на большие мощности.

Предельно допустимая частота вращения принимается обычно на уровне 10–12 % выше номинальной.



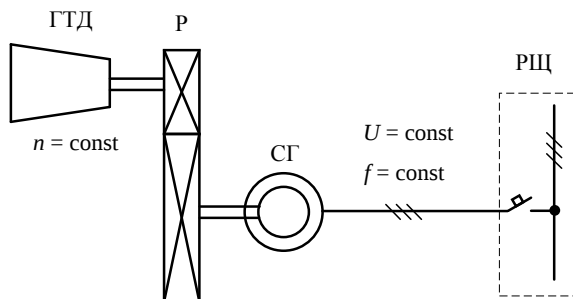
Структурная схема ПТГА: ПТ — паровая турбина;
СГ — синхронный генератор; РЩ — распределительный щит

Мощность ПТ достигает 30 МВт и более. Так, мощность паровой турбины ГТГА на ледоколе «Арктика» и ледоколах серии «Россия» составляет 27,6 МВт, на ледоколах серии «Таймыр» — 19,6 МВт.

Недостатком паровых турбин является относительно невысокий КПД, высокая частота вращения, которая в некоторых случаях требует установки понижающего редуктора между турбиной и генератором, значительный расход времени на прогрев турбины для пуска и приема нагрузки.

2.4. Газотурбогенераторные агрегаты

Основными достоинствами ГТГА являются их компактность, малый вес, лучшие, чем у дизелей, виброшумовые характеристики, многотопливность, легкость запуска при низких температурах, возможность получения больших агрегатных мощностей в габаритах, позволяющих транспортировку железнодорожным и авиационным транспортом для установки или замены на судостроительном заводе или в порту.



Структурная схема ГТГА: ГТД — газотурбодвигатель;
СГ — синхронный генератор; Р — редуктор; РЩ —
распределительный щит

Частота вращения СГ традиционной конструкции с явно выраженными полюсами не превышает 3000 об/мин. Для согласования частоты вращения ГТД и генератора применяется понижающий редуктор, наличие которого снижает КПД и надежность ГТГА, а также повышает его массогабаритные показатели.

2.5. Судовые электрические генераторы

Генератор предназначен для преобразования механической энергии в электрическую, с заданными параметрами электроэнергии. Наибольшее распространение нашли явнополюсные синхронные генераторы (СГ) с электромагнитным возбуждением.

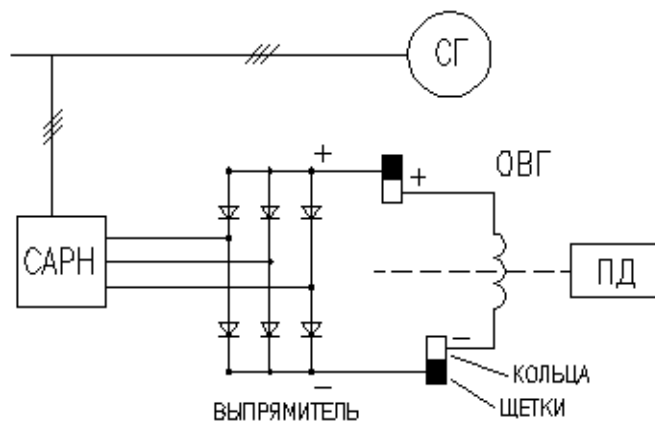
На морских судах в качестве основных источников электрической энергии в большинстве случаев используются трехфазные синхронные генераторы (СГ) с самовозбуждением напряжением 400 и 230 В, частотой электрического тока $f = 50$ Гц и частотой вращения 500–3000 об/мин, в диапазоне мощностей от 50 кВт до 5 000 кВт.

Наибольшее распространение в составе ГА нашли явнополюсные СГ с электромагнитным возбуждением. В данных ГА частота вырабатываемой электроэнергии пропорциональна частоте вращения ПД, а напряжение можно поддерживать постоянным за счет изменения тока в обмотке возбуждения СГ с помощью автоматической системы регулирования напряжения (САРН).

Основными элементами СГ являются статор, ротор, обмотки статора и ротора, подшипники, система охлаждения, система возбуждения и система автоматического регулирования напряжения.

На судах СГ с явнополюсным ротором применяются в диапазоне частот вращения $n = 500$ – 3000 об/мин, а с неявнополюсным ротором — в диапазоне более 3000 об/мин.

По способу передачи электроэнергии в обмотку возбуждения различают синхронные генераторы со щетками и без щеток.



Система возбуждения синхронного генератора со щетками:
САРН — система автоматического регулирования напряжения;
ОВГ — обмотка возбуждения генератора СГ;
ПД — приводной двигатель;
СГ — синхронный генератор

2.6. Кислотные аккумуляторные батареи

Электрические аккумуляторы — это химические источники электроэнергии, действие которых основано на обратимых электрохимических процессах. Электрические аккумуляторы могут быть основными, аварийными и переходными источниками электроэнергии на судах. Если автоматическое включение аварийного дизель-генераторного агрегата не обеспечивается в течение 45 с, то на судне должен быть предусмотрен аварийный переходный источник электрической энергии, включающийся сразу при обесточивании ГРЩ.

Для зарядки аккумуляторных батарей ответственных приемников должно быть предусмотрено зарядное устройство, рассчитанное на зарядку батарей в течение 8 ч.

Электрические аккумуляторы могут быть кислотными и щелочными. Достоинствами кислотных аккумуляторов являются более высокое напряжение на один элемент, более высокий КПД, так как они имеют меньшее значение внутреннего сопротивления, значительно больший ток разряда, меньшая стоимость на единицу мощности, меньшее снижение емкости при понижении температуры окружающей среды.

Вливать воду в кислоту нельзя! В результате этой химической реакции может возникнуть закипание состава, что приведет к его расплескиванию и возможности получения кислотных ожогов.

2.7. Щелочные аккумуляторные батареи

Наибольшее распространение среди щелочных аккумуляторов нашли никель-кадмиевые и никель-железные.

Достоинствами щелочных аккумуляторов являются высокая механическая прочность, большой срок службы, малый саморазряд, меньшее требования к техническому обслуживанию, нечувствительность к перезаряду, недозарядам и продолжительному нахождению в разряженном состоянии.

Внутреннее сопротивление щелочного аккумулятора примерно равно 0,03–0,06 Ом и увеличивается по мере разряда. Внутреннее сопротивление аккумулятора резко возрастает при разряде большими токами, в результате чего происходит поляризация пластин.

Плотность электролита в щелочных аккумуляторах должна находиться в пределах 1,19–1,21 г/см³. Режим заряда аккумуляторов осуществляется током нормального заряда в соответствии с инструкциями по эксплуатации. Величину тока во время заряда рекомендуется поддерживать постоянной.

2.8. Преобразователи электрической энергии. Источники бесперебойного питания

В СЭЭС применяются преобразователи напряжения, рода тока, частоты, количества фаз и др. Для преобразования напряжения переменного тока на судах используют силовые трансформаторы.

Трансформаторы делятся на повышающие, понижающие и разделяющие (коэффициент трансформации равен единице).

На судах контейнеровозах для питания рефрижераторных контейнеров применяют разделяющие трансформаторы. При этом снижение сопротивления изоляции электрооборудования контейнеров не влияет на значение сопротивления изоляции СЭЭС.

Для преобразования рода тока и частоты переменного тока на судах используют электромашинные и полупроводниковые преобразователи.

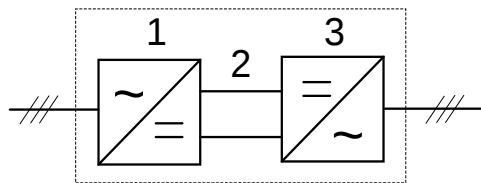
С помощью двух- и трехмашинных агрегатов можно преобразовать переменный ток в постоянный, постоянный в постоянный с другим напряжением или переменный при различных напряжениях и частотах.

К недостаткам электромашинных преобразователей относят невысокий КПД, сложности при обслуживании и повышенная шумность.

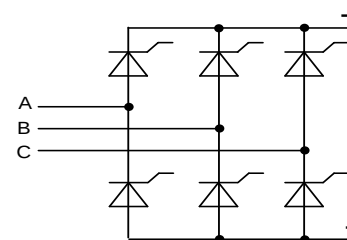
Судовые полупроводниковые преобразователи электрической энергии (выпрямители, инверторы, преобразователи частоты) имеют высокий КПД, быстродействие, надежность. К недостатку полупроводниковых преобразователей относят отрицательное влияние их на качество питающего напряжения (искажается форма кривой напряжения переменного тока).

Силовые полупроводниковые выпрямители — устройства, предназначенные для преобразования электрической энергии переменного тока в электрическую энергию постоянного тока, необходимую для питания потребителей.

Силовые полупроводниковые инверторы — устройства, предназначенные для преобразования электрической энергии постоянного тока в электрическую энергию переменного тока, требующуюся для питания потребителей. Наибольшее распространение получили автономные инверторы напряжения (АИН).



Структурная схема ППЧ
со звеном постоянного тока:
1 — выпрямитель;
2 — звено постоянного тока;
3 — инвертор



Принципиальная электрическая
схема управляемого
выпрямителя

Непосредственные ППЧ могут проводить электрическую энергию в обоих направлениях, т. е. являются обратимыми. КПД у данных преобразователей несколько выше, чем у двухзвенных преобразователей.

Полупроводниковые преобразователи находят применение в источниках бесперебойного питания (ИБП), применяемых в качестве аварийных или переходных источников электрической энергии на судах. ИБП обеспечивают электроэнергией при исчезновении напряжения основного питания системы аварийно-предупредительной сигнализации (АПС), управления механизмов ГА и других ответственных электроприемников.

2.9. Электроснабжение судна от береговой сети. Электробезопасность

При длительной стоянке судна в порту судовая сеть получает питание от береговой электрической сети. Электроснабжение от береговых сетей при нахождении судна в порту или в судоремонтном заводе имеет следующие преимущества:

- передаваемая с берега электроэнергия значительно дешевле судовой;
- экономия моторесурса приводных двигателей судовых генераторов;
- сокращение времени вахты в машинном отделении;
- создание условий для проведения профилактических и ремонтных работ с ГРЩ.

В случае если предусматривается питание судовой сети от внешнего источника электрической энергии, на судне должен быть установлен щит питания от внешнего источника — распределительный щит берегового питания (РЩ БП).

На ГРЩ в фидере питания с берега должны быть предусмотрены коммутационные и защитные устройства, вольтметр или сигнальная лампа, устройство защиты от обрыва фаз питания. Если не предусмотрена параллельная работа между судовыми и внешними источниками электрической энергии на общие шины судовой электростанции, то ее схема соединения должна иметь блокировку, исключающую возможность подключения их на параллельную работу.

Технические меры, обеспечивающие безопасность при эксплуатации судовых сетей, направлены на снижение тока, проходящего через тело человека до безопасной величины, в случае его поражения электрическим током. К техническим средствам защиты относятся защитное заземление, защитное разделение сетей, защитное отключение, уменьшение рабочего напряжения, а также другие меры, включая изоляцию инструментов, ограждения, блокировки, сигнализацию о наличии напряжения, маркировку оборудования и т. п.

Защитное заземление — это соединение с корпусом судна металлических деталей (оболочки или оплетки кабеля, корпуса распределительных устройств и электроприводов и т. д.), которые в нормальных условиях не находятся под напряжением, но могут оказаться под напряжением при повреждении изоляции.

Защитное разделение сетей выполняют с помощью разделяющих трансформаторов, исключаящих гальваническую связь приемника с остальной сетью.

Устройство защитного отключения (УЗО) отключает питание при касании человеком токопровода или металлического корпуса оборудования с неисправной изоляцией.

Надежность электроснабжения значительно выше у судовой системы с изолированной нейтралью, так как однофазное замыкание на корпус не приводит к короткому замыканию. В такой системе замыкание на корпус одной из фаз не нарушает нормальной работы приемников. Однако при этом напряжение между корпусом и другими фазами возрастает до линейного и повышается опасность поражения током при касании человеком неповрежденных фаз.

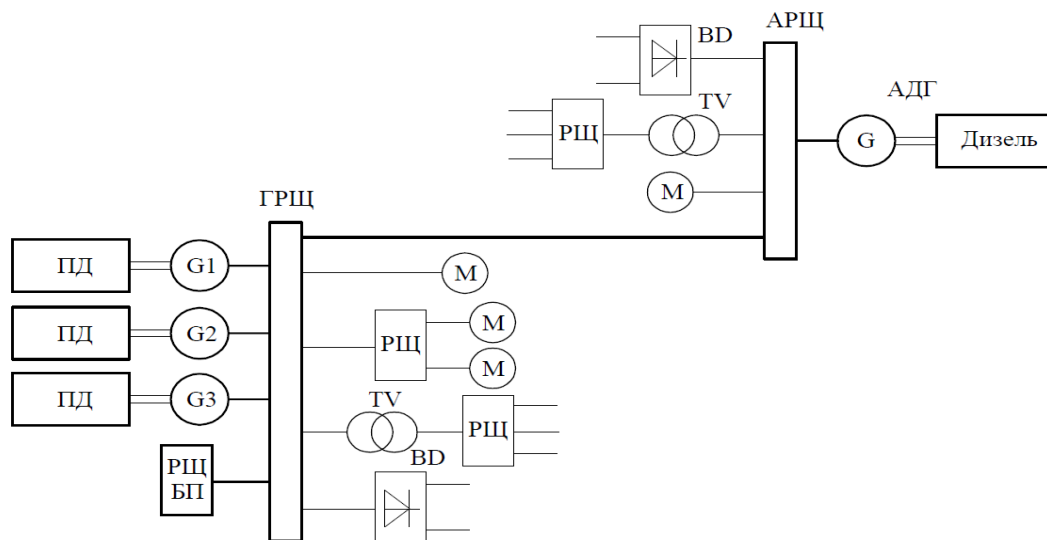
Четырехпроводные трехфазные системы, имеющие изолированную или с глухим заземлением нейтраль, экономичнее трехпроводной трехфазной системы с изолированной нейтралью, что объясняется возможностью получения напряжения 220 В без применения трансформаторов. Однако в четырехпроводных сетях отсутствует гальванической развязки сетей 380 В и 220 В, что снижает ее ненадёжность.

3. СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ СЭЭС

3.1. Структурная схема автономной СЭЭС

СЭЭС в зависимости от назначения и режимам эксплуатации судна значительно отличаются друг от друга. СЭЭС в целом должны удовлетворять требованиям надежности, живучести, гибкости, удобства эксплуатации и экономичности.

Упрощенная структурная схема автономной СЭЭС



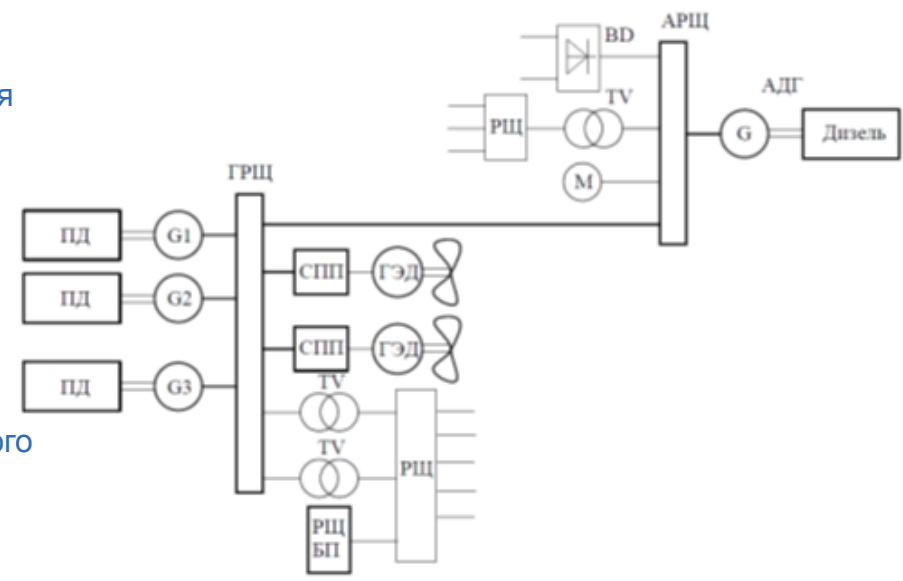
Для обеспечения надежности и живучести СЭЭС в любом режиме работы судна предусмотрено выполнение следующих функций:

- резервирование отдельных элементов (генераторов, трансформаторов, линий электропередачи и др.);
- деление сборных шин ГРЩ на несколько секций, каждая из которых при необходимости может принимать и распределять электроэнергию без связи с другими секциями;
- автоматическое включение резервного генераторного агрегата, резервных линий питания ответственных приемников электроэнергии, аварийного генератора и др.;
- автоматическое снижение нагрузки генераторов при их пере-грузке;
- применение селективных аппаратов защиты с возможно меньшим временем срабатывания и др.

3.2. Структурная схема СЭЭС с отбором мощности от главной энергетической установки

Практика эксплуатации судов с автономными СЭЭС показывает, что в ходовых режимах главная силовая установка обычно имеет резерв мощности, который после соответствующего преобразования можно использовать для получения электроэнергии и питания судовых приемников.

Генераторные агрегаты, использующие в качестве привода мощность ГЭУ, называются генераторными агрегатами отбора мощности. Если привод генератора осуществляется через механическую передачу от валопровода или от вала отбора мощности главного двигателя, то такая система называется системой непосредственного отбора мощности, а сам генераторный агрегат — валогенератором (ВГ). Если в качестве приводного двигателя генератора применяется паровая турбина, получающая пар от утилизационного котла (УК), использующего тепло выхлопных газов главной энергетической установки (ГлЭУ), то такая система называется системой косвенного отбора мощности, а сам генераторный агрегат — утилизационным турбогенератором (УТГ).



Упрощенная структурная схема единой СЭЭС

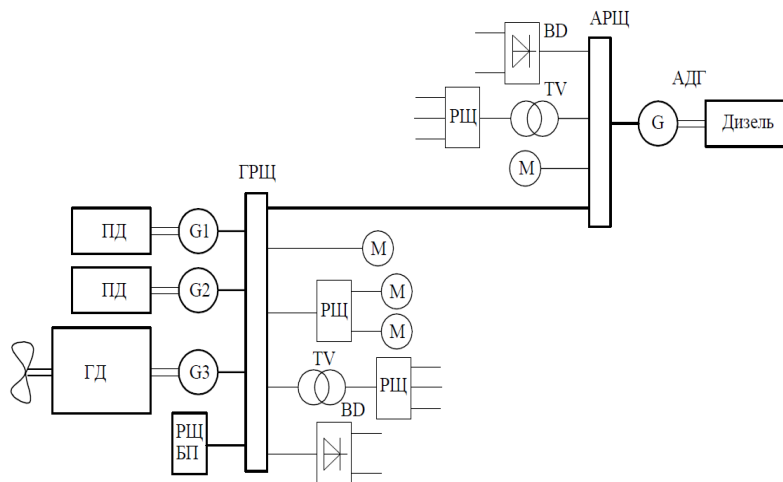
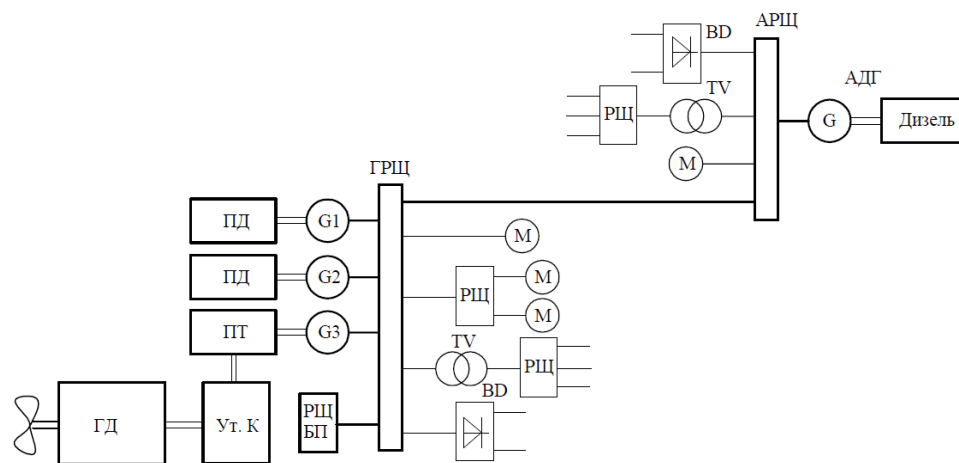


Схема СЭЭС с ВГУ



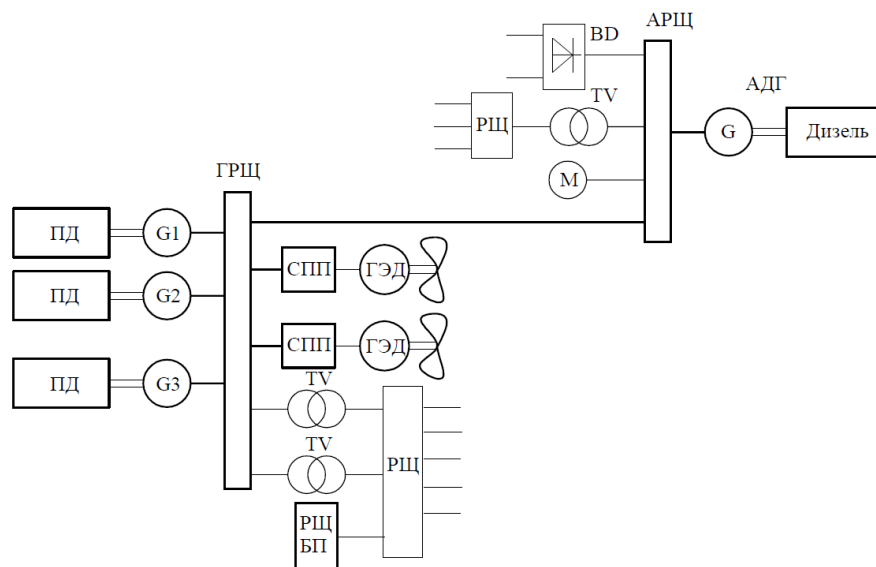
Упрощенная структурная схема СЭЭС с утилизационным турбогенератором

В СЭЭС при работе ГД в ходовых режимах эксплуатации судна пар от утилизационного котла (УтК) поступает на паровую турбину (ПТ), которая приводит в движение генератор. В случае недостаточности паропроизводительности УтК при небольшой мощности ГД электроэнергию вырабатывают вспомогательные ДГ.

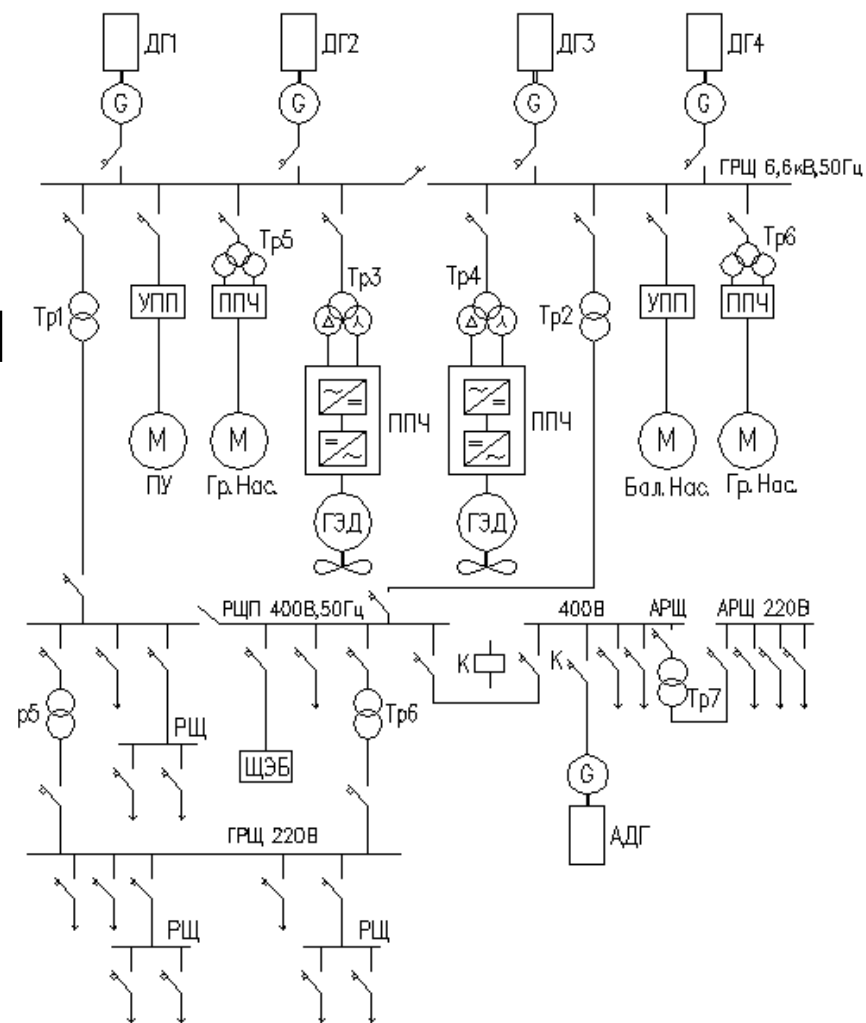
3.3. Структурная схема единой электроэнергетической системы

Применение в составе ЕЭЭС гребных электрических установок дает по сравнению с традиционными механическими системами следующие преимущества:

- отсутствует жесткая механическая связи гребного винта (движителя) с первичным двигателем, что способствует более рациональному размещению оборудования в машинных помещениях;
- более высокая экономичность на малых и средних ходах судна;
- высокие маневренные характеристики судна, что связано с возможностью регулировать частоту вращения ГЭД от 0 до номинальной частоты вращения;
- низкие виброакустические характеристики, в том числе вследствие отсутствия редукторов;
- более высокие показатели надежности и живучести;
- простота реализации реверса судна за счет реверсирования ГЭД или путем разворота ВРК;
- более высокий уровень автоматизации.



Упрощенная структурная схема
единой СЭЭС



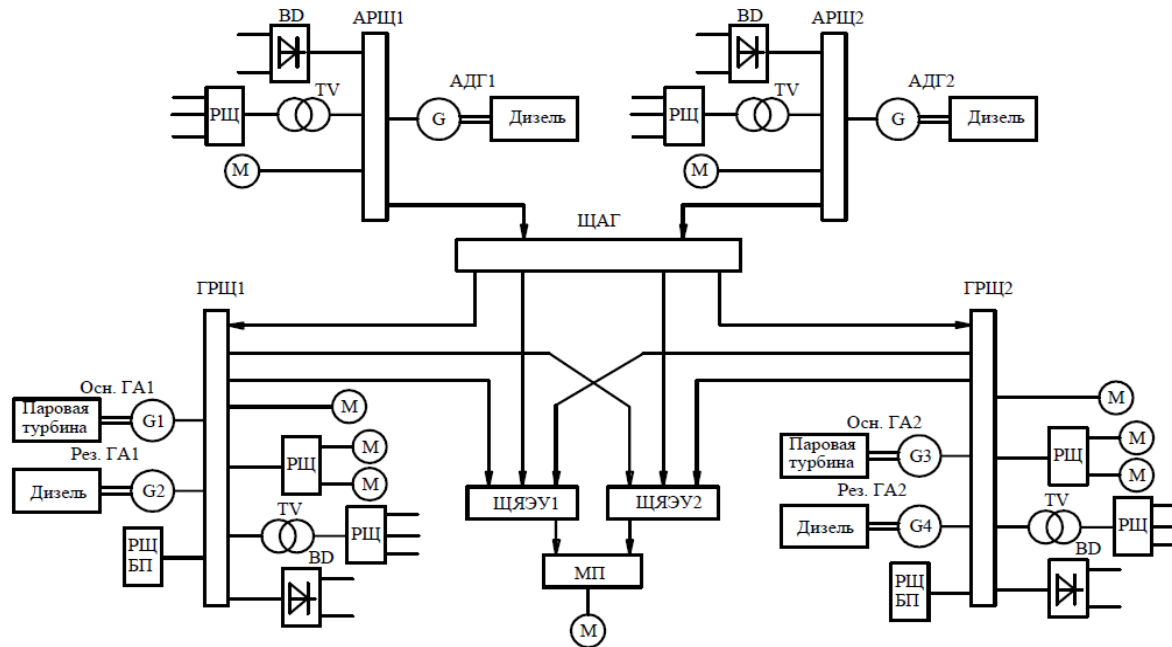
Структурная схема судовой ЕЭЭС
с системой электродвижения

3.4. Структурная схема СЭЭС судов с атомной энергетической установкой

В составе СЭЭС судов с ЯЭУ должно быть предусмотрено не менее двух основных генераторных агрегатов, двух резервных генераторных агрегатов, двух главных распределительных щитов.

В состав аварийной СЭЭС должно входить не менее двух аварийных генераторов и двух независимых друг от друга аварийных систем распределения электрической энергии. АРЩ должны получать питание от каждого главного распределительного щита.

В СЭЭС должно быть предусмотрено не менее двух независимых друг от друга переходных источников электрической энергии, а также щит питания от внешнего источника электрической энергии — распределительный щит берегового питания (РЩ БП).



Упрощенная схема СЭЭС судов с ядерной энергетической установкой

4. РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ЧАСТОТЫ СУДОВЫХ ГЕНЕРАТОРНЫХ АГРЕГАТОВ

4.1. Регулирование частоты вращения судовых генераторных агрегатов

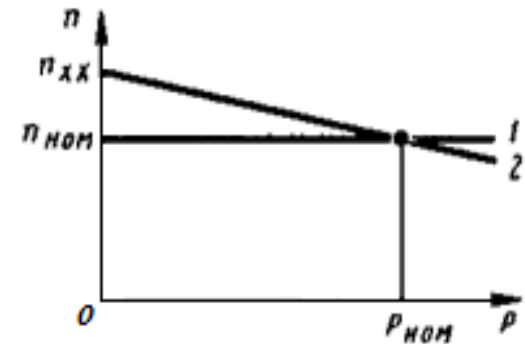
При изменении активного тока генератора меняется его тормозной электромагнитный момент и, как следствие, нарушается равенство вращающего момента ПД и тормозного момента генератора. Вследствие этого изменяются частота вращения ГА и частота тока в электрической сети. Для восстановления равенства моментов, а следовательно, и частоты вращения ГА применяются регуляторы частоты вращения. ГА снабжают автоматическими регуляторами частоты (АРЧ), для которых регулирующим воздействием является изменение подачи топлива (пара), а регулирующим органом — топливная рейка у дизелей и паровпускной клапан у турбин.

Регулятор частоты вращения должен иметь устройство для местного и дистанционного изменения частоты вращения в пределах $\pm 10\%$.

Регуляторы, обеспечивающие работу ПД по астатической и статической характеристикам, называются универсально-статическими.

В зависимости от измеряемых величин различают одноимпульсные АРЧ, работающие по отклонению регулируемой величины, и двухимпульсные (комбинированного типа) АРЧ, работающие по отклонению регулируемой величины и компенсации возмущающего воздействия. Одноимпульсные АРЧ, реагирующие на отклонение регулируемой величины (частоты вращения), изменяют подачу топлива при изменении частоты вращения. Как правило, они являются центробежными и снабжаются центробежными или электрическими датчиками частоты вращения или частоты тока. Недостатком данных АРЧ является сравнительно низкое быстродействие.

АРЧ комбинированного типа (двухимпульсные) дополнительно снабжены датчиком активного тока, поэтому у них подача топлива зависит как от частоты вращения (тока), так и от нагрузки. Точность и быстродействие стабилизации частоты вращения у двухимпульсных АРЧ выше, чем у одноимпульсных, но при этом их схема управления усложняется.



Регуляторные характеристики приводных двигателей генераторных агрегатов:
1 — статическая; 2 — астатическая

В зависимости от реализации определенного закона управления различают следующие виды регуляторов:

- пропорциональный регулятор, в котором перемещение исполнительного органа (топливной рейки) пропорционально изменению частоты вращения;
- интегральный регулятор, в котором скорость перемещение исполнительного органа (топливной рейки) зависит от отклонения частоты вращения;
- дифференциальный регулятор, в котором перемещение исполнительного органа (топливной рейки) зависит от скорости изменения частоты вращения.

В зависимости от наличия усилителя различают АРЧ прямого и непрямого действия. В АРЧ прямого действия датчик частоты вращения воздействует на регулирующий орган непосредственно, в АРЧ непрямого действия — через усилитель (сервомотор). АРЧ прямого действия применяются для ГА небольшой мощности. На большинстве современных судов применяются двухимпульсные ГА непрямого действия.

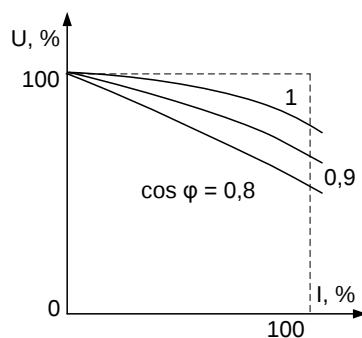
4.2. Характеристики синхронных генераторов

Внешняя характеристика синхронного генератора представляет собой зависимость напряжения на выходах обмотки статора генератора от тока нагрузки I при неизменной номинальной частоте вращения n и постоянных значениях тока возбуждения I_b и коэффициента мощности $\cos \varphi$.

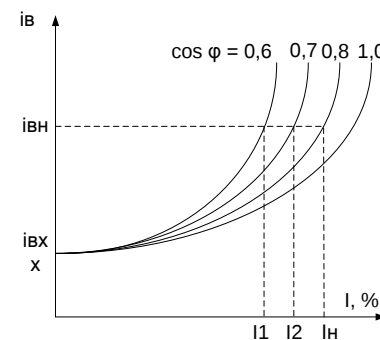
Регулировочная характеристика — зависимость тока возбуждения I_b от тока нагрузки I при номинальной частоте вращения n_n и постоянных значениях напряжения на выходе статора генератора U и коэффициента мощности $\cos \varphi$, т. е. $I_b(I)$ при $U = U_n = \text{const}$, $n = n_n = \text{const}$, $\cos \varphi = \text{const}$.

Регулировочная характеристика показывает, как нужно изменять ток возбуждения с изменением тока нагрузки, чтобы обеспечить постоянство напряжения U при данном $\cos \varphi$ (данном характере нагрузки) и неизменной частоте.

а)



б)



Характеристики синхронного генератора:

а — внешняя характеристика; б — регулировочная характеристика

4.3. Принципы регулирования напряжения и системы возбуждения синхронных генераторов

В эксплуатационных режимах постоянно происходит подключение и отключение части нагрузки генератора (изменение величины тока статора), что приводит к изменению напряжения.

Для регулирования тока возбуждения применяют различные автоматические регуляторы напряжения (АРН), в которых используются следующие принципы регулирования:

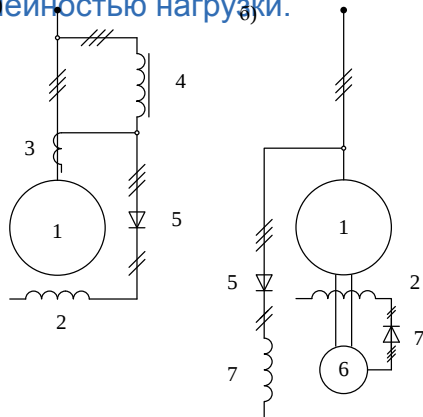
1. Регулирование по отклонению напряжения U от заданного значения.
2. Регулирование по возмущению: токовое компаундирование (компенсация изменения значения тока нагрузки); амплитудно-фазовое компаундирование (фазовое компаундирование) — компенсация изменения значения тока и коэффициента мощности нагрузки I и $\cos \varphi$.
3. Комбинированное регулирование: сочетание систем, использующих регулирование по отклонению и по возмущению.

В настоящее время наибольшее распространение получили два способа питания обмотки возбуждения:

- самовозбуждение (обмотка возбуждения получает питание непосредственно от статорной обмотки основного генератора);
- использование отдельного генератора, расположенного на валу основного генератора (бесщеточные генераторы).

В качестве источника питания АРН используется отбор мощности от основного статора, генератор с электромагнитным возбуждением или на постоянных магнитах (PMG) или дополнительные обмотки, уложенные на статоре основного генератора.

Система возбуждения с генератором на постоянных магнитах имеет ряд следующих преимуществ: отсутствует необходимость в остаточном намагничивании для обеспечения начального возбуждения; при перегрузках и КЗ поддерживается необходимая величина напряжения; нечувствительность к искажениям в цепи статора генератора, связанных с нелинейностью нагрузки.



Системы возбуждения синхронного генератора:
а — самовозбуждение; б — с возбудителем (бесщеточный генератор);
1, 2 — обмотка якорная и возбуждения генератора; 3 —
трансформатор тока; 4 — дроссель; 5 — выпрямитель;
6, 7 — обмотка якорная возбуждения возбудителя

4.4. Начальное возбуждение синхронного генератора

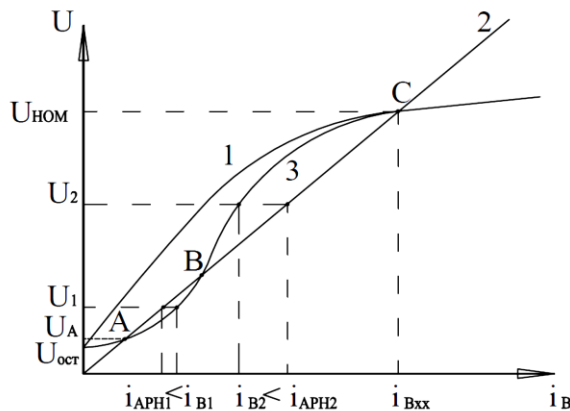
Для получения напряжения на зажимах синхронного генератора необходимо создать в электрической машине вращающееся магнитное поле. В качестве источника энергии для питания обмотки возбуждения может использоваться сам генератор. В этом случае принято говорить о самовозбуждении генератора. Способность генератора к самовозбуждению заключается в обеспечении его начального возбуждения.

Одним из основных недостатков судовых синхронных генераторов является наличие щеток и колец, расположенных на роторе генератора, с помощью которых осуществляется питание обмотки возбуждения.

При малом напряжении в цепи возбуждения генератора сопротивления щеточного контакта и диодов выпрямительного моста в проводящем направлении достигают значительных значений, что обусловлено нелинейным характером зависимости сопротивления этих элементов от приложенного к ним напряжения.

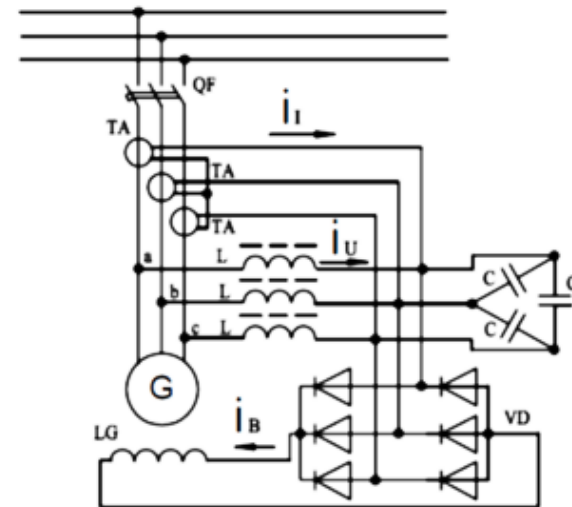
Для обеспечения устойчивого начального возбуждения применяют следующие способы:

1. Повышение величины остаточного намагничивания стали полюсов ротора за счет подбора материала магнитопровода ротора или встраивание в магнитопровод дополнительных магнитных прокладок.
2. Применения для возбуждения возбуждителя на постоянных магнитах.
3. Кратковременное подключение к обмотке возбуждения постороннего источника: аккумуляторной батареи или трансформатора начального возбуждения с выпрямителем.
4. Использование явления резонанса напряжения в цепи возбуждения.



Характеристики холостого хода:

1 и 3 — соответственно идеальная и реальная;
вольтамперная характеристика цепи возбуждения 2



Системы самовозбуждения синхронного генератора:

G — генератор; TA — трансформаторы тока;

VD — выпрямитель; C — конденсаторы

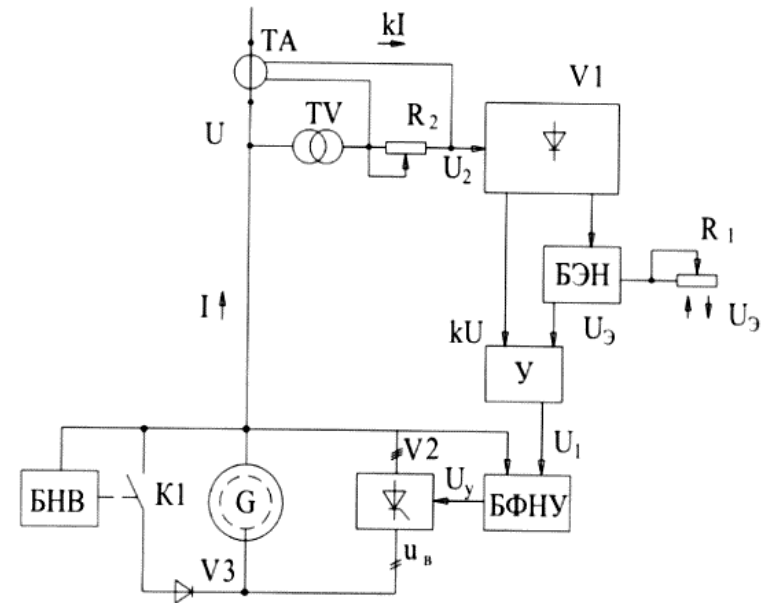
4.5. Автоматический регулятор напряжения, работающий по отклонению

В АРН данного типа напряжение возбуждения определяется со-гласно выражению:

$$u_{\epsilon} = u_{BXX} + k_1 (U_{\text{з}} - U),$$

где $U_{\text{з}}$ — заданное значение напряжения;
 U — фактическое напряжение генератора;
 u_{BXX} — напряжение возбуждения XX.

Схема возбуждения синхронного генератора с регулятором напряжения работающим по отклонению

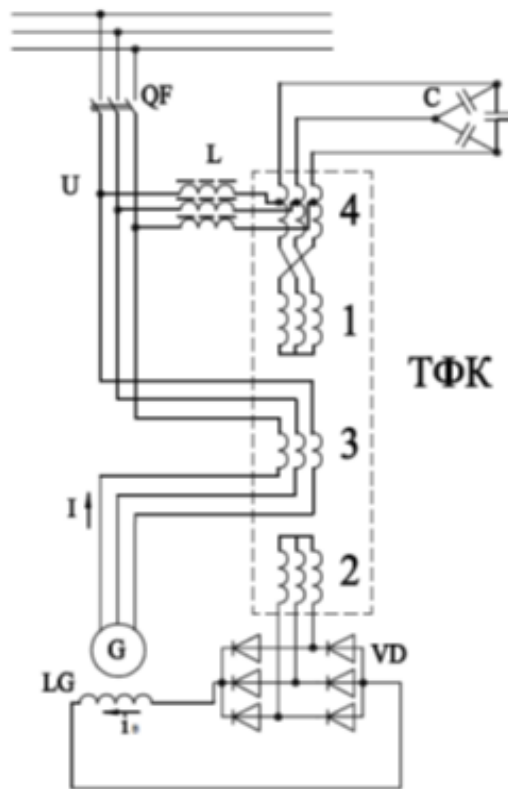


4.6. Автоматический регулятор напряжения, работающий по принципу амплитудно-фазового компаундирования

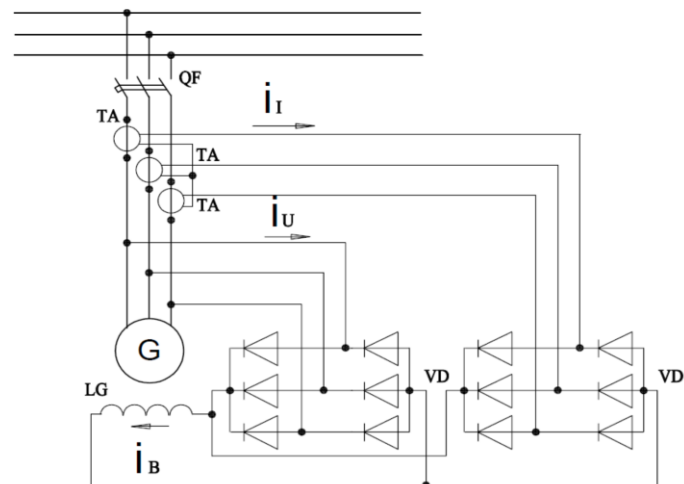
В системах токового компаундирования ток обмотки возбуждения СГ должны определять две составляющие, пропорциональные напряжению и току. Составляющая, пропорциональная напряжению, необходима для обеспечения режима холостого хода и создания основного потока возбуждения. Составляющая, пропорциональная току нагрузки, служит для компенсации тех факторов, которые вызывают снижение напряжения при изменении нагрузки, а также для обеспечения необходимого для срабатывания защитной аппаратуры значения установившегося тока короткого замыкания.

В зависимости от того, как осуществляется суммирование сигналов, пропорциональных напряжению и току, различают системы:

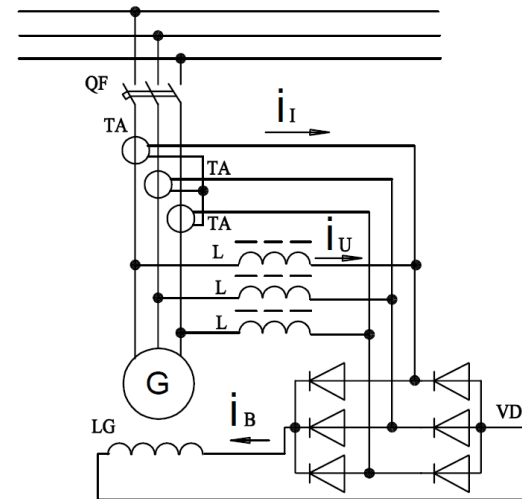
- прямого токового компаундирования, где происходит арифметическое составляющих токов возбуждения;
- прямого фазового компаундирования, где происходит геометрическое суммирование составляющих токов возбуждения.



Система возбуждения с регулятором напряжения амплитудно-фазового компаундирования с магнитным суммированием потоков:



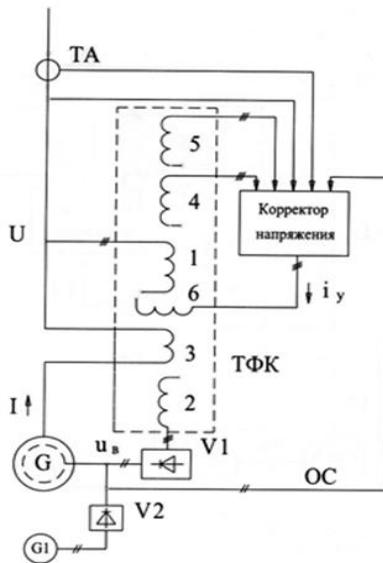
Система возбуждения с регулятором напряжения, работающим по принципу токового компаундирования



Система возбуждения с регулятором напряжения с амплитудно-фазовым компаундированием и электрическим суммированием токов

4.7. Автоматический регулятор напряжения генератора комбинированного типа

Для повышения точности поддержания напряжения СГ, используются комбинированные системы регулирования напряжения, работающие по принципу обратной связи и компенсации возмущающего воздействия одновременно АРН комбинированного типа с амплитудно-фазовым компаундированием и корректором напряжения.

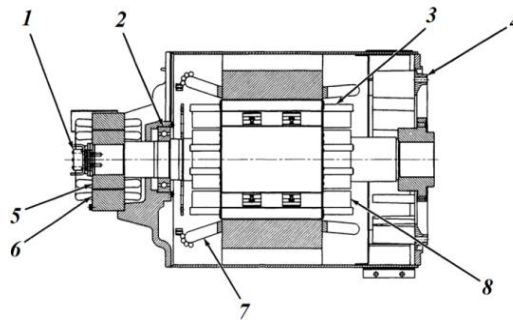


Система возбуждения с регулятором напряжения комбинированного типа

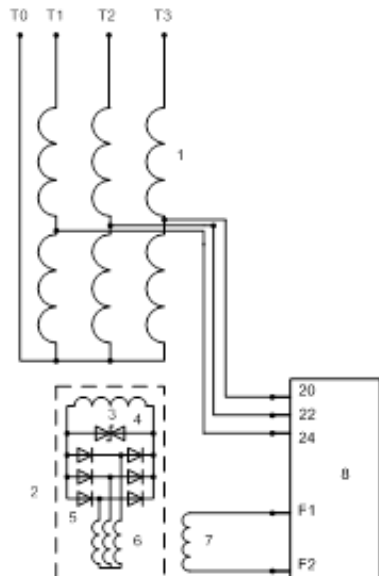
4.8. Автоматический регулятор напряжения бесщеточного генератора

Использование бесщеточных генераторов значительно повышает надежность систем возбуждения в связи с отсутствием щеточного аппарата.

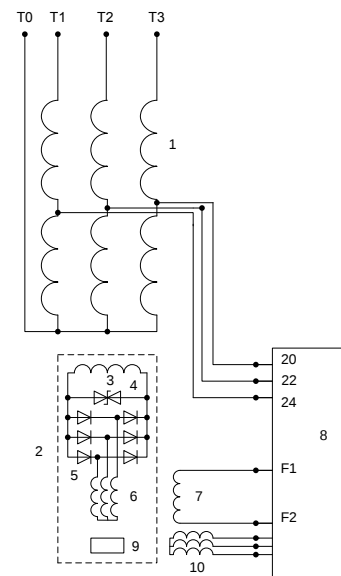
В бесщеточных генераторах для питания обмотки возбуждения генератора применяют возбудитель. Возбудителем является, как правило, обратимая синхронная электрическая машина, трехфазная якорная обмотка которой через выпрямитель подключена к обмотке возбуждения генератора. Регулятор напряжения как правило подключается к обмотке возбуждения возбудителя.



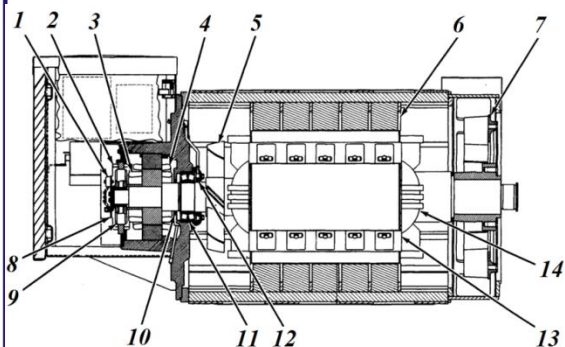
Бесщеточный генератор с самовозбуждением:
1 — выпрямитель; 2 — подшипник; 3 — ротор; 4 — вентилятор;
5 — якорная обмотка возбуждителя; 6 — обмотка возбуждения
возбудителя; 7 — якорная обмотка генератора; 8 — обмотка
возбуждения генератора



Система возбуждения
бесщеточного генератора с
самовозбуждением и
возбудителем: 1, 3 — якорная
обмотка и обмотка возбуждения
генератора;
2 — ротор; 4 — варистор; 5 —
выпрямитель; 6–7 — якорная
обмотка и обмотка возбуждения
возбудителя; 8 — регулятор
напряжения



Система возбуждения бесщеточного
генератора с подвозбудителем на
постоянных магнитах: 1, 3 — якорная
обмотка и обмотка возбуждения генератора;
2 — ротор; 4 — варистор; 5 — выпрямитель;
6, 7 — якорная обмотка и обмотка
возбуждения возбудителя; 8 — регулятор
напряжения; 9 — постоянный магнит;
10 — якорная обмотка подвозбудителя



Бесщеточный генератор с
подвозбудителем на постоянных
магнитах: 1 — выпрямитель;
2, 3, 6 — якорная обмотка
подвозбудителя, возбудителя,
генератора; 4, 13 — обмотка
возбуждения возбудителя и
генератора; 5, 7 — вентилятор;
8 — теплоотвод; 9 — постоянный
магнит; 10, 12 — сальник;
11 — подшипник; 14 — роторы

5. ЭЛЕКТРОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА И ЗАЩИТНО-КОММУТАЦИОННАЯ АППАРАТУРА

5.1. Назначение и виды электrorаспределительных устройств

Электrorаспределительными устройствами (щитами) называют комплектные электротехнические устройства, предназначенные для приема и распределения электроэнергии на судах, снабженные необходимыми аппаратами управления, автоматами защиты и сигнализации.

Существуют следующие виды судовых электrorаспределительных устройств (щитов):

- главный электrorаспределительный щит (ГРЩ), который предназначен для присоединения основных и резервных источников электроэнергии к силовой судовой электрической сети, а также для управления работой источников электроэнергии;
- аварийный электrorаспределительный щит (АРЩ), являющийся частью аварийной судовой электростанции и предназначенный для присоединения аварийного источника электроэнергии к электрической сети, а также для управления работой аварийного источника электроэнергии;
- щит сигнализации и контроля, предназначенный для подачи сигналов (световых, звуковых) о состоянии контролируемых помещений, установок, систем, электроприводов и других объектов.

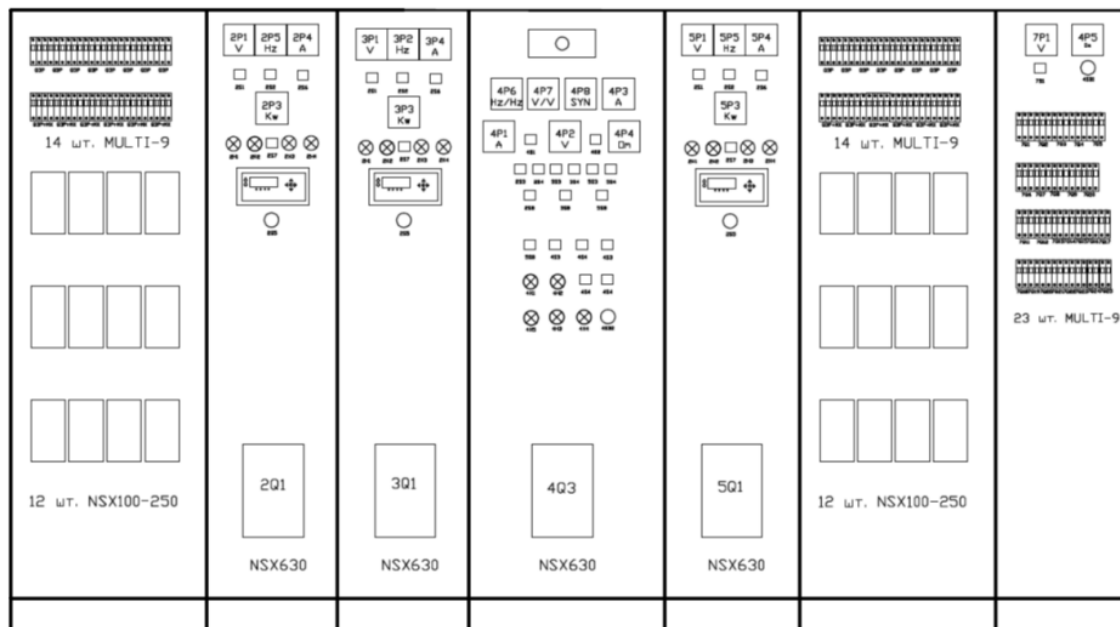
Щиты, получающие энергию от источника и распределяющие ее по сетям (ГРЩ, генераторные щиты, АРЩ), называются первичными. Вторичные щиты получают энергию от других щитов и распределяют ее между отдельными потребителями или их группами. Специальные щиты имеют индивидуальное назначение (ЩПБ, щиты сигнализации и контроля).

5.2. Главные и вторичные распределительные щиты

Главный распределительный щит. Главный распределительный щит (ГРЩ) имеет каркасную конструкцию из отдельных секций

По функциональному признаку в конструкции ГРЩ различают:

- генераторные секции;
- секции управления;
- распределительные секции.



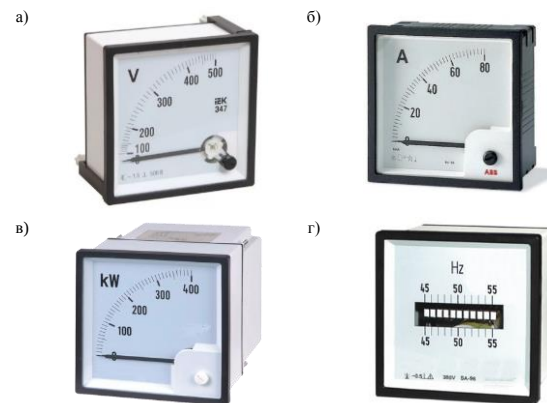
Эскиз главного распределительного щита

Аварийный распределительный щит. АРЩ состоит из генераторной секции и распределительных секций приемников.

Распределительные секции обеспечивают контроль, защиту и управление распределением электроэнергии от шин АРЩ к приемникам и РЩ.

Генераторная секция предназначена для контроля, защиты и управления работой генераторного агрегата, передачи электроэнергии от генератора на сборные шины ГРЩ. Число генераторных секций обычно соответствует числу генераторов.

В средней части ГРЩ обычно размещают секции управления, к ним примыкают генераторные секции, крайними оказываются распределительные секции.



Щитовые электроизмерительные приборы: а — вольтметр; б — амперметр; в — ваттметр; г — частотомер

5.3. Коммутационная аппаратура распределительных щитов

Коммутационная аппаратура предназначена для коммутации силовых цепей, цепей управления и сигнализации без выполнения защитных функций.

5.4. Защитная аппаратура распределительных щитов

Плавким предохранитель — электрический аппарат, предназначенный для размыкания электрической цепи путем расплавления металлической вставки под действием тока, превышающего заданное значение.

Зависимость времени перегорания плавкой вставки от тока, протекающего по предохранителю, называется его *времятоковой характеристикой*

Автоматическим выключатель(АВ) — электрический коммутационно-защитный аппарат, предназначенный для автоматического размыкания электрических цепей при ненормальных режимах их работы, а также для нечастых замыканий и размыканий цепей при их нормальных режимах эксплуатации.

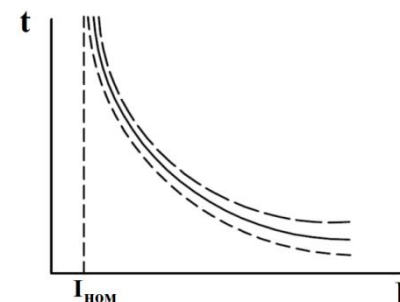
Автоматические выключатели подразделяются на следующие виды: универсальные, установочные и селективные

Расцепитель — часть выключателя, воздействующая непосредственно на механизм свободного расцепления при критических параметрах защищаемой цепи (ток, напряжение). Расцепители представляют собой реле или элементы реле, встроенные в выключатель с использованием его элементов или приспособленные к его конструкции. В установочных АВ могут использоваться электромагнитные, тепловые и полупроводниковые расцепители.

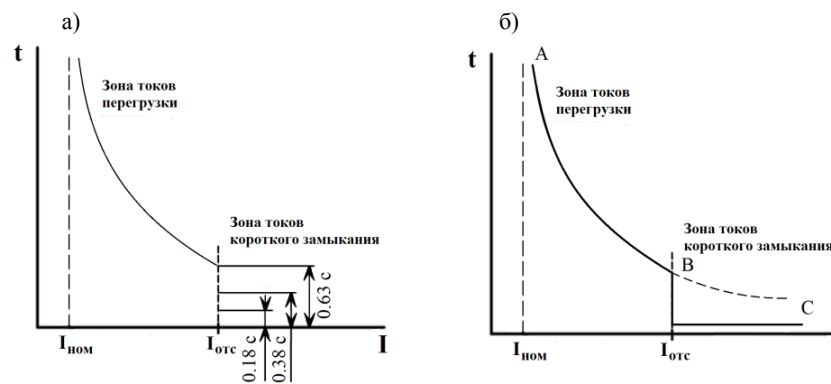
Электромагнитный максимальный расцепитель тока, представляющий собой электромагнит с якорем, обеспечивает автоматическое отключение выключателя при токах короткого замыкания, превышающих уставку по току.

Независимый расцепитель представляет собой электромагнит с питанием от постороннего источника напряжения.

Защитная характеристика — зависимость времени срабатывания АВ от величины протекающего через его контактную систему тока



Защитная характеристика плавких предохранителей



Защитные характеристики автоматических выключателей: а — универсальный селективный
б — установочный

Предельная коммутационная способность характеризуется наибольшим значением тока, который АВ способен отключить без повреждений и включить без сваривания контактов.

Электродинамическая стойкость АВ определяется наибольшим значением ударного тока КЗ, который АВ способен выдержать без механических разрушений.

Термическая стойкость АВ определяется наибольшим количеством тепла, которое выделяется в результате протекания тока КЗ за время срабатывания АВ, не приводя к повреждению изоляции и токоведущих частей выключателя в результате его перегрева.

Автоматические выключатели обладают следующими достоинствами по сравнению с плавкими предохранителями: высокая отключающая способность, лучшая способность защиты электрических цепей при малых перегрузках, одновременное отключение всех фаз питания; быстрое повторное включение, если не применяется тепловой расцепитель, надежная селективность срабатывания.

6. СУДОВЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ

6.1. Схема распределения электрической энергии на судне

Распределение и передачу электрической энергии на судах осуществляют с помощью электрических сетей, которые подразделяют на силовую, аварийную и сеть приемников.

Силовая электрическая сеть предназначена для распределения электроэнергии от ГРЩ основных электростанций до преобразователей или приемников электроэнергии.

Аварийную электрическую сеть используют для распределения электрической энергии от распределительного щита аварийной электростанции до аварийных приемников электроэнергии.

Электрические сети приемников предназначены для распределения электроэнергии от определенного распределительного щита или преобразователя электроэнергии до приемников электроэнергии одного назначения.

Различают следующие типы силовых электрических сетей: фи-дерную, магистральную и магистрально-фидерную.

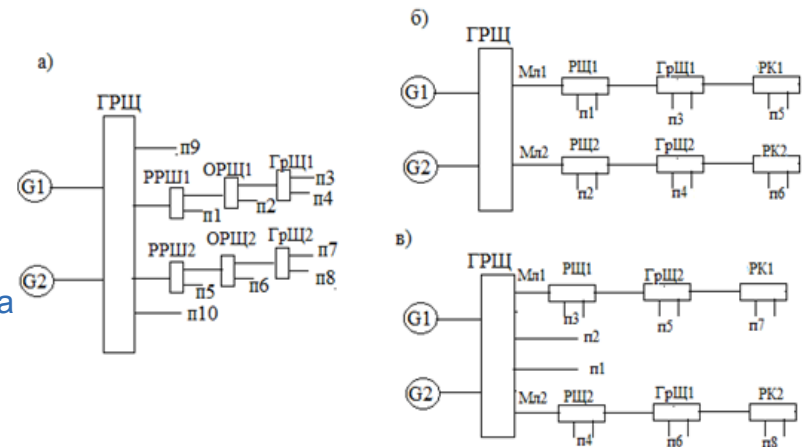


Схема силовых электрических сетей:

а — радиальная (фидерная);

б — магистральная;

в — магистрально-фидерная

Фидером называют линию передачи электроэнергии, включенную между двумя любыми распределительными щитами, между распределительным щитом и приемником или источником электроэнергии.

Магистралью называют линию передачи электроэнергии, параллельно к которой по ее длине подключаются ряд распределительных щитов и приемником электроэнергии.

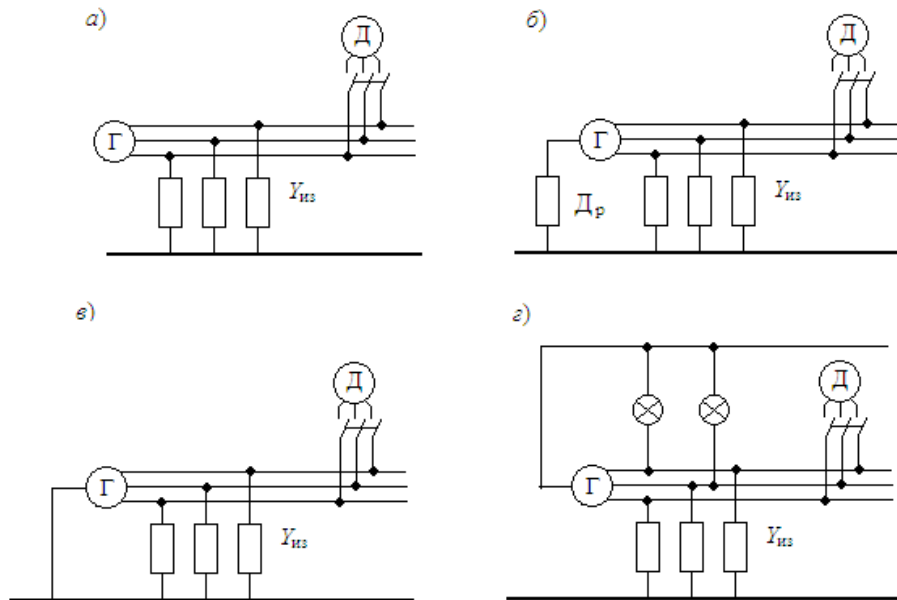
Аварийная электрическая сеть предназначена для распределения электроэнергии на участке от АРЩ до приемников, перечень которых определен Правилами РС.

6.2. Системы распределения электрической энергии на судне

Передачу электроэнергии постоянного и однофазно переменного тока осуществляют двухпроводными линиями электропередачи, трехфазного тока — трехпроводными, реже — четырехпроводными линиями электропередачи.

В судовых электростанциях трехфазного тока допускается применение следующих систем распределения электрической энергии:

- трехпроводной с изолированной нейтралью;
- трехпроводной с компенсированной нейтралью;
- четырехпроводной с изолированной нейтралью



Режимы нейтрали судовых электрических систем
а — схема с изолированной нейтралью; б — трехпроводная схема с компенсированной нейтралью; в — трехпроводная схема с глухим заземлением; г — четырехпроводная схема с изолированной нейтралью

6.3. Судовые электрические кабели и провода

Судовым кабелем называется один или несколько изолированных гибких электрических проводников, заключенных в общую защитную оболочку, допускающую непосредственную прокладку по стальным деталям корпусного набора в сырых помещениях и на открытых палубах.

Судовым проводом называется один или несколько изолированных гибких электрических проводников, заключенных в общую защитную оболочку, допускающую прокладку в сухих и отапливаемых помещениях.

Шнур — это электрический провод, состоящий из двух и более изолированных гибких или особо гибких жил сечением до 1,5 мм², скрученных или уложенных параллельно, покрытых в зависимости от условий эксплуатации неметаллической оболочкой или другими защитными покровами.

6.4. Выбор и проверка кабеля на потерю напряжения

Выбор кабеля дополняют проверкой его на потерю напряжения в линии. Падение напряжения в кабеле, соединяющем генераторы с главным распределительным щитом или с аварийным распределительным щитом, не должно превышать 1 %.

Падение напряжения между сборными шинами главного распределительного щита или аварийного распределительного щита и любыми точками СЭЭС при нормальных условиях работы не должно превышать 6 %.

В линиях электропередачи постоянного тока потеря напряжения численно равна арифметической разности напряжений в начале и конце линии.

В сетях переменного тока потеря напряжения имеет активную и реактивную (индуктивную) составляющие, причем последней можно пренебречь, так как при частоте тока 50 Гц она значительно меньше активной.

6.5. Контроль состояния изоляции судовых электрических сетей

Приложение напряжения к изоляции вызывает протекание через диэлектрик тока утечки, обусловленного ионной проводимостью. Величина тока утечки существенно зависит от механических свойств изоляции, т. е. трещин, пористости и других механических повреждений и определяется главным образом наличием токопроводящей загрязненности.

Состояние изоляции может быть охарактеризовано рядом параметров, таких как диэлектрическая емкость, тангенс угла диэлектрических потерь, интенсивность и характеристики частичных разрядов, электрическая прочность и др.

На величину токов утечки влияют следующие факторы: увлажненность, температура, токопроводящая загрязненность, объемная и поверхностная пористость, механические повреждения. На величину токов утечки влияют следующие факторы: увлажненность, температура, токопроводящая загрязненность, объемная и поверхностная пористость, механические повреждения. Протекание этих токов сопровождается тепловыделением.

Изоляционные материалы, применяемые в составе судового электрооборудования (СЭО) на напряжение от 1000 В до 15 кВ, должны обеспечивать во время эксплуатации установки сопротивление изоляции 1500 Ом на 1 В номинального напряжения, но не менее 2 МОм.

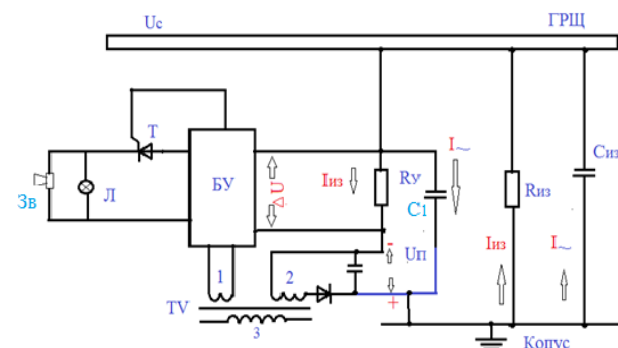
Контроль и измерение сопротивления изоляции является необходимым условием обеспечения электропожаробезопасности СЭЭС в процессе эксплуатации.

Основным принципом работы устройств автоматического контроля сопоставления изоляции систем переменного тока, находящихся как под рабочим напряжением или в обесточенном состоянии, является принцип наложения на контролируруемую сеть постоянного напряжения и измерения возникающих при этом токов утечек, характеризующих состояние изоляции.

При снижении сопротивления изоляции в сети ниже установленного значения необходимо определить место снижения состояния изоляции.

Определение места замыкания на корпус в сети производится в два этапа. На первом этапе определяется отходящий от ГРЩ фидер, где произошло замыкание, на втором — место замыкания на данном фидере.

Вручную поочередно отключают автоматические выключатели на ГРЩ до момента исчезновения сигнала, подаваемого УКИ. Действия по отключению фидеров питания на ГРЩ должны быть согласованы с вахтенной службой и не должны нарушать режим работы судна.



Устройство контроля сопротивления изоляции электрической сети переменного тока: $UП$ - выпрямленное напряжение, TV - трансформатора; $R_{изм}$ - эквивалентное сопротивление изоляции сети; R_y - сопротивление уставки измерительного прибора; БУ - блок управления; Т - тиристор; Зв - звонок; Л - сигнальная лампа

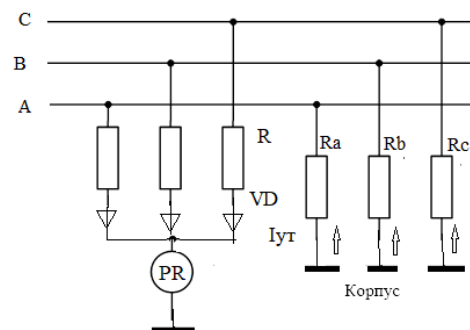


Схема измерения сопротивления изоляции с помощью щитового мегаомметра

При измерении сопротивления изоляции мегомметром необходимо помнить следующее:

- измерения проводят при обесточенном состоянии оборудования, предварительно убедившись в отсутствии на нем напряжения;
- напряжение мегомметра превышает безопасную для персонала величину, поэтому измерение начинают лишь после завершения операции подключения мегомметра;

7. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ГЕНЕРАТОРНЫХ АГРЕГАТОВ

7.1. Преимущества и недостатки параллельной работы генераторных агрегатов

В СЭЭС предусматривают как автономную, так и параллельную работу генераторных агрегатов (ГА).

Если предусматривается длительная параллельная работа ГА, то количество и мощность ГА выбирают таким образом, чтобы в каждом из режимов работы судна нагрузка каждого из параллельно работающих ГА составляла 70 - 90% его номинальной мощности.

Параллельная работа ГА обладает существенными преимуществами, к которым относят следующие:

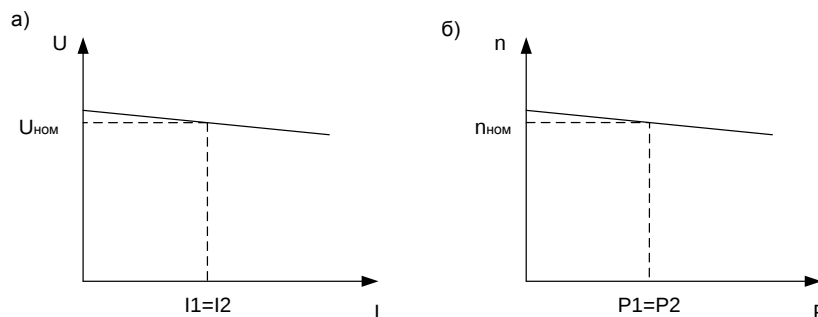
- обеспечивается работа ГА при оптимальном коэффициенте загрузки;
- не допускается работа дизель-генераторов при нагрузках менее 30% от номинальной, что повышает моторесурс приводных двигателей;

В СЭЭС предусматривают как автономную, так и параллельную работу генераторных агрегатов (ГА).

Если предусматривается длительная параллельная работа ГА, то количество и мощность ГА выбирают таким образом, чтобы в каждом из режимов работы судна нагрузка каждого из параллельно работающих ГА составляла 70 - 90% его номинальной мощности.

Параллельная работа ГА обладает существенными преимуществами, к которым относят следующие:

- обеспечивается работа ГА при оптимальном коэффициенте загрузки;
- не допускается работа дизель-генераторов при нагрузках менее 30% от номинальной, что повышает моторесурс приводных двигателей;



Регуляторная характеристика приводного двигателя (а) и внешняя характеристика синхронного генератора (б)

К недостаткам параллельной работы ГА относятся:

- увеличение токов короткого замыкания в СЭЭС
- необходимость распределения активных и реактивных нагрузок.
- необходимость защиты от работы ГА от перехода в двигательный режим.

7.2. Включение синхронных генераторов на параллельную работу

Процесс включения генераторов переменного тока на параллельную работу принято называть синхронизацией. Для включения синхронных генераторов на параллельную работу необходимо выполнение следующих условий:

1. Разность значений электродвижущей силы подключаемого генератора E_2 и напряжения сети U_1 не должна превышать допустимой величины. Условие выполняется путем регулирования тока возбуждения подключаемого генератора.
2. Разность частот подключаемого f_2 и работающих f_1 генераторов не должна превышать допустимого значения. Это обеспечивается регулированием подачи топлива (пара) к приводному двигателю подключаемого генератора.
3. Включение на параллельную работу должно быть произведено в момент, когда ЭДС подключаемого генератора и напряжение работающих генераторов совпадают по фазе. Выполнение этого условия проверяется с помощью синхроскопа.
4. Чередования фаз статорных обмоток генераторов должны быть одинаковыми. Это обеспечивается при монтаже генераторов в период строительства судна.

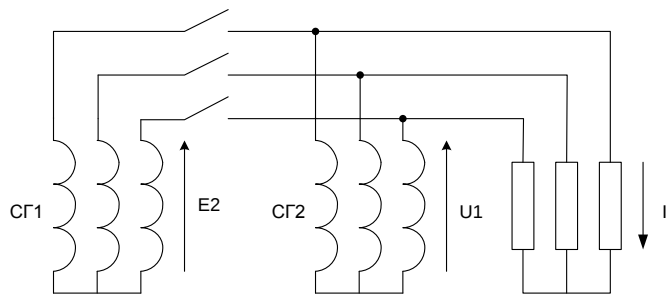
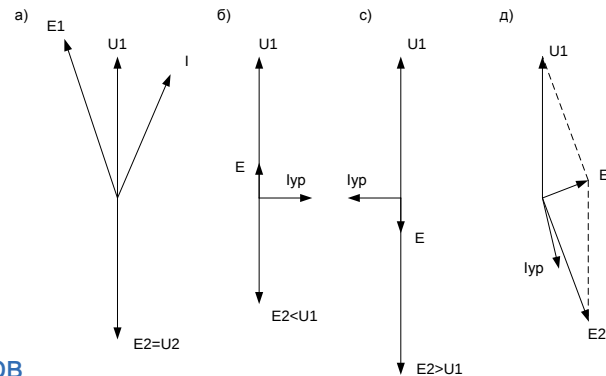


Схема включения синхронных генераторов на параллельную работу



Векторные диаграммы генераторов при синхронизации
а — выполнение условий синхронизации;
б, в — не выполняется равенство напряжений и ЭДС;
г — не совпадают по фазе напряжение и ЭДС

Условия синхронизации синхронных генераторов:

1. Одинаковая форма кривых мгновенного напряжения.
2. Одинаковое значение ЭДС подключаемого генератора (E_2) и напряжения сети (U_1).
3. Равенство частот.
4. Совпадения по фазе ЭДС подключаемого генератора и напряжения сети.
5. Одинаковое чередование фаз.

Нарушение любого из условий синхронизации приводит к появлению значительного по величине уравнительного тока, который может носить как активный, так и реактивный характер.

7.3. Способы синхронизации генераторов переменного тока

Существует три способа синхронизации ГА: точная, грубая синхронизация и самосинхронизация. Каждый из способов может выполняться вручную, полуавтоматически и автоматически.

При точной синхронизации подключаемый генератор включается на шины ГРЩ с соблюдением всех условий синхронизации.

Грубая синхронизация отличается от точной тем, что генератор в момент синхронизации подключается к шинам ГРЩ через индуктивное сопротивление — реактор, который в случае возникновения уравнительного тока ограничивает его величину.

При самосинхронизации частоту вращения подключаемого генератора доводят до номинальной и без возбуждения генератор подключают к шинам ГРЩ, а затем подают возбуждение и генераторы втягиваются в синхронизм.

7.4. Автоматическая синхронизация генераторов

Проведение процесса точной синхронизации вручную представляет собой достаточно сложную операцию и требует от обслуживающего персонала определенных навыков. Поэтому в настоящее время, учитывая общий уровень автоматизации электроэнергетических систем, эта функция выполняется автоматически.

Все устройства автоматической синхронизации выполняют следующие функции:

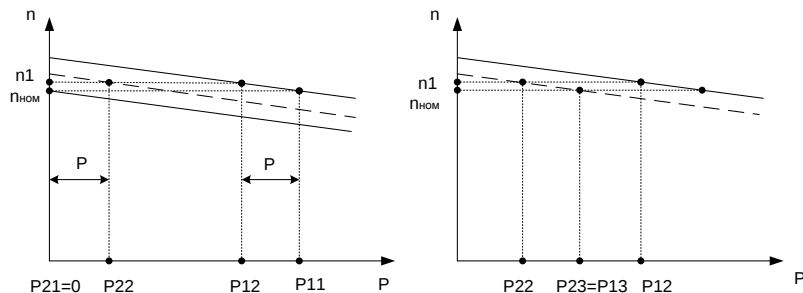
- осуществляют измерение угла между векторами напряжений с выдачей сигнала на включение автоматического выключателя;

- производят контроль скольжения и разности напряжений включаемых генераторов с целью запрета включения, если указанные величины превышают заданные значения.

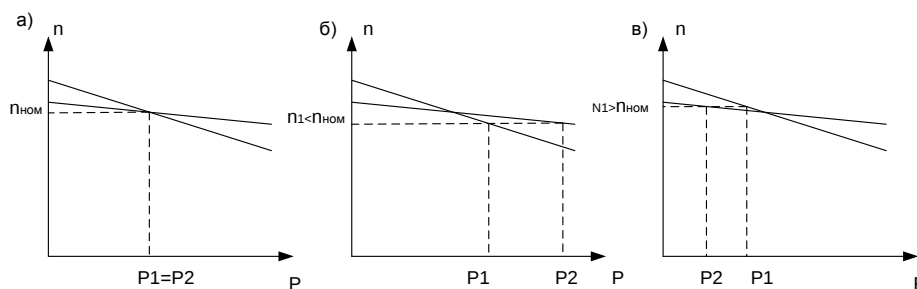
Современные автоматические устройства синхронизации предусматривают автоматическую подгонку частоты вводимого в синхронизм генератора.

7.5. Распределение активной нагрузки при параллельной работе генераторов

На судах распределение активной нагрузки между параллельно работающими генераторными агрегатами осуществляется в ручном или автоматическом режиме, при этом распределение нагрузки между включенными генераторами распределяется пропорционально их номинальным активным мощностям.



а — до распределения нагрузки; б — после распределения нагрузки



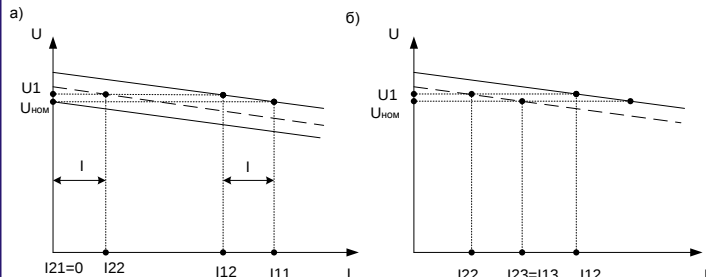
а — равенство нагрузки приводных двигателей ГА;
б, в — нагрузка приводных двигателей ГА неодинакова

7.6. Распределение реактивной нагрузки при параллельной работе синхронных генераторов

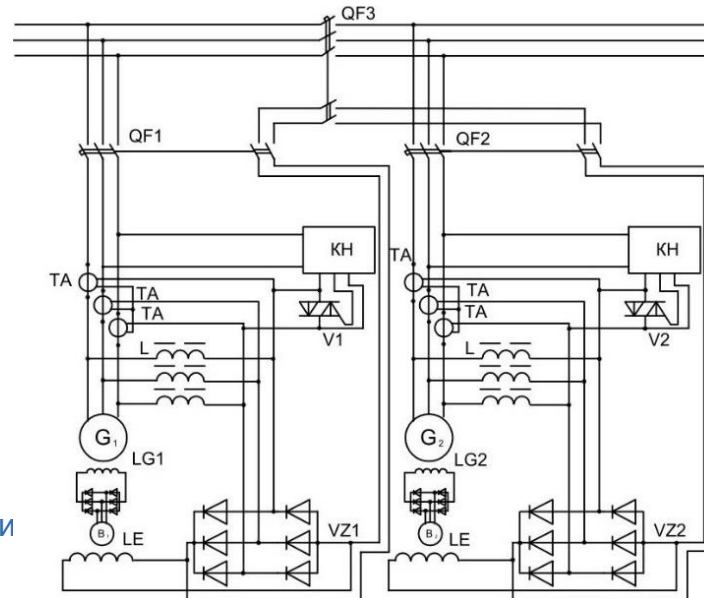
Реактивная нагрузка параллельно работающих генераторов распределяется за счет изменения токов возбуждения синхронных генераторов.

Для автоматического распределения реактивной нагрузки между СГ, снабженными системами амплитудно-фазового компаундирования применяют уравнивательные связи.

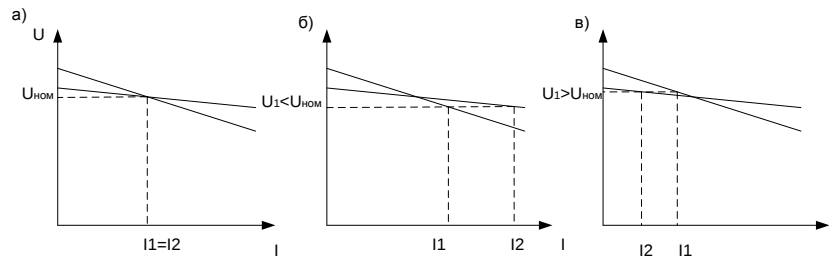
Для распределения реактивных токов между параллельно работающими СГ снабженными комбинированными системами возбуждения, т. е. амплитудно-фазового компаундирования с корректором напряжения может быть осуществлено введением статизма внешних характеристик по реактивному току генератора или путем использования специальных устройств.



Внешние характеристики синхронных генераторов:
а — до распределения нагрузки; б — после распределения нагрузки



Система возбуждения и регулирования напряжения синхронных генераторов с уравнивательными связями



Распределение реактивной мощности при параллельной работе ГА с разным статизмом внешних характеристик:
а — равенство реактивной нагрузки генераторов;
б, в — реактивная нагрузка генераторов не одинакова

Если два ГА работают параллельно и в их цепях имеются уравнильные токи, то эти токи не производят полезной работы, они циркулируют между генераторами.

8. КОРОТКИЕ ЗАМЫКАНИЯ В СЭЭС

8.1. Причины и типы коротких замыканий в судовых сетях

Различают следующие виды КЗ:

- замыкание между фазами в сети переменного тока или полюсами в сети постоянного тока;
- замыкание между фазой или фазами и нулевым проводом в четырехпроводной системе переменного тока;
- замыкание между фазой или фазами и корпусом судна в системах с заземленной нейтралью переменного тока.

Причины возникновения КЗ:

- попадание в электрооборудование воды или посторонних предметов;
- пробой изоляции, в том числе при ее загрязнении или разрушении;
- разрушение крепежа токоведущих частей и по другим причинам.

В зависимости от характера КЗ различают:

- металлическое (глухое) КЗ, когда напряжение в месте замыкания практически равно нулю;
- неглухое КЗ — замыкание через электрическую дугу, при этом напряжение в месте замыкания достигает значительной величины.

Последствиями КЗ в СЭЭУ являются:

- пожар с выделением токсичных веществ вследствие горения конструктивных и изоляционных материалов;
- разрушение оборудования электрической дугой;
- повреждение оборудования в результате электродинамического и термического действия тока КЗ;
- значительное снижение напряжения в судовой сети.

8.2. Короткое замыкание синхронных генераторов

При КЗ в результате переходных процессов в работающем электрооборудовании (генераторы, электродвигатели и т. д.) токи в сети значительно возрастают. Наибольшее значение мгновенного тока в этом режиме называют ударным током КЗ, который наблюдается примерно через 0,01с. В последующем ток в цепи снижается до так называемого установившегося тока КЗ.

Индуктивное сопротивление статорной обмотки генератора переменного тока в начальной стадии переходного процесса уменьшается более чем в десять раз. Далее следует ее рост.

8.2. Короткое замыкание синхронных генераторов

При КЗ в результате переходных процессов в работающем электрооборудовании (генераторы, электродвигатели и т. д.) токи в сети значительно возрастают. Наибольшее значение мгновенного тока в этом режиме называют ударным током КЗ, который наблюдается примерно через 0,01с. В последующем ток в цепи снижается до так называемого установившегося тока КЗ.

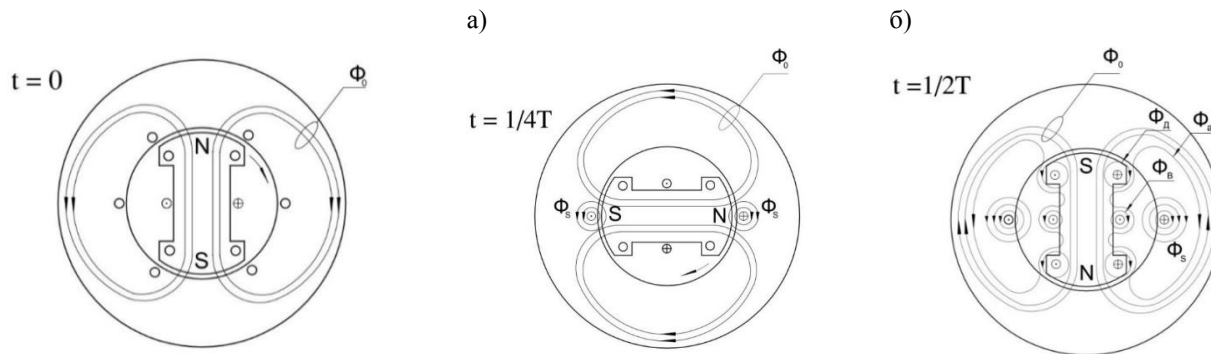
Индуктивное сопротивление статорной обмотки генератора переменного тока в начальной стадии переходного процесса уменьшается более чем в десять раз. Далее следует ее рост.

Учитывая пренебрежимо малые значения активных сопротивлений и значительные индуктивности обмоток генератора, а также то, что рассматриваемые временные интервалы КЗ измеряются несколькими периодами переменного тока, можно с небольшой погрешностью рассматривать эти обмотки как сверхпроводящие контуры.

Поэтому обмоткам синхронного генератора в режиме КЗ характерен принцип постоянства потокосцепления, т. е. в рассматриваемый период КЗ в любой момент времени с каждой из обмоток должен быть сцеплен магнитный поток, который оценивается числом и направлением силовых линий, как и в момент КЗ ($t = 0$).

Через $\frac{1}{4}$ периода (T) поток Φ_0 выйдет из зацепления с рассматриваемой фазой ОС.

Через $\frac{1}{2}$ периода ротор развернется на 180° . Направление потока Φ_0 изменится на противоположное.

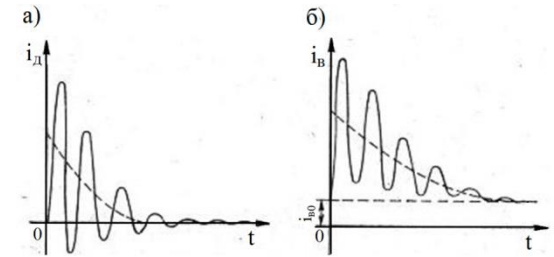


Исходное состояние
синхронного генератора

Взаимодействие магнитных
потоков
синхронного генератора при
коротком замыкании:
а — через $\frac{1}{4}$ периода; б —
через $\frac{1}{2}$ периода

Короткое замыкание сопровождается снижением напряжения в судовой сети. Расчет токов КЗ осуществляется в следующих целях:

- для оценки возможных опасных воздействий токов КЗ на СЭЭС и ее элементы;
- для определения уставок срабатывания устройств защиты;
- для выбора оптимальной схемы СЭС;
- для проверки на коммутационную способность аппаратов, предназначенные для отключения токов КЗ;
- для проверки токопроводов на динамическую и термическую стойкость.



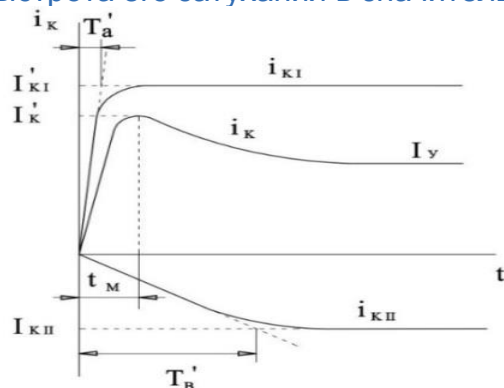
Токи в успокоительной обмотке (а) и обмотке возбуждения (б)

8.3. Короткое замыкание генераторов постоянного тока

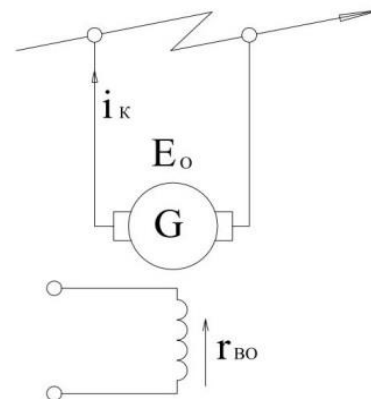
Внезапное КЗ генератора постоянного тока вызывает значительный всплеск тока якоря ($8-15 I_{\text{НОМ}}$ за $t_{\text{м}} = 0,05$ с) и приводит к следующим последствиям:

- появление опасных механических усилий в обмотках электрической машины;
- появление значительного тормозящего момента машины и не-допустимых механических напряжений скручивания вала с ПД;
- нарушение коммутации и образование кругового огня на кол-лекторе;
- нагрев обмоток.

Величина всплеска тока якоря генератора постоянного тока практически не зависит от системы возбуждения, а быстрота его затухания в значительной мере определяется ею.



Ток КЗ генератора постоянного тока

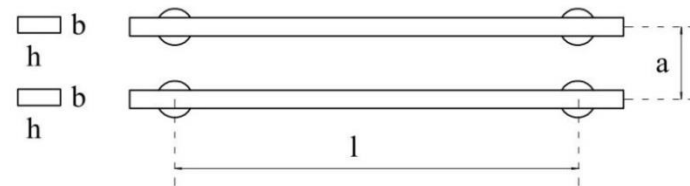


Короткое замыкание генератора постоянного тока независимого возбуждения

8.4. Электродинамические действия токов короткого замыкания

При протекании тока i в проводящем контуре в последнем возникает электродинамическая сила F , стремящаяся деформировать контур.

В режиме КЗ в СЭЭС практический интерес представляет динамическое действие токов КЗ в конкретный момент времени, в который этот ток достигает максимального значения. Для СЭЭС переменного тока это ударное значение тока КЗ через 0,01 с от начала процесса КЗ.



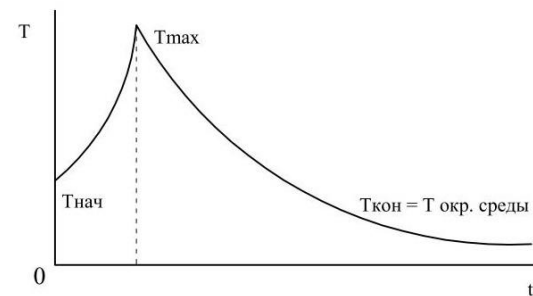
Взаимодействие двух контуров, по которым протекают токи КЗ

8.5. Термические действия токов короткого замыкания

Задача теплового расчета: определение максимальной температуры нагрева в режиме короткого замыкания ($T_{\max}$) и сравнение ее с кратковременно допустимой температурой токопровода.

Пренебрегая отдачей тепла в окружающую среду, так как время отключения тока КЗ t_k мало, принимаем, что выделенное тепло в токопроводе.

$$Q = \int_0^{t_k} I_K^2(t) \cdot r \cdot dt$$



Изменение температуры токопровода в режиме КЗ

8.6. Расчет токов короткого замыкания

Расчеты токов КЗ в СЭЭС следует начинать с выбора расчетного режима работы, расчетных точек КЗ и установления величин, которые необходимы для проверки электрооборудования. Для каждого проверяемого элемента СЭЭС выбирается режим работы системы, при котором данный элемент находится в наиболее тяжелых условиях при коротком замыкании.

В качестве расчетной точки для проверки коммутационных аппаратов и токопроводов по предельным токам КЗ следует принимать точку, в которой при КЗ в цепи аппарата или проводника будет наибольший ток.

Расчетным видом КЗ при проверке электрооборудования СЭЭС является трехфазное металлическое замыкание, т. е. сопротивление в точках КЗ в расчетах не учитывается.

Необходимые для расчета технические данные элементов СЭЭС наносят или на расчетную схему, или вносят в отдельную таблицу.

Для упрощения схемы замещения применяются следующие способы:

- замена последовательно или параллельно включенных сопротивлений одним эквивалентным;
- замена двух или нескольких параллельно работающих генераторов одним эквивалентным, номинальная мощность и номинальный ток которого определяется как сумма номинальных мощностей и сумма номинальных токов заменяемых генераторов;

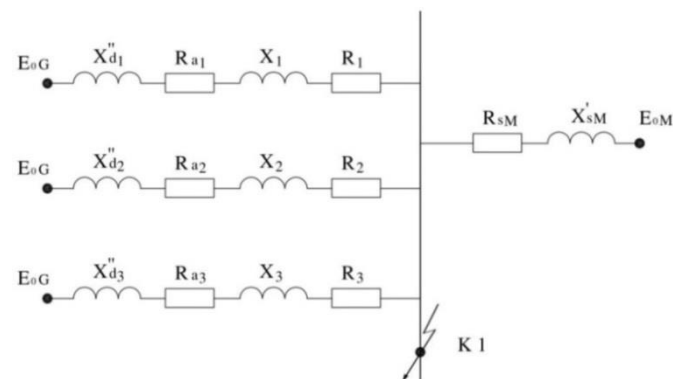
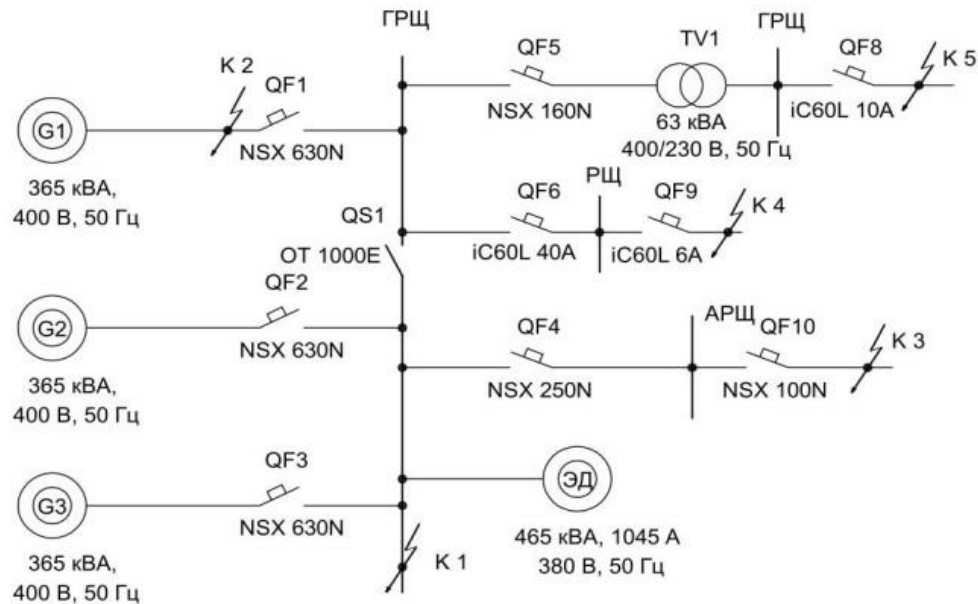


Схема замещения для точки КЗ

Взаимодействие двух контуров, по которым протекают токи КЗ

9. ПРОЦЕССЫ ПРИ ВНЕЗАПНОМ ИЗМЕНЕНИИ НАГРУЗКИ И УСТОЙЧИВОСТЬ РАБОТЫ СЭЭС

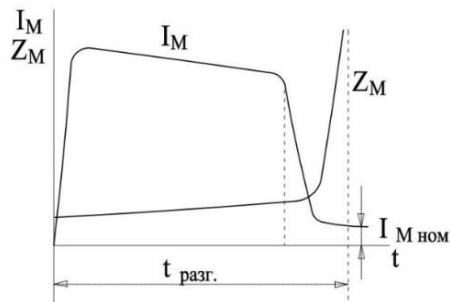
9.1. Изменение напряжения генератора переменного тока при внезапном изменении нагрузки

Отклонения напряжения от номинальной величины возникают при внезапных изменениях нагрузки генераторов переменного и постоянного тока. Судовые генераторы переменного тока с автоматическими регуляторами напряжения должны обеспечивать поддержание напряжения в пределах $\pm 2,5\%$ (аварийные генераторы $\pm 3,5\%$) от номинального значения при изменении нагрузки от нуля до номинальной при номинальном коэффициенте мощности.

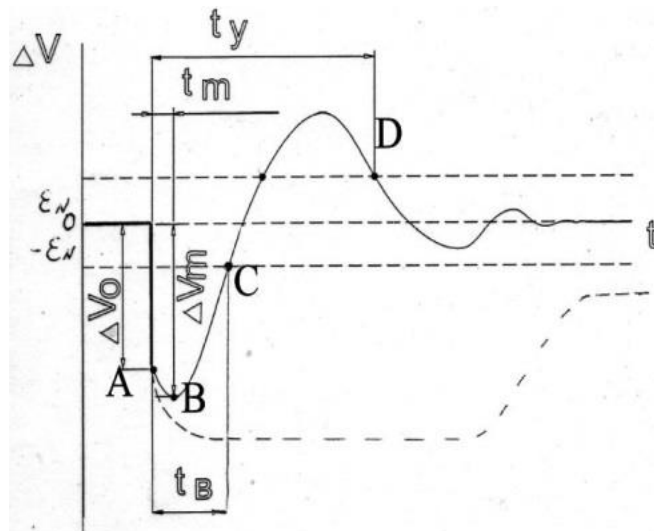
Для генераторов постоянного тока точность поддержания напряжения находится в диапазоне $2,5\text{--}5,0\%$ в зависимости от мощности и схемы возбуждения.

Внезапное изменение симметричной нагрузки генератора, работающего при номинальной частоте вращения и номинальном напряжении, при имеющихся токе и коэффициенте мощности, не должно вызывать снижения напряжения ниже 85% и повышения выше 120% от номинального значения.

В нормальных режимах работы СЭЭС запуск асинхронного двигателя вызывает снижение напряжения, так как сопровождается пусковым током, который достигает семи–деяти и более значений его номинальной величины.



Изменения тока и сопротивления асинхронного электродвигателя в процессе запуска



Изменение напряжения при запуске асинхронного двигателя:

ΔV — отклонение напряжения от номинального значения;

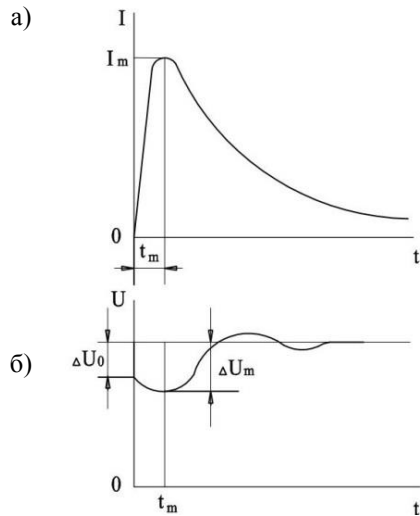
ϵ_N — допустимое отклонение напряжения; ΔV_0 — начальное

изменение напряжения (точка A);

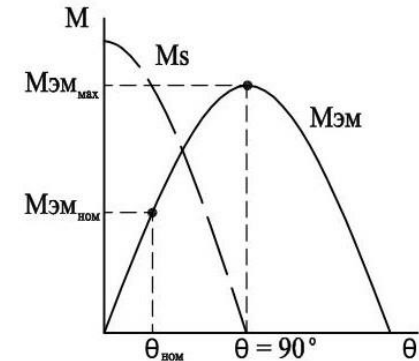
ΔV_{max} — максимальное отклонение напряжения (точка B); t_{max} — время достижения максимального изменения

напряжения; t_B — время восстановления напряжения (точка C); t_y — время восстановления напряжения (точка D)

9.2. Изменение напряжения генератора постоянного тока при внезапном изменении нагрузки



Наброс нагрузки на генератор постоянного тока: а – переходный процесс изменения тока; б – переходный процесс изменения напряжения



Удельный синхронизирующий момент

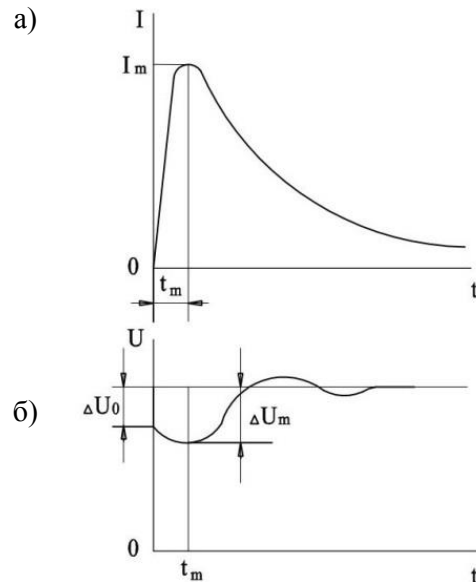
9.3. Статическая устойчивость параллельной работы синхронных генераторов

Под устойчивостью СЭЭС понимают ее способность переходить от одного устойчивого режима к другому, в том числе после различного рода возмущений. Устойчивость работы СЭЭС включает два взаимосвязанных понятия: устойчивость параллельной работы генераторов и устойчивость нагрузки.

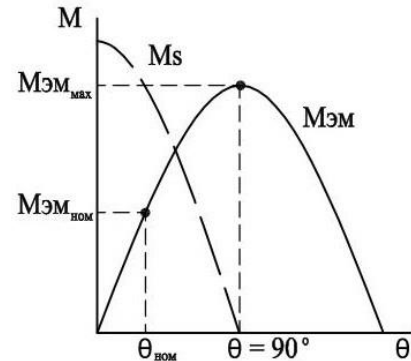
При рассмотрении параллельной работы синхронных генераторов под устойчивостью понимают их способность продолжать работать синхронно при весьма малых колебаниях нагрузки (статическая устойчивость), а также при значительных, но непродолжительных колебаниях нагрузки (динамическая устойчивость).

Статической устойчивостью СЭЭС называют ее способность возвращаться к исходному режиму или весьма близкому к нему после малых изменений ее параметров.

9.2. Изменение напряжения генератора постоянного тока при внезапном изменении нагрузки



Наброс нагрузки на генератор постоянного тока: а – переходный процесс изменения тока; б – переходный процесс изменения напряжения



Удельный синхронизирующий момент

9.3. Статическая устойчивость параллельной работы синхронных генераторов

Под устойчивостью СЭЭС понимают ее способность переходить от одного устойчивого режима к другому, в том числе после различного рода возмущений. Устойчивость работы СЭЭС включает два взаимосвязанных понятия: устойчивость параллельной работы генераторов и устойчивость нагрузки.

При рассмотрении параллельной работы синхронных генераторов под устойчивостью понимают их способность продолжать работать синхронно при весьма малых колебаниях нагрузки (статическая устойчивость), а также при значительных, но непродолжительных колебаниях нагрузки (динамическая устойчивость).

Статической устойчивостью СЭЭС называют ее способность возвращаться к исходному режиму или весьма близкому к нему после малых изменений ее параметров.

Статический предел мощности $P_{\max}$ можно повышать следующим образом: увеличивая ЭДС E , увеличивая напряжение U_{ϕ} , уменьшая синхронное индуктивное сопротивление генератора X_c .

Наиболее простым и эффективным средством повышения статической устойчивости является увеличение ЭДС. Современные автоматические регуляторы напряжения с ростом нагрузки увеличивают ток возбуждения и ЭДС при $U = \text{const}$, что повышает устойчивость работы генераторных агрегатов.

9.4. Динамическая устойчивость синхронных генераторов

Динамической устойчивостью СЭЭС называют ее способность переходить от исходного устойчивого режима к другому, также устойчивому режиму либо возвращаться к исходному после больших изменений ее параметров или внешних возмущающих воздействий.

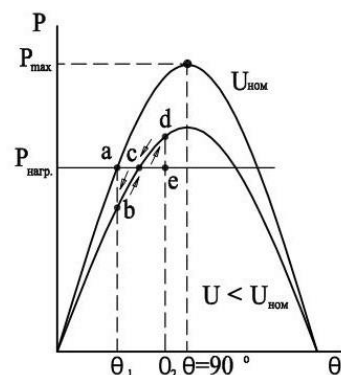
Динамическую устойчивость работы генераторов можно рассмотреть на примере изменения мгновенного напряжения в СЭЭС.

В процессе эксплуатации могут возникнуть колебания мощности параллельно работающих ГА. Причинами колебаний являются:

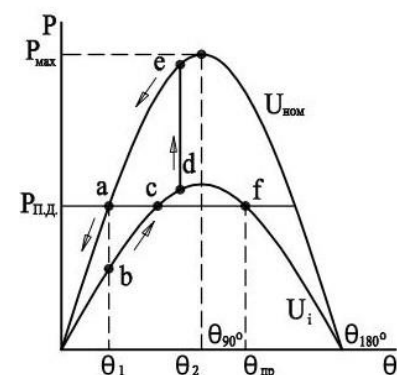
- периодическое изменение вращающего момента одного приводного двигателя или всех параллельно работающих;
- автоколебания в системе регулирования частоты вращения приводных двигателей генераторов;
- автоколебания в системе регулирования возбуждения;
- нарушение настройки параметров автоматического устройства распределения активной нагрузки ГА.

Основными мероприятиями по увеличению динамической устойчивости в СЭЭС при параллельной работе ГА являются:

- сокращение времени отключения короткого замыкания;
- применение быстродействующих автоматических регуляторов напряжения с форсировкой возбуждения;
- увеличение механической инерции агрегатов, что приводит к повышению их стоимости;
- применение успокоительных обмоток в роторах генераторов повышает динамическую устойчивость, способствуя более быстрому затуханию качаний роторов в результате рассеяния энергии в этих обмотках.



Динамическая
устойчивость
синхронного генератора



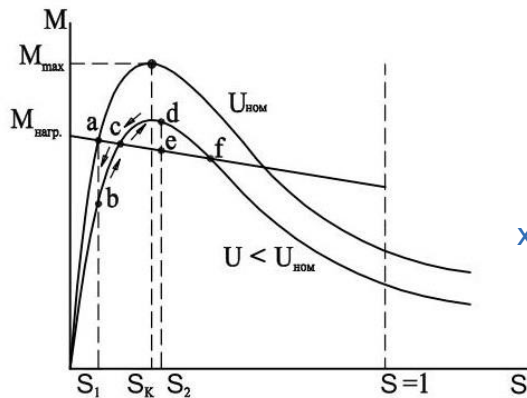
Влияние АРН на
динамическую
устойчивость
синхронного генератора

9.5. Устойчивость работы асинхронного электродвигателя

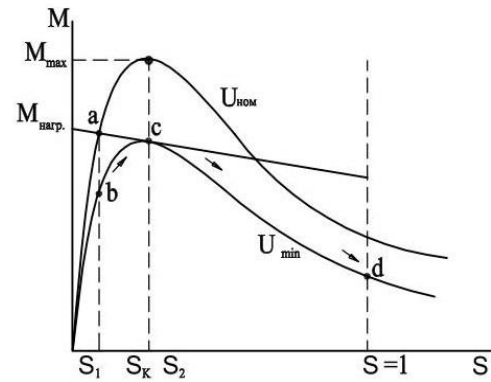
Значение вращающего момента АД пропорционально квадрату напряжения: $M \sim U^2$.

При длительном (статическом) снижении напряжения до 65–70 % АД затормаживаются. При кратковременном провале напряжения этого не происходит. Торможение электроприводов происходит постепенно по мере уменьшения запасенной ими кинетической энергии.

Если напряжение после отключения КЗ или наброса нагрузки восстановится за время, в течение которого двигатели не успеют остановиться, то они начнут разгоняться. Поэтому, согласно условиям устойчивости работы электроприводов, можно допускать значительно большие кратковременные снижения напряжения, чем при его длительном снижении.



Механические
характеристики
асинхронного
двигателя



Допустимое снижение
напряжения на АД

10. ЗАЩИТА В СЭЭС

10.1. Назначение и основные требования

Защита СЭЭС должна выявлять повреждение или ненормальный режим работы электроэнергетической системы, определять место повреждения, выполнять необходимые отключения, сопровождающиеся сигнализацией, или обеспечивать срабатывание сигнализации.

Защита в СЭЭС должна удовлетворять ряду требований, среди которых выделяют следующие:

- полнота защищенности, т. е. обеспечение необходимыми средствами защиты различных видов электрооборудования;
- избирательность (селективность), которая заключается в том, что защита отключает только поврежденный элемент или участок, обеспечивая дальнейшую работоспособность СЭЭС.

Избирательность обеспечивается главным образом согласованием времени срабатывания защитной аппаратуры на смежных участках электрической цепи. Наименьшую выдержку времени срабатывания имеет защита приемников электрической энергии, наибольшую — токовая защита источников электрической энергии.

Быстродействие имеет важное значение при защите от токов КЗ, обеспечивая тем самым уменьшение последствий вредного воздействия токов КЗ.

Чувствительность — свойство защиты реагировать на повреждения или ненормальные (аварийные) режимы в СЭЭС. Чувствительность обеспечивается выбором уставки срабатывания защиты $A_{уст}$ в соответствии с выражением.

где $A_{\text{раб max}}$ — максимально возможное значение контролируемого параметра (ток, напряжение, мощность и т. д.) в нормальном режиме работы СЭЭС;

$A_{\text{авар min}}$ — минимально возможное значение того же параметра в аварийном режиме.

Надежность защиты оценивается двумя показателями: вероятностью срабатывания защиты при возникновении повреждения или ненормального режима в СЭЭС и вероятностью отсутствия ложных срабатываний в нормальных режимах, а также при повреждениях, возникающих вне зоны действия защиты.

10.2. Построение система защиты генераторов

Судовые генераторные агрегаты в составе СЭС должны иметь защиту от перегрузок по току и мощности, токов КЗ, работы с повышенным и пониженным напряжением или в двигательном режиме.

Система электрической защиты должна быть избирательной (селективной) как в зоне токов перегрузки, так и в зоне токов КЗ. Устройства защиты от перегрузок и КЗ не должны срабатывать от пусковых токов защищаемого электрического оборудования.

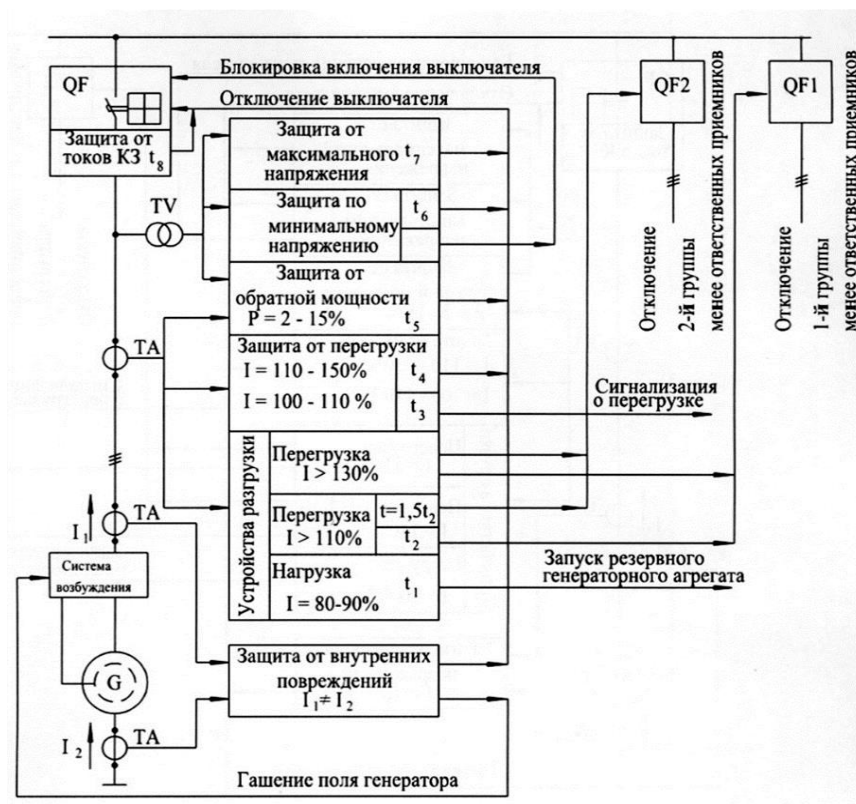
Для генераторов, предназначенных для параллельной работы, должны быть установлены следующие устройства защиты:

- от перегрузок;
- от КЗ;
- от обратного тока или от обратной мощности;
- от максимального и минимального напряжения.

Защиту генераторов обеспечивают автоматические выключатели, реле защиты или устройства защиты.

В состав схемы, представленной на рис. 10.1, входит защита от токов КЗ, защита от максимального напряжения, защита от минимального напряжения, защита от обратной мощности, защита от перегрузки и защита от внутренних повреждений. Защита от токов КЗ реализуется с помощью АВ.

Защита от перегрузки реализована путем отключения второстепенных потребителей в несколько ступеней с выдержкой времени, запуском резервного генераторного агрегата и отключением ГА от сети.



Структурно-функциональная схема защиты генератора

10.3. Защита генератора от перегрузки

Нагрузка генераторов судовой электростанции непостоянна и меняется при изменении режима эксплуатации судна, времени года и времени суток. При большой загрузке генераторов включение мощного приемника или совпадение максимумов нагрузки отдельных приемников может привести к перегрузке генераторов. Значительная перегрузка может возникнуть в случае отключения одного из параллельно работающих генераторов. Если в работе находятся два генератора с загрузкой каждого 75 %, то отключение одного из них приведет к увеличению нагрузки на оставшемся в работе генераторе до 150 %. Для предотвращения отказа агрегата необходимо принять эффективные меры к уменьшению его нагрузки.

Генераторы могут в течение некоторого времени работать с нагрузкой больше номинальной. Дизель в исправном состоянии способен работать с перегрузкой до 10 % в течение 60 мин. С учетом перегрузочной способности генераторов классификационными обществами были установлены требования к их защите. При перегрузке до 10 % обеспечивается сигнализация о перегрузке с выдержкой времени до 15 мин; при перегрузках 10–50 % производится отключение генератора с выдержкой времени, зависящей от величины перегрузки.

Уставка защиты от перегрузки и выдержка времени должны быть установлены с учетом перегрузочной характеристики приводного двигателя генератора таким образом, чтобы двигатель мог в течение этого времени развивать необходимую мощность.

Во избежание обесточивания судна следует по возможности предотвращать отключение генераторов. Для этого используют следующие способы:

- увеличение числа работающих генераторов при достижении такого значения нагрузки, при котором резерв мощности станции может оказаться недостаточным;
- разгрузка генераторов электростанции путем отключения неответственных приемников, которое не меняет режим работы судна;
- ввод в действие приемников (подруливающего устройства и т. п.), включение которых может привести к перегрузке генераторных агрегатов только после запуска и включения резервного ГА.

Своевременный запуск резервного генераторного агрегата позволяет предотвратить возможные перегрузки. Рациональная организация управления судовой электростанции должна обеспечивать загрузку генераторов в диапазоне 60–90 % в течение большей части времени эксплуатации. При наличии в системе управления функции запуска резервного генераторного агрегата, в зависимости от нагрузки работающих генераторов, обычно принимают уставку, равную 90 %. Во избежание неоправданных запусков резервного агрегата, применяют выдержку времени $t_1 \geq 10$ с.

Сигнализация о перегрузке генератора включается при нагрузке более 100 % и в случае отсутствия запуска резервного агрегата в функции нагрузки остается единственным средством защиты генератора при перегрузке до 10 %.

Должно быть предусмотрено автоматическое и избирательное отключение менее ответственных устройств при перегрузке генераторов. Эффективным средством защиты генераторов в диапазоне перегрузок от 10 до 50 % является разгрузка генераторов путем отключения части нагрузки.

На практике при перегрузке 10–15 % отключают первую группу приемников с выдержкой времени 5–10 с. Если это не позволило устранить перегрузку, то производится отключение второй и последующих групп с соответствующими выдержками времени. При перегрузке 20–30 % и более выполняется отключение всех групп одновременно без выдержки времени.

Для защиты генератора от перегрузки не должны применяться защитные устройства, исключающие немедленное повторное включение генератора, если произошло срабатывание защиты и генератор был отключен.

10.4. Защита генератора от обратной мощности

Переход в двигательный режим происходит вследствие нарушения работы приводного двигателя генератора, в режиме рекуперации энергии в сеть электроприводами гребных электрических установок, грузоподъемными механизмами, приводом трала и т. д. Значительные колебания мощности возможны при малой нагрузке генераторов или при выполнении операции синхронизации генераторов, когда частота подключаемого к шинам генератора меньше частоты работающих.

Мощность, потребляемая агрегатом из сети в двигательном режиме, невелика. По этой причине уставка защиты от обратной мощности должна составлять:

- 8–15 % от номинальной для дизель-генераторов;
- 2–6% — для турбогенераторов.

Выдержку времени t_5 защиты принимают 0,7–1,5 с для дизель-генераторов и 3–5 с — для турбогенераторов. Для того чтобы убедиться в работоспособности защиты при выводе агрегата из работы, уменьшают подачу топлива (пара) в приводной двигатель до срабатывания защиты и отключения выключателя генератора.

10.5. Защита генератора от минимального и повышенного напряжения

Защита от минимального напряжения обеспечивает отключение генератора от шин ГРЩ при напряжении 70% и менее от номинального. Защита от минимального напряжения должна обеспечивать возможность надежного подключения генераторов к шинам ГРЩ при напряжении 85 % и более номинального и исключать возможность подключения генераторов к шинам при напряжении менее 35 % номинального, а также отключать генераторы при снижении напряжения на их зажимах в пределах от 70 до 35 % номинального.

КЗ в электрических цепях, особенно на шинах ГРЩ, приводит к значительным снижениям напряжения в СЭЭС. В связи с этим необходима выдержка времени защиты при снижении напряжения, которая должна быть больше, чем у защиты генератора от токов КЗ.

Длительно допустимое повышение напряжения в судовой сети составляет 6 %. Защита от максимального напряжения должна срабатывать при повышении напряжения более чем на 6–10 % с выдержкой времени $t_6 = 0,5–2$ с.

10.6. Защита генератора от внутренних повреждений

Правилами РС предписано иметь защиту от внутренних повреждений для генераторов при напряжении выше 1000 В и для генераторов мощностью более 1000 кВт • А. Для этих целей применяют дифференциальную защиту, для реализации которой на границах защищаемого участка ставят трансформаторы тока. Устройство защиты сравнивает вторичные токи трансформаторов, которые в нормальном режиме отличаются на величину токовой погрешности трансформаторов.

Защита не должна срабатывать при бросках тока в случае синхронизации или при включении мощных приемников, когда погрешности трансформаторов типа ТА существенно возрастают.

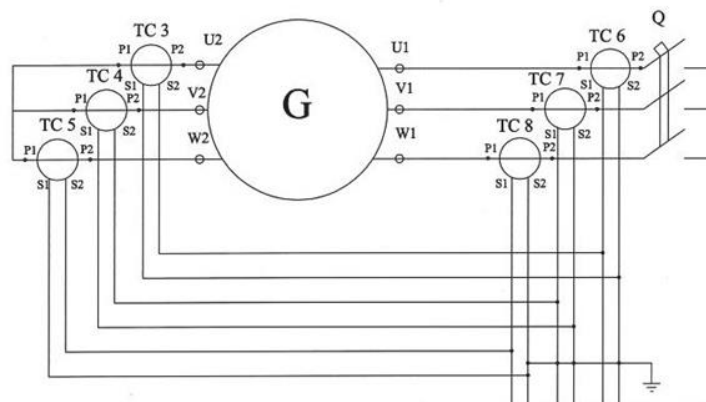


Схема защиты от внутренних повреждений и КЗ генератора и кабеля до автоматического выключателя в ГРЩ

10.7. Защита генератора от токов короткого замыкания

Наиболее тяжелым видом аварий на электростанциях судов является КЗ, так как его токи много раз превышают токи нормальных режимов работы, что может привести к значительным тепловыделениям и возникновению пожара.

Под КЗ понимают:

- замыкание между фазами в сети переменного тока и полюсами в сети постоянного тока;
- замыкание между фазой или фазами и нулевым проводом в четырехпроводной системе переменного тока;
- замыкание между фазой или фазами и корпусом судна в системах с заземленной нейтралью переменного тока.

В зависимости от характера КЗ различают:

- металлическое (глухое) КЗ, когда напряжение в месте замыкания практически равно нулю;
- неглухое КЗ, когда замыкание происходит через электрическую дугу, а напряжение в месте замыкания достигает значительной величины.

Последствия КЗ в СЭЭС:

- пожар с выделением токсичных веществ, вследствие горения конструктивных и изоляционных материалов;
- разрушение оборудования электрической дугой;
- повреждение оборудования в результате электродинамического и термического действия тока КЗ;
- значительное снижение напряжения в судовой сети.

Наибольшее значение мгновенного тока в этом режиме называют ударным током КЗ, который наблюдается примерно через 0,01 с. В последующем ток в цепи снижается до так называемого установившегося тока КЗ.

Устройством, обеспечивающим защиту генератора от токов КЗ, является автоматический выключатель генератора, который снабжен расцепителем — реле, отключающем выключатель в случае, если ток, протекающий через выключатель, превышает ток уставки расцепителя.

Уставки по току устройств защиты генератора от КЗ должны со-ответствовать не менее чем 200 % его номинального тока.

Отключение АВ производится со следующей выдержкой времени:

$$t_g = t + \Delta t$$

где t — выдержка времени защиты от токов КЗ выключателя, ближайшего к выключателю генератора;

Δt — ступень времени, необходимая для обеспечения избирательного (селективного) действия защиты (обычно $\Delta t = 0,1\text{--}0,2$ с).

10.8. Защита приемников электроэнергии и электрических сетей

Нарушение нормального режима работы приемника сопровождается нарушением режима работы электрической сети, связанной с этим приемником.

Электродвигатели мощностью свыше 0,5 кВт должны иметь индивидуальную защиту от КЗ и перегрузок, а также от снижения напряжения (нулевую защиту). Допускается использование защиты от токов КЗ, предусмотренной на фидере питания.

Защитные устройства электрических двигателей должны быть следующих видов: от токов КЗ, токов перегрузки, самопроизвольного повторного пуска электродвигателя при восстановлении напряжения после обесточивания или снижения напряжения до 60% и менее (нулевая защита).

Исключение составляют электродвигатели электрогидравлических рулевых устройств, для которых предусмотрена защита только от токов КЗ

В цепях питания электрических приводов пожарных насосов не должны применяться устройства защиты от перегрузки, в основе работы которых принцип действия электротепловых или температурных реле. Устройства защиты от перегрузки допускается заменять световой и звуковой сигнализацией.

Электрические приводы якорного и швартовного механизмов должны обеспечивать возможность стоянки под током.

Защитные устройства трансформаторов от токов КЗ и токов перегрузки устанавливаются в цепях первичных обмоток. На фидерах питания первичных обмоток трансформаторов должны быть установлены устройства защиты от короткого замыкания и перегрузки. Если трансформаторы предназначены для параллельной работы, то необходимо устанавливать выключатели, выключающие их первичную и вторичную обмотки, но не обязательно одновременно.

Силовые полупроводниковые устройства должны иметь защиту от внутренних и внешних перенапряжений. Блоки полупроводниковых элементов должны быть защищены от КЗ.

Защита от токов КЗ является обязательной и должна применяться на всех ответвлениях распределительной сети. Контроль за токами КЗ осуществляется во всех фазах сети. Защита от токов перегрузки имеет ограниченное применение в распределительных сетях.

Для защиты распределительных сетей от токов КЗ и перегрузки применяются в основном автоматические выключатели.

Избирательность электрических сетей состоит в отключении в кратчайшее время поврежденного участка сети с сохранением бесперебойного снабжения электроэнергией остальных.

Для защиты экипажа судна от поражения электрическим током и защиты отдельных видов электрического оборудования от однофазных замыканий на корпус должны применяться устройства защитного отключения (УЗО).

Для электрического оборудования ответственного назначения установка УЗО не допускается.

11. СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЭЭС

11.1. Основные термины и определения. Требования к системам автоматизации

Локальные системы автоматического управления, в том числе системы автоматического регулирования напряжения и частот ГА, системы дистанционного автоматизированного управления (ДАУ), систему аварийно-предупредительной сигнализации (АПС), системы индикации, систему управления генерируемой мощностью судовой электростанции PMS, относят к системам автоматизации и управления СЭЭС.

Система ДАУ предназначена для управления механизмами и оборудованием с удаленного поста управления.

Система аварийно-предупредительной сигнализации (АПС) предназначена для сигнализации о достижении контролируемыми параметрами установленных предельных значений и данных об изменении нормальных режимов работы механизмов и устройств.

Система индикации предназначена для получения информации о значениях определенных физических параметров и определенных состояниях механизмов и устройств.

На судах с символом класса автоматизации AUT1 система управления СЭЭС должна обеспечивать дистанционный пуск генераторных агрегатов с автоматической синхронизацией, приемом и распределением нагрузки.

Автоматический пуск резервного генератора, автоматическая синхронизация, а также прием и распределение нагрузки в СЭЭС происходит в следующих случаях:

- достижение работающими генераторами установленной предельно допустимой нагрузки;
- неисправность (отказе) работающего ГА.

Система пуска мощных приемников электрической энергии, включение которых может привести к недопустимому провалу напряжения или обесточиванию шин ГРЩ, должна предусматривать: предварительный автоматический запуск резервного генератора.

В автоматизированных СЭЭС должны контролироваться следующие параметры генератора:

- величина напряжения с передачей сигнала на АПС и отключением генератора при отклонении параметров сверх допустимых;
- частота в судовой сети с передачей сигнала на АПС;
- сопротивление изоляции с передачей сигнала на АПС;
- нагрузка (ток) генератора, с передачей сигнала на АПС, разгрузкой генератора и его отключением;
- обратная мощность (ток) с передачей сигнала на АПС и отключением генератора.

11.2. Принцип построения системы автоматизации СЭЭС

Большинство систем управления СЭЭС имеют иерархический принцип построения, при котором в случае отказа элементов верхнего уровня обеспечивается работоспособность СЭЭС с помощью элементов нижнего уровня системы.

На нижнем (нулевом) уровне иерархии находятся управляемые элементы СЭЭС с датчиками и исполнительными органами ручного управления.

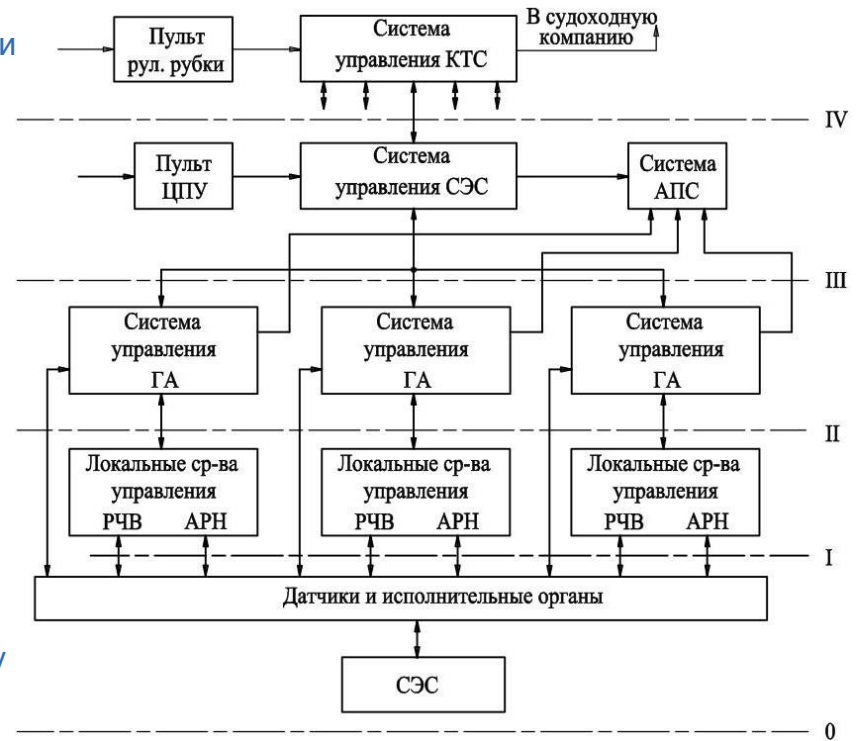
Первый уровень иерархии представляет собой совокупность локальных средств автоматизации, обеспечивающих стабилизацию напряжения и частоты генераторов.

Второй уровень системы управления СЭЭС – уровень локальных систем управления. На данном уровне предусмотрено выполнение следующих функций:

- автоматическое или дистанционное управление приводными двигателями генераторов;
- контроль параметров и защита генераторных агрегатов;
- стабилизация частоты;
- стабилизация напряжения;
- синхронизация генераторов;
- распределение активной и реактивной нагрузки между параллельно работающими генераторами;

Третий уровень – управление судовой электростанцией. На данном уровне предусмотрено выполнение следующих функций:

- контроль и управление загрузкой работающих ГА (запуск резервного ГА, включение схемы разгрузки генераторов отключающую менее ответственные приемники электроэнергии);
- выбор очередности пуска резервных ГА;
- изменение состава работающих ГА в зависимости от их текущего технического состояния и режима эксплуатации судна;



Система автоматизации и управления СЭЭС

- защита от токов КЗ;
- вывод СЭС из состояния обесточивания;
- управление пусками мощных приемников электроэнергии.

Четвертый уровень – управление комплексами технических средств с главного поста управления в рулевой рубке.

На этом уровне осуществляется:

- задание режимов эксплуатации СЭЭС в зависимости от режима эксплуатации судна (ходовой, маневровый, стояночный и др.);
- управление основными и аварийными электростанциями судна;
- вывод судна из обесточенного состояния с включением ответственных устройств, обеспечивающих движение, управление и безопасность судна.

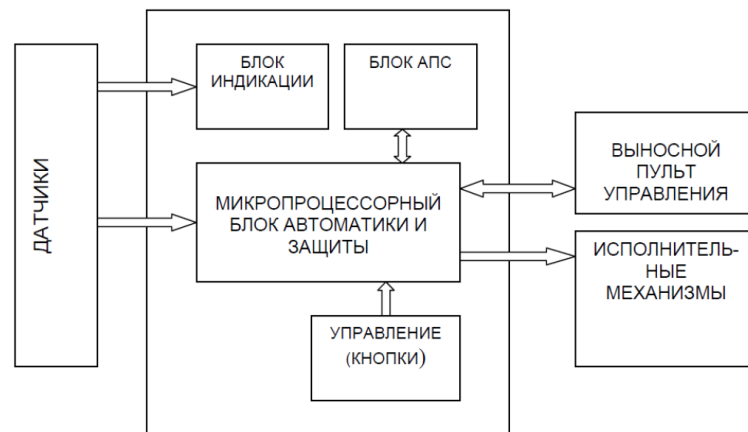
11.3. Система автоматического управления и защиты приводного двигателя генераторного агрегата

САУ состоит из следующих элементов:

- датчики системы защиты и управления;
- исполнительные механизмы (регулятор частоты вращения, пусковой соленоид, стоп-устройства);
- центральный блок САУ, расположенный на генераторном агрегате;
- выносной блок, расположенный в центральном посту управления или в рулевой рубке.

САУ ПД выполняет следующие задачи:

- управление электроприводом масляного насоса
- выбор и индикацию режима работы системы управления (дистанционный, местный).
- трехкратный запуск ПД при дистанционном или ручном режиме управления (до момента реализации запуска);
- блокировку пуска ПД после неудавшегося трехкратного пуска.
- пуск ГА при выводе электростанции из обесточенного состояния без предварительной маслопрокачки;



Функциональная схема системы автоматического управления и защиты приводного двигателя

– остановку с выдержкой времени в автоматическом режиме ГА после разгрузки и отключения генератора от шин ГРЩ;

– остановку ПД по команде от кнопок на центральном или выносном блоке САУ.

Защита ПД с последующей блокировкой пуска осуществляется САУ по следующим аварийным параметрам:

- разнос ПД;
- аварийно-низкое давление смазочного масла;
- аварийно-высокая температура смазочного масла;
- аварийно-высокая температура охлаждающей воды.

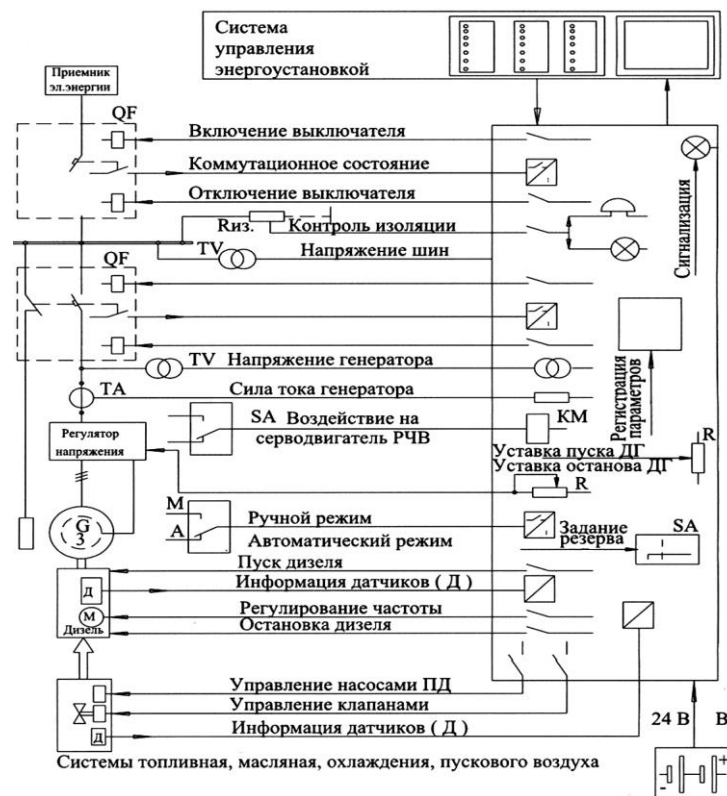
11.4. Система управления судовой электростанцией

Приводной двигатель должен обеспечить поддержание частоты вращения в пределах $\pm 5\%$ от номинального значения во всем диапазоне нагрузок от ХХ до ее номинального значения. Кратковременные изменения частоты при мгновенном сбросе 100 % или набросе 50 % нагрузки (для аварийных ГА 100 %) не должны превышать $\pm 10\%$, а частота вращения должна восстанавливаться за время не более 5 с.

Каждый генератор переменного тока должен иметь отдельную независимую систему автоматического регулирования напряжения (САРН), способную обеспечить поддержание напряжения при изменении нагрузки от нуля до номинальной величины при номинальном коэффициенте мощности с отклонением не более $\pm 2,5\%$.

Система управления судовой электрической станции обеспечивает:

- пуск и остановку генераторного агрегата;
- синхронизацию генератора;
- защиту генератора;
- распределение нагрузки между агрегатами при их параллельной работе;
- контроль параметров и сигнализацию об отклонении параметров от заданной величины;
- выбор варианта управления работой агрегата (местное, дистанционное, автоматическое управление);



Система управления судовой электростанцией

- вывод электростанции из состояния обесточивания;
- контроль работоспособности и диагностирование и т. д.

11.5. Микропроцессорные системы автоматического управления и защиты

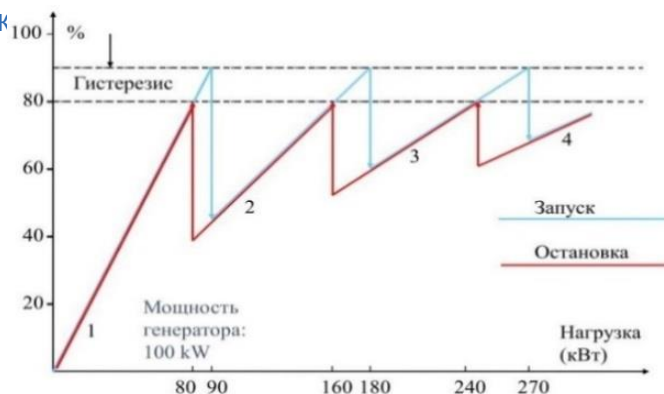
Современные системы управления СЭЭС строятся на основе микропроцессорных контроллеров. В составе микропроцессорной СУ СЭЭС используются однофункциональные микропроцессорные блоки, выполняющие функцию синхронизации, распределения активной и реактивной нагрузки, защиты генератора по току, напряжению, частоте и т. д. С помощью микропроцессорных блоков можно обеспечить степень автоматизации электростанции, соответствующий уровню AUT2 и AUT1, в том числе:– дистанционный пуск генераторных агрегатов;

- автоматическую синхронизацию генераторных агрегатов;
- распределение активной и реактивной нагрузки при параллельной работе генераторных агрегатов;
- разгрузку и отключение генераторного агрегата от шин ГРЩ;
- остановку приводного двигателя при параллельной работе генераторов в случае снижения нагрузки;
- автоматическую разгрузку, отключение и остановку генераторного агрегата;
- разгрузку генераторных агрегатов с помощью отключения менее ответственных приемников электрической энергии при перегрузке;
- защиту генератора и приводного двигателя;
- программируемые уровни нагрузки для запуска, остановки и разгрузки;
- работу с интерфейсами MODBUS-RTU и CAN (CANopen).

Назначение приоритетов запуска ГА позволяет осуществлять запуск или останов агрегата с более низким приоритетом при изменении нагрузки электростанции в заданном диапазоне. Определяет последовательность запуска резервных ГА при обесточивании ГРЩ.

При параллельной работе генераторных агрегатов распределение активной и реактивной нагрузки между генераторами осуществляется пропорционально их номинальной мощности.

На современных судах при длительном переходе микропроцессорные СУ СЭС реализуют асимметричный способ распределения активной нагрузки между генераторами.



Последовательность запуска и останова резервных ГА в зависимости от нагрузки судовой электростанции

12. ВАЛОГЕНЕРАТОРНЫЕ УСТАНОВКИ

12.1. Общие сведения о ВГУ

ВГУ осуществляют прямой отбор мощности от ГлЭУ для производства электроэнергии.

Применение валогенераторных установок (ВГУ) в составе судовых электроэнергетических систем позволяет отказаться от эксплуатации автономных генераторных агрегатов в ходовых режимах эксплуатации судна. В связи с этим среди основных достоинств применения ВГУ необходимо отметить:

- снижение себестоимости вырабатываемой электроэнергии;
- увеличение моторесурса приводных двигателей автономных ГА;
- уменьшение эксплуатационных затрат;
- повышение надежности СЭЭС и безопасности мореплавания в целом;

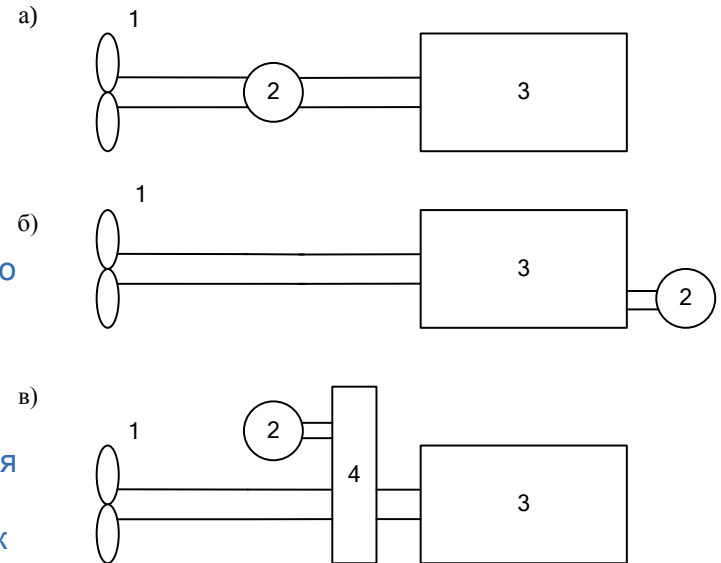
- уменьшение уровня шума и вибрации в машинном отделении.

Современные ВГУ могут работать параллельно с дизель-генератором. В некоторых типах ВГУ возможна реализация двигательного режима работы ВГ. В этом случае ВГ автономно или совместно с ГД работает на гребной винт (ГВ), обеспечивая ход судна, что повышает надежность СЭУ и безопасность мореплавания в целом.

Для валогенератора с электромагнитным возбуждением и подключением на ГРЩ должно быть предусмотрено устройство гашения поля для снятия возбуждения. Гашением поля называют процесс, заключающийся в сведении магнитного потока возбуждения генератора к минимальному значению.

Простейшим способом реализации данного процесса является отключение обмотки возбуждения.

При включении валогенератора на судовую сеть на ходовом мостике должна автоматически включаться световая предупредительная сигнализация, оповещающая о том, что изменение режима работы главных механизмов может привести к отклонению параметров судовой сети.



ВГУ с различными способами отбора мощности от ГД:

а — ВГ, встроенный в линию гребного валопровода; б — ВГ с приводом от вспомогательного вала ГД;

в — ВГ с приводом от редуктора:
1 — ГВ; 2 — ВГ; 3 — ГД; 4 — редуктор

Для стабилизации частоты тока в судовой сети в составе ВГУ могут использоваться устройства стабилизации частоты вращения ВГ или частоты тока вырабатываемой электроэнергии.

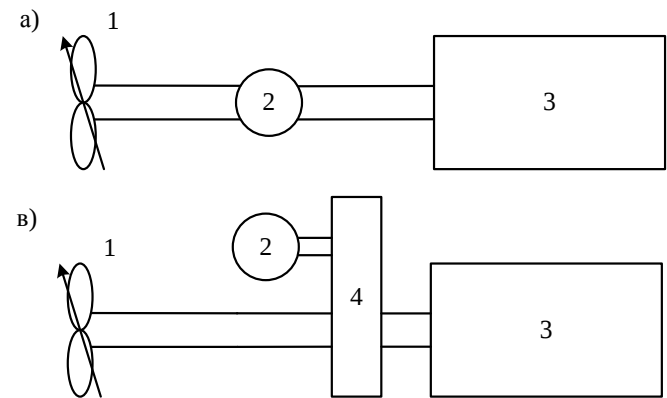
12.2. ВГУ на судах с винтом регулируемого шага

Одним из способов стабилизации частоты вращения ВГ является поддержание постоянства частоты вращения ГД. Работа ГД с постоянной частотой вращения возможна при использовании винта регулируемого шага (ВРШ).

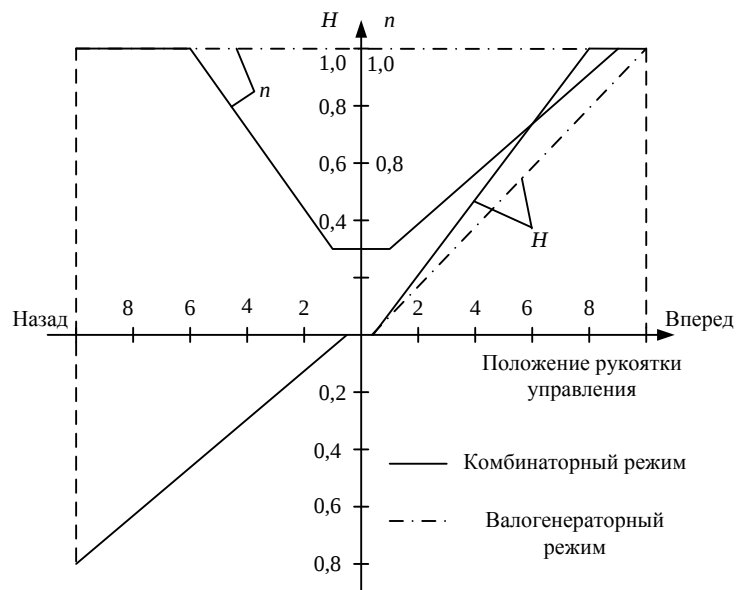
Использование в составе пропульсивного комплекса качестве движителя ВРШ позволяет:

- расширить область рабочих режимов ГД;
- осуществить пуск ГД при нулевом шаге винта с минимальным моментом сопротивления;
- осуществить реверс судна разворотом лопастей винта, что позволяет использовать неревверсивные ГД;
- повысить маневренные характеристики судна, что связано с отсутствием ограничений по минимальной частоте вращения ГД;
- уменьшить тепловые напряжения и механические нагрузки ГД на маневренных режимах;
- снизить расход горюче-смазочных материалов ГД при работе на ходовых режимах;

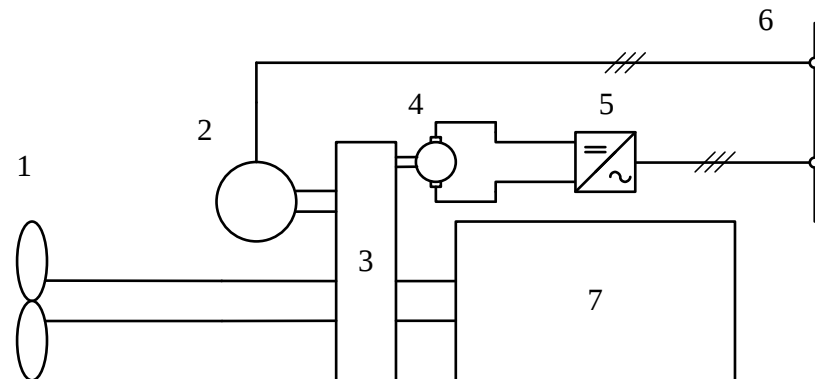
На судах с ВГУ и ВРШ применяют два способа управления главным двигателем: по валогенераторной или комбинаторной характеристике. При работе по валогенераторной характеристике скорость судна регулируется путем изменения шагового отношения винта, при этом частота вращения остается постоянной. При работе по комбинаторной характеристике валогенератор выводится из работы, а скорость судна изменяется одновременным регулированием шагового отношения и частоты вращения винта. Данный способ регулирования является более экономичным.



ВГУ на судах с ВРШ:
а — ВГ установлен в линии гребного валопровода;
б — ВГ с приводом от редуктора: 1 — ВРШ, 2 — ВГ, 3 — ГД, 4 — редуктор



Способы управления ГД на
судах с ВРШ:
H — шаг винта; n — частота
вращения винта



ВГУ с планетарной передачей:
1 — ВФШ; 2 — ВГ; 3 — редуктор с
планетарной передачей;
4 — ЭД постоянного тока;
5 — управляемый выпрямитель;
6 — ГРЩ; 7 — ГД

12.3. ВГУ с планетарными передачами

Для поддержания постоянства частоты вращения валогенераторов в некоторых типах ВГУ применяются стабилизирующие планетарные передачи, установленные между выходным валом ГД и ВГ. Принцип действия передач с постоянной выходной частотой вращения основан на использовании планетарной зубчатой передачи, эпицикл которой может вращаться от дополнительного привода с помощью гидромотора или электродвигателя, увеличивая или уменьшая частоту вращения планетарного колеса, соединенного с ВГ.

При изменении частоты вращения входного вала планетарного механизма сохраняется постоянство частоты вращения валогенератора. Увеличивая или уменьшая частоту вращения планетарного колеса, вспомогательный привод поддерживает постоянство частоты вращения входного вала, связанного с ВГ.

Вместо ЭД в составе ВГУ может применяться гидропривод. Гидроприводом называется система, в которой передача энергии от источника (гидравлического насоса) к гидродвигателю (гидромотору) осуществляется посредством гидравлической жидкости.

Точность поддержания частоты вращения ВГ с применением планетарных передач составляет $\pm 1,5 \%$ от номинальной величины.

12.4. ВГУ с синхронным генератором и полупроводниковым преобразователем

ВГУ с полупроводниковым преобразователем и синхронным ВГ нашли широкое применение на современных судах. В установках данного типа частота вращения ВГ изменяется в широких пределах пропорционально частоте вращения ГД, в результате чего меняется и частота вырабатываемой электроэнергии. Для поддержания постоянства частоты в судовой сети применяется полупроводниковый преобразователь (ПП).

Частота вращения синхронного ВГ изменяется пропорционально частоте вращения ГД, в результате чего меняется и частота вырабатываемой электроэнергии. Для стабилизации и поддержания постоянства частоты тока в судовой сети при работе синхронного ВГ с переменной частотой вращения широко используются ПП.

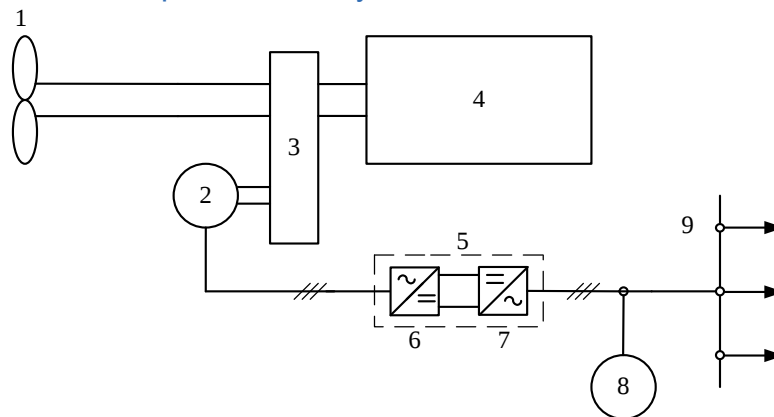
Основные режимы работы СЭЭС с ВГУ являются:

- одиночный генераторный режим;
- генераторный режим параллельно с ДГ;
- автономный двигательный режим.

Достоинствами ВГУ данного типа являются:

– возможность изменения частоты вращения ГД в широком диапазоне, что повышает экономичность пропульсивного комплекса;

- возможность реализации режима длительной параллельной работы ВГУ со вспомогательными ДГ;
- возможность реализации двигательного режима эксплуатации ВГ.



ВГУ с синхронным ВГ и ПП на базе ВИ:

- 1 — ВФШ; 2 — синхронный ВГ;
- 3 — редуктор; 4 — ГД; 5 — ПП;
- 6 — УВ; 7 — ВИ; 8 — СК; 9 — ГРЩ

12.5. ВГУ с асинхронизированным генератором

АСМ, или машина двойного питания, представляет собой АМ с фазным ротором, которая имеет симметричную двух- или трехфазную обмотку возбуждения. Обмотка возбуждения АСМ получает питание от источника электроэнергии переменного тока.

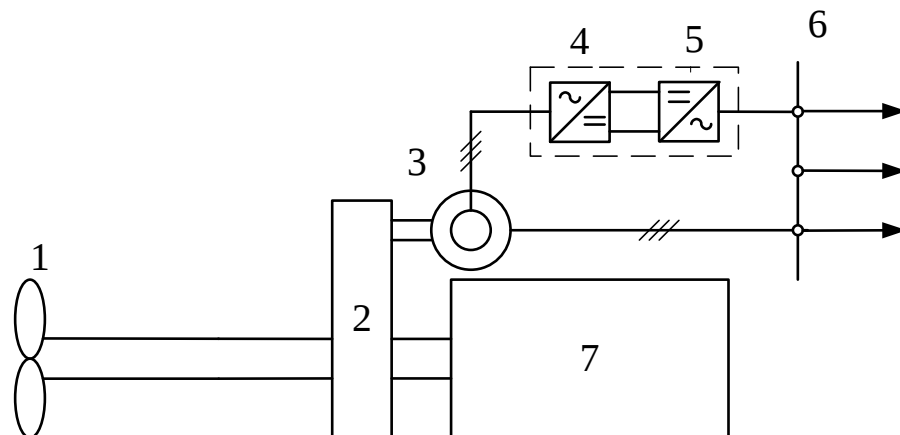
Поддержание постоянной частоты вырабатываемой электроэнергии в асинхронизированном ВГ осуществляется путем изменения частоты тока в обмотке возбуждения.

При номинальной частоте вращения асинхронизированный ВГ работает как СМ с питанием обмотки возбуждения постоянным током.

Поддержание постоянства напряжения осуществляется за счет регулирования магнитного потока с помощью системы возбуждения генератора, поддержание постоянства частоты напряжения в судовой сети – за счет регулирования частоты тока в обмотке возбуждения.

Достоинства ВГУ на базе АСМ:

- возможность реализации в ВГУ автономного режима работы ВГ и параллельной работы с ДГ;
- возможность реализации в ВГУ двигательного режима работы ВГ;
- уменьшение мощности ПП в связи с установкой его в цепи питания обмотки возбуждения, что позволяет снизить его стоимость и габариты;



ВГУ на базе асинхронизированного ВГ:

- 1 — ВФШ; 2 — редуктор;
3 — асинхронизированный ВГ;
4 — НВ; 5 — АИ; 6 — ГРЩ; 7 — ГД; 8 — НПП

13. ЕДИНЫЕ И ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ СЭЭС

13.1. Общие сведения о ЕЭЭС

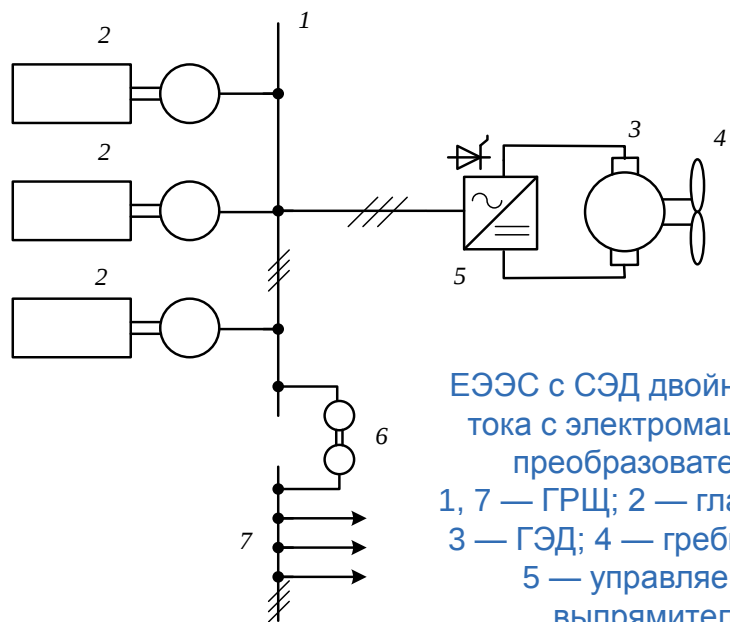
По мере развития полупроводниковой техники появилась возможность создания единых СЭЭС, в которых одни и те же генераторные агрегаты вырабатывают электроэнергию для питания системы электродвижения и общесудовых потребителей.

Достоинства ЕЭЭС:

- снижение массогабаритных и стоимостных показателей установки за счет уменьшения количества используемых ГА;
- оптимизация режимов эксплуатации приводных двигателей (дизелей) и, как следствие, снижение расхода горюче-смазочных материалов и повышение КПД;
- повышение надежности и безопасности эксплуатации ЭЭУ и судна в целом;
- возможность планирования техобслуживания и ремонта генераторных агрегатов путем поочередного вывода их из эксплуатации и др.

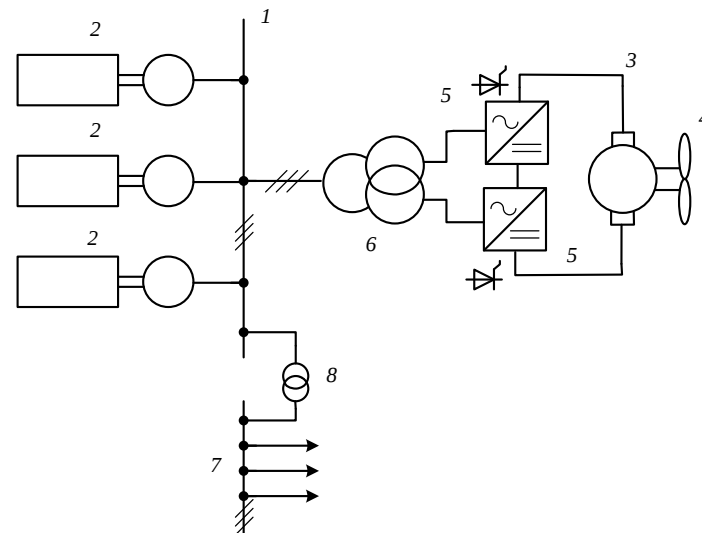
13.2. ЕЭЭС с СЭД двойного рода тока

В ЕЭЭС с СЭД двойного рода тока применяются генераторы переменного тока, от которых через полупроводниковые выпрямители получают питание ГЭД.



ЕЭЭС с СЭД двойного рода тока с электромашинным преобразователем:

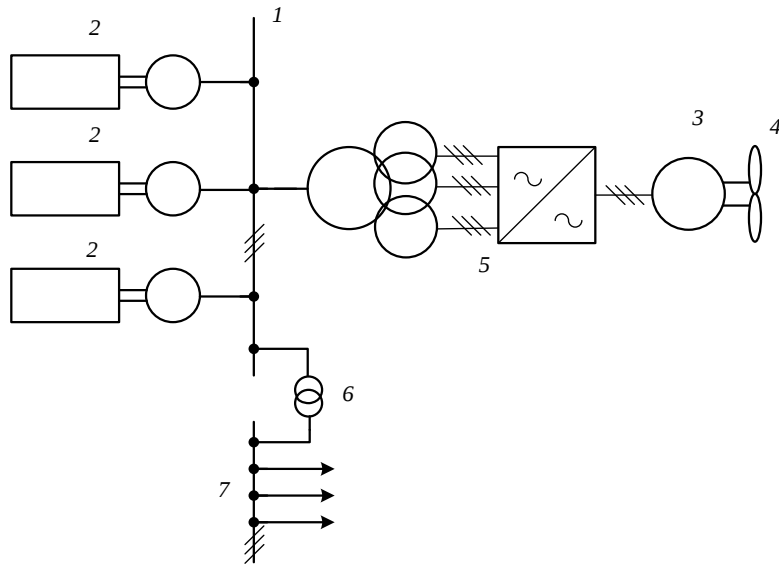
- 1, 7 — ГРЩ; 2 — главные ДГ;
3 — ГЭД; 4 — гребной винт;
5 — управляемый выпрямитель;
6 — электромашинный преобразователь



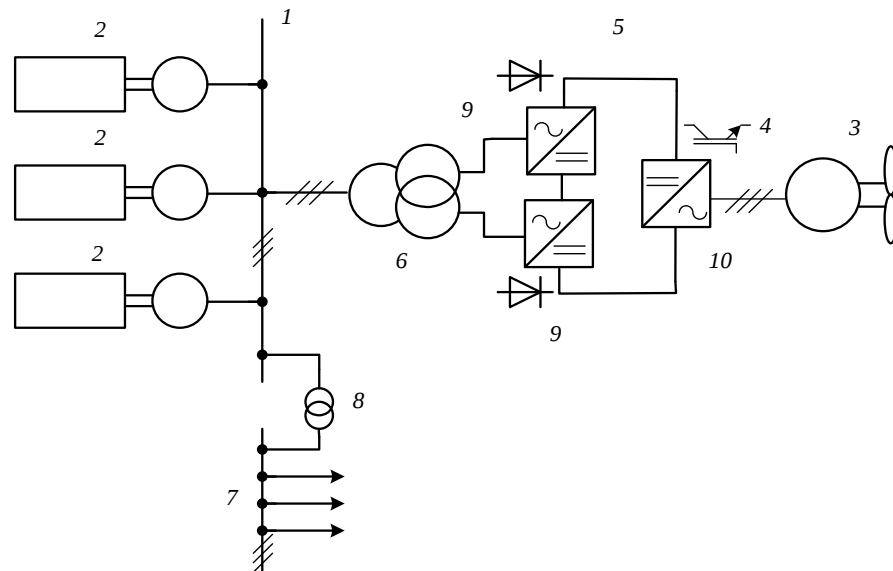
ЕЭЭС с СЭД двойного рода тока с трехобмоточным трансформатором: 1, 7 — ГРЩ; 2 — главные ДГ;
3 — ГЭД; 4 — гребной винт; 5 — управляемые выпрямители; 6 — трехобмоточный трансформатор; 8 — вспомогательный трансформатор

13.3. ЕЭЭС с СЭД переменного рода тока

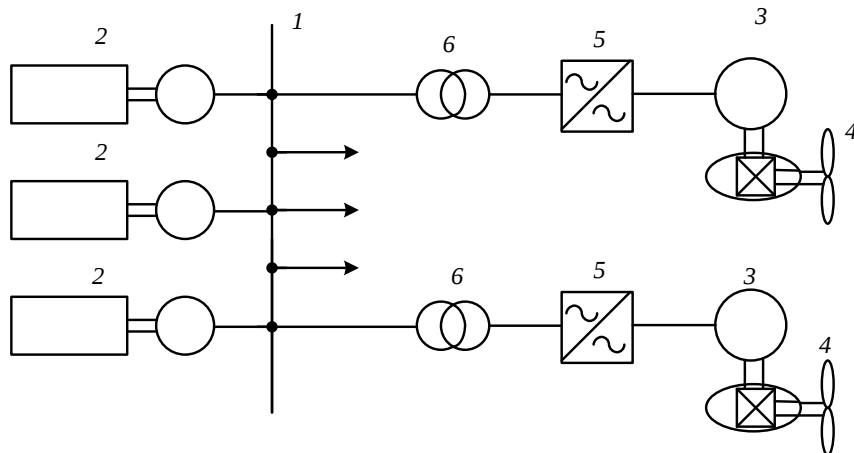
В СЭД переменного тока в качестве ГЭД может применяться как асинхронная, так и синхронная машина с электромагнитным возбуждением или возбуждением на постоянных магнитах.



ЕЭЭС с СЭД с прямой передачей вращающего момента на винт и непосредственным преобразователем частоты: 1 — ГРЩ; 2 — главные ДГ; 3 — ГЭД; 4 — гребной винт; 5 — преобразователь частоты с непосредственной связью; 6 — трансформатор



ЕЭЭС с СЭД переменного рода тока с ПП со звеном постоянного тока: 1 — ЩЭД; 2 — главные ДГ; 3 — ГЭД; 4 — гребной винт; 5 — преобразователь частоты со звеном постоянного тока; 6 — трехобмоточный трансформатор; 7 — ГРЩ; 8 — трансформатор собственных нужд; 9 — неуправляемый выпрямитель; 10 — автономный инвертор



ЕЭЭС с СЭД переменного тока на
базе ВРК:

1 — ГРЩ; 2 — ДГ; 3 — ГЭД; 4 — ВРК;
5 — ППЧ; 6 — трансформатор

13.4. Высоковольтные СЭЭС. Состав и классификация

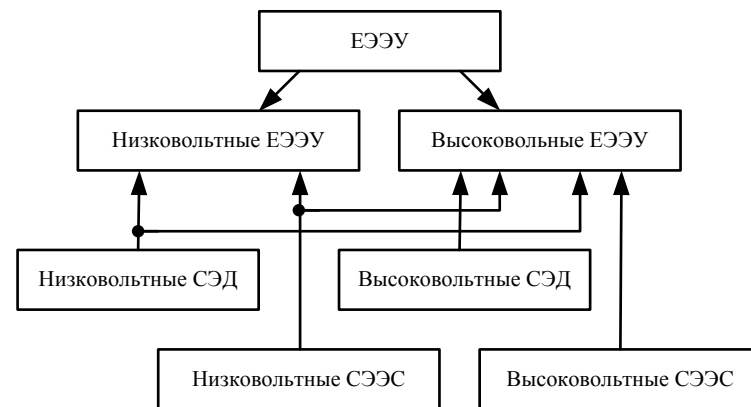
Мощность ГЭД на судах с электродвижением, как правило, значительно превосходит мощность судовых потребителей.

Рост мощности ГЭУ с электрическими машинами переменного тока определяет необходимость увеличения величины напряжения в судовой сети. Основными факторами, ограничивающими нижний предел напряжения, являются величина ударного тока КЗ и динамическая устойчивость. С ростом напряжения ударный ток КЗ уменьшается, а динамическая устойчивость увеличивается.

Ограничение по максимально допустимой величине ударного тока КЗ связано с ограниченной возможностью разрыва цепи при КЗ в коммутационной аппаратуре. Однако имеются ограничения и по верхнему пределу напряжения, обусловленные безопасностью обслуживания и надежностью электрооборудования. В настоящее время в Правилах РС определен предел по величине напряжения, равный 15 кВ.

Ограничивающими факторами для применения низкого напряжения в судовых силовых сетях являются:

- пропускная способность сборных шин, коммутационно-защитной аппаратуры главного распределительного устройства и силовых кабелей;



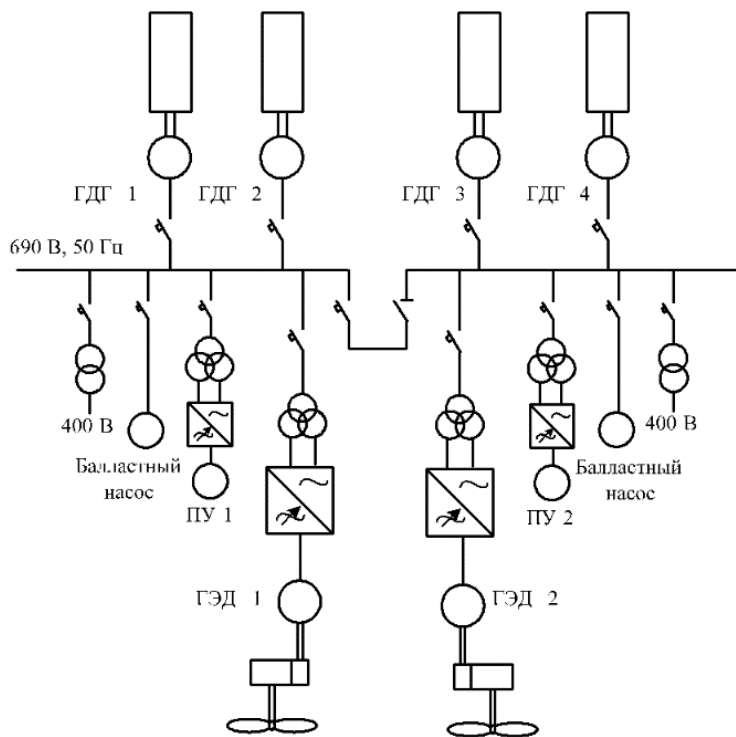
Классификация ЕЭЭС по величине напряжения

– массогабаритные характеристики электрических машин — генераторов и ГЭД, зависящие при прочих равных условиях не только от номинальной частоты вращения, но и от величины номинального напряжения.

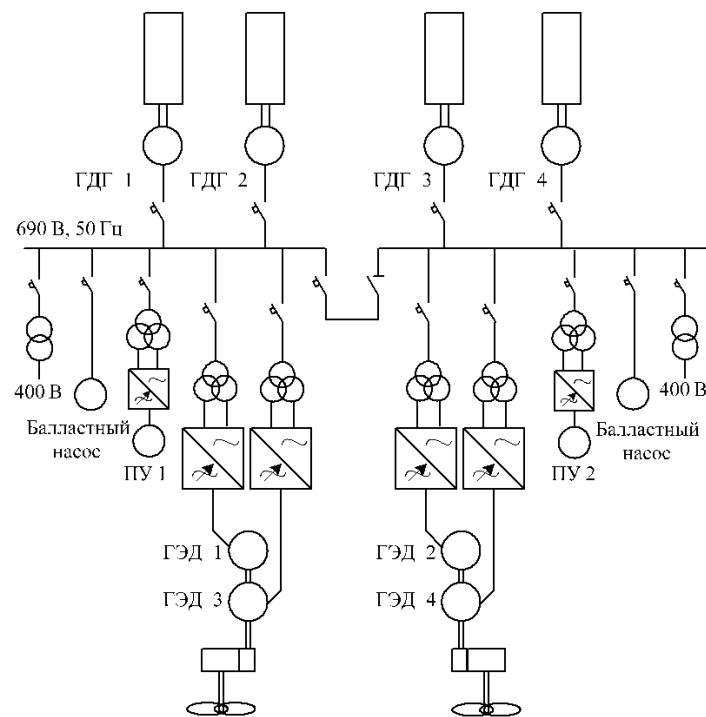
Стандартным высоковольтным напряжением является 3000 В, 3300 В, 6300 В, 6600 В, 10 000 В, 11 000 В, 15 000 В.

13.5. Структурные схемы ЕЭЭС с СЭД

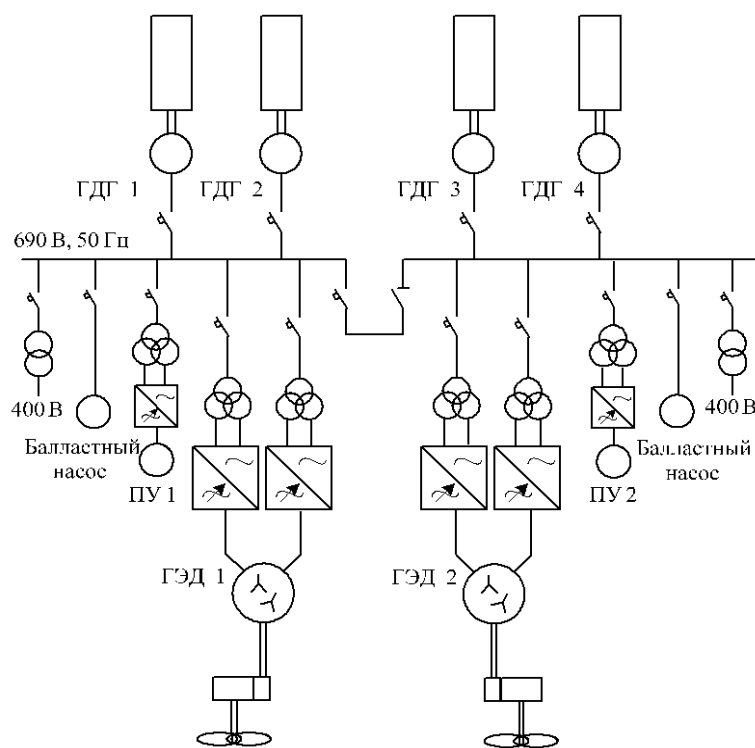
Единичная мощность низковольтного гребного электропривода переменного тока может достигать 4–8 МВт, а в отдельных случаях и более.



Низковольтная ЕЭЭС и СЭД переменного тока



Высоковольтная ЕЭЭС с низковольтной СЭД переменного тока и трехфазными ГЭД, соединенными в тандем



Высоковольтные ЕЭЭС и СЭД
переменного тока с шестифазными ГЭД

13.6. Основные требования к высоковольтному электрооборудованию

К высоковольтному оборудованию относятся ГРЩ, высоковольтные генераторы, двигатели и преобразователи, комплектные распределительные устройства, высоковольтные трансформаторы, высоковольтная коммутационно-защитная аппаратура (автоматические выключатели, контакторы, замыкатели, разъединители и т. п.), высоковольтные кабели и т.д.

Российским морским регистром судоходства (РС) разработаны требования к трехфазным системам переменного тока с номинальным напряжением, превышающим 1 кВ .

Электрическое оборудование на напряжение свыше 1000 В не должно устанавливаться в те же корпуса (оболочки), где установлено низковольтное оборудование. Изоляционные материалы, применяемые для электрического оборудования, должны обеспечивать во время эксплуатации установки сопротивление изоляции 1500 Ом на 1 В номинального напряжения, но не менее 2 МОм.

Для контроля состояния изоляции должны использоваться системы пофидерного контроля изоляции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В учебник включены материалы, предусмотренные рабочей программой по дисциплине «Судовые автоматизированные электроэнергетические системы», включая общие сведения о судовых электроэнергетических системах, составе, назначению, классификации, принципе действия судовых источников электроэнергии, схемотехническим решениям СЭЭС, системах регулирования частоты и напряжения, распределения активной и реактивной мощности при параллельной работе генераторных агрегатов, способах построения электрических сетей, причинах и последствиях возникновения аварийных режимов, а также вопросы устойчивости, защиты и управления.

Основное внимание при изучении дисциплины следует обратить на вопросы связанные с технической эксплуатацией генераторных агрегатов, включая их синхронизацию, автономную и параллельную работе, защиту и управлению.

Полученные теоретические знания в области эксплуатации судовых источников электроэнергии, судовых электростанций и судовых электроэнергетических систем инженеры-электромеханики смогут использовать в будущей практической деятельности при решении вопросов технической эксплуатации судового электрооборудования и средств автоматизации.

К перспективным направлениям развития судовой электроэнергетики следует отнести применение на современных судах в качестве источников электроэнергии вентильных генераторных агрегатов, работающих с переменной частотой вращения, а так же статических источников электроэнергии нового поколения, включая суперконденсаторы и солнечные батареи.

На судах нового поколения планируется применять СЭЭС с распределением электроэнергии на постоянном токе.

***Автор выражает благодарность ПАО «Совкомфлот»
за помощь и содействие в издании учебника***