

Курс лекций по “СУДОВЫМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ СИСТЕМАМ”

Литература.

1. Баранов А.П. “Автоматическое управление судовыми электроэнергетическими установками” - Транспорт, 1981.
2. Краснов В.В., Мещанинов П.А., Мещанинов А.П. “Основы теории расчета СЭС”, 1989.
3. Михайлов В.Л. “Автоматизированные электроэнергетические системы судов”, 1977.
4. Никифоровский Н.Н., Корневский Б.И. “Судовые электрические станции”, 1974.
5. Яковлев Г.С. “Судовые электроэнергетические системы”, 1987.
6. “Справочник судового электротехника”
 - т.1 “Судовые электроэнергетические системы и устройства”, под ред. Китаенко, 1980.
7. Роджеро Н.И. “Справочник судового электромеханика и электрика”
8. Мещанинов П.Л. “Автоматизация судовых электрических станций.”
9. Зайцев А.И., Юдин В.В. “Элементы и системы судовой электроэнергетики и автоматики”, 1986.
10. Зайцев А.И., Юдин В.В. “Судовые электроэнергетические системы”, 1986.
11. Регистр СССР, ч. 11, 1985.
12. “Справочник по серийным транспортным судам” ЦБНТИ МРФ издательство “Транспорт” т.1-4; в частн. т. 2.
13. Белов, Кордюков, Титар “Судовые электрические машины”, 1972.

Задача курса: изучение вопросов производства и распределение электрической энергии на судне.

Электроэнергетической системой - называется единый комплекс, предназначенный для производства, распределения и потребления электрической энергии на судне, состоящей из первичных двигателей, генераторов, распределительных устройств, кабельных трасс, устройств защиты и автоматики устройств управления и потребителей электрической энергии. Этот комплекс объединен общим процессом выработки, распределения и потребления электрической энергии,

Типы электрических станций и их классификация.

1. По типу первичного двигателя ЭЭУ:

- 1.1. Тепловые - когда электроэнергия вырабатывается за счет сжигания жидкого, твердого или газообразного минерального или органического топлива.
- 1.2. Атомные - когда электрическая энергия вырабатывается за счет энергии распада атомного ядра.

2. По типу первичного двигателя:

- 2.1. Парогенераторы;
- 2.2. Турбогенераторы;
- 2.3. Дизель - генераторы;
- 2.4. Газовые турбины.
- 2.5. Смешанные;

3. По величине установленной мощности электростанции:

- 3.1. Малой мощности 200-500 кВт;
- 3.2. Средней мощности 500-2000 кВт;
- 3.3. Большой мощности - выше 2000 кВт.

4. По назначению:

- 4.1. Основные - питает судовые потребители в основных эксплуатационных режимах судна (стоянка с погрузкой, швартовка и ходовой режим);
- 4.2. Аварийные - питают судовые потребители в экстренных случаях;
- 4.3. Специального назначения - питает потребители специального назначения.

5. По роду применяемого тока:

- 5.1. Постоянного тока;
- 5.2. Переменного тока;
- 5.3. Смешанного тока.

6. По способу управления судовой электростанцией:

- 6.1. Полностью автоматизированные
- 6.2. Полуавтоматизированные
- 6.3. Не автоматизированные

7. По способу отбора мощности от главного двигателя:

- 7.1. Отбор с помощью навешенного генератора;
- 7.2. Валогенератор;
- 7.3. Утилизационный котел.

Требования предъявляемые к судовым электростанциям.

Условия работы электрооборудования на судах:

Промышленное оборудование: влажность 50...75%, температура до 25...35°, положение строго вертикальное или строго горизонтальное. Оборудование не может работать при крене и вибрациях. Оборудование на судах: влажность до 98% при температуре до 45°, температура -40...+50° С, вибрация от 1 до десятков Гц, борто-

вая качка до 22°, крен до 15°, дифферент до 10°. Периодические ударные сотрясения. Необходимо учитывать присутствие морской воды, паров нефтепродуктов и масел на схемах. За счет работы главного двигателя и гребного винта диапазон частот вибрации может быть от 5-6 Гц до нескольких сотен Гц. Ударные сотрясения (во время швартовки. на судах ледоколах). Все эти требования заставляют создавать оборудование специального исполнения - специальное оборудование (судовое).

Габариты оборудования должны быть минимальными. Оборудование очень часто подвергается воздействию морской воды, поэтому на поверхность оборудования наносится спец. покрытие. Возможно также кратко - долговременное затопление отсека морской водой, поэтому на изоляцию наносятся спец. кремний - органические лаки. Во избежание попадания пыли, масел, паров нефтепродуктов, оборудование помещается в спец, герметичные ящики.

Требования предъявляемые к отдельным элементам СЭС.

Элементами СЭС являются:

1. Электрические машины: генераторы, электродвигатели, трансформаторы.
2. Кабели.
3. Распределительные устройства, в том числе: электрические аппараты и распределительные щиты.
4. Аппаратура управления, сигнализации и т.д.

Общее требование - надежность работы.

1. Чтобы обеспечить надежность работы генератора и электродвигателя, изоляция применяется кремний - органическая. Большие перегрузки приводят к перегреву машины и к уменьшению механической и электрической прочности изоляции, что создает опасность возникновения КЗ. Дополнительные требования к изоляции - влаго- и маслонепроницаемость, маслостойкость. Судовые электромашины выполняются более механически прочными, с усиленными подшипниками. Некоторые ответственные машины выполняются по замкнутому циклу вентиляции.
2. На судах применяются кабели из специальной негорючей резины (нейритовая изоляция). Где кабель может быть подвергнут механическим воздействиям, на него надевается стальная оплетка, а где кабель может стать источником излучения, там на него надевается экранированная медная оплетка.
3. Электрические аппараты помещаются в дюралевые или стальные ящики с сальниками и прокладками для обеспечения герметизации вводов кабеля в ящик. Ящик крепится к переборкам на четырех амортизаторах. Ножки штепсельных разъемов покрываются серебром.

В том числе ко всему судовому оборудованию предъявляются следующие требования:

1. Минимальный вес и габариты.
2. Удобство обслуживания.
3. Высокий КПД.
4. Минимальная стоимость и максимальная унификация.
5. Малая шумность и минимальные радиопомехи.

Причем все эти требования в комплексе не должны приводить к снижению надежности.

Требования предъявляемые к СЭС, как к единой системе.

Для обеспечения надежности системы предусматривается ряд мероприятий:

1. Подача питания наиболее ответственными потребителям от основного и резервного источников по 2-ум кабелям.
2. Установка резервных и аварийных агрегатов.
3. Размещение оборудования на судне в наименьших уязвимых местах.
4. Установка на судне нескольких электростанций.

Все выше указанные требования должны обеспечить бесперебойное снабжение судовых потребителей электроэнергией.

Кроме указанных требований, к СЭС также предъявляются следующие:

1. Возможность быстрой локализации поврежденных участков.
2. Минимальный расход кабеля.
3. Простота перевода электростанции из одного режима работы к другому.
4. Минимальный вес, габариты и стоимость.

Потребители электроэнергии на судах и характер их нагрузки.

Все судовые потребители классифицируются по нескольким признакам: по назначению, по степени важности, по режимам работы.

1. По назначению:

а) Палубные механизмы: шпиль, брашпиль, рулевая машина, шлюпочные лебедки, грузовые краны, траповая, буксирная лебедка и т.д.

б) Механизмы судовых устройств и систем: охлаждающий насос для главного двигателя, топливный насос, топливоперекачивающие насосы, компрессор (для запуска дизеля сжатым воздухом), центробежные фильтры очистки топлива и масла, пожарная система (пожарные насосы), балластно - креновая система (балластные насосы), пеногенераторные установки (пожаротушение), система пресной воды.

в) Радиотехнические средства, электронavigационные приборы: внутрисудовая связь, лаг, эхолот, несколько радиостанций.

г) Бытовые механизмы и приборы: установки - кондиционеры: вентиляторы, холодильники, камбуз.

д) Электрическое освещение: основное, аварийное, малое аварийное.

2. По степени важности:

а) Особо ответственные потребители: это такие потребители, отказ в работоспособности которых приведет к аварии судна и гибели экипажа. Это: устройства управления курсом судна, навигационные приборы, средства радиосвязи, аварийные насосы. Питание этих потребителей не должно прекращаться более чем на 10 секунд. Питание к ним должно подаваться по двум кабельным трассам, и должно осуществляться от двух источников (основной и аварийной электростанции).

б) Ответственные потребители: это потребители, обеспечивающие движение судна и сохранность груза. Такая группа потребителей должна получать питание в основных и аварийных режимах судна.

в) Мало ответственные потребители: бытовые механизмы и приборы - они допускают отключение питания на длительное время и не оказывают никакого влияния на жизнедеятельность судна.

3. По режиму работы:

а) Электродвигатели, работающие в непрерывном режиме с примерно постоянной нагрузкой: к этой группе в основном относятся насосы и вентиляторы, не требующие регулирования скорости.

б) Электроприводы работающие кратковременно.

в) Привода, работающие в повторно - кратковременном режиме: компрессоры, грузовые краны.

Судовые электродвигатели.

На судах применяются асинхронные двигатели следующих типов: АН, МАФ, АМ, ДМ, ЧА, МАП, АО. (ОСТ 5.6181-81). В основном применяются двигатели с короткозамкнутым ротором, а с фазным ротором - только в случаях, когда нужно регулирование скорости. Диапазон - 1:10.

Преимущества двигателей: простота, высокая надежность, малый вес, простота обслуживания.

Недостатки: большие пусковые токи (5-7 Iном), сильная размагничивающая реакция якоря у генератора, и как следствие, снижение напряжения сети (до 20%). Невозможность регулирования скорости. Сильная нагрузка сети реактивными токами при недогрузке двигателя. При несимметричном напряжении судовой сети возникает сильный нагрев асинхронного двигателя. Допустима несимметрия 2...2,5%. Если больше - то двигатель сильно нагревается и выходит из строя.

Двигатели постоянного тока.

В основном это двигатели серии ДПМ 1-11 габаритов:

- 1...6 габарит - 3 кВт,
- 6...7 габарит - 18...43 кВт,
- 9...11 габарит - 57...200 кВт.

ДПМ - двигатель постоянного тока морского исполнения. 1000, 1500, 3000 об. синхронных.

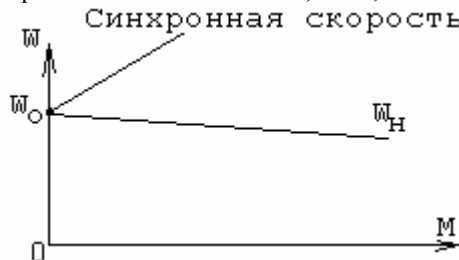


Рис.1.

Кроме серийных двигателей применяют двигатели, разработанные по спец заказам.

Основное преимущество - простота регулирования скорости путем изменения питающего напряжения.

Недостатки - более сложное устройство, большая (в 2 раза) цена и большая масса (на 30...40%) по сравнению с АД. Требуют постоянного обслуживания (щетки, коллектор).

Судовые генераторы.

Различают следующие типы генераторов: дизель - генераторы, турбогенераторы, валогенераторы. По назначению генераторы делятся на: основные, аварийные, резервные. Дизель - генераторы и турбогенераторы выполняются на общей фундаментной раме.

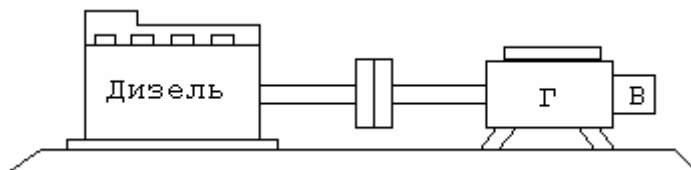


Рис.2.

В - возбуждатель
 $U_n = 400 \text{ В}$

$\omega_{0Д} = 1500 \text{ об/мин}$ $p = 2$
 $\omega_{0Д} = 1000 \text{ об/мин}$ $p = 3$
 $\omega_{0Д} = 750 \text{ об/мин}$ $p = 4$
 $\omega_{0Д} = 500 \text{ об/мин}$ $p = 6$

Все дизель - генераторы выполняются с явнополюсным ротором. Чтобы механический удар, возникающий при переходных процессах не передавался на механизмы дизеля, дизель и генератор соединяются через специальную демфирующую муфту (с пружинами).

Турбогенератор.

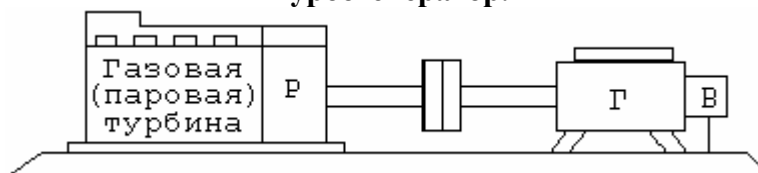


Рис.3. Турбогенератор.

$n_{турб.} = 20000-30000$ об/мин.

Для понижения частоты вращения применяется редуктор. Используются генераторы как переменного, так и постоянного тока. Типы: МС, МСК, МСС, ГМС, ГСС, ГМ, СБР, ТМ, ГПЧ, ВПР по ОСТ 5.6181-81.

Генераторы типа МС и МСК.

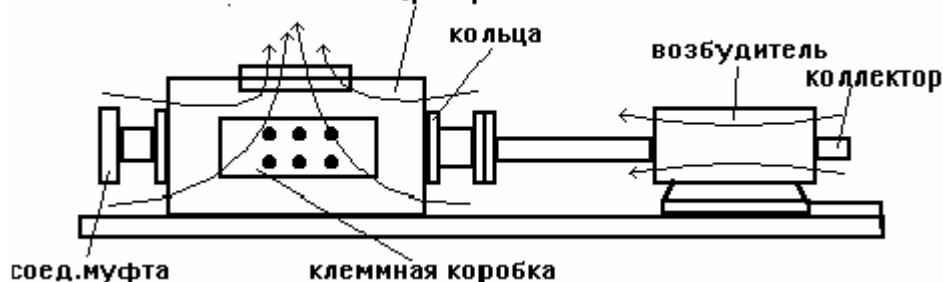


Рис.4.

Стрелками показаны пути охлаждающего воздуха (выполнено охлаждение по разомкнутому циклу, радиально - осевой). (Примечание: если воздух всасывается со стороны коллектора - осевой способ). Обмотка изолирована бумажной изоляцией, ротор изолирован слюдой (ОВ). Бумажная изоляция - с пропиткой шиллаком. У генераторов МСК вентиляция выполнена по замкнутому циклу с воздухоохладителем. Такая вентиляция обеспечивает независимость охлаждающего воздуха от температуры окружающей среды. Вторая особенность - применяется вентильное возбуждение машины, т.е. отсутствует возбуждательный генератор. За счет этого габариты генератора снижены примерно на 40% по сравнению с серией МС. Кроме того, в этом генераторе применяется кремнийорганическая изоляция обмоток. Эта изоляция допускает большую температуру нагрева обмоток - до 120°C, что позволяет применять провод меньшего сечения.

Конструкция генератора.

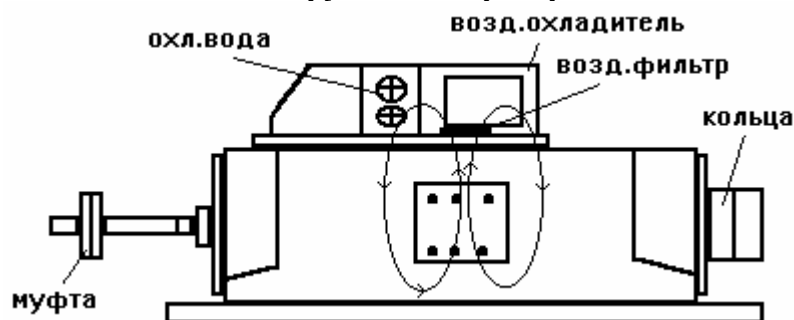


Рис.5.

Все судовые генераторы допускают наработку 10000 часов.

Допустимые перегрузки: 10% - 2 часа, 25% - 30 мин, 50% - 5 мин. Перегрузка дизеля (допустимая) - 10%.

Генераторы постоянного тока.

По способу питания обмотки возбуждения:

- 1) С независимым возбуждением.
- 2) С самовозбуждением.

По способу включения обмотки возбуждения:

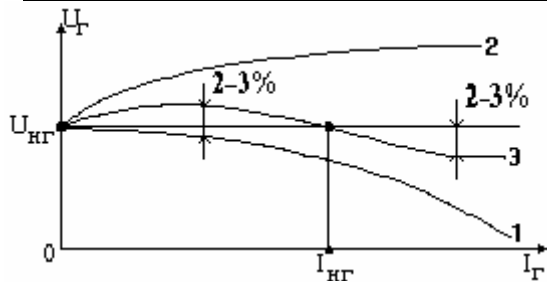
- 1) Параллельного.
- 2) Последовательного.
- 3) Смешанного.

На судах в основном применяются генераторы смешанного возбуждения. Последовательная (сервисная) обмотка используется для компенсации реакции якоря. Такие машины называются машинами с компаундированным возбуждением. Серия П 1...11 габаритов, 3...200 кВт. Эти генераторы имеют теплоустойчивую термоорганическую изоляцию. На каждом полюсе 2 обмотки: шунтовая и сервисная (5...6 витков). Генераторы выполнены в брызгозащищенном исполнении, направление вращения - против часовой стрелки (см. со стороны коллектора).

$n_H=1440$ об/мин - $n_H=2920$ об/мин (с учетом того, что генераторы приводятся в движение с помощью асинхронного двигателя (их синхронная скорость ниже асинхронной как раз на столько процентов).

Таблица 1.

Тип генератора	P_H , (кВт)	U_H , (В)	n , об/мин
ГПМ - 3	100	230	1500
ГП 1375/810	1375	500	810
П 1950/750	1950	750	750



3 - нормальная характеристика;
2 - генератор с КО (компенсационной обмоткой);
1 - генератор параллельного возбуждения.

Рис.6. Внешние и регулировочные характеристики генераторов.

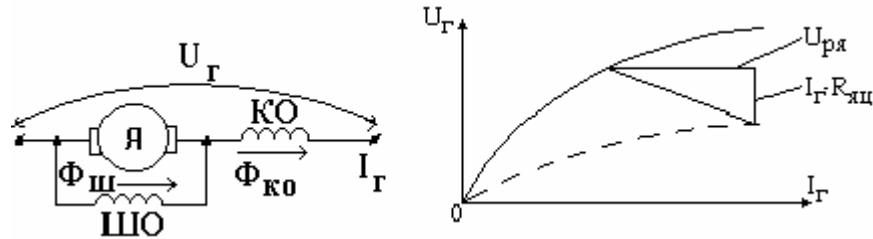


Рис.7.

$$U = I_{Г} \cdot R_{яц}$$

Число витков КО подбирается таким образом, чтобы $U_{Г}$ находилось в пределах $U_{Г}$ во всём диапазоне изменения нагрузки.

К судовым генераторам постоянного тока предъявляются следующие требования:

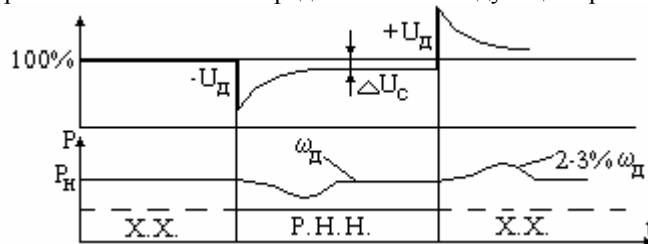


Рис.8.

Каждый ДГ должен иметь систему стабилизации частоты вращения и систему стабилизации напряжения.

$\Delta U \leq 12\%$ при $P_{Г} = 10 \dots 20$ кВт

$\Delta U \leq 8\%$ при $P_{Г} = 20 \dots 80$ кВт

$\Delta U \leq 5 \dots 8\%$ при $P_{Г} > 80$ кВт

$\Delta U \leq \pm 2.5\%$

Судовые трансформаторы.

ОСО - однофазный сухой открытый;

ОСВ - однофазный сухой водозащищенный;

ОСЗ - однофазный сухой брызгозащищенный;

ТСВ - 3-х фазный сухой водозащищенный;

ТСЗ - 3-х фазный сухой брызгозащищенный;

ОСБВ - 1-фазный сухой броневого водозащищенный;

Эти трансформаторы соответствуют ГОСТ 9879-61.

Таблица 2.

$U_{В}$	$U_{Тр}$	$U_{Н}$	Схема соединения
220		133	$\Delta/\Delta - 12$
380		133	звезда/ $\Delta - 12$
380		230	звезда/звезда 12

Требования эксплуатации.

$t_{окр} = -40 \dots +50^{\circ}C$ с кратковременным повышением до $70^{\circ}C$, влажность до 80%. Наклон: длительный - 15° , кратковременный - 45° . Трансформатор имеет выводы на первичной обмотке для подрегулировки вторичного

напряжения в пределах $\pm 5\% U_H$. Трансформаторы допускают перегрузки: 10% в течении 2-х часов, 50% в течении 30 минут., выдерживают режим короткого замыкания в течении 1,5 сек.

Ток, частота и напряжение судовых электростанций.

Преимущества электростанций на постоянном токе:

1. Простота регулирования ω ДПТ.
2. Простота (регулирования) применение 2-х фазных (2-х проводных линий).
3. Большая надежность аппаратуры управления на постоянном токе.

Преимущества электростанций на переменном токе:

1. Большая надежность эл. машин переменного тока по сравнению с постоянным током.
2. Простота преобразования уровней напряжения с помощью трансформатора.
3. Меньшие затраты на обслуживание, меньший вес, габариты, стоимость по сравнению с машинами постоянного тока.

Недостаток - худшие регулировочные свойства.

На судах применяется ряд стандартных уровней напряжений:

Постоянный ток: 220, 110, 24, 12 В

Переменный ток: 380, 220, 127, 42, 24, 12 В

Возможно и применение и нестандартных уровней, однако эти цепи не должны иметь соединений со стандартными цепями.

Правила Регистра рекомендуют применять стандартные напряжения для следующих цепей.

Таблица 3.

НОМЕР	ПОТРЕБИТЕЛИ	НОМИНАЛ СТАНД. НАПРЯЖЕНИЙ	
		ПОСТ.	ПЕРЕМ.
1.	Силовые потребители, цепи управления, нагревательные устройства, установленные вне помещений для жилья.	220	380
2.	Отопительные приборы для кают и жилья, освещение, сигнализация, внутренняя связь.	220	220
3.	Штепсельные розетки, установленные в служебных помещениях и жилых каютах.	220	220, 127
4.	Штепсельные розетки для переносного инструмента и переносных пультов дистанционного управления.	24	42
5.	Штепсельные розетки для переносных ручных ламп: в особо сырых помещениях - 12 В, в повышенной влажности - 24 В.	12 24	12 24

Иногда применяют и повышенное напряжение 660 В и выше.

Преимущества и недостатки повышенных напряжений.

1. Уменьшается сечение кабельных трасс, вес и габариты электрооборудования.
2. При высоком напряжении для гашения электрической дуги при размыкании цепи, нужны специальные устройства.
3. Меньшая надежность цепей повышенного напряжения и большая опасность для персонала.

Частота переменного тока.

$f=50$ или 60 Гц. На судах, где имеет место вес (на воздушных подушках) используется частота 400 Гц и выше.

Преимущества $f=50$ Гц:

1. Используется общепромышленное оборудование, переработанное в соответствии с требованиями Регистра.
2. Для насосов и других приводов недопустима высокая частота вращения из-за возникновения кавитации.

При применении высокой частоты: существенно снижается вес и габариты генераторов и двигателей, но для многих приводов требуется установка понижающего редуктора, что значительно усложняет обслуживание.

Синхронные генераторы.

Таблица 4.

Р, кВт	$f=50$ Гц				$f=400$ Гц			
	п, об/мин	L, мм	H, мм	m, кг	п, об/мин	L, мм	H, мм	m, кг
600	1000	1480	940	3315	12000	680	440	945
250	1500	820	710	1850	6000	470	410	510

Таблица 5.

P, кВт	m, кг	
	50 Гц	400 Гц
7.5	80	18.3
15	145	29

Агрегаты: $f=50$ Гц,

$f=400$ Гц

$P=4.5$ кВт
 $m=258$ кг

$P=4.5$ кВт
 $m=59$ кг

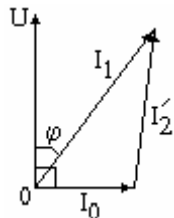


Рис.9.

Трансформаторы на $f=400$ Гц в 2,5 меньше, чем трансформаторы на 50 Гц. Индукция в 3 раза меньше и соответственно возрастает $\cos \varphi$ трансформатора (от 0,9 до 0,98) за счёт уменьшения намагничивающего тока. Частота 400 Гц применяется для судов маломерного флота.

Кабели

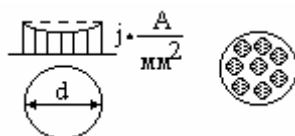


Рис.10

Эпюра использования кабеля при частоте $f=400$ Гц. Поэтому для наилучшего использования меди кабеля, его выполняют из отдельных проводников, изолированных друг от друга путем покрытия изоляционным лаком.

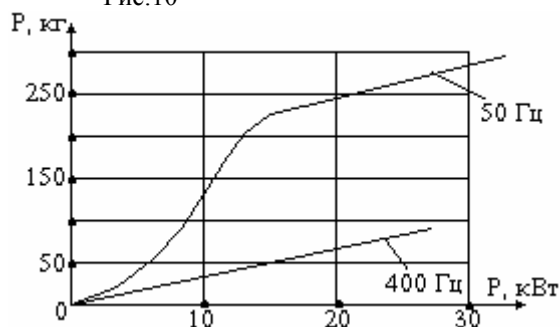


Рис.11.

Высокая частота применяется для уменьшения массо - габаритных показателей оборудования на специальных судах (подводные лодки, экранопланы, суда на воздушной подушке).

Род тока.

“+” применения постоянного тока:

1. Аппаратура на нем работает более устойчиво и более долговечно.
2. Простота регулирования скорости двигателей постоянного тока .

“-“ постоянного тока:

1. Применение коллекторов машин, малая надежность большие затраты при эксплуатации) машины постоянного тока дороже.

“+” применения переменного тока:

1. Простота конструкций СД и АД, отсутствие коллектора, меньший вес и габариты по сравнению с ДПТ, большая надёжность.
2. Простота преобразования уровня напряжения.

“-“ переменного тока:

1. Худшее регулирование свойств двигателей переменного тока.
2. Меньшая надежность работы аппаратуры на переменном токе.

Расчёт мощности судовых электрических станций.

Расчет мощности СЭС производится по отраслевому стандарту, согласованному с Регистром, проверенный практикой эксплуатации судов ОСТ 5.6168-80 ЦНИИСЭТ. Диаграмма удельного расхода топлива для дизель - генератора. При загрузке дизеля менее удельный расход топлива возрастает.

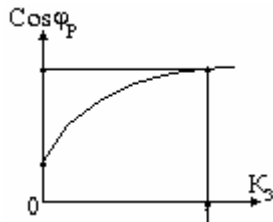


Рис.14.

Значения K_3 определяются на основе изучения опыта эксплуатации плавающих судов. В результате получены следующие рекомендации:

Механизмы, обслуживающие электроэнергетическую установку $K_3=0,7...0,9$

Палубные механизмы $K_3=0,3...0,9$

Бытовые системы $K_3=0,5...0,9$

Преобразователи электроэнергии $K_3=0,6...0,9$

Для определенного типа судна берется более узкий диапазон коэффициента загрузки. В вышеприведенную таблицу записываются все приводы, работающие в данном режиме. Количество строк в таблице равно количеству потребителей на судне. После того как будет заполнена вся таблица, суммируется отдельно мощность приемников, работающих в режиме НП и ПР. ($\Sigma P_{н.п.}$; $\Sigma P_{п.р.}$). Соответственно находятся $\Sigma Q_{н.п.}$ и $\Sigma Q_{п.р.}$. После этого производится сравнение данных сумм для того, чтобы выбрать коэффициент одновременности по режиму работы (K_0). K_0 - учитывает по неодновременность работы потребителей во времени.

1) $\Sigma P_{н.п.} > \Sigma P_{п.р.}$, то $K_0=1,0...0,8$

2) $\Sigma P_{н.п.} \approx \Sigma P_{п.р.}$, то $K_0=0,8...0,7$

3) $\Sigma P_{н.п.} < \Sigma P_{п.р.}$, то $K_0=0,7...0,6$

Мощность электростанции (активная): $P=(\Sigma P_{н.п.} + \Sigma P_{п.р.}) \cdot K_0$

$P_{ор}' = P_0 \cdot K_{п.}$, где $K_{п.}$ - коэффициент, учитывающий потери мощности в кабельных трассах (в зависимости от величины судна $K_{п.}=1,02...1,04$, т.е. от 2% до 4% энергии).

$P_{п.}$ - учёт активных потерь электроэнергии в кабелях.

$S = \sqrt{P_{ор}'^2 + Q_0^2}$ - полная мощность.

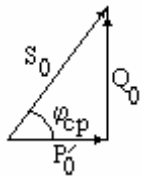


Рис.15.

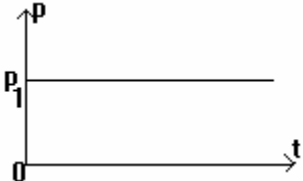
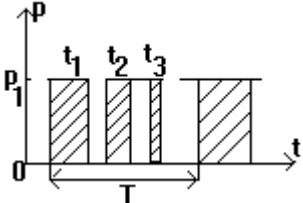
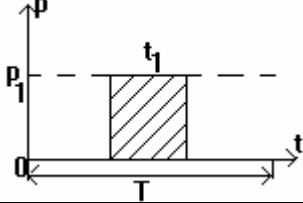
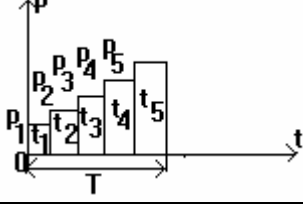
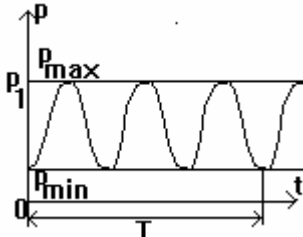
$\text{Cos} \phi_{cp}$ - средневзвешенный коэффициент мощности по режиму работы. $\text{Cos} \phi_{cp}$ необходимо знать для определения мощности генератора.

Аналитический метод переменных нагрузок.

Отличие данного метода от предыдущего заключается в том, что электроприемники представляются не постоянным графиком нагрузки, а постоянным графиком. Существуют несколько типовых переменных графиков нагрузки. Каждый из них характеризуется математическим ожиданием или средним значением активной мощности и дисперсией (колебанием) величины активной мощности. Всё это с применением ТВ позволяет более точно определить мощность потребителей, чтобы более точно выбрать генераторные агрегаты. Таблица состоит из 1...12 позиций предыдущей таблицы. Для тех потребителей у которых переменный во времени график нагрузки добавляется еще 4 позиции.

Таблица типовых графиков нагрузок.

Таблица 7.

№	Тип графика нагрузки	Вероятность работы, А	Средняя активная мощность, P _{ср}	Дисперсия активной мощности, Д
1	<p align="center">Непрерывный</p> 	$a=1$	$P_{ср}=P_1$	$D=0$
2	<p align="center">Периодический</p> 	$T_p=t_1+t_2+...+t_i$ $a = \frac{T_p}{T}$	$P_{ср}=P_1 \cdot a$	$D = \frac{P_1^2 \cdot T_p (T - T_p)}{T^2}$
3	<p align="center">Эпизодический</p> 	$a_1 = \frac{t_1}{T}$	$P_{ср}=P_1 \cdot a_1$	$D = \frac{P_1^2 \cdot t_1 (T - t_1)}{T^2}$
4	<p align="center">Многоуровневый</p> 	$a_i = \frac{t_i}{T}$ a_1, a_2, \dots	$P_{ср}=\sum P_i \cdot a_i$	$D = \frac{\sum P_i^2 \cdot t_i (T - t_i)}{T^2}$
5	<p align="center">Периодически изменяющийся</p> 	$a=1$	$P_{ср} = \frac{P_{max} + P_{min}}{2}$	$D = \frac{(P_{max} - P_{min})^2}{4}$

Цель формул - более точное определение нагрузки. По данной методике составляются следующие таблицы: первые 7 глав берутся из предыдущей методике, затем составляют еще 8 глав.

Наименование эксплуатационного режима.

- 9 - Коэффициент загрузки приемников $K_3=P_1/P_{н.п.}$; $P_1=P_{ф.п.}$;
- 10 - Коэффициент мощности $\cos \varphi$;
- 11 - Количество работающих приемников m ;
- 12 - Мощность (по графику) всех приемников $P=P_{н.п.} \cdot K_3 \cdot m$;
- 13 - Вероятность режима $a=T_p/T$; $T_p=t_1+t_2$;
- 14 - Средняя потребляемая мощность $P_{ср}=P_1 \cdot a$;
- 15 - Дисперсия $D=(P_1^2 \cdot T_p/T^2) \cdot (T - T_p)$; ΣD ; $\sigma = \sqrt{\Sigma D}$;
- 16 - Средняя потребляемая реактивная мощность $Q_{ср}$; ΣQ_{ch} ;

Таблица 8.

Условное обозначение графика работы								
8	9	10	11	12	13	14	15	16
						ΣP_{cp}		

σ - среднеквадратичное отклонение нагрузки.

1) Подсчитывают среднеквадратичное отклонение нагрузки σ .

2) Подсчитывают полную активную мощность с учётом потерь.

$P_p = K_{\Pi} \cdot (\Sigma P_{cp} + \beta \cdot \sigma)$, где K_{Π} - коэффициент учитывающий потери активной энергии в кабелях; $K_{\Pi} = 1,02 \dots 1,05$;

$\beta = 1$ при $a = 0,84$; $\beta = 2$ при $a = 0,975$;

3) Подсчитывают (среднюю(полную)) реактивную мощность $Q_p = \Sigma Q_{cp}$;

4) Определяют полную мощность $S = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2}$;

5) Определяют средневзвешенный коэффициент мощности по режиму работы.

Метод корреляционных зависимостей.

Метод основан на получении среднестатистических кривых (зависимостей) $P_r = f(B; N_{ГД})$, где B - водоизмещение, $N_{ГД}$ - мощность главного двигателя. Данный метод справедлив для классических судов серийной постройки (пассажирские речные суда, речные сухогрузы, речные и морские танкеры и т.д.). Метод применим для уникальных или не серийных судов.

$P_r = \frac{0,25 \cdot N}{1,3 + 0,0005 \cdot N}$; $P_r = \frac{0,88}{1,4 + 0,0014 \cdot B}$, P - суммарная установленная мощность приемников электроэнергии.

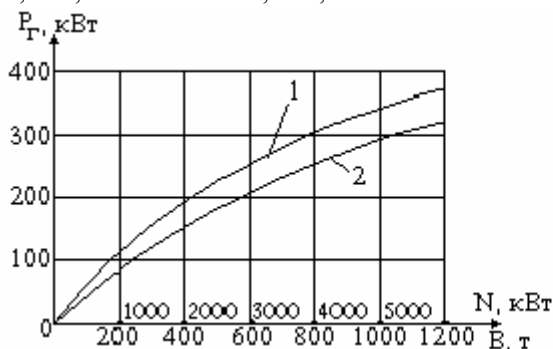


Рис.16.

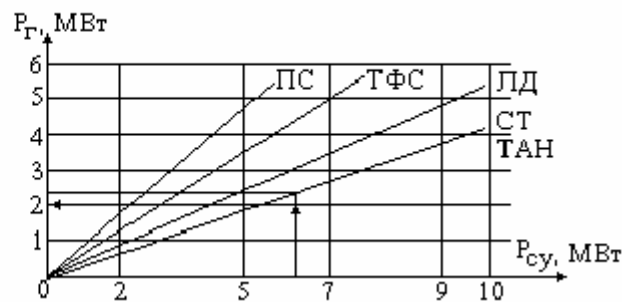


Рис.18.

Получены коэффициенты, показывающие какая часть мощности задействована в каждом типовом эксплуатационном режиме для каждого типа судов.

Таблица 9.

Тип судов	Стоянка без погрузки	Стоянка с погрузкой	Швартовый и маневренный режим	Ходовой режим	Аварийный ходовой режим
1	2	3	4	5	6
Морские сухогрузные теплоходы	$0,3P_r$	$0,5P_r$	$0,5P_r$	$0,5P_r$	$0,4P_r$
Морские сухогрузные пароходы	$0,25P_r$	$0,45P_r$	$0,43P_r$	$0,43P_r$	$0,37P_r$
Морские танкеры	$0,24P_r$	$0,6P_r$	$0,53P_r$	$0,53P_r$	$0,38P_r$
Морские ледоколы, паромы	$0,15P_r$	$0,4P_r$	$0,55P_r$	$0,55P_r$	$0,44P_r$
Сухогрузные суда и танкеры (речные)	$0,25P_r$	$0,4P_r$	$0,4P_r$	$0,4P_r$	$0,4P_r$
Толкачи (буксиры)	$0,25P_r$	$0,3P_r$	$0,43P_r$	$0,45P_r$	$0,45P_r$
Пассажирские теплоходы речные	$0,15P_r$	$0,3P_r$	$0,4P_r$	$0,4P_r$	$0,3P_r$

Метод статического моделирования нагрузок на ЭЦВМ.

Этот метод является развитием метода переменных нагрузок. Метод представляет собой набор алгоритмов связанных между собой единой программой, позволяющих определять суммарную мощность судовой электростанции путем суммирования нагрузок отдельных приемников. Нагрузки подсчитываются с учётом вероятности их распределения в различных режимах работы судна. Иными словами составляются такие же таблицы как и в методе переменных нагрузок. Но в этом случае они не подводятся под типовой график, а определяются с учётом среднестатистических величин для каждого эксплуатационного режима.

Определение мощности и количества генераторных агрегатов судовой электростанции. Рекомендации.

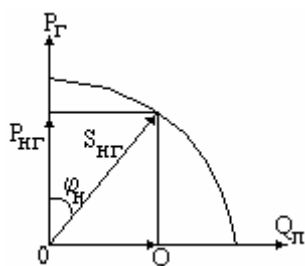


Рис.19.

1. Если $\varphi_{ср} < \varphi_{ном}$, то генератор выбирается по активной мощности: $P_{расч} < P_{нг}$.
2. Если $\varphi_{ср} < \varphi_{ном}$, то $S_p < S_{нг}$.
3. Выбранные генераторные агрегаты должны быть достаточно хорошо нагружены во всех эксплуатационных режимах. Нагрузка генератора должна быть $0,85...0,9P_{нг}$.
4. Число типоразмеров генераторов должно быть минимальным.

Мощность стояночного агрегата должна быть такой, чтобы обеспечивать не только бытовые нужды, но также механизмы, которые могут работать при стоянке. Существует 2 правила выбора мощности стояночного генератора:

- 1) По режиму “стоянка без погрузки”.
- 2) По режиму “стоянка с погрузкой”.

Резервный генератор по мощности должен быть таким же, как и основной, чтобы первый мог его заменить. Мощность аварийного генератора должна быть такой, чтобы обеспечить: сигнальные огни, навигационные приборы, прожекторы, рулевой привод, аварийное освещение, пожарный насос и т.д.

Анализ количественного состава генераторов СЭС.

ЦНИИСЭТ № 11117-004-69.

Таблица 10.

№	Комплект СЭС	Зарубежные суда			
		Англия (ИК)	Швеция	Германия	Япония
1	4 ОГ	2	1	-----	1
2	3 ОГ+1 СГ	2	-----	-----	-----
3	3 ОГ	5	3	6	9
4	2 ОГ+1 СГ	1	1	3	6
5	2 ОГ	-----	-----	1	5

Таблица 11.

Назначение судов	Зарубежные суда					Россия				
	4 ОГ	3О+1СГ	3 ОГ	2О+1СГ	2 ОГ	4 ОГ	3О+1СГ	3 ОГ	2О+1СГ	2 ОГ
Сухогруз	2	2	19	2	3	1	1	9	5	-----
Лесовоз	-----	-----	2	-----	-----	-----	-----	2	5	1
Контейнеровоз	-----	-----	2	2	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Рифрежератор	2	-----	1	1	-----	3	-----	-----	-----	-----
Танкер	-----	1	5	11	4	-----	-----	6	5	2
Навалочных	1	-----	4	1	1	4	1	8	15	3

ОГ - основной генератор, СГ - стояночный генератор.

Статистика показала, что комплектация судов электростанциями состоящих из 3 ОГ за рубежом 57%, у нас 50 %.

Анализ показывает, что самыми распространенными вариантами СЭС являются: 3 ОГ или 2 ОГ+1 СГ. Преимущества и недостатки электростанций состоящих из более 3 генераторов:

“+”: более гибкая система и нагрузка генераторов в пределах номинала.

“-”: сложность управления многогенераторной электростанции (параллельная работа генераторных агрегатов, увеличивается габарит МО и т.д.).

Наличие большого количества параллельно работающих генераторов усложняет электростанцию, особенно ухудшается работа в динамических режимах. На специальных судах (паромы, ледоколы, рефрижераторы) всё же находят применение СЭС с большим количеством генераторов. Суда с малым количеством генераторов (1 или 2) целесообразно применять в тех случаях, когда они периодически встают на профилактический ремонт (речные суда средней зоны). Если суда непрерывно эксплуатируются, то при таком количестве генераторов, они становятся экономически невыгодны.

Таблица 12.

Серия судов	Комплект СЭС
”Омск”	3 ОГ×400 кВт 1 ВГ×150 кВт
”Красноград”	2 ОГ×375 кВт 2 СГ×250 кВт
”Выборг”	3 ОГ×330 кВт 1 СГ×240 кВт
”Волголес”	2 ОГ×250 кВт 1 СГ×100 кВт
”Джанкой”	3 ОГ×280 кВт
”Белорецк”	2 ОГ×425 кВт 1 ВГ×150 кВт

Разработка схемы СЭС и расчёт сечения кабеля. Составление схемы распределения электроэнергии.

Правила составления схемы распределения электроэнергии на судне должны обеспечивать 2 основных требования:

1. Обеспечение надежной работы схемы распределения электроэнергии.
2. Обеспечение удобства эксплуатации.

Первое требование достигается:

- а) Резервированием наиболее важных элементов схемы: генераторов, приборов контроля и т.д.
- б) Применением нескольких электростанций и секционированием схемы канализации электроэнергии. При этом каждая часть схемы может работать самостоятельно.
- в) Применением развитой системы защиты генераторов и сети от возникновения аварийных режимов: перегрузки, КЗ, перехода генератора в двигательный режим, обрыва фазы питающей сети, контролем сопротивления изоляции и бесконтактных устройств коммутации.

Удобство эксплуатации обеспечивается путем максимального упрощения схемы распределения, применением автоматических устройств: регуляторы напряжения, частоты вращения, распределения активной и реактивной мощности между генераторными агрегатами.

Схемы распределения электроэнергии на судах.

Существует 3 типа схем распределения электроэнергии четко изложенных в морском Регистре (Регистр СССР часть 1). Согласно правилам необходимо обеспечить надежность электроснабжения. Для этого осуществляется:

- резервирование наиболее важных элементов схемы (генераторов, кабелей, приборов управления и контроля).
- применение нескольких электростанций и секционирование схем канализации, каждая при этом должна работать автономно.
- применение развитой системы защиты генераторных агрегатов и судовых сетей от аварийных режимов (КЗ, обрыв фазы, перегрузка, повышение и понижение напряжения).

Указанные требования не должны приводить к усложнению эксплуатации электростанции и увеличению ручных операций при управлении электростанцией. Для выполнения указанных требований на судах применяют 3 варианта канализации электроэнергии:

1. Радиальная схема.

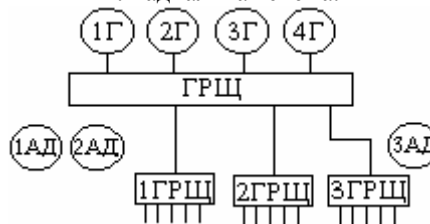


Рис.20.

Все наиболее ответственные потребители электроэнергии получают питание непосредственно от ГРЦ. Некоторые однотипные потребители получают питание от распределительных щитов РЩ расположенных вблизи друг от друга. Данная система имеет преимущество - удобство управления, поскольку все коммутационные аппараты располагаются в одном месте (сухогруз, паром).

2. Магистральная или кольцевая схема.

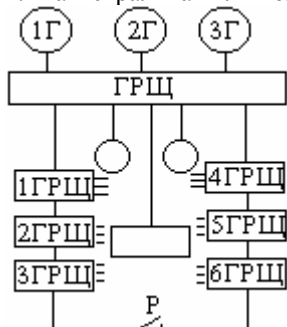


Рис.21.

Потребители получают питание от распределительных щитов, расположенных по всей длине судна и подключаемых к магистралям левого или правого борта. Для надежности магистрали закольцовываются. Данная система применяется на больших судах, где силовые потребители сосредоточены по судну (танкер, пассажирское судно).

3. Смешанная система или радиально - групповая.

Она содержит элементы двух предыдущих систем. При выборе системы руководствуются двумя критериями:

- 1) Надежность электроснабжения.

2) Минимальный вес кабельных трасс (весит 40% от веса всего электрооборудования).

- потребители расположены вблизи ГРЩ - радиальная схема.
- потребители расположены вдали от ГРЩ - магистральная схема.

На судах нашла применение именно смешанная схема.

Подключение потребителей к ГРЩ регламентируется Регистром:

При разработке схемы электроснабжения все потребители разделяются на 3 категории по степени важности:

- Потребители 1-ой категории важности должны получать питание непосредственно от ГРЩ, их питание не должно исчезать более чем на 10 с. Поэтому питаются они по 2 фидерам: 1-ый от ГРЩ, 2-ой от АРЩ (аварийный).
- Потребители 2-ой категории должны питаться от ГРЩ или РЩ и должны иметь 50% или 100% резерв. Отключение данных потребителей возможно только при аварии. Основные и резервные потребители должны записываться с разных сторон ГРЩ.
- Потребители 3-ей категории допускают отключение на несколько часов и могут запитываться от групповых РЩ. С целью повышения надежности электроосвещение и отопление питаются пониженным напряжением 220 или 127 В через понижающие трансформаторы. При этом мощность трансформатора должна быть достаточна для питания всех потребителей. На судне устанавливаются 2 трансформатора: основной и дополнительный (левого и правого борта).

АРЩ находится на 1-ой или 2-ой палубе, имеет отдельный ход. От него получают питание: все потребители в аварийном режиме, пожарный насос, навигационные приборы, сигнально - отличительные огни, шлюпочные лебедки, аварийное освещение.

Освещение на судне подразделяется на 3 категории:

- 1) Освещение помещений машинно - котельного отделения.
- 2) Бытовое освещение.
- 3) Палубное освещение.

Каждая из них подразделяется на 3 вида:

- а) основное (от ГРЩ).
- б) аварийное (от аварийного генератора через трансформатор).
- в) малое аварийное (от аккумуляторов - тока 24 В).

Выписка из правил Регистра 1985 г.

Требования к схеме распределения электроэнергии.

От шин главного распределительного щита должны получать питание следующие потребители (по отдельным фидерам): привод рулевой машины, якорного устройства, пожарных и осушительных насосов спринклерной системы, гирокомпас, холодильники грузовых трюмов, агрегаты системы возбуждения ГЭУ (гребной электроустановки), щиты основного освещения, щит радиостанции и навигационных приборов, щит сигнально - отличительных огней, все другие щиты питающие потребителей одинакового назначения, распределительные устройства объединенного пульта управления, щит станции обнаружения пожара, электроприводы обслуживающие ГЭУ, щит электроприводов грузовых лебедок, шлюпочных устройств и грузовых кранов, устройство управления ВРШ (винт регулируемого шага), зарядное устройство питания стартовых аккумуляторных батарей и др. батарей питающих ответственные потребители, щиты питания электроприводов закрытия водонепроницаемых дверей, щит холодильной установки системы углекислотного пожаротушения.

Подключение АРЩ.

При нормальной работе АРЩ должен питаться от ГРЩ (через перемычку). В случае возникновения аварийного режима, АРЩ отключается от ГРЩ и запитывается от аварийного ДГ, который пускается от стартерной аккумуляторной батареи, расположенной в одном помещении с ДГ.

- Рулевая машина должна получать питание по 2-м фидерам: 1-ый от АРЩ, 2-ой от ГРЩ, причем они должны быть проложены по разным трассам. Если имеется группа приводов, запитанных от ГРЩ, то питающий кабель этого щита должен быть на одновременную работу всех приводов, работающих вместе.
- Щит сигнально - отличительных огней должен получать питание по 2-м фидерам: 1-ый от АРЩ, 2-ой от ближайшего группового РЩ, получающего питание от ГРЩ.
- Розетки, установленные в жилых помещениях, должны получать питание отдельно от освещения по своему фидеру.
- На судне разрешается устанавливать только сухие трансформаторы.

Все устройства, питающиеся от трансформаторов, должны иметь возможность запитываться не менее чем от 2-х трансформаторов (основного и резервного). Мощность каждого трансформатора должна быть рассчитана на полную нагрузку.

Аварийные источники энергии.

Аварийные ДГ, аккумуляторы. Мощность аварийного источника должна быть достаточной для питания всех потребителей, работающих в аварийном режиме. Все аварийные источники должны включаться в работу за $t \leq 45$ сек после исчезновения основного питания, эти источники должны иметь защиту только от КЗ, но не от перегрузки (по перегрузке должна быть сигнализация).

При наличии аварийного ДГ предусматривается источник энергии (аккумулятор), от которого на время запуска ДГ должно осуществляться питание следующих потребителей: аварийное освещение, сигнально - отличительные огни, внутри судовая связь, устройство закрытия водонепроницаемых дверей.

Классификация схем распределения электроэнергии и распределительных устройств.

Схемы распределения электроэнергии классифицируют по виду питающих линий: 2-х проводные, 3-х проводные и 4-х проводные постоянного и переменного тока. В 3-х и 4-х проводных системах нулевой провод заземлять категорически запрещается с точки зрения техники безопасности. При этом обязательно необходимо вести контроль сопротивления изоляции. А также по схемам питающих линий: радиальные, магистральные, смешанные.

Распределительные устройства и их классификация.

Распределительные устройства распределяющие электроэнергию от генераторов к отдельным потребителям, т.е. это распределительные щиты.

1. По назначению:

- а) ГРЩ - получает электроэнергию от главных генераторов и распределяет между отдельными потребителями и отдельными распределительными щитами.
- б) РЩ - получают электроэнергию от ГРЩ и передают ее отдельным потребителям или групповым РЩ.
- в) ГРРЩ - предназначен для питания однотипных потребителей, получает питание от РЩ и распределяет его между однотипными потребителями (вентиляторы, освещение).
- г) АРЩ - получает питание от аварийного источника (ДГ или АБ) и распределяет его между аварийными потребителями.
- д) Пульты: стационарные, переносные. На пультах сосредоточены органы управления или синхронизации.

2. По конструктивному исполнению:

- а) Распределительные устройства открытого исполнения.
- б) Распределительные устройства защищенного исполнения (брызгозащищенные, водозащищенные, герметичное). Распределительные устройства каплезащищенного исполнения устанавливаются в сухих отапливаемых помещениях. Приборы водозащищенного исполнения имеют более прочный корпус (выдерживают обливание водой 2 атмосферы с 5 метров в течении 5 минут). Приборы такого класса чаще всего устанавливаются на палубе. Герметичное исполнение - в распределительное устройство не должна попадать вода при погружении на глубину 10 метров. Электроизмерительные приборы встраиваются внутрь щита. Оно должно работать под водой (не глубине меньше 10 метров) и сохранять работоспособность после удаления воды.

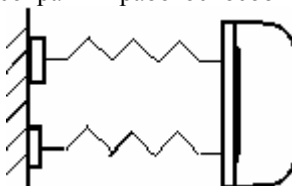


Рис.22.

Установка щитов.

ГРЩ устанавливается вблизи источников электроэнергии (ДГ) в местах, где сосредоточено наибольшее потребление электроэнергии. ГРЩ отделяется от машинного отделения шумопоглощающей переборкой. Запрещается прокладывать вблизи ГРЩ трубы с жидкостями (в том числе и не горючими) и паром под давлением. Рядом с ГРЩ (между ним и переборкой) предусматриваются проходы шириной 800 мм.



Рис.23.

Конструктивно щит изготавливаются из отдельных секций шириной 1,2 м. ГРЩ устанавливается перпендикулярно или параллельно плоскости судна.

Распределительный щит.

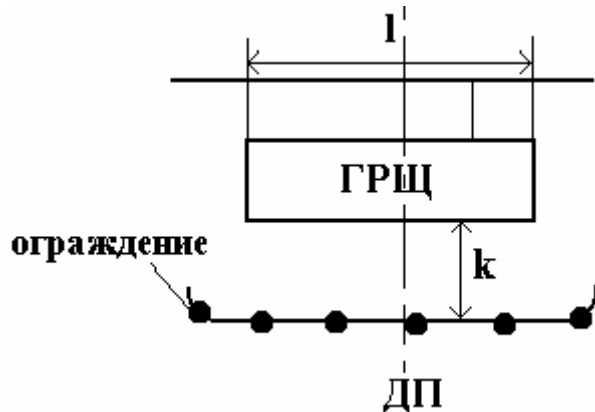
Различают следующие их конструкции:

- 1) С предохранителями.
- 2) С предохранителями и пакетными выключателями.
- 3) С автоматическими выключателями.

Все они унифицированы.

На каждом судне на главной палубе устанавливается щит питания с берега (ЩПБ) обязательно в водозащищенном исполнении. Оно имеет устройство предупреждения обрыва фазы (с сигнализацией).

Описание конструкции ГРЩ.



$L < 3$ м, $h = 600$ мм, $k = 800$ мм;

$L > 3$ м, $h = 800$ мм, $k = 1000$ мм;

$L < 1,2$ м, то допускается приставная конструкция (без ограждения), но панели ГРЩ съемные. Внутри щита приборы и оборудование должны быть расположены так, чтобы обеспечивался к ним свободный доступ.

Рис.24.

Конструкция ГРЩ должна обеспечивать: удобство обслуживания с любой стороны, наглядность расположения оборудования с лицевой стороны, удобство монтажа и транспортировки, а также установки на судне (щит делается из отдельных конструктивно законченных секций). Эти секции унифицированы по назначению: генераторная станция, секция управления, распределительная секция.

Устройство унифицированных секций.

1. Генераторная секция.

Там находятся все приборы и устройства, обслуживающие генератор: вольтметр, амперметр, переключатель фаз, автоматический выключатель главного генератора, ваттметр, частотомер, фазометр, блок стабилизации напряжения генератора, устройство защиты от обратной мощности, устройство распределения активной нагрузки и регулирования частоты (УРЧН), устройство разгрузки генератора УРГ, устройство включения резерва, трансформаторы тока и напряжения.

2. Секция управления.

В секции управления находятся приборы и устройства управляющие электростанцией в целом: устройство контроля сопротивления изоляции, устройство синхронизации генераторов и т.д. А также управляющая машина мнемосхема, показывающая состояние электростанции.

3. Распределительная панель.

На ней находятся автоматические выключатели, соединяющие ГРЩ с отдельными потребителями (1-ой категории) и распределительными щитами.

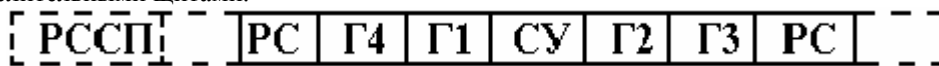


Рис.25. Компоновка ГРЩ.

Распределительных секций может быть несколько.

РССП - распределительная секция стояночных потребителей.

Рекомендации к конструкции ГРЩ для 3-х генераторов.

1. Шины главного тока ГРЩ должны быть секционированны.

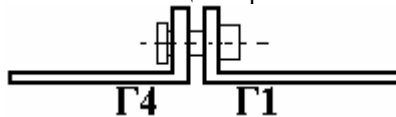


Рис.26.

Также секционируются цепи управления.

2. Отдельные участки шин должны соединяться между собой межсекционными разъединителями (рубильники без устройства дугогашения). Это необходимо для обеспечения работоспособности электростанций при аварии. Число секций сборных шин ГРЩ должно соответствовать числу генераторов.

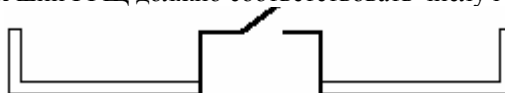


Рис.27.

3. Должны выделяться 2-е распределительные секции ходовых потребителей расположенных по левому и правому борту. Одна из них должна быть основной, а другая резервной.

4. Дублирующие друг друга механизмы ответственного назначения должны получать питание с разных секций ходовых потребителей.

5. Целесообразно выделить отдельную секцию для питания стояночных потребителей, при этом к ней подключить:

- а) все механизмы стояночного режима.
- б) один из силовых трансформаторов.
- в) механизмы работающие во всех режимах судна.

6. Распределительные секции стояночных потребителей должны быть максимально упрощены по конструкции, и не должны располагаться между генераторными секциями. Рекомендуется питать секции РССП по кабельной перемычке от среднего генератора и от распределительных секций ходовых потребителей.

7. Питание АРЩ должно осуществляться от средней секции сборных шин.

8. Шины $U=220$ В должны подразделяться на 2-е группы: к 1-ой группе подключаются потребители с высоким сопротивлением изоляции, а ко второй группе потребители у которых вероятно сопротивление изоляции меньше.

10. Питание секций $U=220$ В должно осуществляться от 2-х силовых трансформаторов, каждый из которых рассчитан на полную мощность при $U=220$ В, при этом один из них подключается к РС правого борта, а другой - левого борта. В АРЩ (если имеется 220 В) предусматривается отдельный трансформатор.

11. Количество проводов управления, проходящих из одной секции ГРЩ в другую, должно быть минимальным.

12. Автоматические выключатели генераторов должны изготавливаться в выдвижном исполнении.

Схема генераторной панели ГРЩ.

РОМ - срабатывает если генератор перешел в двигательный режим - реле обратной мощности.

УСГ - устройство синхронизации генератора.

W - ваттметр.

A - амперметр.

Hз - частотомер.

V - вольтметр.

ТНИ - трансформатор напряжения измерительный.

ПА - переключатель амперметра для контроля линейных токов.

ДУ - добавочное устройство для частотомера.

ПV - переключатель вольтметра для контроля линейных напряжений.

φ - фазометр, показывает фазу напряжения относительно тока.

I> - катушки максимальных реле.

УУВГ - устройство управления возбуждением генератора. Для стабилизации напряжения генератором.

СГП - сопротивление гашения поля. Когда отключено от сети поле начинает падать и наводится большое ЭДС, контакт К2 замыкается, а К1 размыкается и энергия магнитного поля идет на нагрев сопротивления.

УРГ - устройство разгрузки генератора, если переходит перегрузка.

УВР - устройство включения резервных генераторов.

УРЧН - устройство регулирования частоты и активной нагрузки.

ПС - переключатель серводвигателя. Имеет 2 положения: первое - СД получает от УРЧН, второе от УСГ.

СД - серводвигатель, управляет подачей топлива, он перемещает рейку топливного насоса.

КБ - кнопка "частота больше".

КМ - кнопка "частота меньше".

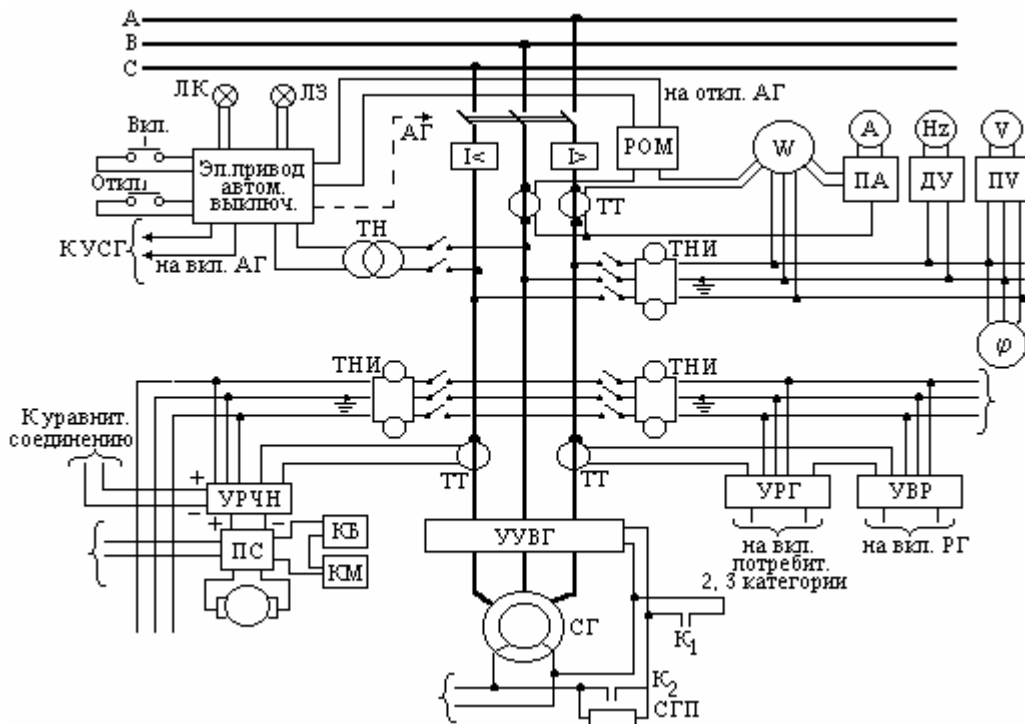


Рис.28.

Канализация эл. энергии и расчёт эл. сетей.

Кабели прокладываются по специальным чертежам, которые называются “чертежи прокладки кабеля”. Они составляются в соответствии с правилами Регистра. Различают скрытую и открытую проводку кабеля. Скрытая - в каютах, коридорах и других помещениях для жилья. Прокладывают в спец. каналах, закрытые декоративными щитами.

Открытая проводка - в нежилых помещениях. По правилам Регистра, запрещается прокладка вблизи высокотемпературных источников, агрессивных сред. Там где возможны механические повреждения кабеля, он должен быть защищен (прокладка в трубах, металлических желобах или кабель в металлической оплетке). Прокладка кабеля в грузовых трюмах нежелательна. Кабель выходящий на открытую палубу должен быть экранирован, во избежание радиопомех. При переходе через водонепроницаемую переборку применяются специальные кабельные коробки. При разработке схем прокладки кабелей желательно, особенно магистральные, были максимально прямыми с целью уменьшения веса кабельной трассы. На судах применяются кабели следующих марок: КНР, КНРП, КНРТП, КНРТЭ. Рассчитаны на рабочую температуру $t=65^{\circ}\text{C}$. Для кабеля применяется негорючая резина. Для монтажа: УВГ, УВОГ. Для сильно точного оборудования: НРШМ.

Расчёт судовых эл. сетей.

Можно разделить на несколько участков:

1. Участок до ГРЩ.
2. От ГРЩ к РЩ.
3. От РЩ к отдельным потребителям.

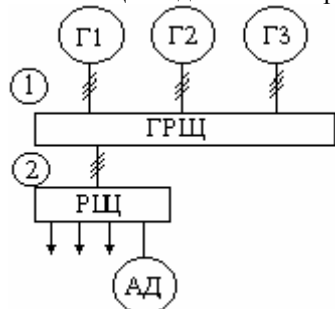


Рис.28.

$$K_3 = \frac{P_{pi}}{P_{ni}} - \text{коэффициент загрузки;}$$

$$K_0 = \frac{n_p}{n_k} - \text{коэффициент одновременности.}$$

$$= I) I_{a_{pщ}} = K_0 \cdot \left(\sum_1^m K_{3i} \cdot I_{in} \right) - \text{рабочий ток питающий фидер;}$$

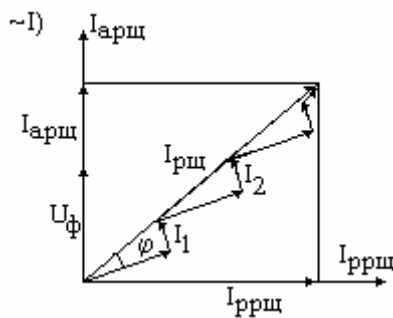


Рис.39.

$$I_{ai} = I_i \cdot \cos\varphi_i; \quad I_{pi} = I_i \cdot \sin\varphi_i; \quad I_{арш} = \sum_1^m K_{zi} \cdot I_{ai};$$

$$I_{ррш} = \sum_1^m K_{zi} \cdot I_{pi}; \quad I_{рш} = K_0 \cdot \sqrt{I_{арш}^2 + I_{ррш}^2},$$

где m - количество потребителей, получающих питание от данного распределительного щита.

$$3. I_{оп} = \frac{P_{оп}}{\sqrt{3} \cdot U_{л} \cdot \cos\varphi_{оп} \cdot \eta_{оп}};$$

Вторым этапом расчёта является предварительный выбор сечения кабеля, он должен производиться по таблицам "Норм - нагрузок на корабле". Он приводится в справочнике Китаенко. В таблицах учитывается режим работы потребителя.

Для одиночно проложенных кабелей, согласно таблице с увеличением жильности, допустимые токи нагрузки снижаются. Пример:

Длительный режим: 35 мм² одножильный 165 А, двухжильный 123 А, трехжильный 118 А

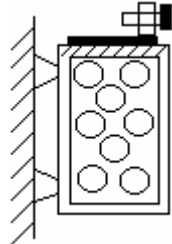
Кратковременный режим: 35 мм² одножильный 15 минут - 275 А, 30 минут - 223 А, 60 минут - 195 А.

Температура окружающей среды не превышает 40°C. t>40°C, при этом токовые нагрузки на кабеле должны быть соответственно снижены. В этом случае рабочий ток пересчитывается на некоторый фиктивный ток по которому производится выбор сечения кабеля. Этот расчёт производится по формуле:

$$I_{фр} = I_{р(40^\circ)} \cdot \frac{65 - \Theta_{кр}}{65 - 40} - \text{расчетная формула}; \quad I_{фр} = I_{р(40^\circ)} \cdot 0,2 \cdot \sqrt{65 - \Theta_{кр}}$$

Следующим шагом является определение сечения кабеля по таблицам с учётом коэффициента 1,25. Данная формула показывает на сколько надо уменьшить ток, чтобы температура жилы не превысила 65°C, при t_{окр}=40°C.

Третий этап расчёта состоит в учёте укладки кабелей в пучки.



$$I_{пф} = \frac{I_{р(40^\circ)}}{K_1 \cdot K_2}; \quad K_2 = \sqrt{\frac{24}{\Sigma t_p}} - \text{длительность работы кабеля за сутки.}$$

$1 \geq K_1 K_2$ - условие расчёта.

K_1 - Учитывает редкость прокладки.

Если $K_1 K_2 > 1$, то принимается $K_1 K_2 = 1$.

Рис.30.

Более подробный расчёт сечения кабеля с учётом тепловыделения в пучке, в книге Яковлева стр.208 издание 1967 года.

Выбранные кабели обязательно должны быть проверены на падение напряжения.

Согласно правилам Регистра допустимые потери напряжения составляют:

- для силовых 7%;
- для основного освещения 5%;
- Для автономного освещения и потребителей 36 вольт 10%.

Расчёт потерь напряжения для постоянного тока.

1. Учитывается падение напряжения на "+" и "-" жилах.

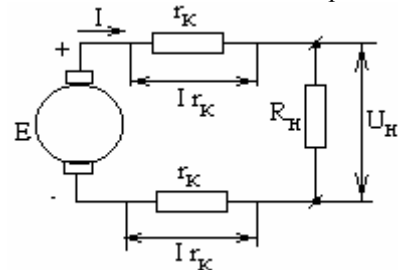


Рис.31.

$$\Delta U = E - U_n = 2 \cdot r_k \cdot I; \quad r_k = \frac{e_k}{\gamma \cdot S}, \quad S [\text{mm}^2]; \quad \gamma = \frac{37}{1 + 0,004(\Theta_{окр} - 20^0)};$$

$$\Delta U = \frac{2 \cdot I \cdot e_k}{\gamma \cdot S}; \quad \Delta U = \frac{2 \cdot I \cdot e \cdot 100\%}{\gamma \cdot S \cdot U_n}; \quad \Delta U^* \% = \frac{2 \cdot I \cdot e_k \cdot 100\%}{\gamma \cdot S \cdot U_n^2};$$

$$P = I \cdot U_n.$$

2. В цепях переменного тока необходимо учитывать коэффициент мощности потребителей, т.е. потери напряжения определяются из векторной диаграммы. Вначале определим потерю напряжения для одной фазы.

$$\Delta U_{л} = U_{г.л} - U_{п.л} = 2 \cdot \Delta U_{ф} \cdot \cos 30^\circ;$$

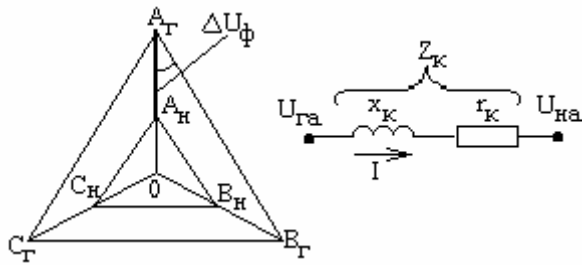


Рис.32.

Чтобы найти ΔU_ϕ составим векторную диаграмму.

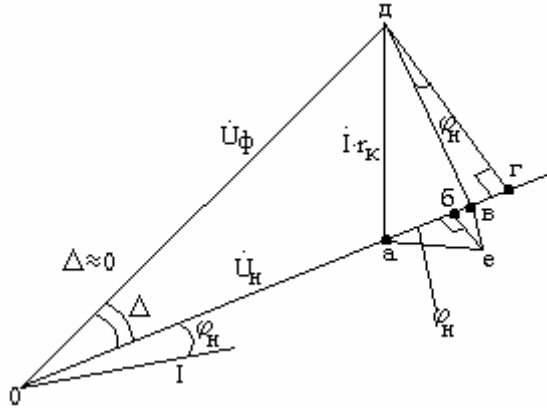


Рис.33.

$$a\gamma = a\delta + \delta\epsilon + \epsilon\gamma; a\delta = I \cdot r_k \cdot \cos\varphi_n; \delta\epsilon = I \cdot x_k \cdot \sin\varphi_n;$$

$$\epsilon\gamma = \epsilon\delta \cdot \sin\varphi_n; I \cdot r_k = a\epsilon;$$

$$a\gamma \approx \Delta U_\phi = I \cdot r_k \cdot \cos\varphi_n + (I \cdot x_k + I \cdot r_k) \cdot \sin\varphi_n;$$

$$\Delta U_\phi = I \cdot r_k \cdot \cos\varphi_n + I \cdot x_k \cdot \sin\varphi_n;$$

$$\Delta U_{\phi\%} = \frac{I \cdot 100\%}{U_{н\phi}} (r_k \cdot \cos\varphi_n + x_k \cdot \sin\varphi_n)\%;$$

$$\Delta U_{л\%} = \frac{I \cdot 100\% \cdot \sqrt{3}}{U_{нл}} (r_k \cdot \cos\varphi_n + x_k \cdot \sin\varphi_n)\%;$$

$$\Delta U_{л} = \Delta U_{\phi} \cdot \sqrt{3}; \quad \Delta U_{\%} = \frac{P \cdot 100\%}{U_{л}^2} \cdot (r + x \cdot \operatorname{tg}\varphi_n)\%;$$

$$P = 3 \cdot I_\phi \cdot U_\phi \cdot \cos\varphi_n; \quad P = \frac{3 \cdot I_\phi \cdot U_{л}}{\sqrt{3}} \cdot \cos\varphi_n; \quad U_\phi = \frac{U_{л}}{\sqrt{3}}; \quad P = \sqrt{3} \cdot I_\phi \cdot U_{л} \cdot \cos\varphi_n; \quad I_\phi = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_{л} \cdot \cos\varphi_n}.$$

Автоматическое регулирование частоты и напряжения судовых генераторов.

По правилам Регистра изменение напряжения в статических режимах не должно превышать 2÷2,5%. В динамических режимах при подключении асинхронных нагрузок напряжение не должно изменяться более чем на 20%, а частота на 2%.

Стабилизация частоты вращения первичных двигателей.

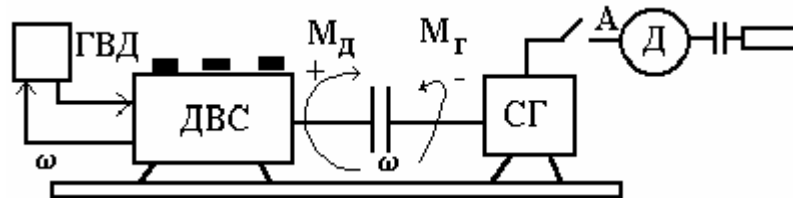


Рис.34.

$$M_d = J_\Sigma \cdot \frac{d\omega}{dt} + M_2 + \Delta M_{пост} - \text{ в динамике; в статическом режиме: } M_d = M_\Gamma.$$

J_Σ - суммарный момент инерции.

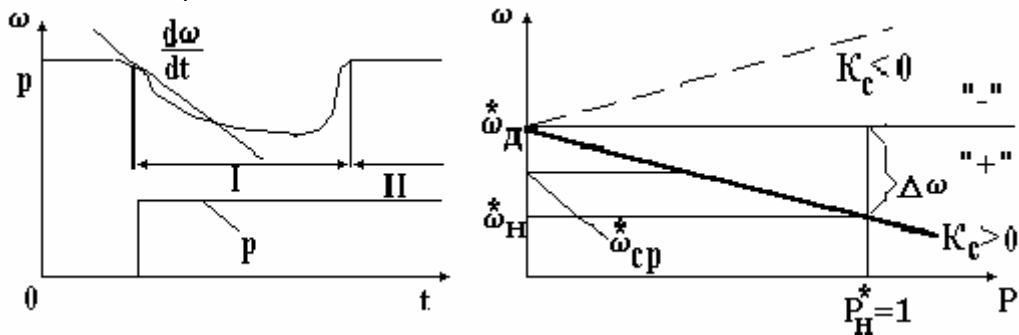


Рис.35.

$$K_c = \frac{\omega_0^* - \omega_n^*}{\omega_n^*} = \frac{1 - \omega_n^*}{\omega_n^*} - \text{коэффициент статизма; } K_c = 0,01 \div 0,03 ; \delta = \frac{\Delta\omega^*}{\omega_{cp}^*} - \text{коэффициент неравномерности.}$$

$\Delta\omega^* = P_n^* \cdot K_c$ - отклонение частоты в статическом режиме при известной нагрузке в относительных единицах.

$$\Delta\omega_{дин\%} = \frac{\omega_0 - \omega_{мин\text{дин}}}{\omega_0} \cdot 100\% . \text{ Регуляторы с положительным и отрицательным статизмом } (K_c > 0 \text{ и } K_c < 0).$$

Способы регулирования частоты вращения.

Существует 2 способа регулирования частоты вращения:

1. По мгновенному отклонению регулируемой величины (частоты).
2. По мгновенному отклонению активной нагрузки и частоты.

Регуляторы построенные по данным принципам бывают двух типов:

- прямого действия;
- косвенного действия.

Регуляторы работающие по принципу отклонения частоты имеют датчик скорости вращения. Регуляторы, работающие по второму признаку - два датчика частоты и активной мощности. Такие регуляторы наз. двухимпульсные. Во всех случаях сигнал преобразуется в перемещение рейки топливного насоса у дизеля или регулирующего клапана у турбины. Прямого действия применяется на дизелях до 100 кВт, а косвенного более 100 кВт.

Регулятор построен по принципу регулятора Ватта.

Одноимпульсный - когда управляющий сигнал пропорционален скорости вращения. Двух импульсный - пропорционален величине активной нагрузке и скорости вращения.

Центробежные регуляторы бывают со статической и астотической характеристикой. Регуляторы с положительным статизмом построены неправильно.

Центробежный регулятор скорости вращения, одноимпульсный регулятор косвенного действия.

- 1- шарики весом G;
- 2- вал (ось);
- 3- пружина;
- 4- подвижная муфта (скользит по валу);
- 5- редуктор;
- 6- золотник с двумя поршнями напротив поршня с отверстиями **c** и **d**;
- 7- регулирующий клапан;
- 8- главный рабочий цилиндр гидроусилителя;
- 9- гидроусилитель;

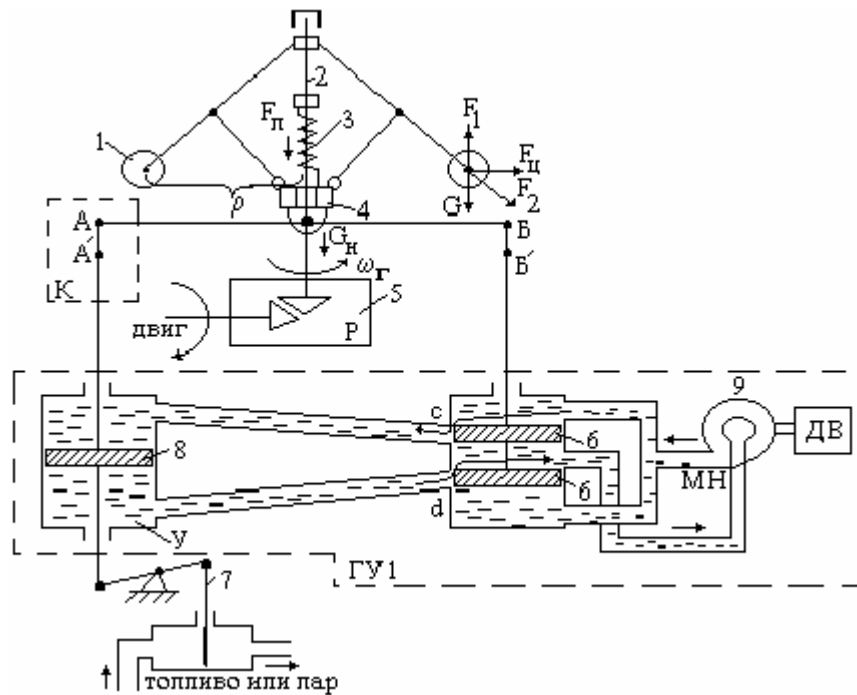


Рис.36.

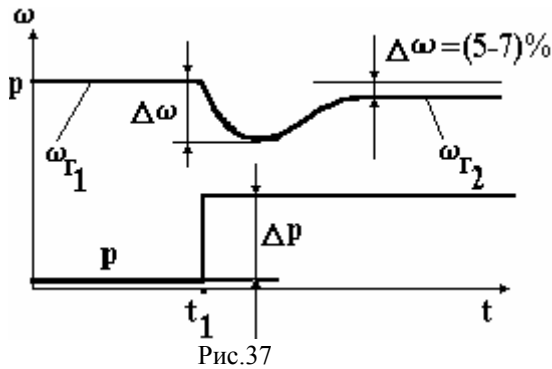
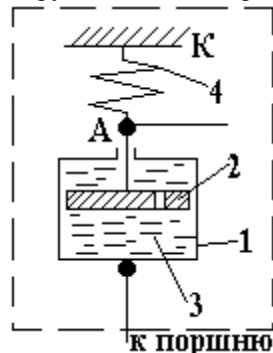


Рис.37

В момент времени t_1 производится наброс нагрузки на ΔP , скорость вращения начинает падать на $\Delta\omega$, шарики опускаются, муфта 4 скользит вниз за счёт пружины. Рычаг АБ будет опускаться, т.к. отверстия **с** и **д** перекроются, точка А рычага неподвижна, а точка В переместится до положения Б', отверстия **с** и **д** откроются.

Масло под давлением пойдет через отверстие **с** и надавит на поршень 8, а масло из под поршня через нижнюю трубку попадет в пространство между поршнями и уйдет по средней трубке. Рычаг АБ поворачивается против часовой стрелки и точка В возвращается в положение близкое к первоначальной точке Б. после того как закончиться переходный процесс скорость будет ω_{r2} чуть меньше ω_{r1} .

Недостатком такого регулятора является его высокая инерционность: время затухания процесса до 5 секунд при набросе 100% нагрузки, наличие перепада скорости при изменении нагрузки.



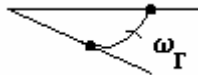
- 1 - цилиндр;
- 2 - поршень;
- 3 - жидкость;
- 4 - пружина.

Указанный регулятор может иметь астотическую характеристику если к нему добавить дополнительный элемент компенсатор.

Рис.38.

Устройство предназначено для компенсации статического уменьшения скорости возникающего из-за вязкости масла и трения (за счёт дополнительной подачи топлива).

Работу данного устройства можно разбить на два этапа. Первый этап протекает также как и у регулятора без компенсатора. Начинается второй этап: пружина тянет точку А вверх, поршень поднимается, рычаг АБ поворачивается по часовой стрелке, точка В опускается вниз, **с** и **д** открываются. За счёт дополнительного перемещения мы попадаем в точку.



Двухимпульсный электромеханический регулятор частоты вращения.

Состоит из одноимпульсного регулятора рассматриваемого ранее и датчика, создающего импульс по нагрузке. Структурная схема 2-х импульсного регулятора частоты вращения.

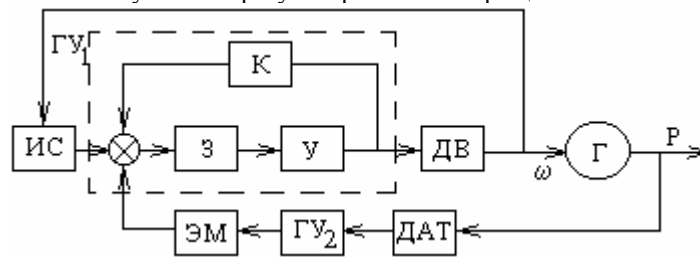


Рис.39.

Преимуществом регулятора является то, что муфта и рычаг начинают сразу перемещаться при появлении сигналов активной мощности, до того еще как начинает меняться скорость.

Схема регулирования по активной мощности.

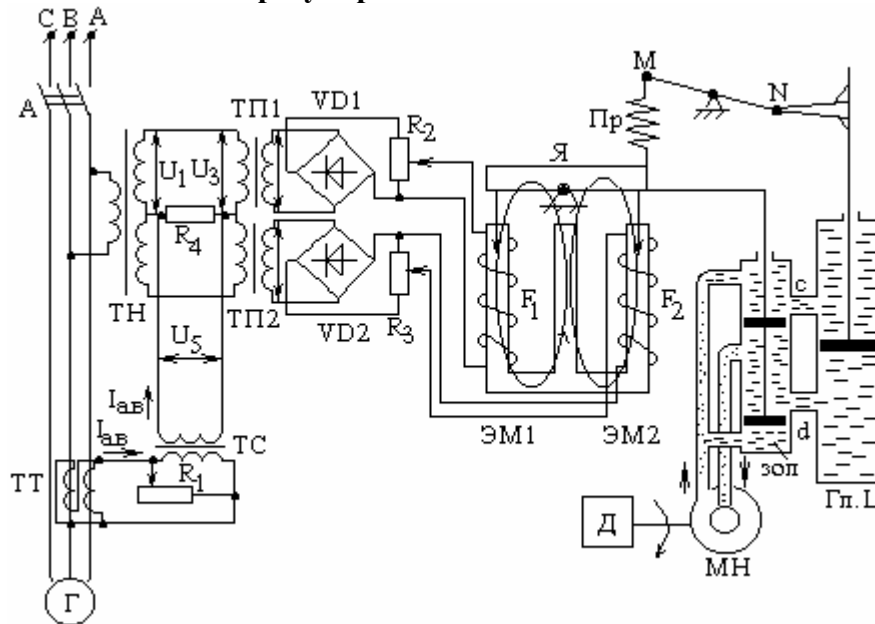


Рис.40.

ТН - понижающий трансформатор напряжения;
 ТС - согласующий трансформатор;
 ЭМ - электромагнит.

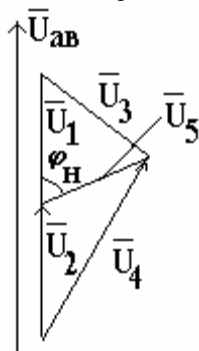


Рис.41.

При активной нагрузке якорь находится в среднем положении. Примечание: положение поршней золотника изображено для наброса нагрузки.

При отсутствии активной нагрузки $U_3=U_4$. При набросе активной или смешанной нагрузки $U_4>U_3$, сила электромагнита $F_2>F_1$, до этого $F_2=F_1$ (пружина Пр была не растянута). За счёт разности сил якорь Я поворачивается по часовой стрелке, пружина растягивается, поршни золотника открывают отверстия **с** и **д** как изображено на рисунке. Масло под давлением поступает в полость над поршнем главного цилиндра, поршень опускается вниз до тех пор, пока не повернется рычаг МН по часовой стрелке и через пружину усилие этого рычага не повернет якорь против часовой стрелки. При этом отверстия **с** и **д** закроются. Перемещение штока

Длина и фаза вектора U_5 будет определяться характером нагрузки.

При реактивной нагрузке $\varphi_n=\pi/2 \rightarrow U_3=U_4$;

При активной нагрузке $\varphi_n=0 \rightarrow U_4=U_1+U_2$;

$U_3=U_1-U_5 \cdot \cos\varphi_n$;

$U_4=U_2+U_5 \cdot \cos\varphi_n$;

K_n - коэффициент трансформации.

$U_3=K_n \cdot U_3$;

$U_4=K_n \cdot U_4$;

поршня главного цилиндра передается на подвижную муфту центробежного регулятора, который переместит золотник гидроусилителя, управляющей топливной заслонкой рассмотренного ранее.

При набросе активной нагрузки на 100% время переходного процесса равно 1 секунда.

$\Delta\omega=1,5\%$ - провал скорости.

Регулирование частоты вращения электромашинных преобразователей.

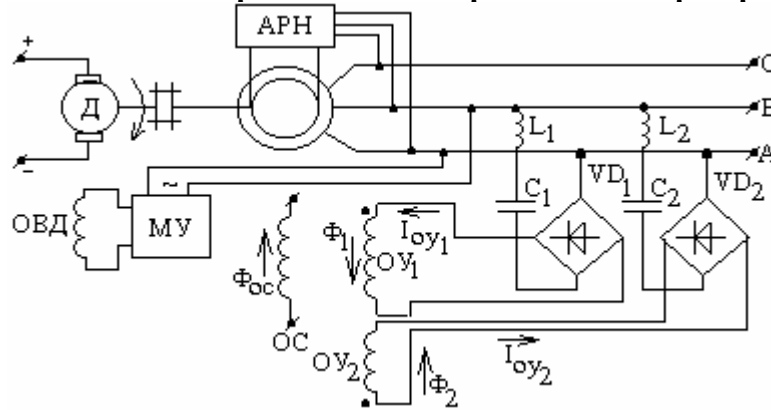


Рис.42.

В обмотке смещения задается такая величина магнитного потока которая соответствует номинальной частоте вращения. При этом магнитные потоки обмоток OY1 и OY2 направлены встречно, равны по величине и друг друга компенсируют. OY1 и OY2 питаются от выпрямителей VD1 и VD2, которые подключены к напряжению U_{AB} через резонансные фильтры (L_1, C_1 и L_2, C_2). Эти фильтры настроены на частоту 40 Гц, второй 60 Гц.

Такая система позволяет стабилизировать частоту агрегата при изменении нагрузки.

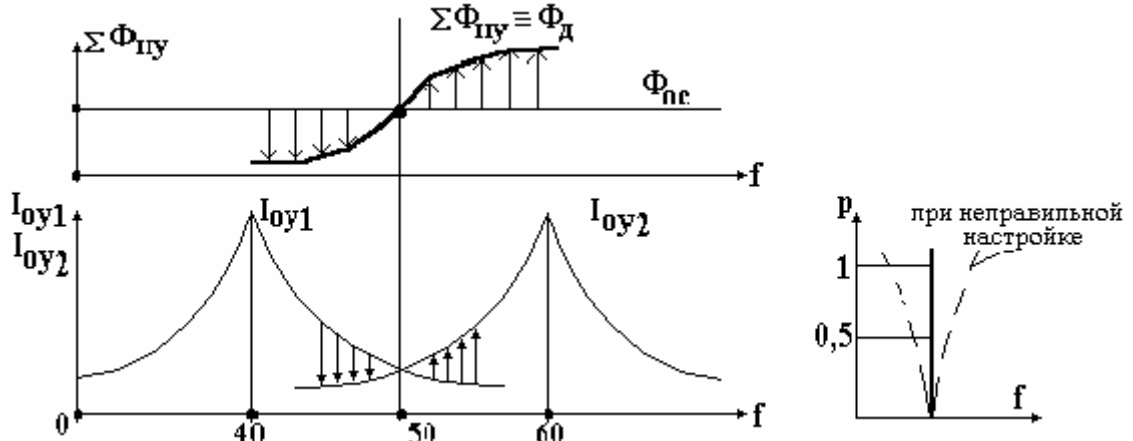


Рис.43.

Автоматическое поддержание напряжения судовых генераторов.

По правилам Регистра динамические провалы напряжения не более 20%. Если больше, то:

- включение добавочного сопротивления
- переключение двигателя со звезды на треугольник
- применение двух скоростных двигателей
- применение быстродействующих автоматических регуляторов напряжения

Функции возлагаемые на АРН (автоматический регулятор напряжения):

1. Поддержание заданного уровня напряжения во всём диапазоне изменения нагрузки: коэффициент мощности $\cos\varphi_{наг}=0,1\div 1$.
2. Увеличение (форсировка) тока возбуждения генераторов при набросах реактивной нагрузки и коротких замыканиях в системе с целью обеспечения динамической устойчивости СЭС.

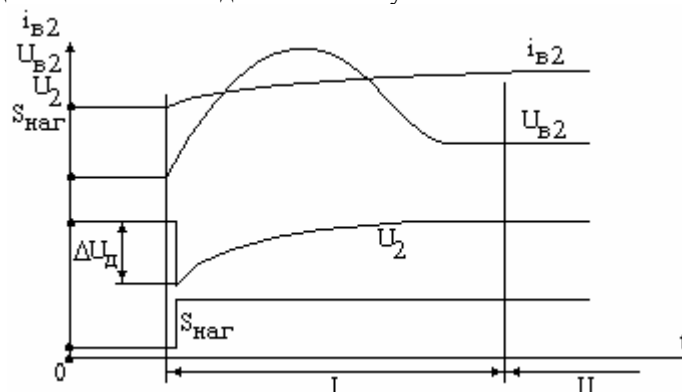


Рис.44.

3. Обеспечение самозапуска АД после КЗ или другого аварийного снижения напряжения.
4. Облегчение пуска АД соизмеримых по мощности с генератором.
5. Улучшение условий синхронизации генераторов при подключении их на параллельную работу.

Критерии качества регулирования напряжения.

Система АРВ характеризуется двумя качествами:

- Скорость нарастания напряжения возбуждения $dU_{в2}/dt = tg\alpha$

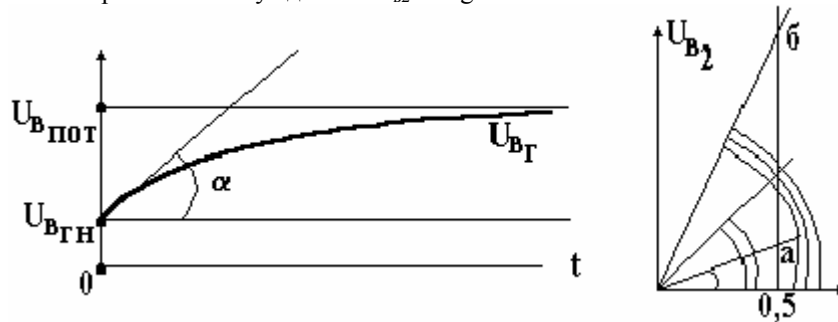


Рис.45.

За эталонное время принято брать 0,5 секунды.

- а) Для машинных систем возбуждения $tg\alpha = 108 \div 235$ В/с;
- б) Для компаундированных систем возбуждения $tg\alpha = 250 \div 300$ В/с;

- Коэффициент форсировки напряжения возбуждения : $K_{\phi} = \frac{U_{вПот}}{U_{вГном}}$

$U_{вПот}$ - максимальное значение напряжения которое может выдать возбуждательный агрегат.

- а) $K_{\phi} = 2 \div 2,5$;
- б) $K_{\phi} = 3 \div 4,5$.

Тиристорные между ними.

Форсировка необходима для увеличения скорости нарастания тока возбуждения генератора до необходимой величины, при которой напряжение генератора будет номинальным при новом значении нагрузки S.

Характеристики регулирования систем возбуждения.

Система АРН может находиться в двух состояниях: переходное 1, установившаяся 2.

Величина ΔU не зависит от систем АРН, при любой системе она будет одинакова. Она зависит от соотношения мощностей подключаемой нагрузки к мощности генератора, а также $\cos\phi$ нагрузки (см. рис.44.): $\Delta U = f(K_{ст}; \cos\phi_{наг})$. 2 - статический участок его можно охарактеризовать коэффициентом статизма.

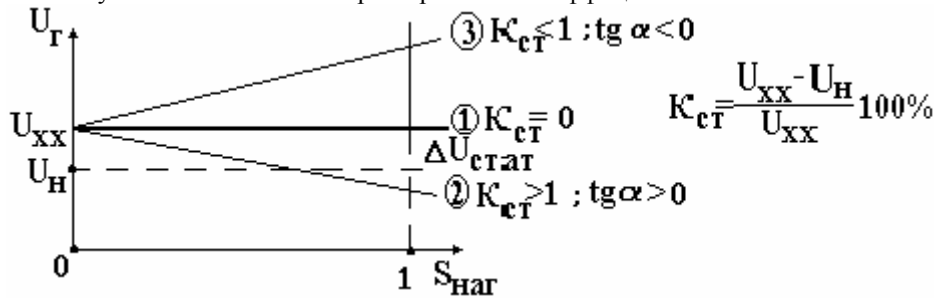


Рис.46.

Правила Регистра требуют чтобы $\Delta U_{д} \leq 20\%$; $\Delta U_{стат} = (2 \div 2,5)\%$; $U^* = U_{XX}^* - K_{стат} \cdot S_{наг}^*$.

Статическая характеристика показывает на сколько конечное установившееся значение напряжение генератора отличается от начального значения U_{zz} . Из рассмотрения этой характеристики можно вывести два закона регулирования:

1. Регулирование по астотической характеристики. Это такое регулирование при котором регулирующее воздействие заранее выбирается таким, чтобы полностью скомпенсировать все факторы отклонения напряжения генератора. В этом случае не требуется спец. сигнала обратной связи по напряжению генератора. Это регулирование по возмущающему воздействию.
2. Регулирование по статическим характеристикам. Можно получить регулируя по возмущающему воздействию (при неправильной настройке) и введение обратной связи по величине отклонения напряжения генератора. В этих системах обязательно наличие ΔU . Такие системы называются системами регулирования по отклонению регулирующего параметра.

Существуют также комбинированные системы регулирования возбуждения, в которых присутствуют элементы регулирования по возмущению и отклонению тока нагрузки.

Примеры регулирования напряжения.

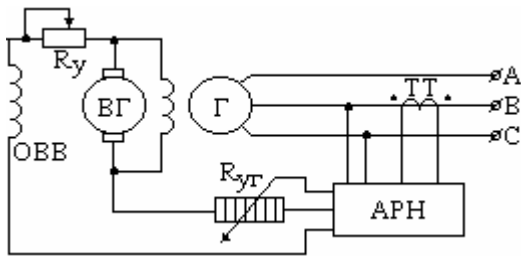


Рис.47.

Системы АРН бывают прямого и косвенного действия:

- прямого действия - это такие системы, когда АРН подключается непосредственно на ОВГ.
- косвенного действия - АРН к ОВВ.

АРН прямого действия применяются для небольших мощностей до 300 кВт, косвенные выше 300 кВт.

Классификация систем АРН.

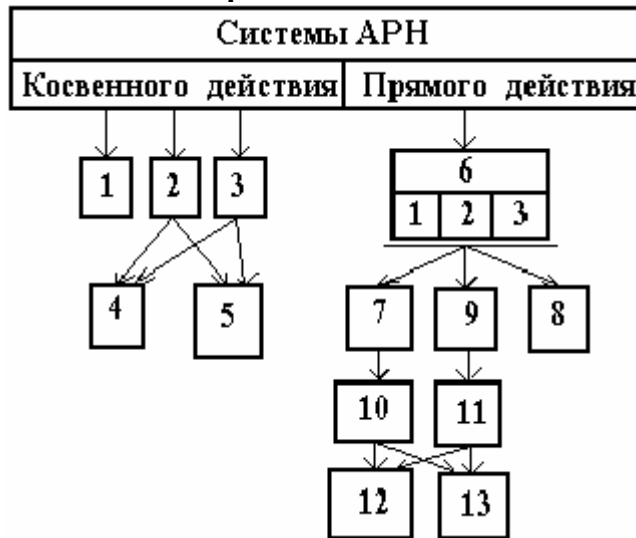


Рис.48.

1. Системы работающие по отклонению регулируемой величины.
2. Системы фазового компаундирования.
3. Системы токового компаундирования.
4. Системы с параллельным включением сигналов по току и напряжению а также системы с трехстержневыми трансформаторами фазового компаундирования (ТФК).
5. Системы с последовательным включением трансформаторов тока и напряжения, а также системы с трехобмоточными ТФК.
6. Системы с применением тиристоров.
7. Тиристоры включены в составе основного выпрямителя. Основной - это выпрямитель питающий обмотку возбуждения .
8. Тиристоры включены на стороне переменного тока.
9. Тиристоры включены на стороне постоянного тока.
10. Симметричные системы основного выпрямителя.
11. Несимметричные системы основного выпрямителя.
12. Релейная система управления открыванием тиристоров.
13. Фазовая система управления открыванием тиристоров.

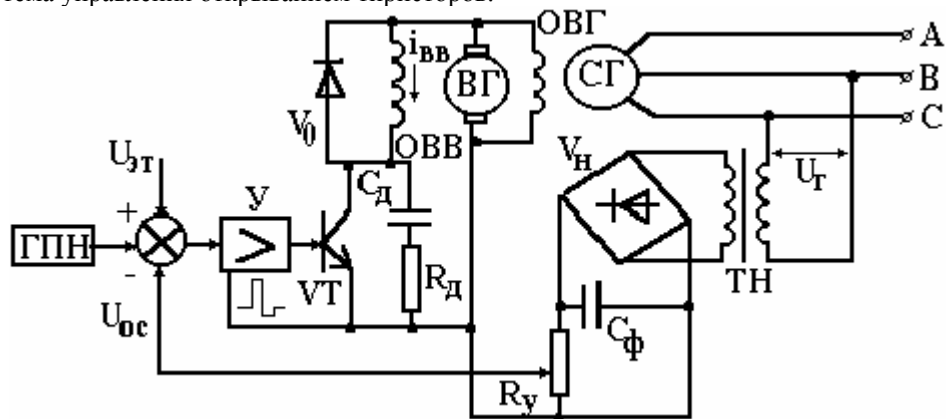


Рис.49.

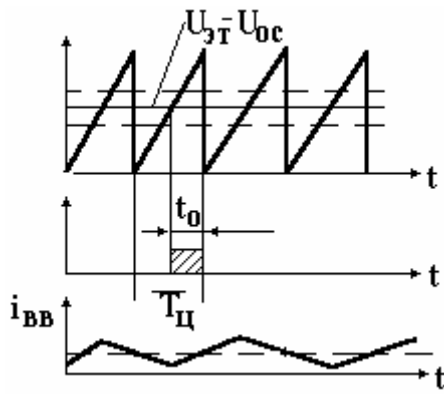


Рис.50.

Транзистор VT работает в ключевом режиме. Когда U_r снижается, уменьшается величина $U_{ос}$, время t_0 растет, что приводит к возрастанию тока $i_{ВВ}$, а следовательно тока возбуждения генератора, следовательно увеличивается U_r .
* - форма управляющего сигнала.

Компаундирование наиболее радикальный способ стабилизации напряжения постоянного и переменного тока. Под компаундированием понимается введение дополнительного тока подпитки пропорционального току нагрузки генератора. Величина этого тока должна быть такой, чтобы полностью скомпенсировать все факторы снижающие напряжение генератора ниже номинального:

- активное падение напряжения;
- реакция якоря;
- падение напряжения в добавочных полюсах, в кабелях.

Компаундирование применяется для машин постоянного и переменного тока. Может быть прямым и косвенным. Прямым - когда дополнительный ток подается в ОВГ. Косвенный - когда дополнительный ток подается в ОВВ. Компаундирование может быть токовым и амплитудно - фазовым. Для МТП применяется токовое компаундирование, для машин переменного тока применяется амплитудно фазовое компаундирование.

- Под токовым компаундированием компаундированием понимается такое, когда $I_{доп}$ пропорционален лишь абсолютной величине $I_{наг}$ генератора.
- Под амплитудно - фазовым компаундированием понимается такое, когда $I_{доп}$ зависит от амплитуды и фазы $I_{наг}$ генератора.

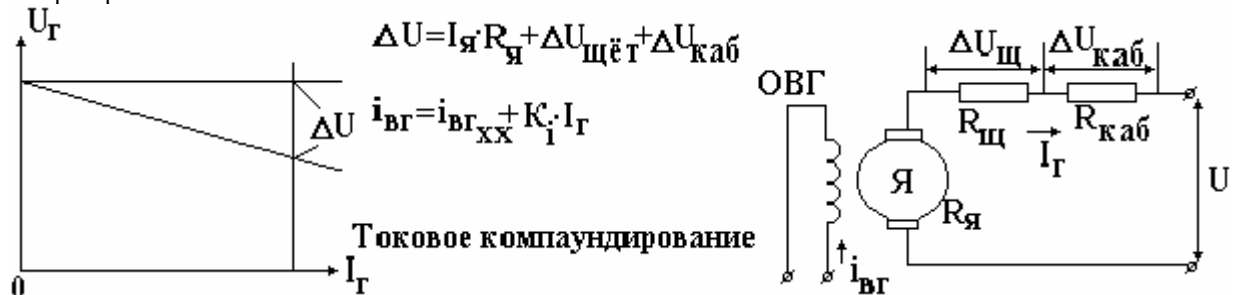


Рис.51.

Амплитудно - фазовое компаундирование.

Для машин переменного тока необходимо также регулировать i_v . Отличием является то что регулировочная характеристика тока зависит не только от модуля тока, но также от фазы.

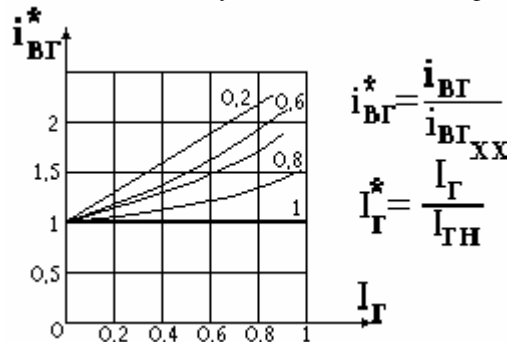


Рис.52.

Для того чтобы понять изменение тока возбуждения рассмотрим диаграмму Потье для генераторов с неавнополюсным ротором.

Построение начинаем с параметров нагрузки. Далее определяется активное падение напряжение на стартере генератора и получаем E в зазоре - E_s , далее строится реакция якоря $-x_a I_2$ (x_a - сопротивление взаимоиנדукции между ротором и статором). Соединив $x_a I_u$ с нулевой точкой получим полную E , которая наводится обмоткой возбуждения. F_v отстает от E на 90° . Строим МДС реакции якоря. Она совпадает с током по направлению, но встречно с F_a . Соединив F_a с нулевой точкой, получаем F_s - полную МДС. $E_s \perp F_s$.

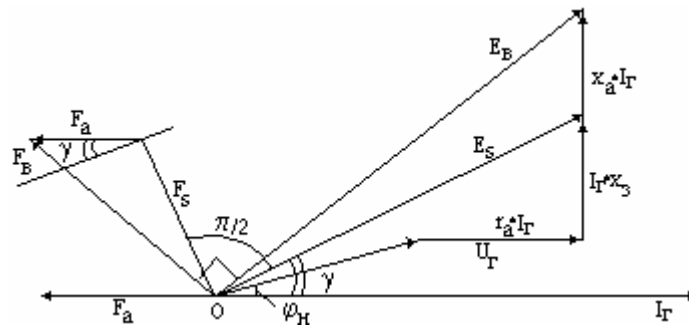


Рис.53.

Для вывода закона амплитудно - фазового компаундирования рассмотрим векторную диаграмму Потье при различных значениях угла φ_n при условии постоянства величин U_r и I_r .
 Закон компаундирования: выведем предположение, что ток и напряжение нагрузки генератора раны номинальному, а коэффициент мощности ($\cos \varphi$) меняется от 1 до 0.

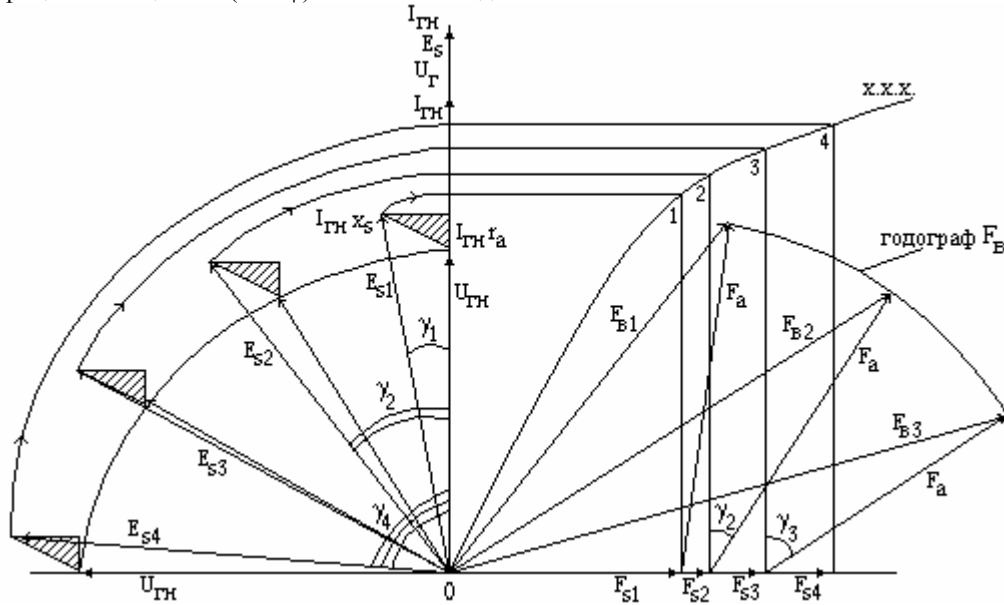


Рис.54.

В левой полуплоскости построим диаграмму Потье при условии: $I_{гн}=I_r$; $U_r=U_{гн}$; $\cos \varphi_{ном}=1$. С помощью циркуля перенесем E_s на ось U_r . В правом квадранте определим полную намагничивающую силу генератора. Чтобы найти закон компаундирования нужно соединить все концы векторов F_b : $F_b = \sqrt{F_s^2 + F_a^2 + 2 \cdot F_a \cdot F_s \cdot \cos \gamma}$; $F_s=f(xxx)$.
 Таким образом, чтобы поддерживать напряжение на клеммах генератора равным номинальному при изменении $\cos \varphi_{наг}$ необходимо регулировать I_b по закону треугольника. Однако регулирование будет не линейным поскольку величина F_s меняется.

Практическая реализация устройств компаундирования.

Устройство компаундирования просто реализуется если пренебречь изменением F_s . Диапазон изменения F_s колеблется в пределах (4...7)%.

Для реализации закона компаундирования достаточно получить составляющую вектора F_s путем поворота тока пропорционального напряжению на угол $\pi/2$.

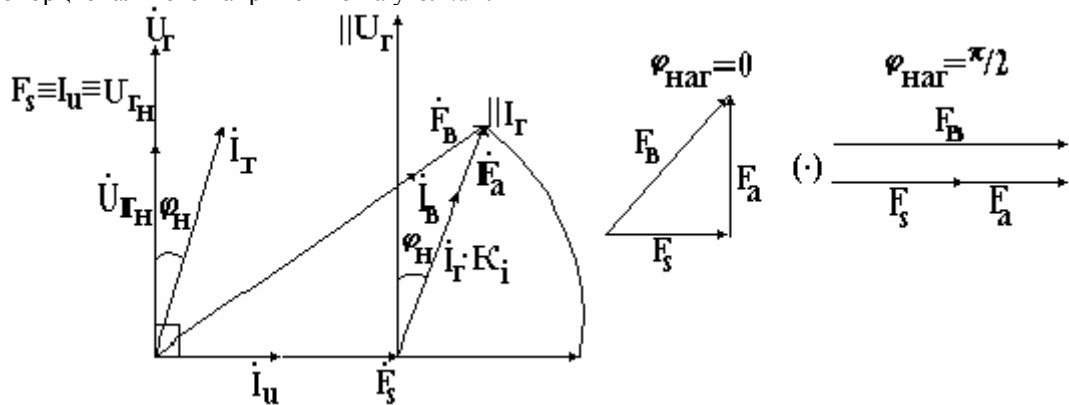


Рис.55.

Практическая реализация возможна:

1. Геометрическим суммированием сигналов пропорциональных напряжению и току генератора. При этом ток пропорциональный напряжению сдвигается по фазе относительно напряжения на угол $\pi/2$.

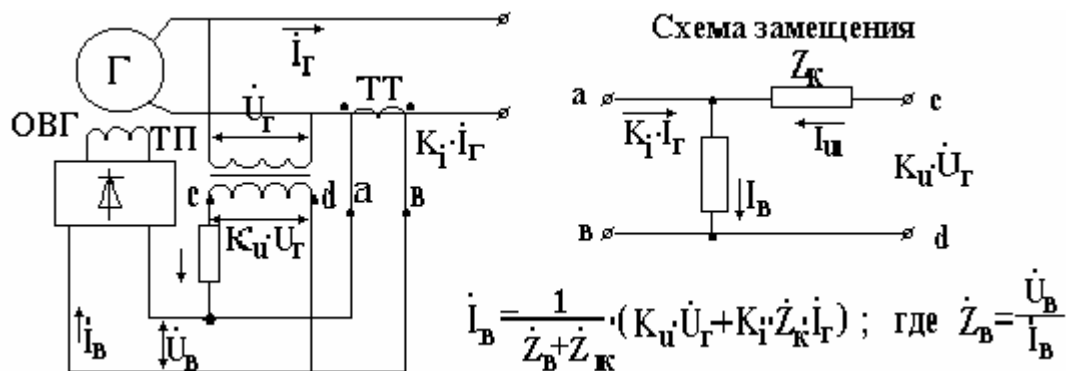


Рис.56.

2. Геометрическое суммирование двух напряжений.

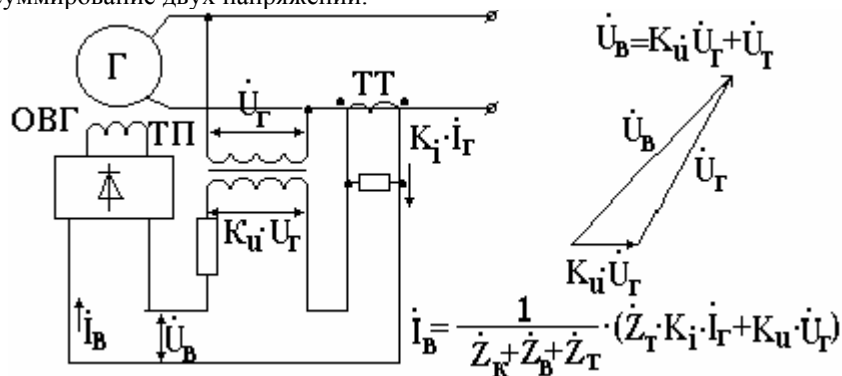


Рис.57.

3. Суммирование МДС и магнитных потоков пропорциональных току и напряжению генератора в специальных трансформаторах. Эти трансформаторы наз. трансформаторами фазового компаундирования.

3.1 Суммирование МДС.

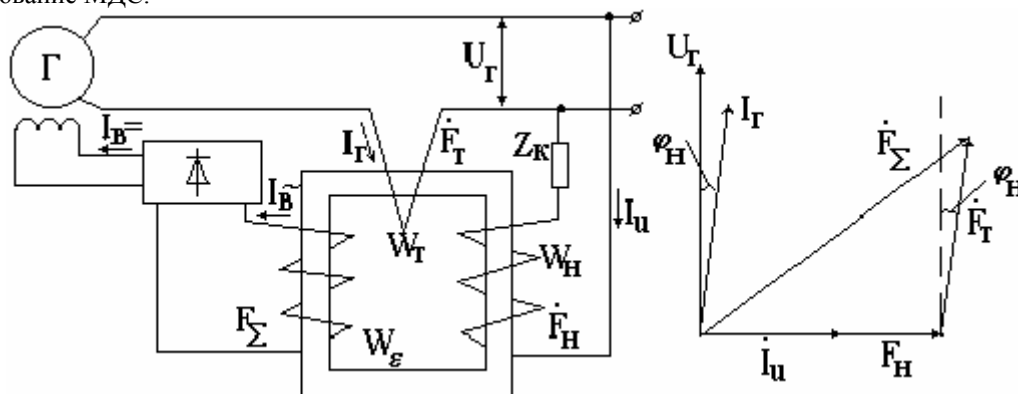


Рис.58.

3.2 Суммирование магнитных потоков 3-х стержневого трансформатора.

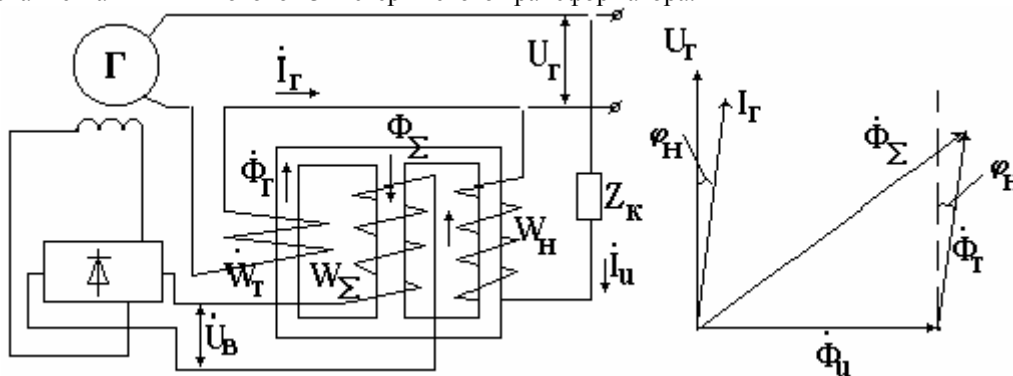


Рис.59.

Эти трансформаторы модулируют изменение МДС генератора (см. диаграмме Потье).

Компаундирующие сопротивления.

1. В качестве Z_k применяется дроссель:

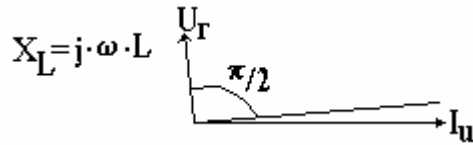


Рис.60.

2. В качестве Z_k применяется конденсатор:

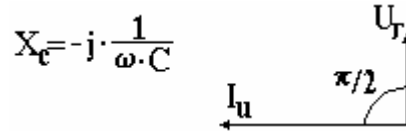


Рис.61.

Когда в качестве Z_k применяется дроссель обмотки W_T и W_H включаются согласно. В качестве Z_k применяется конденсатор, тогда эти обмотки включаются встречно для того чтобы повернуть составляющую I_u в сторону отставания. В схемах ТФК сопротивление Z_k может отсутствовать, вместо него применяется магнитный шунт, который отделяет обмотку W_H от остальных обмоток трансформатора.

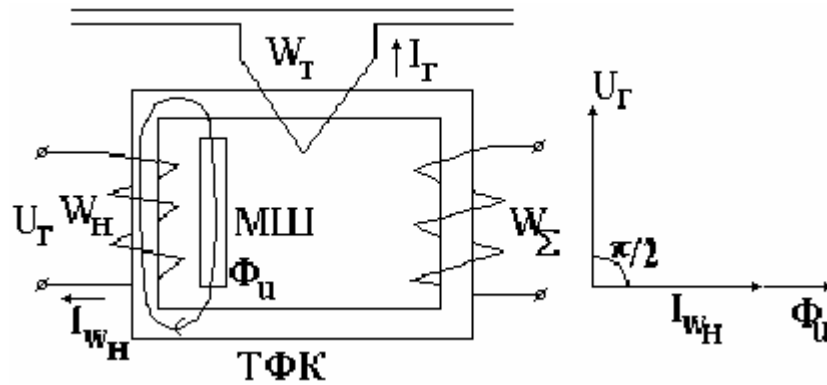


Рис.62.

МШ - магнитный шунт;

4. Сдвиг между током и напряжением обеспечивается за счёт питания обмотки W_H линейным напряжением.

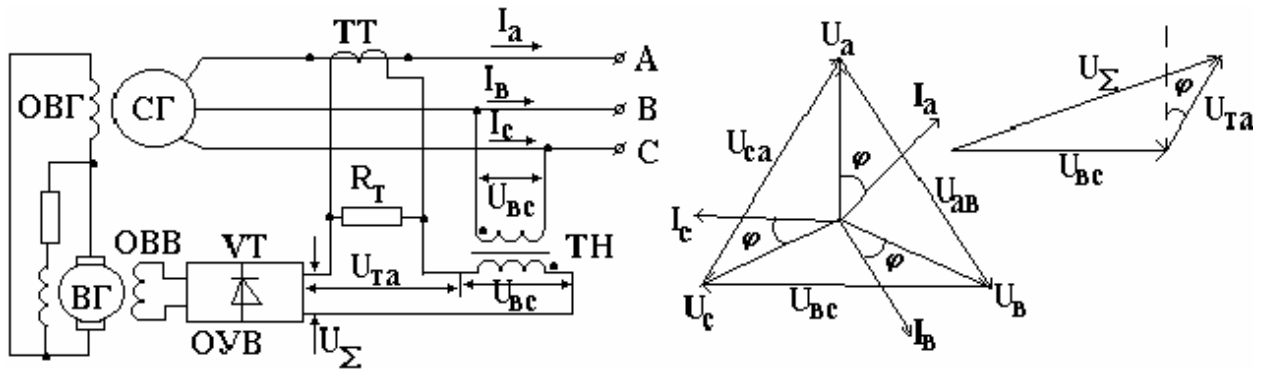


Рис.63.

Практические схемы регуляторов напряжения.

В большинстве этих схем применяется унифицированный трансформатор фазового компаундирования.

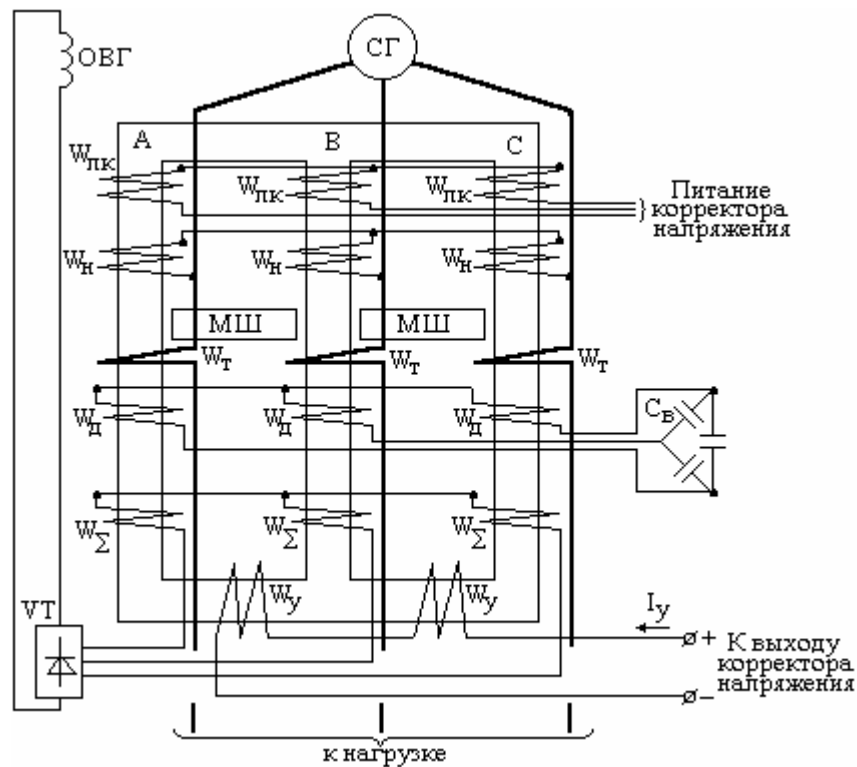


Рис. 64.

Емкость C_B с обмоткой W_T образуют колебательный контур. Его резонансная частота 35...40 Гц и при раскрутке дизеля за счёт остаточного намагничивания ротора генератора напряжение $U_{ост}=8...10$ В происходит резонансное самовозбуждение, возникает большой ток и ЭДС, которая увеличивает напряжение генератора.

При увеличении I_u происходит насыщение железа трансформатора, при этом коэффициент трансформации растёт, а напряжение обмотки W_Σ снижается. Система регулирования управляемого трансформатора работает наоборот по сравнению с магнитным усилителем.

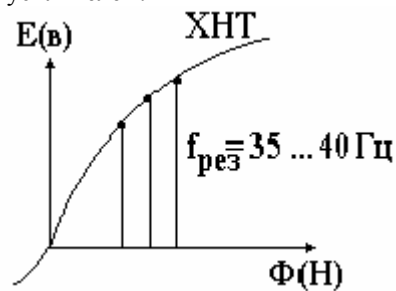
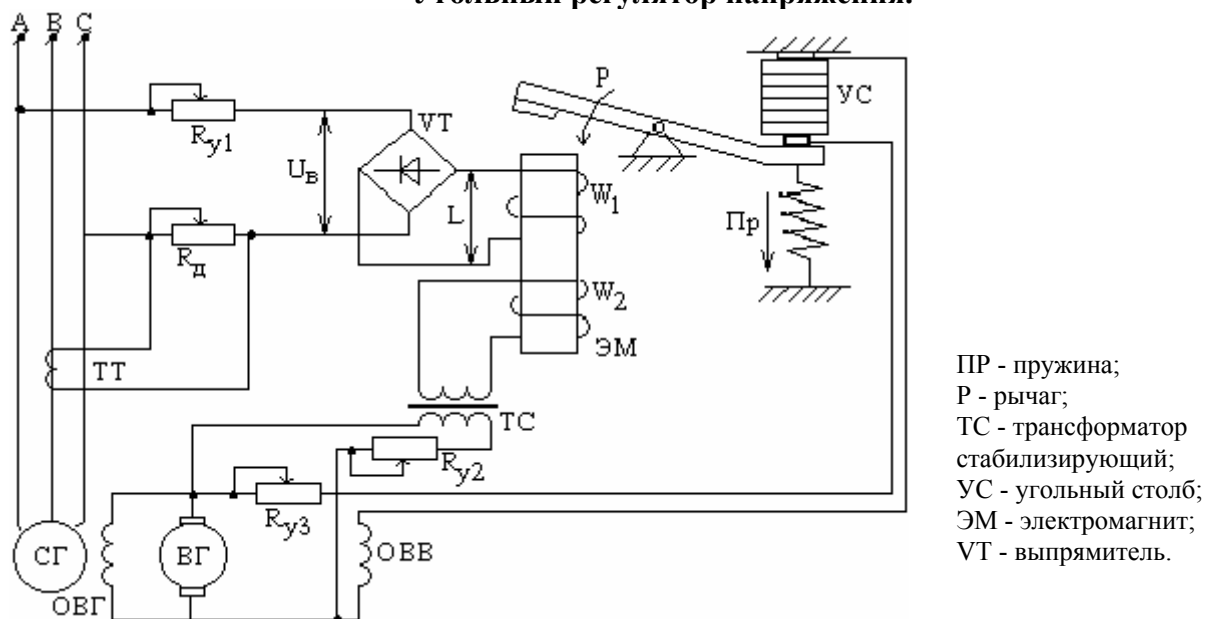


Рис. 65.

Угольный регулятор напряжения.



- ПР - пружина;
- Р - рычаг;
- ТС - трансформатор стабилизирующий;
- УС - угольный столб;
- ЭМ - электромагнит;
- VT - выпрямитель.

Рис. 66.

Амплитудно-фазовое компаундирование

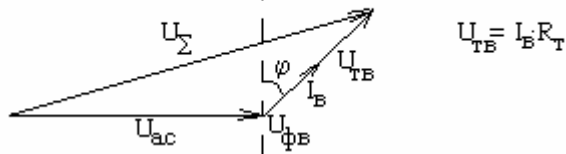


Рис.67.

Регулятор компактный, имеет высокое быстродействие (напряжение при набросе 100% нагрузки восстанавливается за 1,5...2 секунды). Основной недостаток угольный столбик боится тряски и вибрации.

Регулятор напряжения генераторов типа МСС.

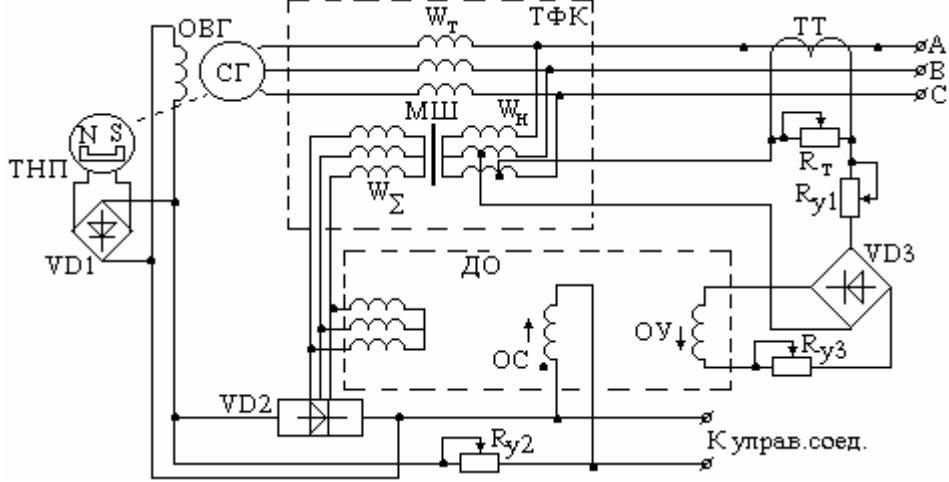


Рис.68.

ГНП - генератор начального подмагничивания;

ОС - обмотка смещения;

ОУ - обмотка управления;

ТФК - трансформатор фазового компаундирования;

МШ - магнитный шунт;

ДО - дроссель отбора, который своими обмотками управляет направлением тока.

ДО - дроссель с регулируемой индуктивностью. Регулирование осуществляется за счёт подмагничивания. ОУ подключена к датчику напряжения. Датчик напряжения выполнен по схеме компаундирования.

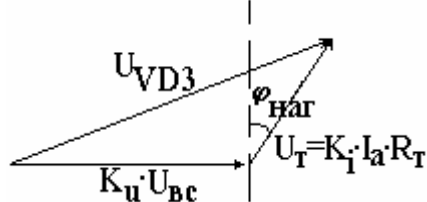


Рис.69.

При набросе нагрузки напряжение VD₂ возрастает и увеличивается возбуждение генератора. При возрастании нагрузки ток в ОУ возрастает, но поскольку он направлен встречно ОС регулирующий поток уменьшается, индуктивность возрастает, ток отбора уменьшается. U на W_Σ возрастает, что приводит к возрастанию напряжения возбуждения генератора.

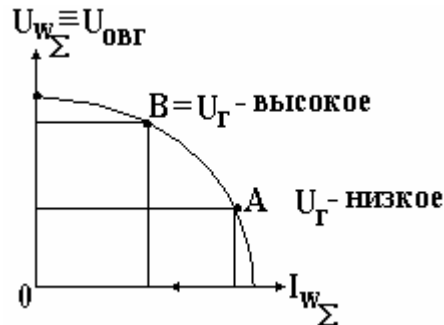


Рис.70.

В случае параллельной работы данного генератора с другим генератором, необходимо выравнять ЭДС с целью выравнивания реактивной нагрузки генераторов. Система МСС поддерживает напряжение на выходе генератора (U_r) в статических режимах с точностью ±2,5%, ΔU_{стат}% = ±2,5% при P_r=0...P_{гн}; Cos φ_{наг}=0,7...0,95.

Динамические характеристики. При набросе нагрузки с Cos φ_{наг} = 0,8 провал напряжения ΔU_{дин}% = 20%, время восстановления ≈ 0,56 секунд.

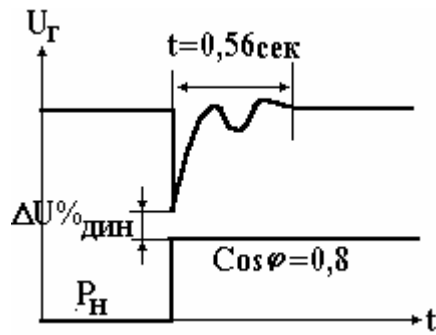


Рис. 71.

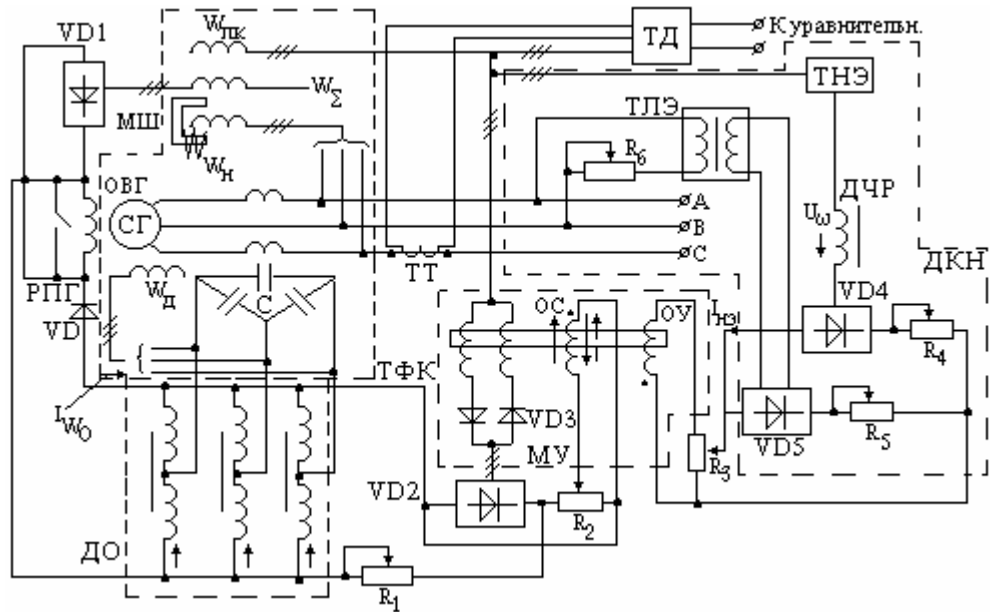


Рис. 72. Система возбуждения генераторов типа МСК.

3-х фазный ДО

РПГ - рубильник гашения поля;

ТД - добавочное устройство с трансформатором ТЛЭ;

ТНЭ - трансформатор линейного и нелинейного элемента;

W_d - добавочная обмотка, служит для возбуждения и регулирования напряжения.

Корректор напряжения состоит из ТНЭ и ТЛЭ.

МУ - 3-х фазный магнитный усилитель;

VD₂ - мост;

ТД - служит для реактивной параллельной работы генератора;

ДЧК - дроссель частотной коррекции;

ДКН - датчик корректора напряжения.

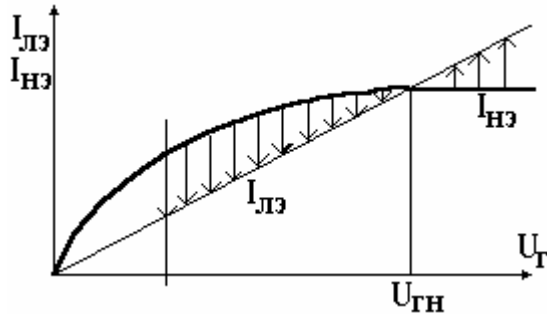


Рис. 73.

При $U_G = U_{Гном} \rightarrow I_{ЛЗ} = I_{НЗ}$ при $U_G = U_{Гн}$ ток в ОУ отсутствует. С увеличением $I_{ввых}$ МУ будет расти ток в обмотке W_d .

ДЧК - служит для стабилизации напряжения генератора при изменении частоты вращения дизеля. $X_{дчк} = \omega L_{дчк}$; $U_\omega = j I_{НЗ} \cdot X_{дчк}$ С ростом частоты ток возбуждения будет уменьшаться.

Управляемое фазовое компаундирование.

Система регулирования с ТФК у которого напряжение на W_Σ уменьшается, может регулироваться с помощью подмагничивания стали трансформатора ТФК. Условием работы ТФК в этом случае является отсутствие переменного тока в ОУ. Для этого конструкция ТФК изменяется. Сердечник в каждой фазе делится пополам и на

каждую половину мотается ОУ. Затем эти обмотки включаются встречно так что переменная составляющая ЭДС от обмоток W_T и W_H взаимокompенсируются.

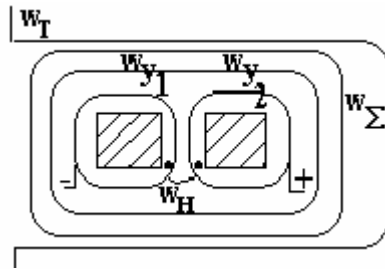


Рис. 74.

Чем больше подмагничивание, тем меньше напряжение. M - взаимная индуктивность обмоток W_H и $W_Σ$.

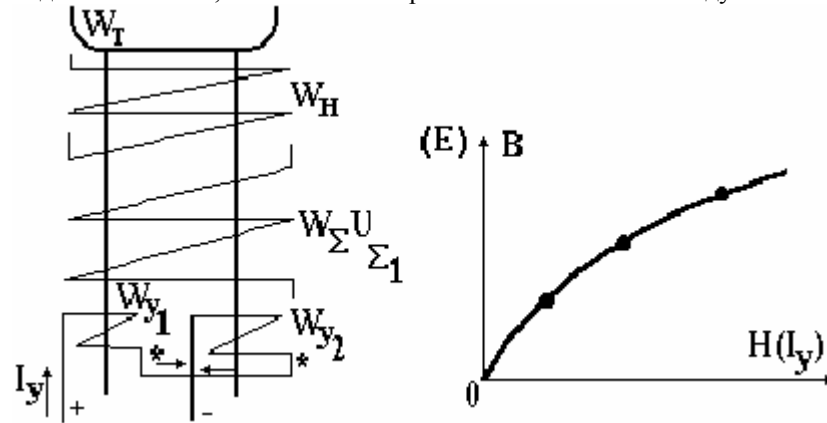


Рис. 75.

$e_Σ = M_{HΣ} \cdot \frac{di_H}{dt}$; Они применяются в УБК-М- схема с максимальным усилителем и в РНА-60.

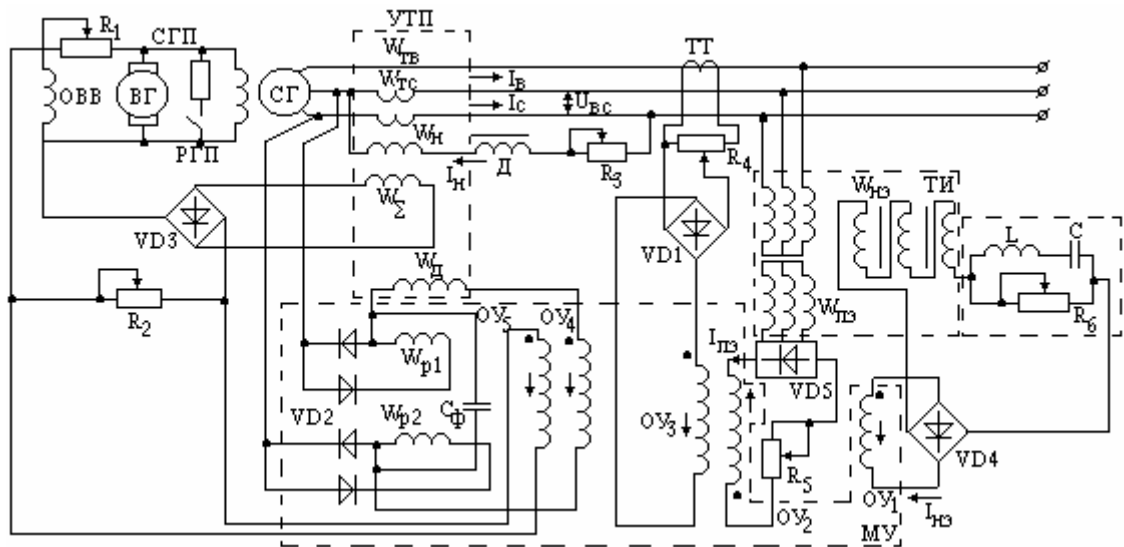


Рис. 76. Система автоматического регулирования напряжения типа УБК-М.

УТП выполнен в однофазном варианте, используется линейный ток и линейное напряжение.

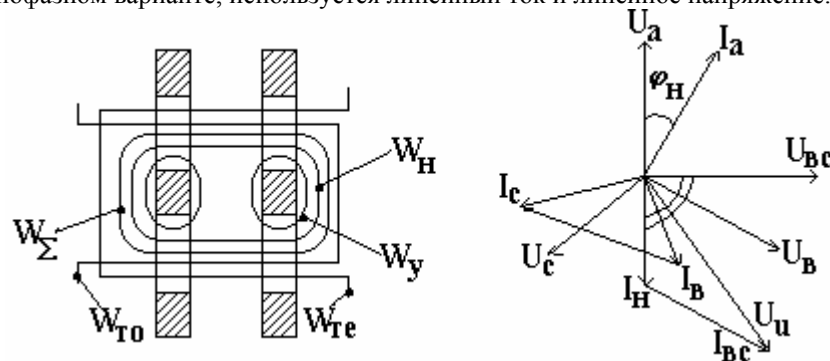


Рис. 77.

Принцип работы корректора такой же как и МС. ИТ состоит из 2-х сердечников.

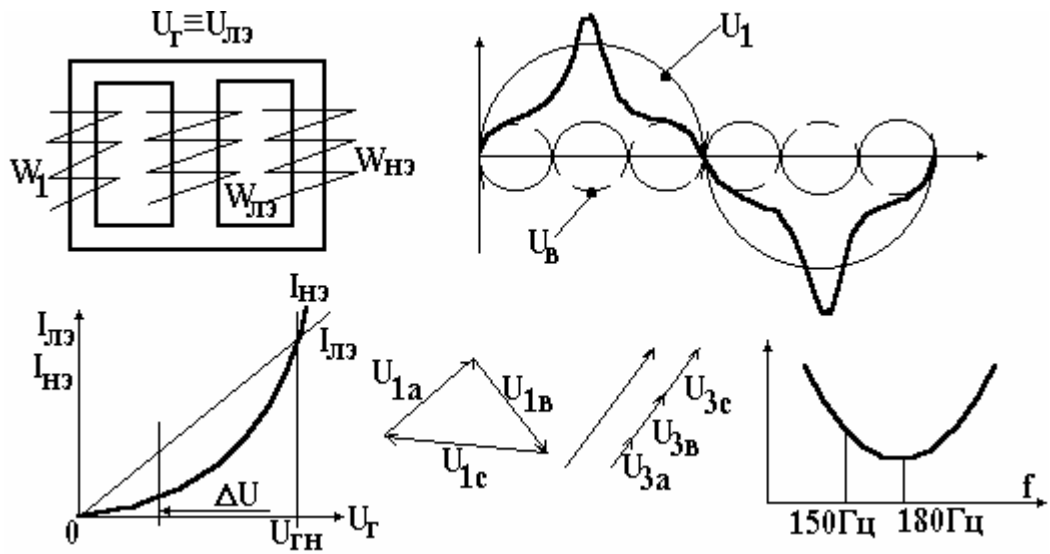


Рис.78.

ЧК представляет резонансный контур 180 Гц.

ОУЗ - служит для ограничения I_r в режиме КЗ. Формирует токоограничивающую характеристику.

ОУ₄ - обмотка ОС по току выхода МУ.

ОУ₅ - ОС по напряжению возбуждения возбудителя.

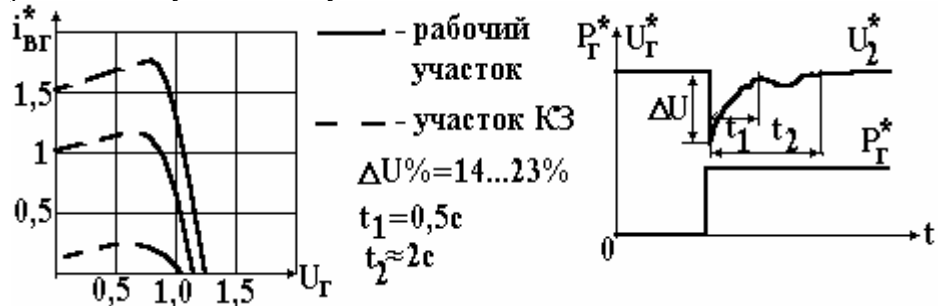


Рис.79.

Бесконтактная система возбуждения (безщеточный СГ).

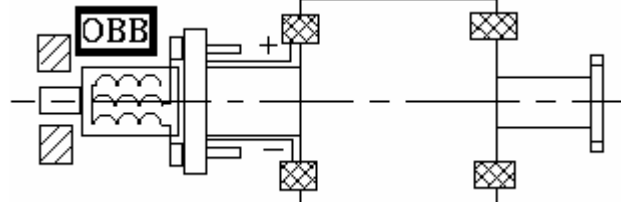


Рис.80.

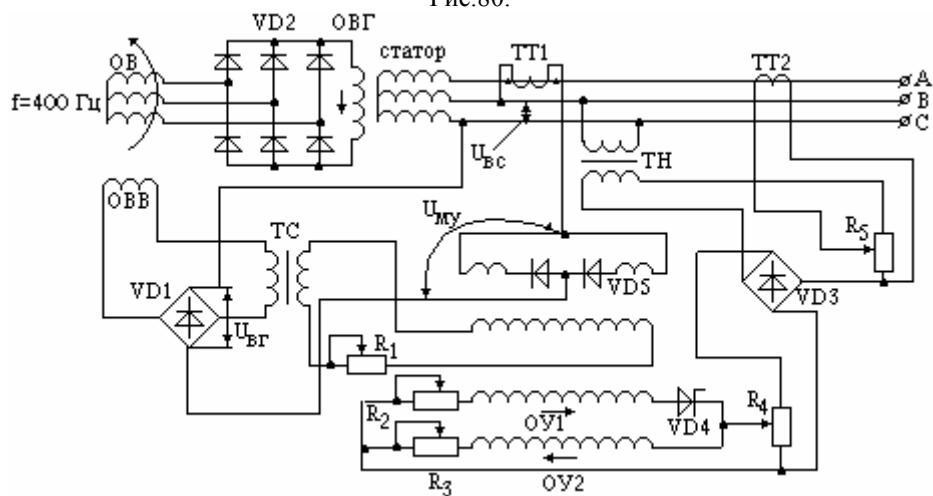


Рис.81.

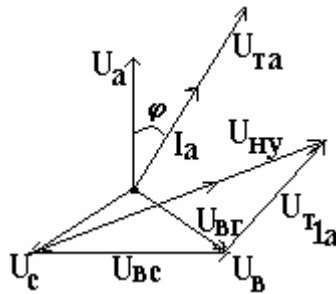


Рис.82.

Регулирование тока возбуждения осуществляется МУ. С увеличением I подмагничивания величина $U_{\text{мн}}$ уменьшается, а $U_{\text{вн}}$ увеличивается. Управляющий сигнал также как и питающий сигнал. В обмотку OY_1 включен стабилитрон, а в OY_2 нет и они включены встречно друг другу.

НС - намагничивающая сила.

Процесс регулирования во времени: применен релейный способ регулирования стабилитрон. Частота колебаний 10...15 Гц. Точность стабилизации $\Delta U\% = 1\%$.

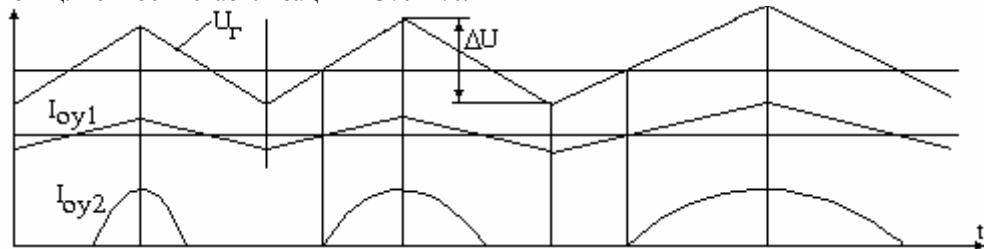


Рис.83.

Системы возбуждения генераторов с применением управляемых вентилей.

Применение тиристоров существенно уменьшает габариты РНА. При этом все положительные качества системы остаются неизменными. Существуют следующие схемы:

1. Тиристоры установлены в системе основного выпрямителя.
2. Тиристоры установлены последовательно ОВ, при этом основной выпрямитель выполнен на диодах.
3. Тиристоры установлены в обмотке возбуждения, при этом основной выпрямитель выполнен на диодах.

Могут регулироваться по возмущающему воздействию, по отклонению U и могут быть комбинированными. Тиристоры могут включаться по симметричным и несимметричным схемам. Управление тиристорами может быть релейным и фазовым.

1.

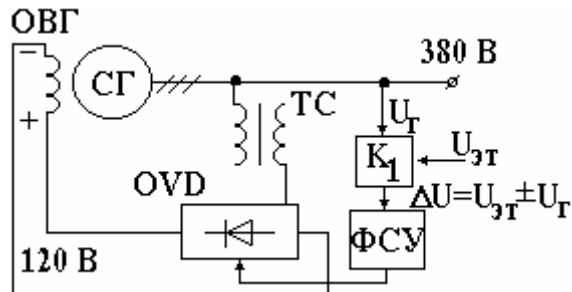


Рис.84.

K_1 - корректор;

2.

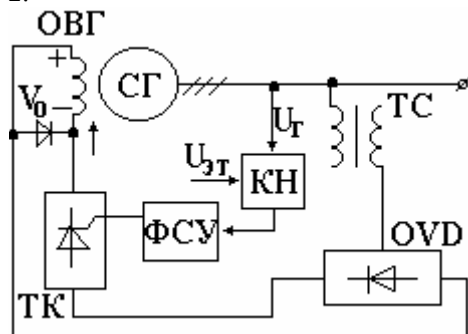


Рис.85.

ТК - тиристорный ключ;
 КН - корректор напряжения;
 ФСУ - фазосдвигающее устройство;

3.

Несимметричные режимы судовых электрических сетей.

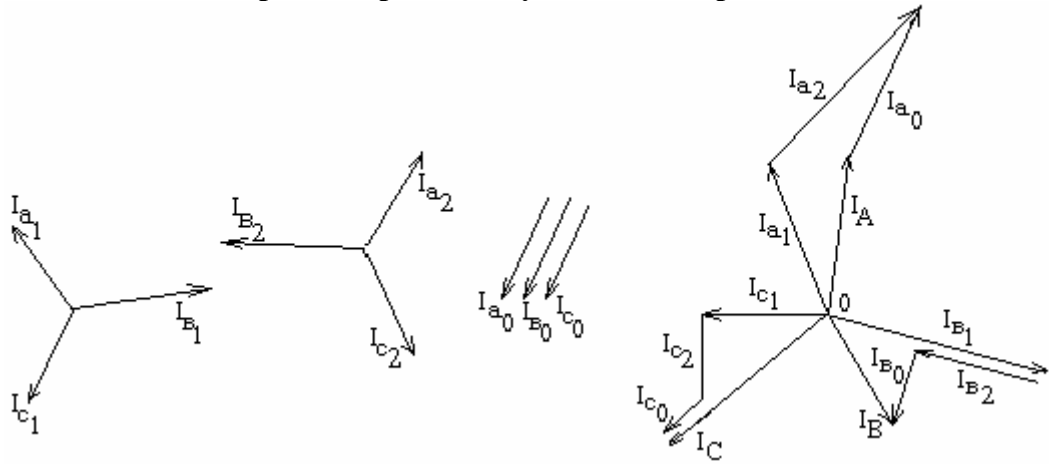


Рис.92.

$$\left. \begin{aligned} I_A &= I_{a_1} + I_{a_2} + I_{a_0} \\ I_B &= I_{b_1} + I_{b_2} + I_{b_0} \\ I_C &= I_{c_1} + I_{c_2} + I_{c_0} \end{aligned} \right\} (1); \quad \left. \begin{aligned} I_{a_1} &= \frac{1}{3}(I_A + aI_B + a^2I_C) \\ I_{a_2} &= \frac{1}{3}(I_A + a^2I_B + aI_C) \\ I_{a_0} &= \frac{1}{3}(I_A + I_B + I_C) \end{aligned} \right\} (2); \quad \left. \begin{aligned} a &= e^{+j120^\circ} = \frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \\ a^2 &= e^{-j120^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \end{aligned} \right\} (3); \quad \left. \begin{aligned} I_{a_2} &= I_{a_2} \\ I_{b_2} &= aI_{a_2} \\ I_{c_2} &= a^2I_{a_2} \end{aligned} \right\} (4);$$

Преимуществом в данных расчётах является то что существующая несимметричная система представляется в виде 3-х независимых друг от друга симметричных 3-х фазных систем. Расчёты для этих систем производятся обычным порядком. Определяются токи и другие составляющие для фазы А. Токи и другие составляющие для фаз В и С определяются по формулам (4). Снижается порядок систем алгебраических уравнений примерно в 3 раза.

Расчёт сопротивлений элементов СЭС для токов прямой, обратной и нулевой последовательности.

К элементам СЭС относятся генераторы, АД, трансформаторы, реакторы, кабели, конденсаторные батареи.

- Имеющие подвижные части (СГ, АД - сопротивления прямой последовательности не равно сопротивлениям обратной последовательности).
- Не имеющие подвижных частей (дрессели реакторы, трансформаторы, кабели - сопротивления прямой последовательности равно сопротивлению обратной последовательности).

1.

а) СГ. Расчёты по методу симметричных составляющих проводятся для установившихся режимов.

- Для токов прямой последовательности.

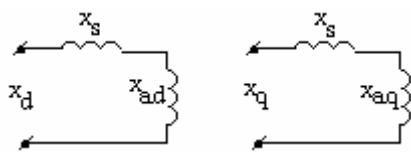


Рис.93.

$$\begin{aligned} x_d &= x_s + x_{ad}; \\ x_q &= x_s + x_{aq}; \\ x_s & - \text{сопротивление рассеивания}; \\ x_{ad} & - \text{сопротивление взаимной индукции.} \end{aligned}$$

$$x_1 = \frac{x_d + x_q}{2}; \quad r_{(1)} = r_a;$$

- Для токов обратной последовательности.

Обратное поле перемещается относительно ротора с двойной скоростью и трансформирует в демпферной обмотке ток двойной частоты.

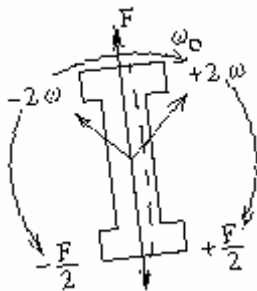


Рис.94.

x_d'' и x_q'' - сопротивления когда в обмотках ротора присутствуют токи.

В статоре присутствует ток $3\omega_0$. В сети будет присутствовать ток 3 гармоника. Расчёт сопротивлений обратной последовательности следует производить по формуле с учётом сверхпереходных сопротивлений.

$$x_{(2)} = \frac{x_d'' + x_q''}{2};$$

Схема замещения:

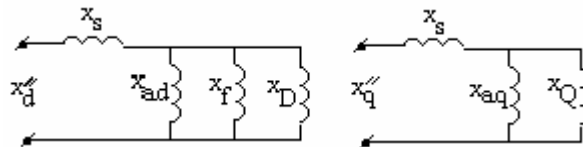
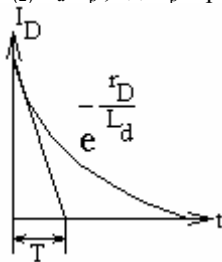


Рис.95.

В справочнике даётся: $x_s, x_d, x_d'', x_d''', r_a, x_q, x_q'', T_a, T', T''$.

$\sigma^{(2)} = r_a + r_p$; где r_p - результирующее сопротивление ротора приведённое ко всем обмоткам статора.



$$x_{(2)} = 1,7 \cdot x_d'' \text{ - неявнополюсный;} \\ x_{(2)} = 1,35 \cdot x_d'' \text{ - явнополюсный.}$$

Рис.96.

б) АМ. В отличие от СМ, АМ имеет равномерный воздушный зазор и магнитосимметричный ротор.

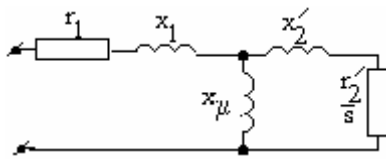


Рис.97.

$$x_{(1)} = x_1 + x_2'; \quad r_{(2)} = r_1 + \frac{r_2'}{s}; \quad x_\mu \gg x_1;$$

$$S_{пр} = \frac{\omega_0 - \omega_p}{\omega_0}; \quad Z_{дв(1)} = \sqrt{x_{(1)}^2 + r_{(1)}^2}.$$

• Обратная последовательность.

$$S_{об} = \frac{-\omega_0 - \omega_p}{\omega_0}; \quad S_{пр} = \frac{r_2'}{r_2} \approx 40 \div 60.$$

Ток протекающий через ротор при обратной последовательности будет в несколько десятков раз больше чем при прямой последовательности. $Z_{дв(2)} = \sqrt{x_{(2)}^2 + r_{(2)}^2}$.

2. $R_{пр} = R_{обр}$.

а) Трансформатор. Сопротивление токам прямой и обратной последовательности зависит от схемы соединения трансформатора.

•

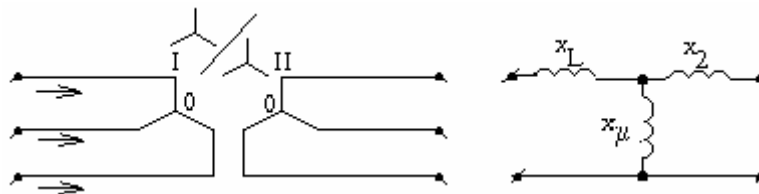


Рис.98.

$$Z_{тр(1)} = x_1 + x_2'; \quad Z_{тр(2)} = Z_{тр(1)};$$

$$x_\mu \gg x_1, x_2.$$

Токи нулевой последовательности протекать не могут.

•

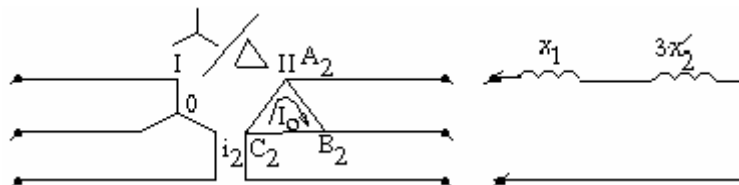


Рис.99.

$$Z_{тр(1)} = Z_{тр(2)} = x_1 + x_2'';$$

$$Z_{тр(0)} = x_1 + 3x_2.$$

Во вторичной обмотке протекают токи нулевой последовательности.

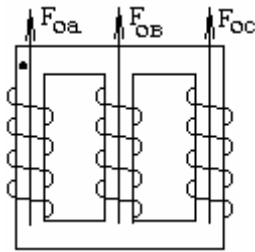


Рис.100.

Если с таким железом трансформатор не симметрично загружен и соединён в треугольник, то он должен экранироваться, если рядом с ним находятся другие приборы в следствии наличия поля от токов нулевой составляющей.

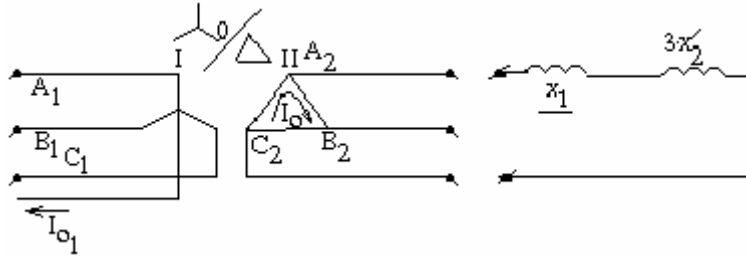


Рис.101.

б) Кабели: $Z_{каб(1)} = Z_{каб(2)}$.

Сопротивления кабелей приводятся в справочной литературе. Тоже самое и реакторы.

Допустимые нагрузки СМ и АД в несимметричном режиме работы.

При проектировании СМ закладывается тепловой запас, который позволяет эксплуатировать машину в режиме несимметрии если отношение $I_2 = (0,2 \dots 0,25) I_n$ тепловой запас за счёт увеличения вентиляции и увеличения сечения меди.

Расчёт допустимой нагрузки АД при несимметрии питающего напряжения.

Самый тяжёлый режим наступает тогда, когда $\phi_{c2} = 0$.

I_{1A} - несёт активная нагрузка;

I_{2A} - греет ротор.

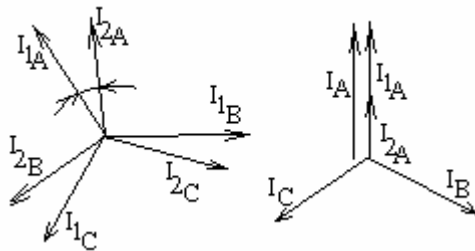


Рис.102.

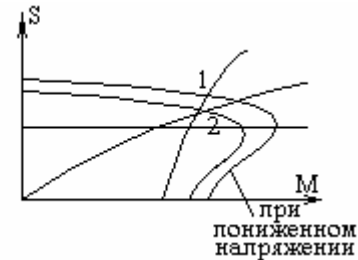


Рис.103.

$$U_1 \approx U_2; 1 \approx 2;$$

$$P_{дв} = M_{дв} \cdot \omega = 3 \cdot I_{1A} \cdot U_{1\phi A} \cdot \cos \phi_{дв}.$$

$$\text{Условием расчёта допустимой нагрузки: } I_{2A} + I_{1A} \leq I_{нАД} \quad (1),$$

где $I_{нАД}$ - номинальный ток АД. Используя уравнение (1) определим связь между коэффициентом допустимой

$$\text{загрузки } \alpha \text{ и коэффициентом несимметрии } \varepsilon. \quad \alpha = \frac{P}{P_{ндв}}; \varepsilon = \frac{U_2}{U_1},$$

где $\alpha = f(\varepsilon)$ - кривая при которой t фазы А двигателя остаётся равной допустимой номинальной рабочей температуре при изменении несимметрии питающего напряжения.

$$I_{1A} + I_{2A} = I_{нАД}; I_{2A} = \frac{U_2}{Z_{2АД}},$$

где $Z_{2АД}$ - сопротивление тока обратной последовательности; U_2 - напряжение обратной последовательности.

Допущения :

$$1. \text{ Кратность пускового тока (в справочниках) } S = 1 \frac{I_{п\text{уск} АД}}{I_{нАД}} = m.$$

$$2. \quad \varepsilon = \frac{U_2}{U_1}; U_1 \approx U_2; I_{2A} = \varepsilon \frac{U_n}{Z_{2АД}}; I_{п\text{уск}} = \frac{U_n}{Z_{2АД}} \approx I_{2A};$$

С учётом допущений 1 и 2 $I_{п\text{уск}} \approx I_{2A}$ - ток обратной последовательности.

$$I_{2A} = \varepsilon \frac{U_n}{Z_{2АД}} = \varepsilon m I_{нАД}; I_{1A} = I_{нАД} - I_{2A} \Rightarrow I_{1A} = I_{нАД} (1 - \varepsilon m); P = P_{ндв} \cdot \alpha;$$

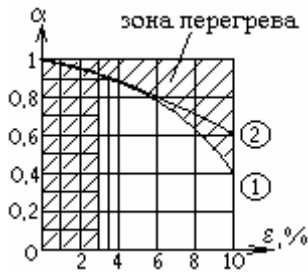


Рис.104.

Если в системе имеется несимметрия, то двигатель нужно выбрать с запасом.

Расчёт судовой сети с несимметричными нагрузками.

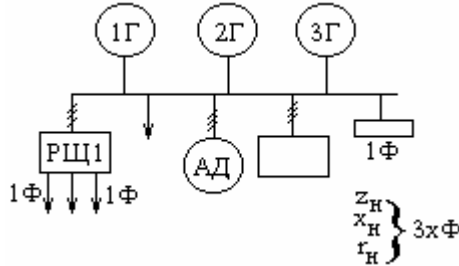


Рис.105.

Требуется определить коэффициент несимметрии напряжения ϵ_u и коэффициент несимметрии токов ϵ_I .

$$\epsilon_U = \frac{U_2}{U_1} \text{ (для - АД); } \epsilon_I = \frac{I_2}{I_1} \text{ (для - СГ) .}$$

Порядок расчёта:

1. Судовая сеть разбивается на симметричную и несимметричную часть.
2. Определяются эквивалентные сопротивления генераторов и приёмников электроэнергии для симметричной и несимметричной частей схемы.

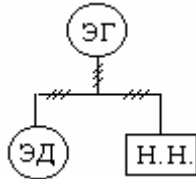


Рис.106.

Для СГ: $Z_{1Г}; Z_{2Г}; Z_{0Г}$;

Для АД: $Z_{1дв}; Z_{2дв}; Z_{дв}$;

НН - несимметричная нагрузка : $Z_{1нн}; Z_{2н}; Z_{0н}$;

ЭГ - эквивалентный генератор;

ЭД - эквивалентный двигатель.

Под ЭГ понимается генератор мощность которого $S_{ЭГ} = \sum_{i=1}^n S_{iГ}$;

Под ЭД понимается: $P_{ЭД} = \sum_{i=1}^n P_{ид} + \sum_{i=1}^m P_{сн}$;

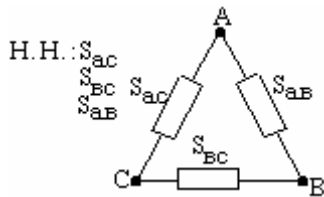


Рис.107.

3. Составляется расчётная схема замещения для фазы А для токов прямой, обратной и нулевой последовательности. Упрощение в расчёте за счёт применения симметричных составляющих получается

- за счёт перехода только к одной фазе (расчёт);
 - за счёт независимости расчётов каждой последовательности.
4. Используя законы Кирхгофа определяются токи и напряжения в каждой схеме.
 5. Определяются коэффициенты ϵ_u и ϵ_I .
 6. По кривым $\alpha=f(\epsilon)$ определяется степень перегрева двигателей, а также через соотношение $I_r/I_{нГ} \leq 0,25$ определяется степень загрузки генератора по теплу.

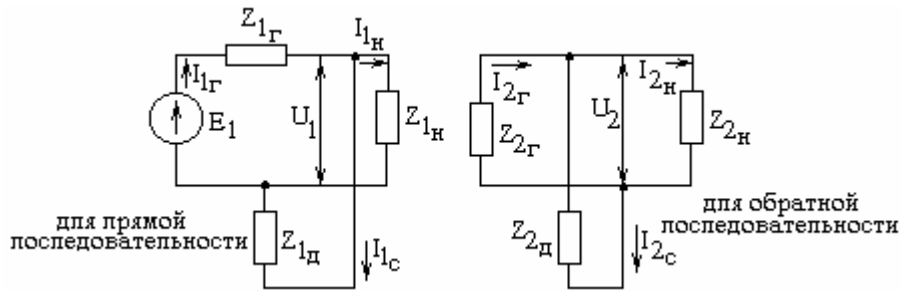


Рис.108.

Схема замещения для нулевой последовательности не изображается и расчёт не производится. Преобразуем треугольник несимметричных сопротивлений в несимметричную звезду, тогда расчёт токов нулевой последовательности не будет.

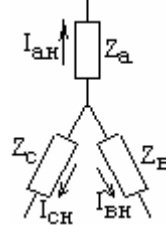


Рис.109.

Формулы преобразования: $Z_A = \frac{Z_{AB}Z_{AC}}{Z_{AB} + Z_{BC} + Z_{AC}}$; $Z_B = \frac{Z_{AB}Z_{BC}}{Z_{AB} + Z_{BC} + Z_{AC}}$; $Z_C = \frac{Z_{AC}Z_{BC}}{Z_{AB} + Z_{BC} + Z_{AC}}$;

Чтобы найти $Z_{1н}$ и $Z_{2н}$, то

$$\left. \begin{aligned} Z_{1н} &= \frac{1}{3}(Z_A + aZ_B + a^2Z_C) \\ Z_{2н} &= \frac{1}{3}(Z_A + a^2Z_B + aZ_C) \end{aligned} \right\} (1);$$

Производим расчёт прямой последовательности:

$$\left. \begin{aligned} I_{1г} = I_{1с} + I_{1н}; I_{1с} &= \frac{U_1}{Z_{1д}} \\ I_{1г} &= \frac{E_{1г} - U_1}{Z_{1г}} \end{aligned} \right\} (1); \quad \left. \begin{aligned} I_{1г} &= \frac{E_{1г} - U_1}{Z_{1г}} \\ U_1 &= \frac{Z_{1д}E_{1г}}{Z_{1д} + Z_{1г}} - \frac{Z_{1д}Z_{1г}}{Z_{1д} + Z_{1г}} I_{1н} \end{aligned} \right\} (2); \quad \left. \begin{aligned} I_{2г} = I_{2с} + I_{2н}; I_{2с} &= \frac{U_2}{Z_{2д}} \\ I_{2г} &= \frac{-U_2}{Z_{2г}} \end{aligned} \right\} (3); \quad \left. \begin{aligned} U_1 &= \frac{Z_{1д}E_{1г}}{Z_{1д} + Z_{1г}} - \frac{Z_{1д}Z_{1г}}{Z_{1д} + Z_{1г}} I_{1н} \\ U_2 &= -\frac{Z_{2д}Z_{2г}}{Z_{2д} + Z_{2г}} I_{2н} \end{aligned} \right\} (3);$$

Чтобы найти токи, выразим напряжения U_1 и U_2 через несимметричную часть схемы:

$$\left. \begin{aligned} U_A = I_{аН}Z_A \\ U_B = I_{бН}Z_B \\ U_C = I_{вН}Z_C \end{aligned} \right\} (4) \Rightarrow \left. \begin{aligned} U_1 &= \frac{1}{3}(U_A + aU_B + a^2U_C) \\ U_2 &= \frac{1}{3}(U_A + a^2U_B + aU_C) \end{aligned} \right\} (5);$$

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= I_{1н}Z_{1н} + I_{2н}Z_{2н} \\ U_2 &= I_{1н}Z_{1н} + I_{2н}Z_{2н} \end{aligned} \right\} (6); \quad \left. \begin{aligned} Z_{1н} &= \frac{1}{3}(Z_A + aZ_B + a^2Z_C) \\ Z_{2н} &= \frac{1}{3}(Z_A + a^2Z_B + aZ_C) \\ Z_{0н} &= (Z_A + Z_B + Z_C) \end{aligned} \right\} (7);$$

Приравняем соответствующие напряжения из формул (3) и (6) получаем систему уравнений с двумя неизвестными $I_{1н}$ и $I_{2н}$. Решая эту систему относительно этих токов, найдём эти токи и получим:

$$\left. \begin{aligned} I_{1н} &= \frac{A_1 E_{1г} (Z_0 + A_2 Z_{2г})}{(Z_{0н} + A_1 Z_{1г})(Z_{0н} + A_2 Z_{2г}) - Z_{1н} Z_{2н}} \\ I_{2н} &= -\frac{A_1 E_{1г} Z_{1н}}{(Z_{0н} + A_1 Z_{1г})(Z_{0н} + A_2 Z_{2г}) - Z_{1н} Z_{2н}} \end{aligned} \right\} (8); \quad A_1 = \frac{Z_{1д}}{Z_{1д} + Z_{1г}}; \quad A_2 = \frac{Z_{2д}}{Z_{2д} + Z_{2г}}$$

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= A_1 E_{1г} - A_1 I_{1н} Z_{1г} \\ U_2 &= -A_2 I_{2н} Z_{2г} \end{aligned} \right\} (9)$$

Подставляя (8) в (9) получим при делении: $\epsilon_u = \frac{U_2}{U_1} = \frac{A_2 Z_{1н} Z_{2г}}{Z_{0н}^2 + A_2 Z_{0н} Z_{2г} - Z_{1н} Z_{2н}}$ (10);

$E_{2г}$ выражено через $I_{2н}$ формула (8), поделив: $\frac{I_{2н}}{I_{1н}} = \epsilon_1 = -\frac{Z_{1н}}{Z_{0н} + A_2 Z_{2г}}$ (11);

Представление несимметричной нагрузки через мощности фаз.

$$Z_{AB} = \frac{U^2_H}{S_{AB}}; Z_{BC} = \frac{U^2_H}{S_{BC}}; Z_{AC} = \frac{U^2_H}{S_{AC}};$$

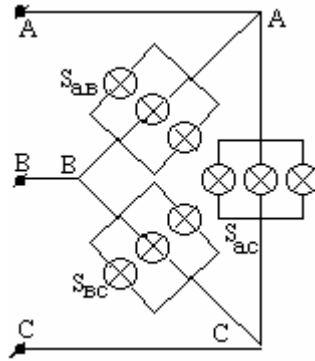


Рис.110.

$$Z = \frac{U^2}{S} = \frac{U^2 - 1}{p - jQ} = U^2 \frac{p + jQ}{(p - jQ)(p + jQ)} = U^2 \frac{p + jQ}{p^2 + Q^2} = \frac{U^2 p}{p^2 + Q^2} + \frac{U^2 jQ}{p^2 + Q^2};$$

Переходя от треугольника к звезде и подставляя выражения для Z_{AB} , Z_{BC} , Z_{AC} после соответствующих преобразований получим:

$$\left. \begin{aligned} Z_{1H} &= \frac{U^2_H}{3} \frac{S_{BC} + aS_{BC} + a^2S_{AB}}{S_{AB}S_{BC} + S_{AB}S_{BC} + S_{BC}S_{AC}} \\ Z_{2H} &= \frac{U^2_H}{3} \frac{S_{AB} + a^2S_{AC} + aS_{BC}}{S_{AB}S_{BC} + S_{AB}S_{AC} + S_{BC}S_{AC}} \end{aligned} \right\} (12); Z_{0H} = \frac{U^2_H}{3} \frac{S_{AB} + S_{BC} + S_{AC}}{S_{AB}S_{BC} + S_{AB}S_{AC} + S_{BC}S_{AC}};$$

$$(12) \Rightarrow (10): \varepsilon_u = \frac{U_2}{U_1} = \frac{A_2(S_{BC} + aS_{AC} + a^2S_{AB})Z_{2\Gamma}}{1 + \frac{A_2(S_{AB} + a^2S_{AC} + aS_{BC})Z_{3\Gamma}}{4} + \frac{S_{BC} + aS_{BC} + a^2S_{AB}}{4} + \frac{S_{AB} + a^2S_{AC} + aS_{BC}}{4}} Z_{2\Gamma} \approx A_2(S_{BC} + aS_{AC} + aS_{AB})Z_{2\Gamma} (13);$$

Выражение (13) является основным расчётным выражением.

Влияние соотношений симметричной и несимметричной нагрузки на коэффициент (искажения) напряжения несимметрии.

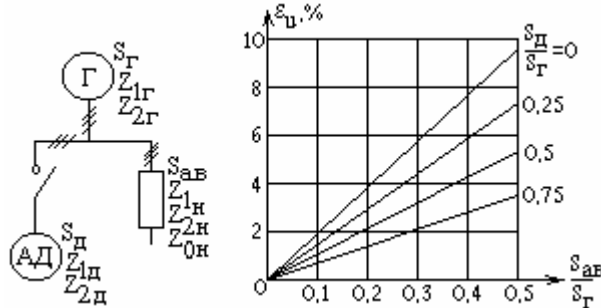


Рис.111.

Подключение АД: коэффициент несимметрии напряжения снижается при увеличении мощности подключённой асинхронной нагрузки. Реально допустимая несимметрия напряжения составляет 2...2,5%.

$f = \left(\frac{S_{AB}}{S_{\Gamma}}; \frac{S_{\text{Д}}}{S_{\Gamma}} \right)$. Линия f однозначно связывает допустимую асинхронную нагрузку с существующей несимметричной нагрузкой.

Переходный режим СЭС. Изменение напряжения частоты при внезапных изменениях нагрузки.

К переходным режимам СЭС относятся: набросы, сбросы, изменения активной и реактивной нагрузки, различного рода КЗ. При подключении к генератору или к сети активной или реактивной нагрузки возникают провалы или выбросы напряжения.

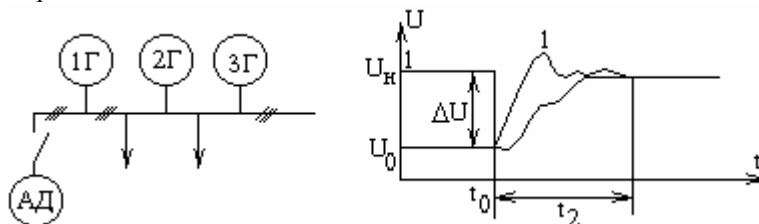


Рис.112.

Величина провала ΔU зависит от соотношения мощности генератора и подключённого двигателя, а также параметра сети и ни коим образом не определяется характеристикой системы регулирования напряжения генератора.

$$\Delta U \% = \frac{U_H - U_0}{U_H} \cdot 100\% \quad (0-50)\%;$$

1 - ТФК с быстродействующим корректором напряжения.

С машинным возбуждением восстановление напряжения идёт дольше в 3-4 раза, $t_2/t_1=3\dots4$

$$\Delta\omega = (0-5)\%, \quad \Delta\omega = \frac{\omega_H - \omega}{\omega_H} \cdot 100\% \text{ - провал (скорости) частоты. } \Delta\omega \text{ - плавно меняется.}$$

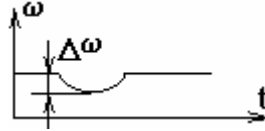


Рис.113.

При провале напряжения возникает:

- мигает свет;
- возникают отказы в аппаратуре;
- снижается скорость вращения АД.

Расчёт изменения напряжения в установках, электростанциях постоянного тока.

Наброс нагрузки на генератор постоянного тока:

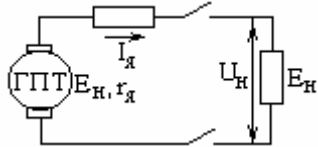


Рис.114.

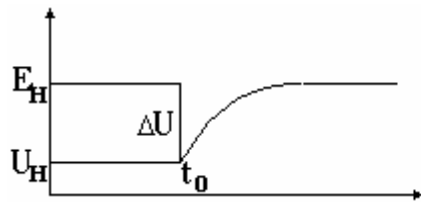
$$L_я \frac{di_я}{dt} + r_я \cdot i_я + r_н \cdot i_я = E_H;$$

Характеризует изменение тока в момент подключения нагрузки.

$$L_я \frac{di_я}{dt} \xrightarrow{\text{замена}} E_я \approx 0,1 r_я i_я, \text{ где } r_н = \frac{E_н}{i_н}; \quad i_н = \frac{E_н}{r'_я + r_н}; \quad U_н = i_н r_н = E_н \frac{r_н}{r_н + r'_я};$$

$\Delta U = E_н - U_н = E_н \cdot (r_я / (r_я + r_н))$ - определяет провал U в момент подключения нагрузки.

$$\Delta U = E_н \frac{0,1 r_я}{r_н + 0,1 r_я} = E_н \frac{0,1}{0,1} \approx 0,1 E_н$$



при подключении активной нагрузки $\Delta U \approx 10\%$

Рис.115.

Расчёт провалов напряжения в СЭС переменного тока.

При подключении нагрузки к СЭС переменный ток имеет дело с двумя составляющими провала напряжения периодической (Sin) и аperiodической (EXP)

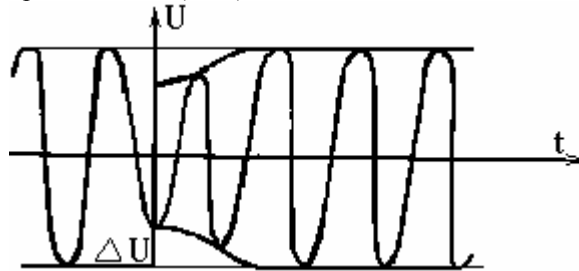


Рис.116.

1. Использование универсальных кривых для расчёта токов КЗ.
2. Аналитический метод расчёта провалов напряжений.
3. Использование расчётных кривых для ΔU .

4. Использование математического моделирования СЭС.

Первый и третий способы являются самыми простейшими и используются при ориентировочном расчёте ΔU . Точность 10%. Второй способ более сложен, но даёт более точные результаты, точность 7%. Четвёртый способ производится по сложному алгоритму, но точность в пределах 5%.

1. В момент включения представляется, что КЗ производится за подключаемой нагрузкой.

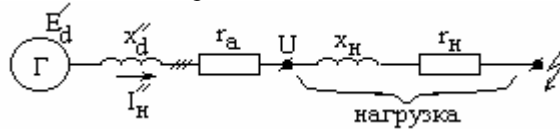


Рис.117.

Для каждого типа генератора в отраслевом стандарте предусмотрено семейство кривых. Существуют также и универсальные кривые.

$$I_{6r} = \frac{S_r}{\sqrt{3} \cdot U_{нл}}; I_{nt}^* = \frac{I_{nt}}{I_{6r}}; Z_{pez}^* = \frac{Z_{pez}}{Z_6}; Z_6 = \frac{U_{6r}}{I_{6r}}; U_{6r} = U_{нф}; Z_{pez} = (r_a + r_n) + j \cdot (x_d'' + x_n); I_{уд} = I_{nt} \cdot K_y, \text{ где}$$

$$K_y - \text{ударный коэффициент. } K_y = 1,6 \dots 1,8. U_{t0} = I_{уд} \cdot Z_n; \Delta U = \frac{E_{жк} - U_{t0}}{E_{жк}}$$

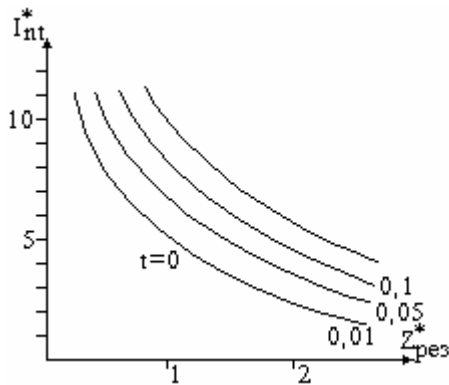


Рис.118.

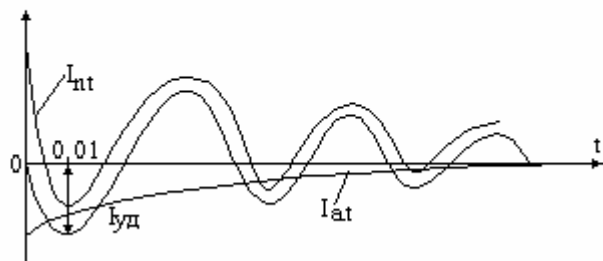


Рис.119.

$$Z_{pez} = (r_a + r_n) + j \cdot (x_d'' + x_n);$$

$$I_{уд} = I_{nt} \cdot K_y, K_y - \text{ударный коэффициент, } K_y = 1,6 \dots 1,8.$$

$$U_{t0} = I_{уд} \cdot Z_n;$$

2. Метод основан на векторной диаграмме явнополюсного СГ, точность выше, поскольку используются все параметры генератора.

Векторная диаграмма явнополюсного СГ.

Для построения диаграммы необходимо знать параметры генератора и нагрузки.

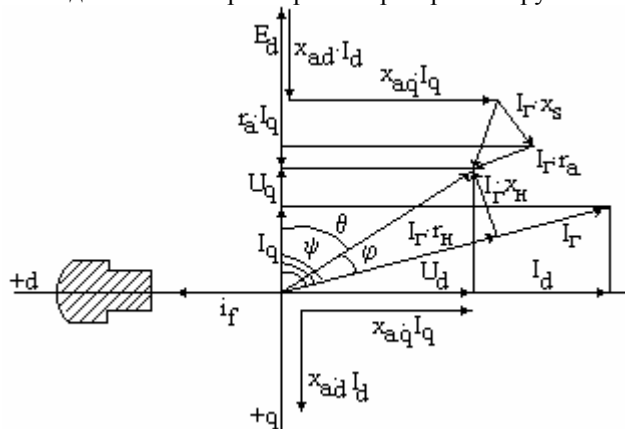


Рис.120. Векторная диаграмма Blondеля.

Исходные данные : нагрузка- x_n, r_n, I_r, U_n ; генератор - $x_s, r_a, x_d, x_q, x_{ad} = x_d - x_s$;

где x_s - сопротивление рассеивания статора; r_a - активное сопротивление статора; x_d и x_q - синхронное индуктивное сопротивление по осям d и q.

1) Строится треугольник напряжения на нагрузке $\cos \varphi = \frac{r_n}{Z_n}; Z_n = \sqrt{x_n^2 + r_n^2}$;

2) Определяется угол φ , он связывает параметры генератора и параметры нагрузки.

$$\cos \psi = \frac{r_n + r_a}{Z_\psi}; \sin \psi = \frac{(x_n + x_q) \omega^*}{Z_\psi}; \omega^* = \frac{\omega}{\omega_n}; Z_\psi = \sqrt{(r_n + r_a)^2 + \omega^{*2} (x_n + x_q)^2};$$

Зная ψ строим оси d и q.

- 3) Раскладываем U и I на компоненты по осям d и q.
 - 4) Находим полное падение напряжения в статоре.
 - 5) Строим вектора $x_d I_d$ и $x_q I_q$ и переносим их вверх и находим $E_d = x_{ad} i_f$. Находим i_f .
- На основании векторной диаграммы выводится ряд расчётных соотношений.

По оси q:

Уравнения напряжения статора генератора:

$$\left. \begin{aligned} U_q &= -r_a I_q + x_{ad} i_f - x_d I_d && \text{п о о с я д q} \\ U_d &= -r_a I_d + x_q I_q && \text{п о о с я д d} \end{aligned} \right\} (1); \quad \begin{aligned} I_d x_d &= (x_s + x_{ad}) I_d = x_s I_d + x_{ad} I_d \\ I_q x_q &= I_q (x_s + x_{aq}) = x_s I_q + x_{uq} I_q \end{aligned} \quad \begin{array}{l} \text{п о т о к} \\ \text{р а с с е и в.} \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{р е а к ц и.} \\ \text{я к о р я} \end{array}$$

$$\left. \begin{aligned} U_q &= r_n I_q + x_n I_d \\ U_d &= r_n I_d - x_n I_q \end{aligned} \right\} (2); (3) \quad \begin{cases} U_f = r_f i_f + \frac{d\psi_f}{dt} - \text{для обмотки возбуждения} \\ \psi_f = x_f i_f - I_d x_{ad} - \text{для потока сцепления} \end{cases}$$

В аналитическом методе учитывают переходные процессы происходящие в ОВГ и не учитывается переходные процессы в статоре генератора. В приведённых уравнениях не учитывается трансформаторная ЭДС (ЭДС наведённая в обмотках при изменении тока в другой обмотке которая трансформаторно связана с первой).

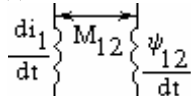


Рис. 121.

Приведённая система уравнений наз. упрощёнными уравнениями Парка-Горева.

Аналитический метод расчёта провала напряжения.

Производится на основании уравнений составленных по векторной диаграмме явнополюсного СГ. Приведения уравнения генератора к уравнению его нагрузки по соответствующим осям d и q и учитывая уравнения потокосцепления для обмотки возбуждения, получим следующую систему.

$$(4) \quad \begin{cases} (r_a + r_n) I_q + (x_d + x_n) \omega^* I_d - x_{ad} \omega^* i_f = 0 \\ -\omega^* (x_q + x_n) I_q + (r_a + r_n) I_d = 0 \\ -x_{ad} I_d + x_f i_f = \psi_f \end{cases}$$

где ω^* - учитывает тот факт, что машина может работать с частотой отличной от номинальной.

Уравнения синхронной машины записаны в системе относительных единиц:

$$I_6 = I_{фн}; U_6 = U_{фн}; \omega_6 = \omega_0 = 314; f = 50 \text{ Гц.}$$

Параметры ротора приведены к статору через коэффициент трансформации, аналогично применению асинхронной машины, т.е. рассматривается приведённая синхронная машина.

Решим систему (4) относительно токов матричным способом.

$$\begin{vmatrix} r_a + r_n & (x_d + x_n) \cdot \omega^* & -x_{ad} \cdot \omega^* \\ -(x_q + x_n) \cdot \omega^* & r_a + r_n & 0 \\ 0 & -x_{ad} & x_f \end{vmatrix} \begin{vmatrix} I_q \\ I_d \\ i_f \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ \psi_f \end{vmatrix};$$

$$\Delta = x_f \cdot [(r_a + r_n)^2 + (x_d + x_n)(x_q + x_n) \cdot \omega^{*2}] - (x_q - x_n) \cdot x_{ad}^2 \cdot \omega^{*2} = x_f \cdot (r_a + r_n)^2 + \frac{x_f \cdot (x_d + x_n) - x_{ad}^2}{x_f (x_d + x_n)(x_q + x_n) \cdot \omega^{*2}} \cdot (x_q + x_n) \cdot \omega^{*2};$$

где $x'_d = x_d - \frac{x_{ad}^2}{x_f}$ - переходное сопротивление из схемы замещения;

$$\Delta = x_f \cdot [(r_a + r_n)^2 + (x'_d + x_n)(x_q + x_n) \cdot \omega^{*2}];$$

$$I_q = \frac{1}{\Delta} \cdot \begin{vmatrix} 0 & (x_d + x_n) \cdot \omega^* & 0 \\ 0 & r_a + r_n & x_f \\ \psi_f & -x_{ad} & -x_{ad} \cdot \omega^* \end{vmatrix} = \frac{(r_a + r_n) \cdot x_{ad} \cdot \omega^*}{\Delta} \cdot \psi_f;$$

$$I_d = \frac{1}{\Delta} \cdot \begin{vmatrix} r_a + r_H & 0 & -X_{ad} \cdot \omega^* \\ -(x_q + x_H) \cdot \omega^* & 0 & 0 \\ 0 & \psi_f & X_f \end{vmatrix} = \frac{(x_a + x_H) \cdot X_{ad} \cdot \omega^*}{\Delta} \cdot \psi_f;$$

$$i_d = \frac{1}{\Delta} \cdot \begin{vmatrix} r_a + r_H & (x_d + x_H) \cdot \omega^* & 0 \\ -(x_q + x_H) \cdot \omega^* & r_a + r_H & 0 \\ 0 & -X_{ad} & \psi_f \end{vmatrix} = \frac{(r_a + r_H)^2 + (x_d + x_H) \cdot (x_q + x_H) \cdot \omega^{*2}}{\Delta} \cdot \psi_f;$$

$$I_{t0} = \sqrt{I_{d_{t0}}^2 + I_{q_{t0}}^2};$$

При XX $I_d=0$; $I_q=0 \rightarrow \psi_{f0}=i_{f0} \cdot x_f$; $U_{t0}=I_{t0} \cdot Z_H$ - напряжение на нагрузке.

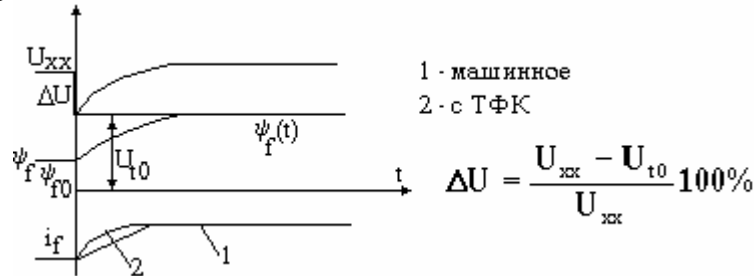


Рис.122.

Для того чтобы найти характер изменения напряжения во времени $U_f=f_1(t)$ необходимо знать характер зависимости $i_f=f_1(t)$. Подставляя закон изменения тока возбуждения i_b в уравнение потокосцепления ОБ получим закон изменения потокосцепления во времени. $U_f = r_f \cdot i_f + \frac{d\psi_f}{dt}$ (5);

Подставим ток i_f в уравнение (5) и опуская промежуточные выкладки получим:

$$\frac{d\psi_f}{dt} + \frac{1}{T_d'} \psi_f = U_f \quad (6) \quad T_d' = \frac{x_f(r_a + r_H)^2 + (x_d' + x_H)(x_q + x_H)\omega^{*2}}{r_f(r_a + r_H)^2 + (x_d + x_H)(x_q + x_H)\omega^{*2}};$$

где T_d' - постоянная времени обмотки статора с учётом ОБ.

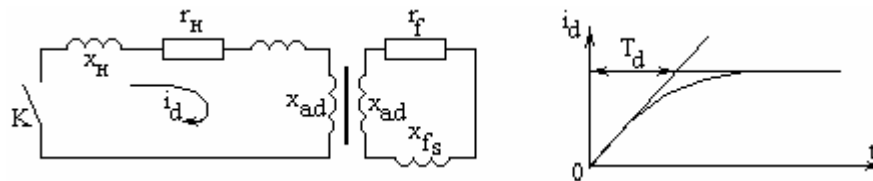


Рис.123.

Зная $U_f=f_3(t)$ решим систему (6).

При условии скачкообразного изменения $U_f=f(t)$ решение (6) имеет вид:

$$\psi_f(t) = (\psi_{f0} - U_f T_d') e^{-\frac{t}{T_d'}} + U_f T_d' \quad (7);$$

Подставляя в уравнение (7) время, начальное потокосцепление находим $\psi_f(t)$ для каждого момента времени подставляются в $I_d(t)$ и $I_q(t)$ и определяем $I(t)$ в каждый момент времени. $U(t)=I(t) \cdot Z_H$.

Определение провалов напряжения по методу расчётных кривых.

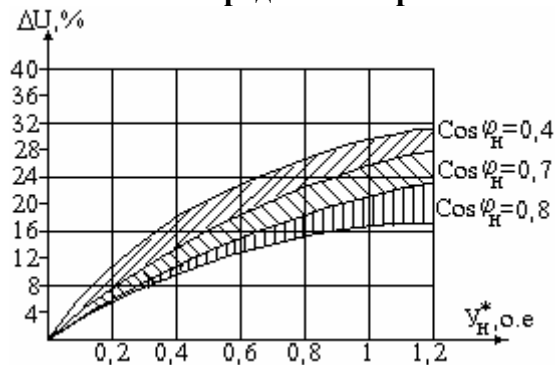


Рис.124.

$$y_H^* = \frac{1}{Z_H^*}; Z_H^* = \frac{Z_H}{Z_6};$$

$$Z_H = \sqrt{x_H^2 + r_H^2}; \cos \phi_H = \frac{r_H}{Z_H}$$

Метод расчёта изменения напряжения и частоты СЭС на математических моделях.

Данный метод применяется при научных исследованиях и проверочных расчётах новых видов разрабатываемых СЭС. Моделирование производится:

- Для анализа существующих СЭС.
- Анализ проектируемых СЭС.

Математическая модель СЭС представляет собой систему дифференциальных уравнений в которую входят:

1. Уравнение электромагнитного равновесия для каждого СГ.
2. Уравнение движения роторов СГ, совместно с приводным двигателем.
3. Уравнение регуляторов напряжений СГ.
4. Уравнение тепловых двигателей.
5. Уравнение наиболее мощных АД записывается своя система уравнений.
6. Уравнения статических нагрузок.
7. Уравнения связей по токам и напряжениям.

Для моделирования, математическая модель записывается как правило в системе координат "d q 0". Ведущий генератор: при параллельной работе нескольких генераторов СЭС, один принимается за ведущий, т.е. он определяет частоту тока в системе. Система УРЧН, остальные (ведомые) генераторы подстраивает к ведущему генератору.

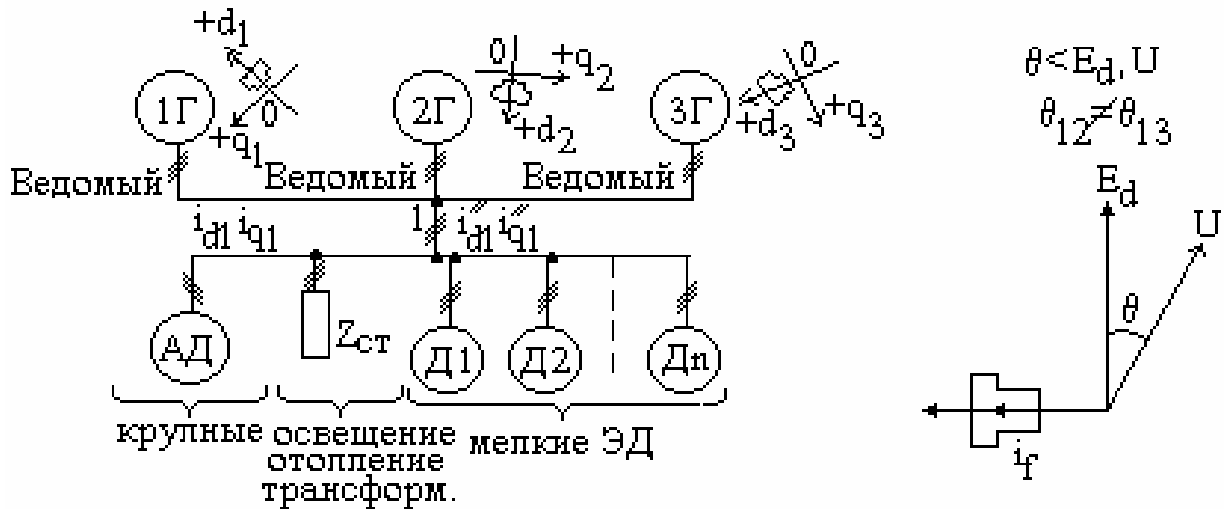


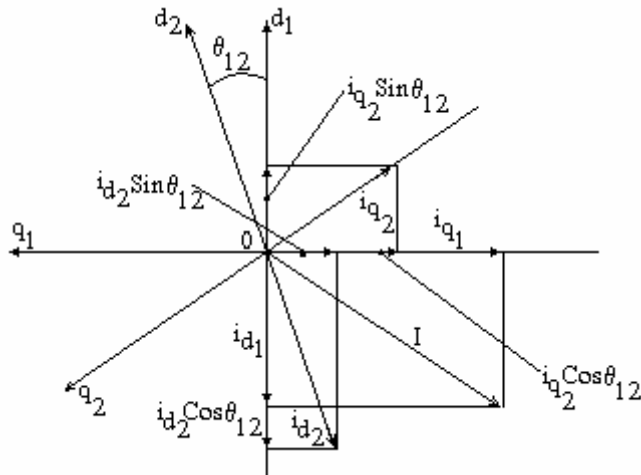
Рис.125.

Формулы преобразования координат.

Под обобщённым вектором понимается вектор являющейся геометрической суммой мгновенных значений фазных величин, при этом направления мгновенных значений соответствуют расположению магнитных осей фаз. Скорость вращения обобщённого вектора равна частоте сети, а у СГ равно частоте вращения ротора.

Смысл преобразования в том, что для 3-х фазного переменного тока переходим к 2-х фазным постоянно-го тока. $i_a, i_b, i_c \rightarrow I_d, I_q$. Для преобразования уравнений ведомых генераторов и нагрузок к осям ведущего генератора используются формулы поворота координатных осей.

θ_{12} - разность между осью d_1 и d_2 .



$$\begin{aligned} i_{d1}^n &= i_{d2} \cos \theta_{12} - i_{q2} \sin \theta_{12} ; \\ i_{q1}^n &= i_{q2} \cos \theta_{12} + i_{d2} \sin \theta_{12} \end{aligned}$$

Рис.126.

Для того чтобы применить первый закон Кирхгоффа необходимо токи генераторов 2Г и 3Г, а также токи всех

$$\text{нагрузок предварительно преобразовать по (1) } \left\{ \begin{array}{l} \frac{d\theta_{12}}{dt} = \omega_1 - \omega_2 \\ \frac{d\theta_{13}}{dt} = \omega_3 - \omega_1 ; \\ \text{-----} \\ \frac{d\theta_{1n}}{dt} = \omega_n - \omega_1 \end{array} \right.$$

Дифференциальные уравнения математических моделей отдельных элементов СЭС.

Уравнение для СГ. Используется полное уравнение Парка-Горева с учётом трансформаторных ЭДС. СГ “d, q, 0”.

$$\text{с т а т } \rho \left\{ \begin{array}{l} U_d = -r_a I_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \psi_q \omega \\ U_q = -r_a I_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \psi_d \omega \end{array} \right. \quad \text{р о т } \Phi \left\{ \begin{array}{l} U_f = r_f i_f + \frac{d\psi_f}{dt} \\ 0 = r_{1D} I_{1D} + \frac{d\psi_{1D}}{dt} ; \\ 0 = r_{1Q} I_{1Q} + \frac{d\psi_{1Q}}{dt} \end{array} \right.$$

где $r_a \cdot I_d$ - активное падение напряжения статора.

$d\psi_d/dt$ - трансформаторная ЭДС по оси d.

$\psi_q \cdot \omega$ - ЭДС вращения;

$r_f i_f$ - активное падение напряжения ОВ.

ψ_f - суммарное потокосцепление ОВ.

(Δ) - уравнение демпферных контуров.

r_{1D} - активное сопротивление продольного демпферного контура.

ψ_{1D} - потокосцепление продольного демпферного контура.

$$\text{с т а т } \rho \left\{ \begin{array}{l} \psi_d = -x_d I_d + x_{ad} i_f + x_{ad} I_{1D} \\ \psi_q = x_q I_q + x_{ad} I_{1Q} \end{array} \right.$$

Запишем уравнения для потокосцеплений:

$$\text{р о т } \Phi \left\{ \begin{array}{l} \psi_f = x_f i_f - x_{ad} I_d + x_{ad} I_{1D} ; \\ \psi_{1Q} = x_{1Q} I_{1Q} - x_{ad} I_q \\ \psi_{1D} = x_{1D} I_{1D} - x_{ad} I_d + x_{ad} i_f \end{array} \right.$$

Каждому магнитному потоку соответствует своё сопротивление и своя индуктивность: $F \equiv x \equiv L$.

где x_s - индуктивное сопротивление рассеивания. $x = \omega \cdot L$; $\Phi = S \cdot F$;

$x_q = x_s + x_{aq}$; $x_d = x_s + x_{ad}$; $x_f = x_{fs} + x_{ad}$; $x_{1D} = x_{sD} + x_{ad}$; $x_{1Q} = x_{sQ} + x_{aq}$;

1 - означает что многостержневая демпферная обмотка СГ приведена к эквивалентному одновитковому контуру.

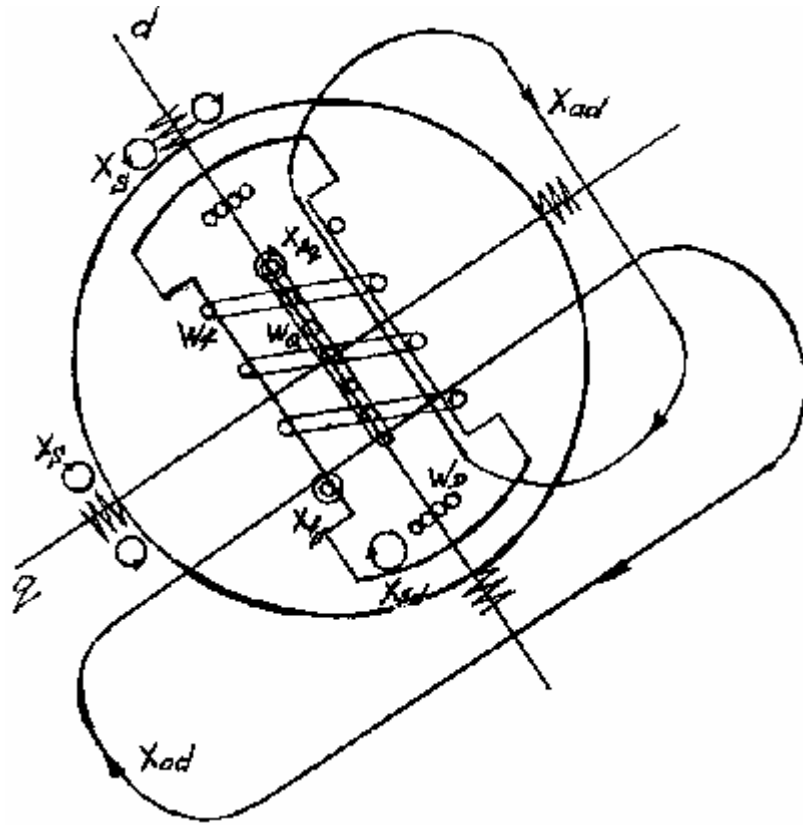


Рис.127.

Система возбуждения.

Для каждой системы возбуждения необходимо записать систему дифференциальных уравнений в которую должны войти: возбудитель, регулятор напряжения, корректор напряжения. Запишем систему уравнений для прямого амплитудно-фазового компаундирования (МСК).

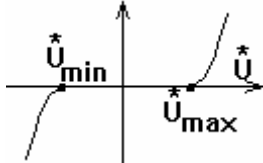


Рис.128.

$$U_f = \frac{r_f + r_k}{X_{ad}} \cdot (1 + K_i \cdot K_u \cdot I_d) \cdot r_f \cdot i_f;$$

где r_k - активное сопротивление компаундирующего дросселя.

K_i - коэффициент обратной связи по току.

K_u - коэффициент обратной связи по напряжению.

$$K_u = \begin{cases} U^*_{\min} < U^* < U^*_{\max} \rightarrow 1 - \frac{K_{u\max} - K_{u\min}}{U^*_{\max} - U^*_{\min}} (U^* - 1) \\ U^* \leq U^*_{\min} \rightarrow K_{u\max} \\ U^* \geq U^*_{\max} \rightarrow K_{u\min} \end{cases}; K_1 = \frac{(r_a + r_H)^2}{x_q + x_H} + x_d + x_H - \sqrt{1 + \frac{(r_a + r_H)^2}{(x_q + x_H)^2}};$$

Все параметры в относительных единицах. Всё есть в книге Г.Н. Супрун "Синтез систем электроэнергетики судов, 1972 год.

где r_a - сопротивление статора;

r_H и x_H - активное и индуктивное сопротивления нагрузки.

Уравнение движения ротора генератора: $\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{T_a} (M_d - M_{cr});$

где T_a - механическая постоянная времени агрегата;

M_d - момент развиваемый тепловым двигателем (дизелем).

M_{cr} - электромагнитный момент сопротивления генератора.

$M_{cr} = \psi_d \cdot I_q - \psi_q \cdot I_d;$

Система уравнений теплового двигателя.

$\frac{dM_d}{dt} = -\frac{1}{T_M}(\rho_d - Z)$, где ρ_d - положение рейки регулятора топливного насоса. Определяет количество топлива одновременно подаваемое в цилиндр. Z - положение координаты устройства управления рейкой топливного насоса (угол отклонения шариков центробежного регулятора).

$$\text{Уравнение центробежного регулятора: } Z = -\frac{1}{\delta\omega}(\omega^* - 1);$$

Поскольку моделируется общая система уравнений агрегата, то постоянная времени пренебрегается, а именно постоянная времени гидроусилителя и центробежного регулятора. $\delta\omega$ - статизм характеристики регулятора.

В качестве нагрузок выступают мощные АД для которых записываются отдельные системы уравнений, а именно электромеханическое уравнение движения ротора АД вместе с агрегатом и уравнение электромагнитного равновесия: $\frac{d\omega_p}{dt} = \frac{P}{J}(M_d - M_n)$, где p - число пар полюсов; J - момент инерции. $M_\partial = \psi^{\partial_{sd}} i^{\partial_{sq}} - \psi^{\partial_{sq}} i^{\partial_{sd}}$;

Токи и потокосцепления определяются из системы электромагнитного равновесия:

$$\text{с т а т } \rho \begin{cases} U^{\partial_d} = r_s i_{sq} + \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \psi_{sq} \omega_p \\ U^{\partial_q} = r_s i_{sq} + \frac{d\psi_{sq}}{dt} + \psi_{sd} \omega_p \end{cases}; \text{ р о т } \Phi \begin{cases} 0 = r_p i_{rd} + \frac{d\psi_{rd}^{\partial}}{dt} - \psi_{rq}^{\partial} \omega_p S \\ 0 = r_p i_{rq} + \frac{d\psi_{rq}^{\partial}}{dt} + \psi_{rd}^{\partial} \omega_p S \end{cases};$$

где r_s и r_p - активное сопротивление статора и ротора.

S - скольжение ротора.

ω_p - скорость вращения ротора.

$$\text{Уравнения потокосцеплений: с т а т } \rho \begin{cases} \psi^{\partial_{sd}} = (x_a + x^{\partial_s}) i_{sd} + x_a i_{rd} \\ \psi^{\partial_{sq}} = (x_a + x^{\partial_s}) i_{sq} + x_a i_{rq} \end{cases}; \text{ р о т } \Phi \begin{cases} \psi^{\partial_{rd}} = (x_a + x^{\partial_r}) i_{rd} + x_a i_{sd} \\ \psi^{\partial_{rq}} = (x_a + x^{\partial_r}) i_{rq} + x_a i_{sq} \end{cases};$$

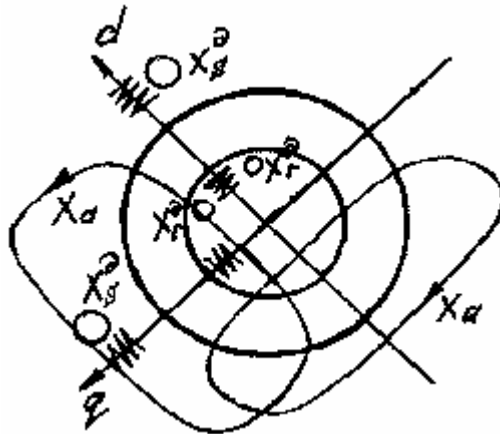


Рис.129.

Уравнения эквивалентной асинхронной и статической нагрузки.

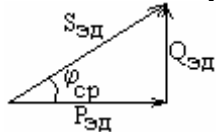


Рис.130.

$$r_{эд} = \frac{P_{эд}}{I_{эдср}^2}; \quad x_{эд} = \frac{Q_{эд}}{I_{эдср}^2}; \quad \text{tg}\varphi_{ср} = \frac{Q_{ср}}{P_{ср}}; \quad Q_{эд} = P_{эд} \cdot \text{tg}\varphi_{ср};$$

$$P_{эд} = \sum_{i=1}^n P_{дi}; \quad \text{Cos}\varphi_{ср} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{Cos}\varphi_{дi}}{n}; \quad P_{д} = 3 \cdot U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \text{Cos}\varphi_{д} \cdot \eta_{д} = \sqrt{3} \cdot U_{л} \cdot I_{\phi} \cdot \text{Cos}\varphi_{д} \cdot \eta_{д}; \quad \eta_{ср} = \frac{\sum_{i=1}^n \eta_{дi}}{n}; \quad U_{\phi} = \frac{U_{л}}{\sqrt{3}};$$

$$I_{срэд} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_{л} \cdot \text{Cos}\varphi_{эд,ср} \cdot \eta_{ср,эд}};$$

ЭД - эквивалентный двигатель;

Из ТОЭ - изменение мощностей и изменение сопротивлений совпадают.

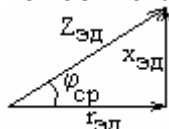


Рис.131.

Для АД: $r_n = r_{эд}$; $x_n = x_{эд}$;

Для статической нагрузки: $r_n = r_{ст}$; $x_n = x_{ст}$.

Уравнения математической модели для эквивалентной двигательной нагрузки и другой статической нагрузки

(отопление, освещение) в осях d и q имеют вид:

$$\begin{cases} U_d = r_n i_{nd} + x_n \frac{di_{nd}}{dt} - x_n i_{nq} \omega^* \\ U_q = r_n i_{nq} + x_n \frac{di_{nq}}{dt} + x_n i_{nd} \omega^* \end{cases};$$

Следующий этап составления математической модели СЭС заключается в объединении выше приведённых уравнений в единую систему дифференциальных уравнений СЭС. Объединение возможно если все они будут записаны в единой системе координатных осей (т.е. базисной). За базисную как правило принимают систему координат “d-q-0” ведущего генератора. Все выше приведённые уравнения, кроме уравнения ведущего СГ должны быть преобразованы к указанной координатной системе уравнения ведомых СГ. Вследствии магнитной симметрии АМ форма записи уравнений не меняется от скорости вращения координатной системы. Поэтому при объединении уравнений синхронной машины с уравнениями ведущего генератора достаточно принять скорость вращения координатной системы двигателя скорости вращения ротора ведущего генератора. $\omega_p^* = \omega_1^*$

После этого записывается вся система уравнений для СЭС. Полученная система д/у должна быть нормализована, т.е. все уравнения должны быть разрешены относительно первых производных, как неизвестных, на каждом шаге расчёта (1 шаг соответствует 0,1...0,001). Для решения алгебраических уравнений применяется алгоритм Гаусса, а для д/у метод Рунге-Кутты. Численное решение указанных систем производится в каждой точке. Как правило интегрирование производится с шагом не более 5 эл. градусов. Математическое моделирование переходных процессов СЭС по полным уравнениям Парка-Горева осуществляется в исключительных случаях:

- научных исследованиях;
- при оценке реально работающих СЭС.

Параллельная работа генераторных агрегатов СЭС.

Преимущества:

1. Позволяет перевести нагрузку с одного генератора на другой без перерыва питания (улучшается гибкость управления нагрузкой).
2. Улучшается качество вырабатываемой эл. энергии за счёт повышения эл. снабжения.
3. Уменьшается число коммутирующих аппаратов ГРЩ.
4. Позволяет лучше использовать установленную мощность генераторных агрегатов при правильном их подборе.

Недостатки:

1. Усложнение схемы управления автоматикой электростанции (появление новых приборов: устройство синхронизации генераторов УСГ, устройство распределения активных нагрузок, устройство распределения реактивных нагрузок между параллельно работающими генераторами).
2. Требуется более квалифицированное обслуживание эл. станции из-за увеличения сложности оборудования.
3. Увеличение токов КЗ. (Коммутационные аппараты, отключающие ток КЗ, должны быть рассчитаны на повышенные токи).
4. Устойчивость параллельной работы генераторных агрегатов. (Возможны незатухающие (труднозатухающие) автоколебания активной и реактивной мощности между генераторами).

Параллельная работа генераторов постоянного тока.

Поскольку характеристики генераторов отличаются из-за заводских допусков ($U=f(I)$), то пропорциональное распределение токов нагрузки между ними затруднено во всем рабочем диапазоне. Причиной отличия характеристик являются:

- различное сопротивление меди;
- неодинаковое количество витков обмоток;
- примеси в стали.

Основная проблема - правильное распределение активной нагрузки между основными агрегатами.

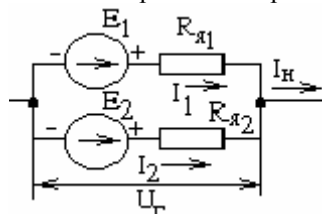


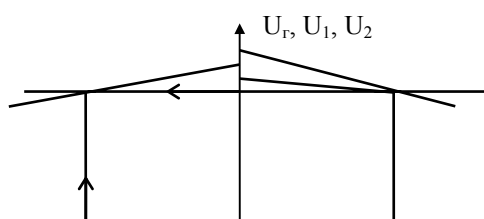
Рис.132.

$$\begin{aligned} U_{г1} &= E_{г1} - I_{г1} \cdot R_{я1} \\ U_{г2} &= E_{г2} - I_{г2} \cdot R_{я2} \\ U_{г1} &= U_{г2} = U_n \\ E_{г1} &= C_e \cdot n_1 \cdot \Phi_1 \\ E_{г2} &= C_e \cdot n_2 \cdot \Phi_2 \end{aligned}$$

$$2 \cdot U_n = E_{г1} + E_{г2} - (I_{г1} \cdot R_{я1} + I_{г2} \cdot R_{я2})$$

$$U_n = \frac{E_{г1} + E_{г2}}{2} - R_{я} \left(\frac{I_{г1} + I_{г2}}{2} \right)$$

Поднять или опустить характеристику можно с помощью изменения E, т.е. меняя n_1, n_2 или Φ_1, Φ_2 . Будем менять поток (т.е. уменьшать или увеличивать возбуждение (I_f) у генераторов пораздельно).



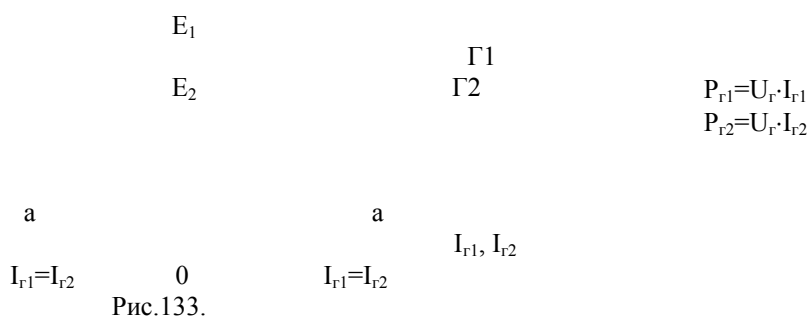


Рис.133.

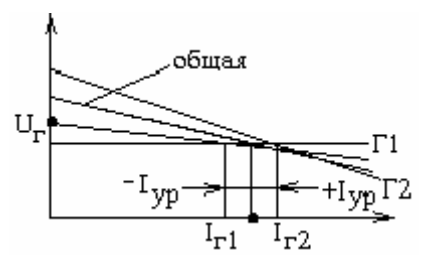
Для одинаковых генераторов R_{я1}=R_{я2}=R_я. Для того чтобы характеризовать параллельную работу генераторов вводится понятие уравнивающего тока, который равен полуразности реальных токов генератора:

$$I_{ур} = \frac{I_{Г1} - I_{Г2}}{2} ;$$

$$I_{Г1} = I_{Г} + I_{ур};$$

$$I_{Г2} = I_{Г} - I_{ур};$$

где I_{ур} - уравнивающий ток. Таким образом между параллельно работающими генераторами циркулирует уравнивающий ток.

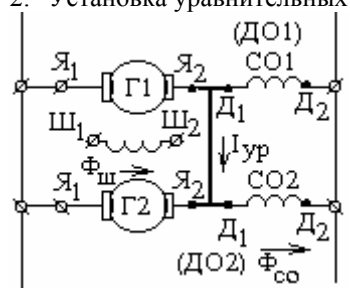


$$I_{Г1} - I_{Г2} = 2 \cdot I_{ур}$$

Рис.134.

Генераторы, у которых не приняты специальные меры по защите от уравнивающего тока, практически не работоспособны. Правила регистра допускают величину уравнивающего тока 10% от I_{Гном}. Параллельная работа генераторов практически обеспечивается следующими способами :

1. Подбор генераторов на заводе изготовителе для параллельной работы по идентичности нагрузочных характеристик. (Различие допускается до 10% в основном рабочем диапазоне).
2. Установка уравнивающих соединений между якорями генераторов.

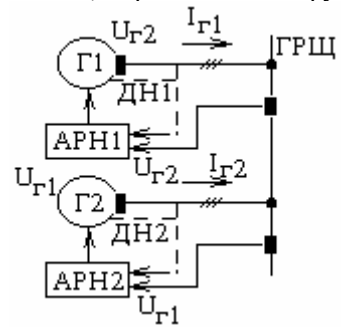


$$\Phi = \Phi_{ш} + \Phi_{со}$$

При отсутствии уравнивающего соединения потоки Φ₁ и Φ₂ заметно отличаются друг от друга, поэтому отличаются ЭДС и токи. Если установить уравнивающее соединение то отличие токов, Φ₁ и Φ₂ уменьшится за счет выравнивания потоков Φ_{со} (сервисных обмоток). При этом ЭДС сближаются и уравнивающий ток уменьшается.

Рис.135.

3. (Регулировка) уменьшение уравнивающего тока за счет поворота щеткодержателей. У машин постоянного тока есть физическая и геометрическая нейтраль. При повороте щеток в сторону вращения, падение напряжения в нем увеличивается, а против вращения - уменьшается за счет реакции якоря при этом ухудшаются условия коммутации.
4. Если генераторы имеют автоматические устройства стабилизации напряжения, то уменьшение уравнивающего тока, выравнивание нагрузок, весьма затруднительно.



$$\Delta U_{к1} \approx r_{к1} \cdot I_{Г1};$$

$$\Delta U_{к2} \approx r_{к2} \cdot I_{Г2}.$$

Если датчики напряжения установлены непосредственно на клеммах генератора, то из-за разных сопротивлений кабельных трасс r_{к1} ≠ r_{к2}. Падение напряжения на кабелях разные. Величина I_{ур} возрастет. Если же датчики напряжения установить на шинах ГРЩ, то I_{ур} уменьшится, поскольку АРН будут учитывать разность падения напряжения в кабелях.

Рис.136.

Следует заметить, что при наличии АРН у генераторов постоянного тока параллельная работа генераторов затруднена, т.к. всегда имеется уравнивающий ток, ток переменной величины и направления.

5. Рекомендуется применять генераторы с более жёсткой характеристикой.

Параллельная работа синхронных генераторов .

При параллельной работе СГ из-за разности ЭДС возникает уравнивающий ток . Однако из-зи преимущественно индуктивного характера цепи уравнивающего тока этот ток является реактивным. Поэтому он не загружает дизели активной составляющей, однако при этом загружает статор генератора и обмотку возбуждения током возбуждения, поскольку при параллельной работе напряжения генераторов одинаковое, а реактивная составляющая токов нагрузки разные.

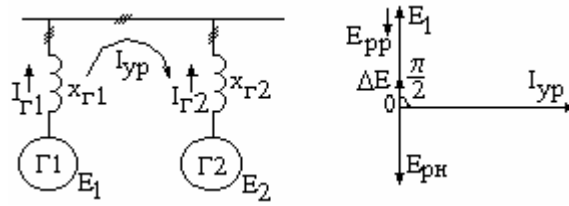


Рис.137.

где E_{pp} - ЭДС размагничивающей реакции; E_{pn} - ЭДС намагничивающей реакции.

$I_{ур}$ - имеет реактивный характер и практически не загружает первичные двигатели. Для устранения уравнивающих токов параллельно работающим генераторам необходимо:

1. Выравнять ЭДС генераторов за счёт воздействия на них $I_{ов}$;

2. Ликвидировать разность фаз между ЭДС: $\Delta\varphi = 0$; $E_1 = E_2$; $I_{ур} = \frac{\Delta E}{x_{Г1} + x_{Г2}}$.

Распределение реактивных нагрузок между параллельно работающими генераторными агрегатами.

Рассматриваются реактивные составляющие токов, поскольку активные составляющие не размагничивают генератор.

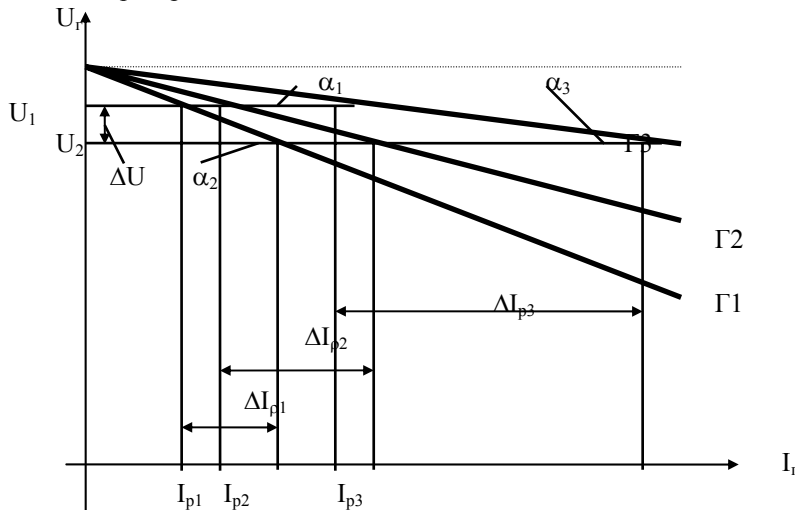


Рис.138.

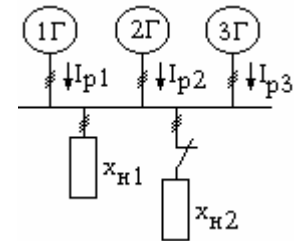


Рис.139.

Если у одного из генераторов окажется астатическая характеристика, то для параллельной работы такой генератор непригоден. $\text{tg}\alpha = \frac{\Delta U}{\Delta I_p}$; $\Delta U = \text{tg}\alpha_i \cdot I_{pi}$, где $i=1, 2, 3$. $\text{tg}\alpha$ - коэффициент статизма. Найдём токи:

$$K_{1c} = \text{tg}\alpha_1 = \frac{U_1 - U_2}{\Delta I_{p1}} = \frac{\Delta U}{\Delta I_{p1}} \quad \Delta I_{p1} = \frac{\Delta U}{K_{1c}}$$

$$K_{2c} = \text{tg}\alpha_2 = \frac{\Delta U}{\Delta I_{p2}} \quad \Rightarrow \Delta I_{p2} = \frac{\Delta U}{K_{2c}};$$

$$K_{3c} = \text{tg}\alpha_3 = \frac{\Delta U}{\Delta I_{p3}} \quad \Delta I_{p3} = \frac{\Delta U}{K_{3c}}$$

$$\sum_{i=1}^n I_{p1} = \Delta U \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{ic}} \right); \quad \Delta U = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta I_{pi}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{ic}}} - \text{общее изменение напряжения в системе при набросе нагрузки. В}$$

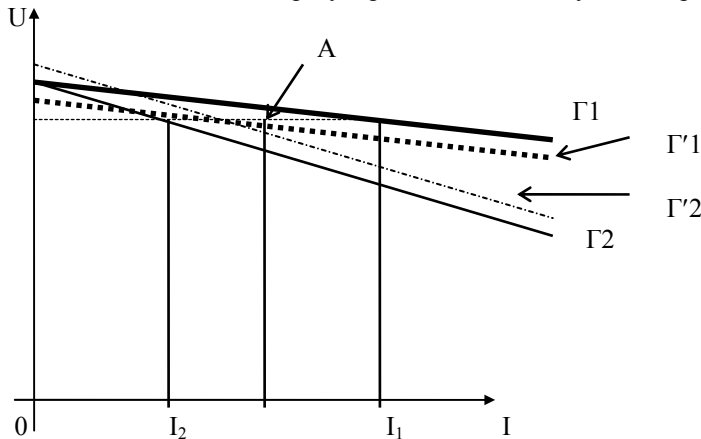
числителе - суммарный наброс реактивной нагрузки.

$$\Delta I_{Pi} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta I_{Pi}}{\frac{1}{K_{ic}} \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{ic}}} \quad (2)$$

- В числителе формулы (2) суммарное изменение тока при подключении на-

грузки. Знаменатель - это сумма обратных коэффициентов статизма. Данная формула показывает распределение реактивных токов при отсутствии каких-либо автоматических устройств. Для параллельной работы необходимо подбирать генераторы с одинаковым коэффициентом статизма. Правила Регистра допускают разброс величин реактивных токов параллельно работающих генераторов не более чем на 10%. если в параллели работают генераторы разной мощности, то реактивная нагрузка между ними должна распределяться пропорционально их мощности.

Из (2) также видно, что чем жёстче будет механическая характеристика, т.е. чем больше K_{ic} (коэффициент статизма), тем большую реактивную нагрузку примет на себя генератор. $K_{ic} \approx 0,01; 0,02; 0,03$. Способы выравнивания реактивных нагрузок между параллельно работающими генераторными агрегатами. Оно производится за счёт дополнительного регулирования тока возбуждения работающих генераторов.



Перемещение характеристик (нагрузочных) осуществляется регулированием возбуждения (с помощью различных способов).

Устройство и схемы пропорционального распределения реактивных нагрузок между параллельно работающими генераторами.

Если обычное соединение не позволяет добиться отклонения реактивных токов при параллельной работе менее чем на 10%, то применяются специальные схемы выравнивания реактивных нагрузок. Наиболее распространены три способа. Они подразделяются по типам генераторных агрегатов.

1. В параллель подключены генераторы одинакового типа и мощности не имеющие корректора напряжения. Во всех случаях для выравнивания реактивных нагрузок применяются уравнивательные соединения которые утаиваются различным образом. Наиболее простой - установка уравнивательных соединений между обмотками возбуждения генераторов (если электростанция состоит из агрегатов одинакового типа и мощности).

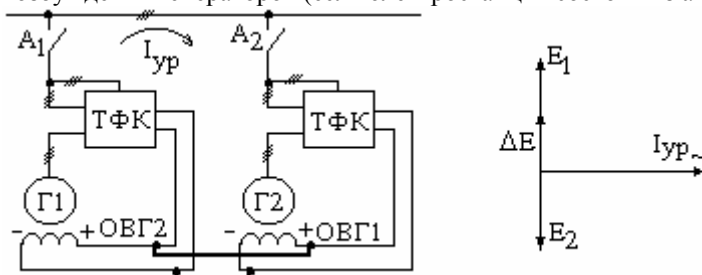


Рис.141.

Между статорами генераторов из-за разности ЭДС возникает $I_{ур}$. Его можно выровнять установив уравнивательные соединения. За счет протекания $I_{ур}$ между ОВ напряжения одной обмотки уменьшается (которая больше),

а другой обмотки увеличивается (которая меньше). За счет сближения $U_{Г1}$ и $U_{Г2}$ сближаются E_1 и E_2 , ΔE и $I_{ур}$ на порядок уменьшается.

2. Второй способ применяется для генераторов разного типа и мощности, в основном не имеющих КН. Уравнивательные соединения устанавливаются между специально предусмотренными в ТФК добавочными обмотками. В этом случае через уравнивательные соединения протекает переменный ток.

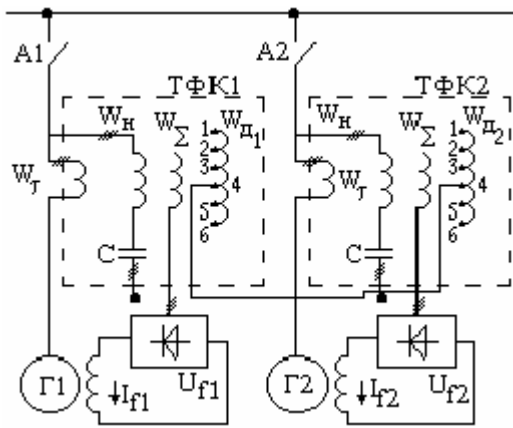
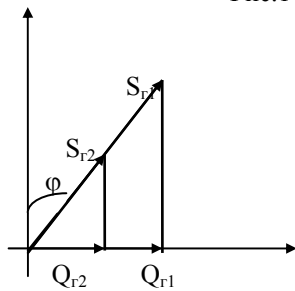


Рис.142.

$I_{ур}$ протекает по обмоткам, создает МДС и наводит ЭДС. $I_{ур}$ подбирают так чтобы ЭДС генераторов было одинакого. при этом $I_{ур}$ между статорами будет отсутствовать. Регулирование происходит за счёт уравнивательной обмотки ($W_{д1}, W_{д2}$) $W_{д1} \neq W_{д2}; Q_1 > Q_2 \Rightarrow W_{д1} > W_{д2}$; Обмотки $W_{д1}$ и $W_{д2}$ в нормальном режиме (когда реактивная нагрузка распределена правильно) выдают одинаковые напряжения и уравнильный ток между ними отсутствует.



100 кВА 200 кВА

Рис.143.

3. Третий способ применяется для генераторов имеющих КН. Он осуществляется путём установки уравнильных соединений между КН. Выравнивание реактивных нагрузок у генераторов имеющих корректоры напряжения уравнильные соединения укладываются между цепями корректоров напряжения. (См. схему МСК). В данном случае применяется схема создания искусственного статизма внешних характеристик генератора.

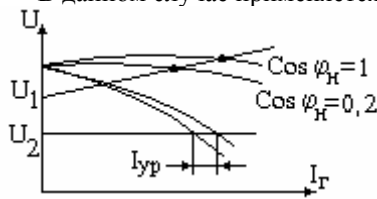


Рис.144.

В схеме искусственного статизма жесткость характеристики зависит от характера нагрузки генератора, т.е. $\cos \varphi$. смысл введения искусственного статизма в том, что при введении $I_{ур}$ внешние характеристики становятся мягче, напряжение на шинах снижается, то разница в $I_{ур}$ уменьшается.

Схема создания искусственного статизма.

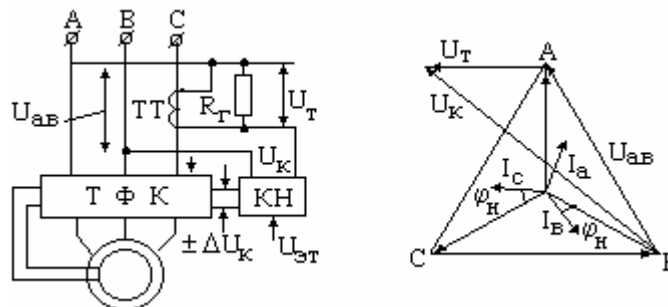


Рис.145.

Установившееся напряжение будет зависеть от нагрузки:

1. Если нагрузка активная $\varphi_n = 0$:

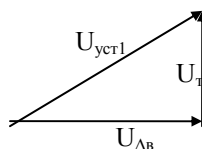


Рис.146.

2. Нагрузка реактивная $\varphi_n = \pi/2$:

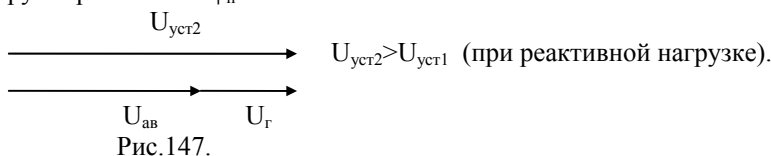


Рис.147.

Схема введения искусственного статизма.

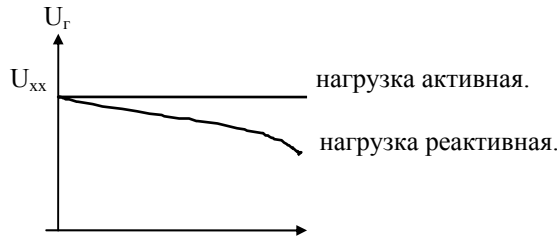


Рис.148.

Схема искусственного статизма позволяет уменьшить разброс реактивных нагрузок генератора за счёт автоматического смягчения внешних характеристик генератора.

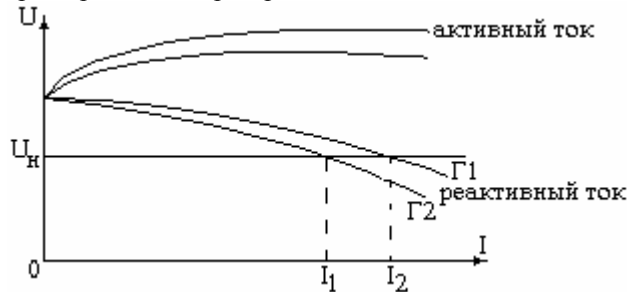
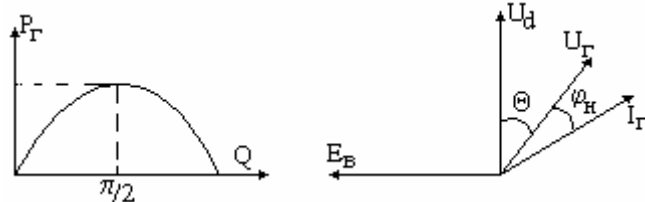


Рис.149.

Распределение активных нагрузок между параллельно работающими генераторными агрегатами.



$$P_G = \frac{E_d \cdot U}{x_d} \cdot \sin \Theta \quad (1); \quad P_G = M_G \cdot \omega \quad (2)$$

Рис.150.

Из приведенных выражений (1) и (2) следует, что для регулировки P_G необходимо воздействовать на угол Θ или M_G . M_G меняется путем подачи топлива на первичный двигатель. Для пропорционального распределения нагрузок существуют различные системы пропорционального распределения активных нагрузок.

$P_{Gi} = \sin \Theta_i$, E_{di} - при параллельной работе не учитывается.

1. Одинаковые СГ : $E_{d1} = E_{d2} = E_{d3}$

За счёт действия системы выравнивания реактивных нагрузок $\Rightarrow \Theta_1 = \Theta_2 = \Theta_3 \Rightarrow P_{Gi}$ - одинаковые. Поэтому достаточно выровнять углы Θ , и $P_{акт.}$ у всех генераторов будет одинаково.

2. Если генераторы разные, то они должны иметь пропорциональные величины углов Θ , чтобы принять на себя пропорциональные нагрузки. Изменение Θ осуществляется за счёт воздействия на первичный двигатель (т.е. регулируется подача топлива на первичный двигатель). Для того, чтобы выравнивать $P_{акт.}$, необходимо воздействовать на момент вращения первичных двигателей, т.е. поворачивать ротор генератора и соответственно вектор ЭДС E_d в ту или иную сторону относительно вектора U . Оси векторов должны совпадать в пространстве. Системы пропорционального распределения активных нагрузок:

- Система распределения активных нагрузок по методу квазисных характеристик.
- По методу ведущего генератора.

Вывод закономерности распределения активных нагрузок между параллельно работающими генераторами с характеристиками различной жесткости. $K_{с.т} = \frac{\Delta \omega}{\Delta P} = \text{tg} \alpha$. Все выражения относятся к случаю отсутствия устройств выравнивания активных нагрузок. Генератор с более жесткой характеристикой принимает на себя большую часть нагрузки.

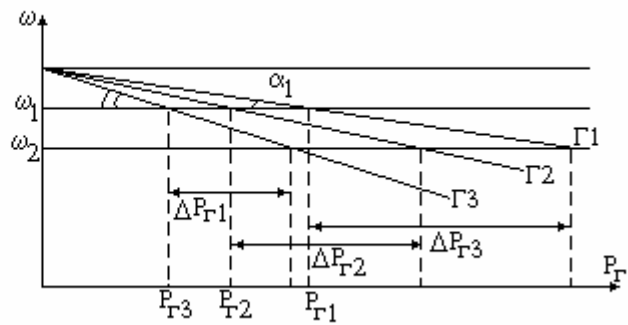
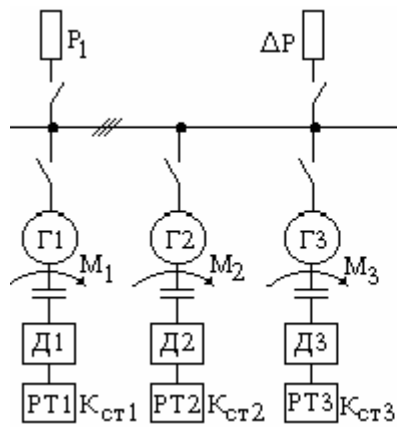


Рис.151.

$$K_{CT1} = \frac{\Delta \omega_{\Gamma}}{\Delta P_{\Gamma 1}} \quad ; \quad \sum_{i=1}^n K_{CTi} = \Delta \omega_{\Gamma} \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{\Delta P_{\Gamma i}} \right)$$

$$K_{CT2} = \frac{\Delta \omega_{\Gamma}}{\Delta P_{\Gamma 2}} \quad ; \quad \sum_{i=1}^n \Delta P_{\Gamma i} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{CTi}} \quad ; \quad \Delta P_{\Gamma i} = \frac{1}{K_{CTi}} \cdot \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{CTi}}} \quad (3)$$

$$K_{CT3} = \frac{\Delta \omega_{\Gamma}}{\Delta P_{\Gamma 3}} \quad \Delta \omega_{\Gamma} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta P_{\Gamma i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{CTi}}}$$

(3) характеризует - такую нагрузку примет на себя каждый генератор, если отсутствуют корректирующие устройства распределения активных нагрузок. Чем больше жёсткость регуляторной характеристики генераторного агрегата, тем большую нагрузку он примет на себя. Если характеристики будут очень жёсткими, то распределение активных нагрузок между генераторами становится неопределённым. ТАКИМ ОБРАЗОМ : Генераторы, имеющие астатические (жёсткие) характеристики, не могут работать в параллель. (Если нет устройства автоматического распределения нагрузок).

- Квазисные характеристики при данном способе распределения активной мощности регулируемая характеристика каждого дизель-генератора перемещается параллельно себе так, что при каждом новом значении нагрузки все регуляторные характеристики пересекаются в одной точке. при этом функция в системе изменяется. Каждой нагрузке соответствует свое значение функции.

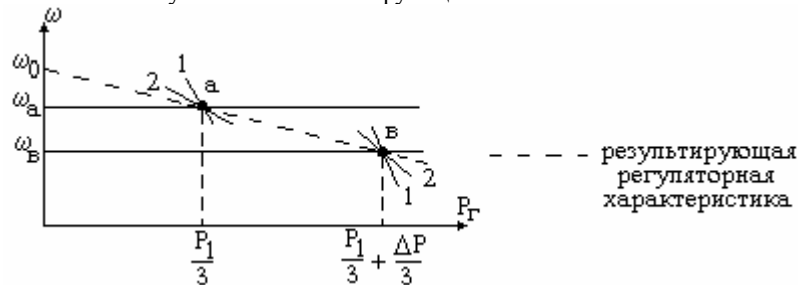


Рис.152.

2) При данном способе распределения мощности, регуляторная характеристика одного из генераторов который называется ведущим остается неизменным. Характеристики других генераторов перемещаются по характеристике ведущего, таким образом что в любой точке они пересекаются. Г3 - ведущий; Г1, Г2 - ведомые.

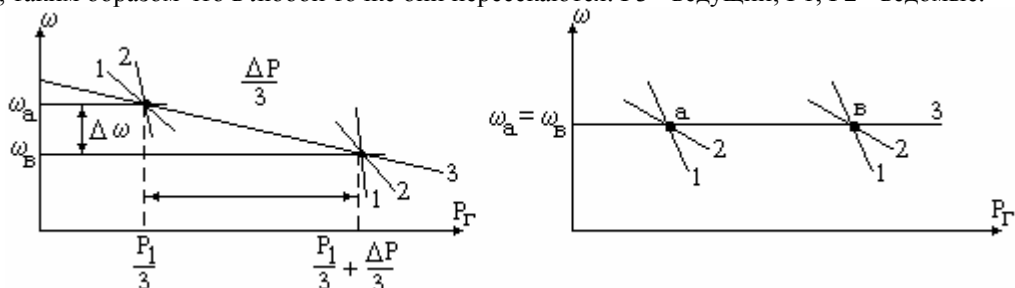
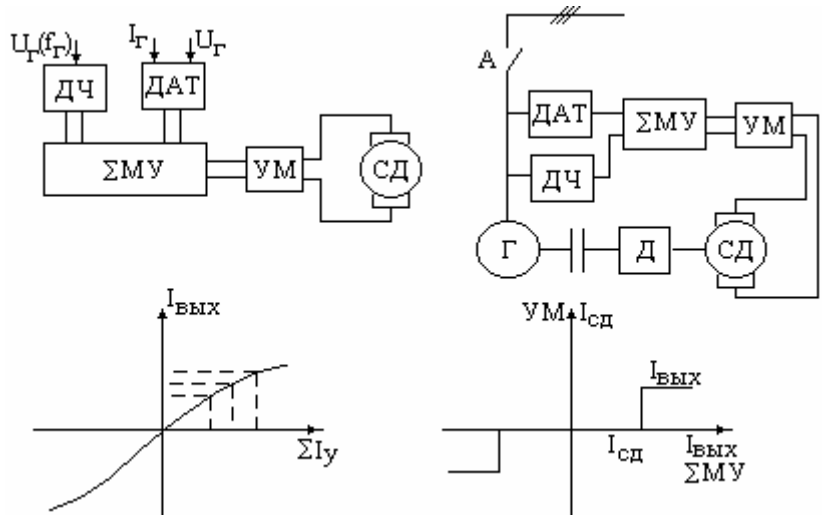


Рис.153.

Устройство рапределения активной мощности.



УРЧН, УРН.
 СД- серводвигатель;
 ДЧ - датчик частоты;
 ДАТ - датчик активного
 тока.

Рис.154.

Схемы подключения УРЧН к электростанции.

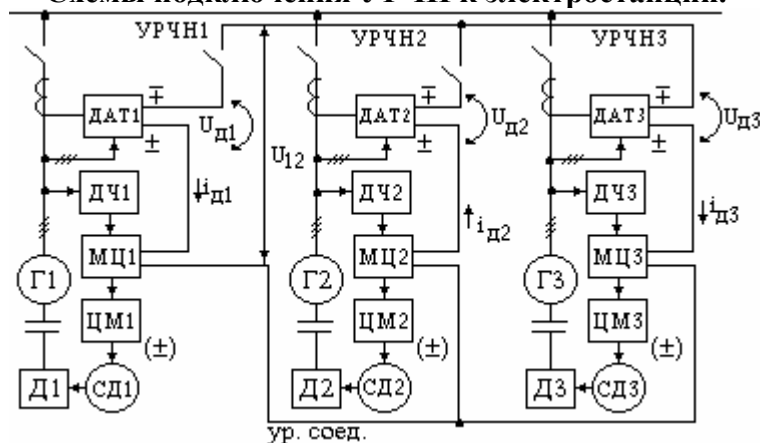
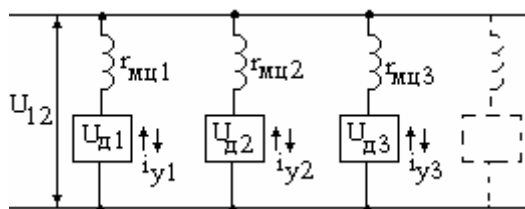


Рис.155.

$$U_{12} = \frac{U_{д1} \cdot Y_1 + U_{д2} \cdot Y_2 + \dots + U_{дn} \cdot Y_n}{Y_1 + Y_2 + Y_3 + \dots + Y_n}; Y_i = \frac{1}{r_{мци}}; r_{мци1} = r_{мци2} = \dots = r_{мциn}$$



$$U_{12} = \frac{\sum^n U_{ди}}{n}; i_{y1} = \frac{U_{12} - U_{ди}}{r_{мци}}$$

Рис.156.

Уравнительная связь обеспечивает пропорциональность распределения активных нагрузок между генераторами. при данном методе все датчики соединяются одинаковым образом (как по схеме). Направление вращения (СД) зависит от направления уравнительного тока. Это направление все время меняется, поддерживается квазистатическое равновесие.

Метод ведущего генератора.

1. Выбирается главный генератор.
2. Датчики частоты 2, 3 отключаются.
3. В МЦ1 шунтируется МЦ1, где $R_6 = r_{мци}$

При этом методе ДЧ у ведомых генераторов отключаются, а у ведущего генератора отключается обратная цепь по активной мощности. Вместо нее включается $R_6 = r_{мци}$, таким образом рабочая точка скользит по регуляторной характеристике ведущего генератора.

Схемы датчиков.

Датчик активной мощности (ДАТ) применяется в устройстве 2-х импульсного регулятора частоты (см. выше).

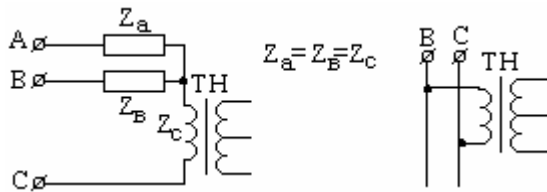


Рис.157.

В данном случае используется не U_{bc} , а фазное. Применение схемы искусственного нуля, но датчик тока включается в ту же фазу.

Датчик частоты (ДЧ).

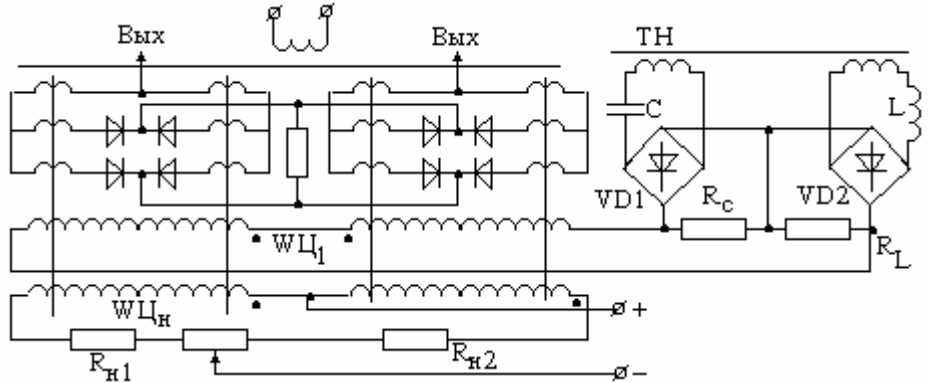


Рис.158.

Состоит из магнитного усилителя и задающей цепи. Применен 2-х тактный реверсивный МЦ. Подробное описание схемы см. Л.р. №4.

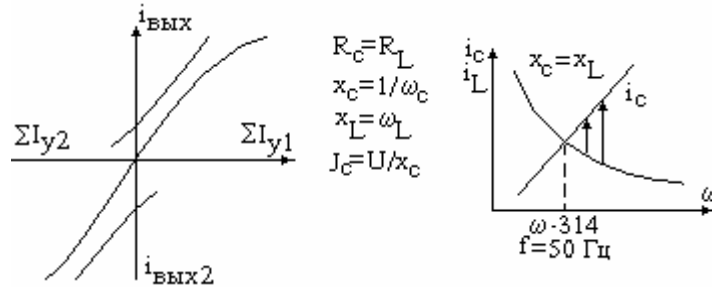
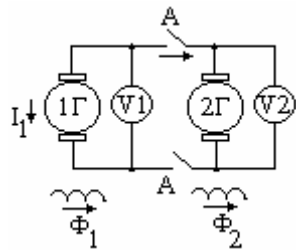


Рис.159.

Способы включения генератора постоянного тока на параллельную работу.

При подключении ГПТ на параллельную работу необходимо соблюдать ряд правил не позволяющих привести электростанцию к аварийной ситуации.

1. Скорости вращения должны быть одинаковы, различие не более 5...10% друг от друга.
2. Напряжение подключаемого генератора меньше напряжения работающего на несколько вольт, так как после подключения этот генератор перейдет в двигательный режим.



$$P_{1r} = I_1 \cdot U = I_1 \cdot (E_1 - I_1 \cdot R_{a1})$$

$$P_{2r} = I_2 \cdot U = I_2 \cdot (E_2 - I_2 \cdot R_{a2})$$

$$E_1 = C_e \cdot n_1 \cdot \Phi_1$$

$$E_2 = C_e \cdot n_2 \cdot \Phi_2$$

$E_2 > U_1$. После подключения: $U_1 = U_2 = U$. Токи выравниваются путем воздействия на магнитный поток подключаемого генератора.

Рис.160.

Подключение на параллельную работу СГ.

1. Равенство действующих значений напряжений.
2. Совпадение чередования фаз.
3. Совпадение формы "синусоид" напряжения.
4. Сопадение частоты.
5. Совпадение фазы.

- 1) $U_{1r} = U_{2r}$;
- 2) "A, B, C" = "A₁, B₁, C₁"

3)

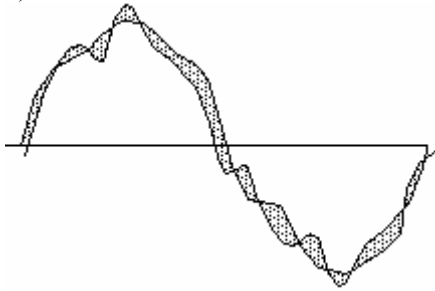


Рис.161.

4) $\omega_1 = \omega_2$;

5) $\varphi_1 = \varphi_2$.

2 и 3 условие определяется монтажем и конструкцией генератора. 1 определяется настройкой регуляторов. 4 - настройкой регулятора частоты вращения. 5 - условием подключения. 4 и 5 условие требует вмешательства оператора.

Процессы происходящие при подключении генераторов на параллельную работу.

Предположим вектор U_1 , условно неподвижен, тогда получим, что вектор U_2 будет вращаться относительно U_1 со скоростью $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2$. А мгновенное значение угла между векторами $\delta = \Delta\omega \cdot t$.

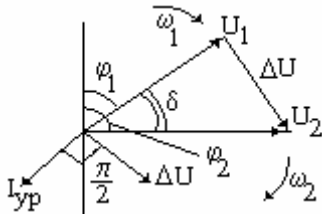


Рис.162.

ΔU определяет величину уравнивающего тока между генераторами. Уравнивающий ток относительно векторов U_1 и U_2 будет занимать положение в пределах $(0 \dots 360)^\circ$. Таким образом каждый из генераторов будет периодически получать толчки активной мощности разного знака с частотой скольжения $\Delta\omega$. При этом генератор вращающийся с большей скоростью будет получать активную мощность отрицательного знака,

а генератор вращающийся с меньшей скоростью активную мощность положительного знака. За счет этого первый генератор будет притормаживаться, а второй ускоряться. Процесс будет идти до тех пор пока скорости вращения генераторов не выровняются. Таким образом подключаемый генератор втянется в синхронизм.

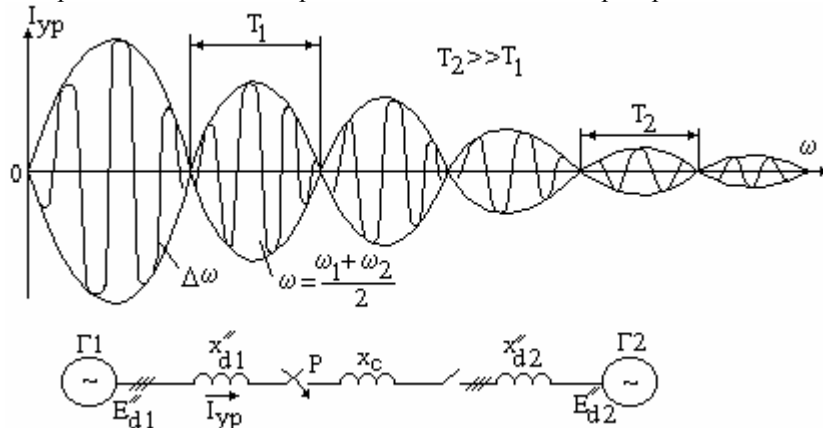


Рис.163.

Сверхпереходным называется режим при котором в обмотках ротора (демферные и возбуждение) присутствуют трансформаторные токи, то есть токи наводимые в обмотках при изменении магнитного потока.

Векторная диаграмма для переходного режима.

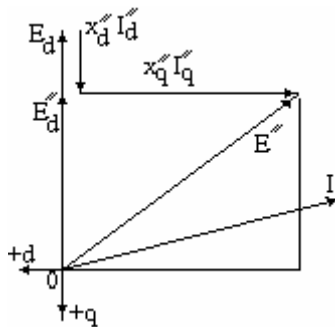


Рис.164.

Эта диаграмма используется при работе генератора на выпрямительную нагрузку. $i_{yp}'' = \frac{2\sqrt{2} \cdot K_y \cdot E_d''}{x_{d1} + x_{d2} + x_c} \cdot \sin \frac{\delta}{2}$; Формула записана при положении, что $E_{d1}'' = E_c'' = E_{c1}''$; $\Delta U_{max} = 2 \cdot E_d'' \sqrt{2}$ - амплитудное;

$K_y = 1 + e^{-0,01/T}$ - ударный коэффициент (1,6...1,8). i_{max} - максимальная величина уравнивающего тока который может быть в данной схеме. Мгновенное значение напряжения действующее между генераторами во время включения может быть определено по формулам:

$$U_1 = U_1 \cdot \sin \omega_1 t$$

$$U_2 = U_2 \cdot \sin \omega_2 t$$

$$\Delta U(t) = U_1 - U_2 = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 - 2 \cdot U_1 \cdot U_2 \cos \delta} \cdot \sin \frac{\delta}{2} \cdot \cos \left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t \right)$$

При $U_1=U_2=U \Rightarrow \Delta U(t) = 2 \cdot U \cdot \sin \frac{\delta}{2} \cdot \cos \left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t \right)$;

Множитель $A = 2 \cdot U \cdot \sin \frac{\delta}{2}$ - называют огибающей. Его величина меняется периодически с частотой $\Delta \omega$.

$\omega = \left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} \right)$ - частота заполнения. i''_{yp} - мгновенное значение огибающей уравнивающего тока.

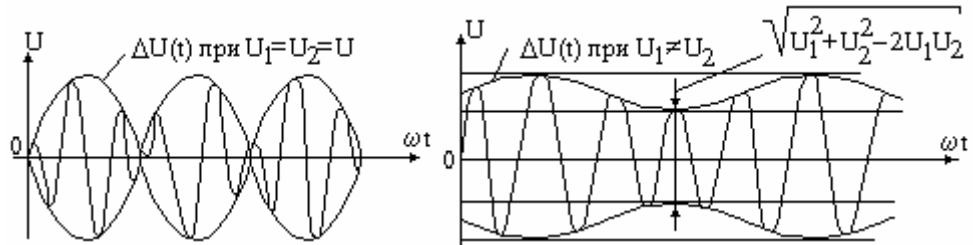


Рис.165.

Способы синхронизации.

- Автоматическая синхронизация - такой процесс, который протекает без вмешательства человека полностью автоматически.
- Ручная синхронизация. Все параметры определяются по приборам и включение производится вручную.
- Полуавтоматическая синхронизация. Определяется момент включения по величине фаз.

Ручная синхронизация.

Каждый генератор должен быть снабжен вольтметром, частотомером, фазометром и синхроскопом.

Схема с сигнальными лампами.

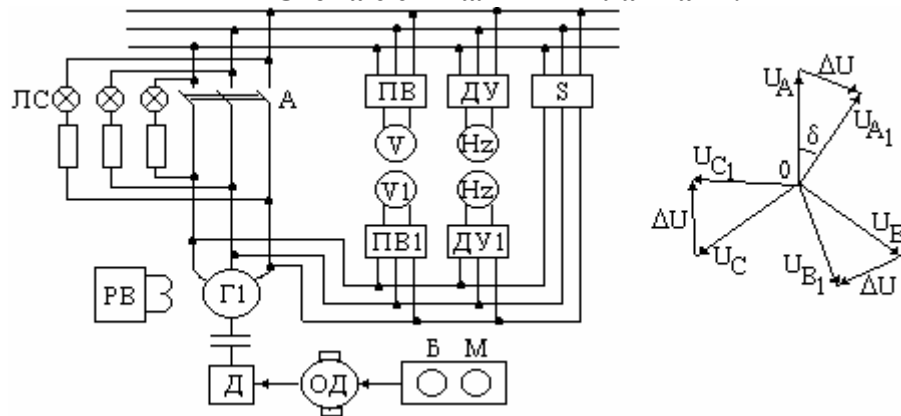


Рис.166.

Синхронизаторы с постоянным временем опережения.

1) $\delta_{оп} = \omega_{сдоп} \cdot t_{оп} = const$

2) $t_{оп} = const$

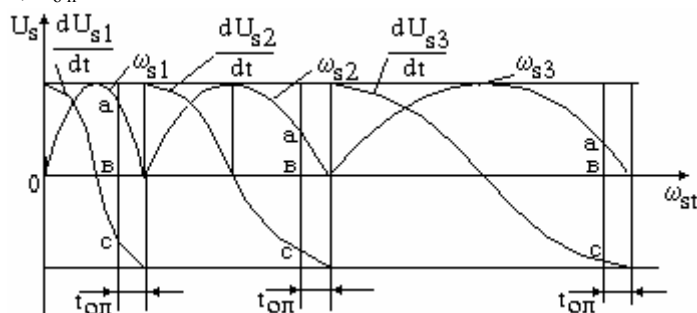


Рис.167.

$$\omega_{s1} > \omega_{s2} > \omega_{s3}; \omega_{s2} = \omega_{сдоп}$$

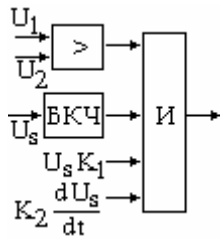


Рис.168.

БКЧ - блок контроля частоты.

K_{1i}, K_2 - масштабные коэффициенты.

$$t_{оп} \approx \frac{K_2}{K_1}$$

Устройство подгонки частоты в автоматических синхронизаторах.

Принцип работы блока автоматической подгонки частоты следующий:

- 1) Формируется 2 напряжения биений сдвинутых по фазе на некоторый постоянный угол ($60^\circ, 120^\circ$)
- 2) Эти напряжения поступают на блок сравнения с некоторым постоянным опорным напряжением. В момент сравнения вырабатывается сигнал - "логическая единица".
- 3) Чередуемость фаз напряжений биений зависит от того какой знак имеет частоты скольжения. При положительном ω_s , ω_{s1} по фазе опережает U_{s2} , при отрицательном ω_s ($\omega_s < 0$) U_{s2} опережает T_{s1} . Таким образом когда $\omega > 0$ логическую единицу выдает первый блок, а затем второй, а в случае $\omega_s < 0$ логическую единицу выдает сначала второй блок.

В любом случае тот блок который сработал первый запрещает срабатывание другого блока и выдает сигнал на увеличение ($\omega < 0$) или уменьшение ($\omega > 0$) подачи топлива дизелю или турбине. Этот сигнал передается в течении некоторого времени. подача топлива на дизель производится импульсами (2...3 сек). Происходит увеличение или уменьшение скорости вращения до тех пор, пока ω_s не войдет в допустимый диапазон. после этого происходит включение автомата генератора и выключение блока подгонки частоты.

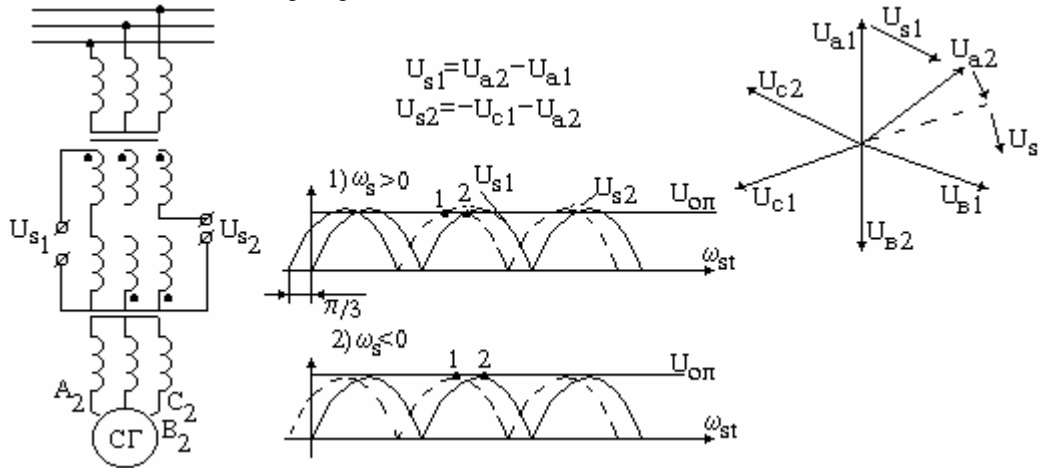


Рис.169.

Блок-схема БПЧ.

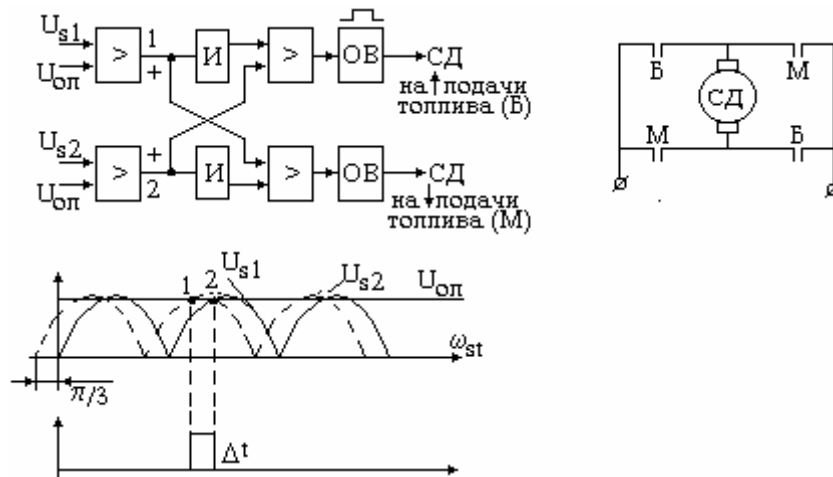


Рис.170.

Δt - (2÷3) сек. для перемещения рейки топливного насоса.

И - инвертор;
ОВ - одновибратор;
СД - серводвигатель.

Блок-схема автоматической точной синхронизации УСГ-1п.

Данное устройство работает на принципе постоянного времени опережения.

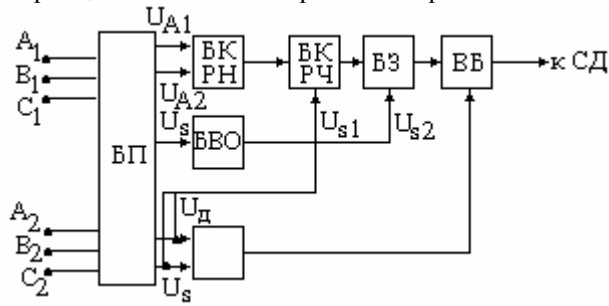


Рис.171.

БП - блок питания и функциональный блок. Формирует стабилизированное напряжение питания схемы. Выдает две огибающих напряжения биений смещенных на 60° , а также производную одной огибающей.

БКРН - блок контроля разности напряжений. Сравнивает действующее значение напряжений подключаемых к генераторам, если их разность не превышает 10% блок выдает разрешающий сигнал на БКРЧ.

БВО - блок времени опережения. Формирует время опережения на срабатывание коммутирующей аппаратуры, путем сравнения огибающей с ее производной. Сигнал поступает на блок запрета.

БПЧ - блок подгонки частоты. Поступают два биения сдвинутые на 60° . В зависимости от чередования фаз биений БПЧ выдает сигналы на реле Б или М блока БВ. Появление одного сигнала исключает появление другого.

БКРЧ - блок контроля разности частот. Контролирует частоту огибающей биений, включается при наличии сигнала с блока БКРН. При частоте скольжения менее допустимой блок выдает разрешающий сигнал на БЗ.

БЗ - Логический блок, выдает разрешающий сигнал при наличии сигналов с блоков БКРЧ и БВО. БЗ выдает сигнал на БВ-БВ.

БВ - выходной блок. Состоит из трех электромагнитных реле. Одно реле включает автомат выключения генератора и получает сигнал с блока БЗ, это реле срабатывает импульсом. Второе и третье реле получают сигнал от блока БПЧ, эти реле коммутируют цепи питания серводвигателя подачи топлива (одно реле "больше", а другое "меньше") Эти электродвигатели работают раздельно. В блоке имеются одновибраторы управляющие работой этих реле, за счет них формируется время включения серводвигателей.

Синхронизатор с постоянным временем опережения САМ-II.

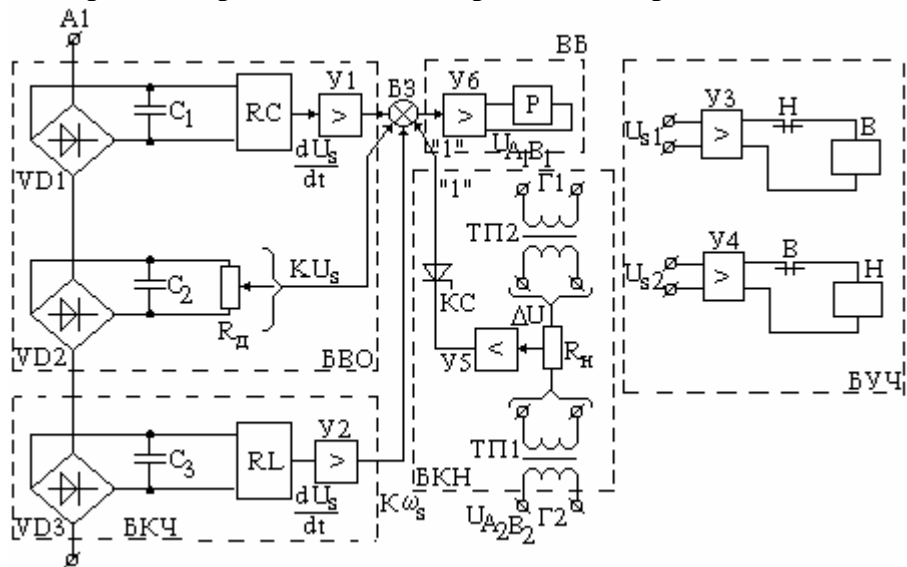


Рис.172.

БВО - блок времени опережения.

БКЧ - блок контроля частоты.

БЗ - блок запрета.

БУЧ - блок управления частотой.

БКРН - блок контроля разности напряжений.

БВ - выходной блок.

С помощью R_n регулируется время опережения.

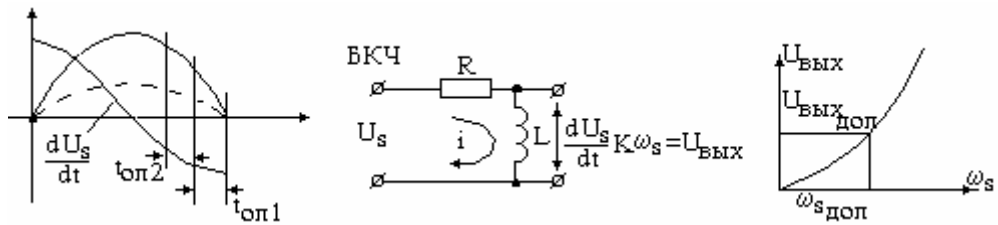


Рис.173.

У1...У4, У6 - компараторы.

БЗ выдает логическую единицу при соблюдении условий синхронизации, такие же как и в предыдущем случае.

БКРН - состоит из двух трансформаторов. R_м мостовая схема сравнения. У₅ - усилитель.

БУЧ - поступает напряжение биения чередования фаз напряжений биений U_{s1} и U_{s2} зависят от знака частоты биений.

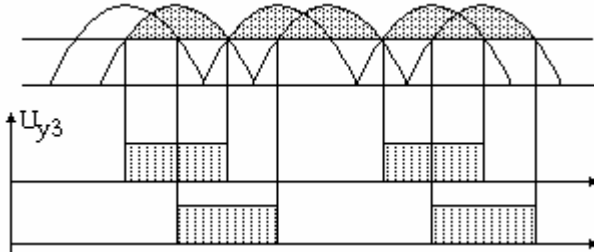


Рис.174.

Реле Р управляет включением автомата. Срабатывает импульсом.

Синхронизатор с постоянным углом опережения.

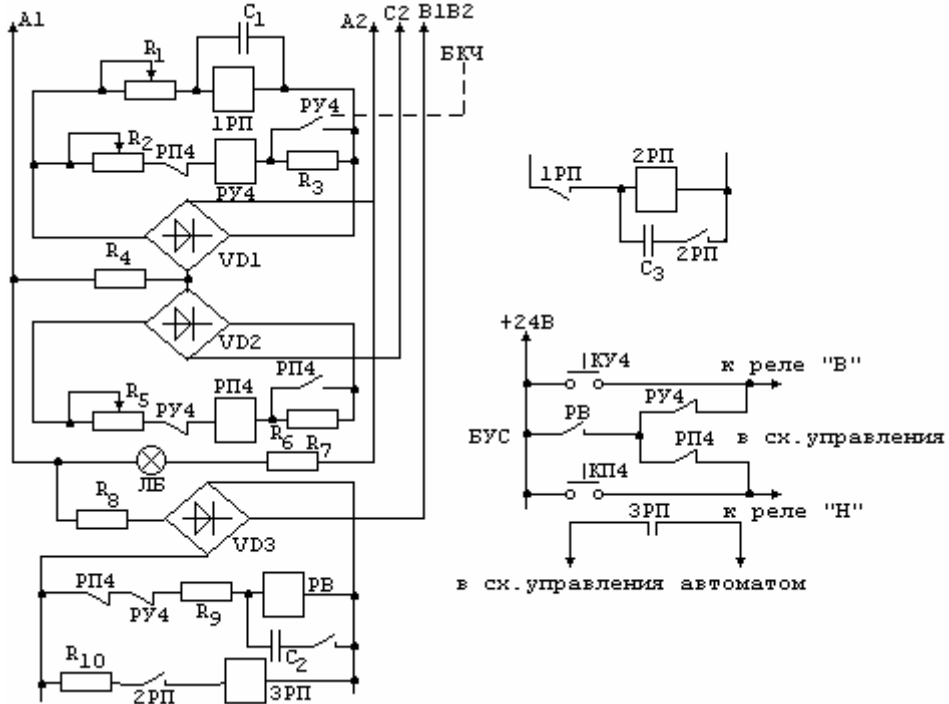


Рис.175.

1РП, C₁, R₁ - контролирует частоту биений;

РУ4 - реле уменьшения частоты;

РП4 - реле повышения частоты.

Реле РУ4 питается с моста VD1, а он через резистор R₄ с A₁ и A₂. Потенциометром R₂...R₅ регулируется время срабатывания реле.

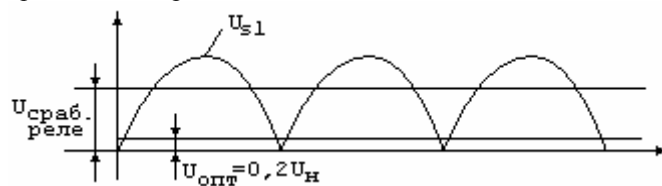


Рис.176.

РВ - реле времени с выдержкой времени при отключении.

Устройство автоматической точной синхронизации с

постоянным временем опережения УСГ-35 (Л.р. №11).

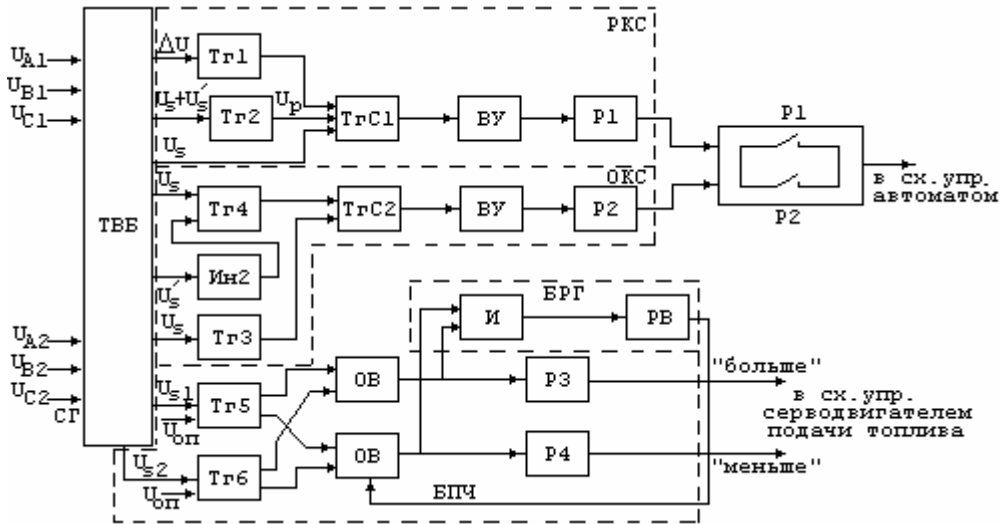


Рис.177.

- РКС - резервный канал синхронизации;
- ОКС - основной канал синхронизации;
- БПЧ - блок подгонки частоты;
- БРГ - блок развода генератора;
- ТВБ - трансформаторно - выпрямительный блок;
- Tr1...Tr6 - триггер Шмитта. Сравнивают напряжения биений с опорным напряжением, которые задаются стабилизаторами.
- TrC1...TrC2 - счетный триггер. Выполняет роль логического сравнивающего устройства.
- ВУ - выходной усилитель;
- P1...P4 - исполнительные электромагнитные реле;
- ОВ - одновибратор;
- РВ - реле времени;
- И - схема совпадения.

U_s - напряжение огибающей биений. $U'_s = \frac{dU_s}{dt}$; $U_{s1}=U_{s2}=60^\circ$; $U_s+U'_s$ - для выработки времени опережения. Особенностью работы данной схемы является выработка сигнала разрешения по частоте биения. Диаграмма работы РКС:

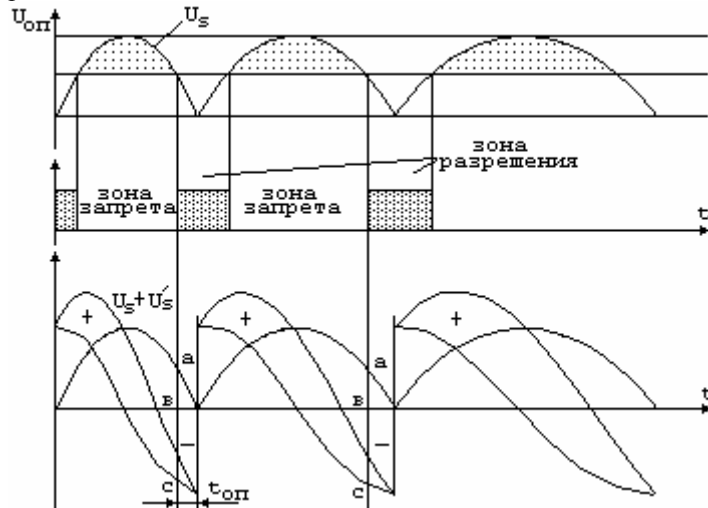


Рис.178.

По мере уменьшения частоты биений точка в заползает в зону разрешения. Если при ω_{s1} она находилась в зоне запрета, то при ω_{s2} она попадает в зону разрешения. Пропадание импульса U_p в зону разрешения возможно только при допустимой частоте биений.

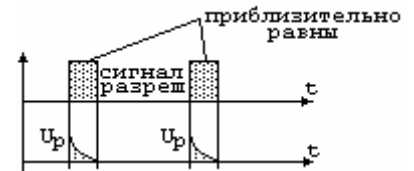


Рис.179.

После включения автомата генератора все сигналы с блока ТВБ (ΔU , U_s , U'_s) обнуляются.

Грубая синхронизация генераторов.

Сцелью упрощения процесса синхронизации и его ускорения в ряде случаев применяется метод грубой синхронизации. Суть которого заключается в том, что включение производится без контроля положения угла между векторами напряжений. Но условия по $\Delta U \leq \Delta U_{доп}$ и $\omega_s \leq \omega_{сдоп}$ должны соблюдаться. Без специальных мер величина ударного уравнивающего тока может достигать 5...6 кратных значений. Поэтому этот ток ограничивают путем введения в цепь реактора. Реактора выполняется воздушным (без железа) сечение обмотки рассчитывается на кратковременную работу 3...5 секунд, поэтому габариты якорей небольшие.

Схемы включения с помощью грубой синхронизации.

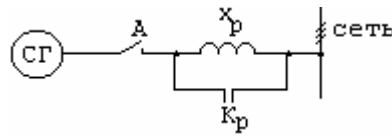


Рис.180.

При токе 2...2,5 происходит втягивание в синхронизм. Условиями для расчета реактора задаются двумя параметрами:

- 1) током реактора $i_p = (2 \dots 2,5) I_{нр}$
- 2) $\Delta U \leq 0,2 U_n$

Воспользуемся формулой $i_{yp}'' : x_p = \frac{2 \cdot K_y \cdot \sqrt{2} \cdot E_d''}{i_{рд}} - (x_{d1}'' + x_{d2}'')$; $x_c = x_p$; $\delta = 180^\circ \Rightarrow \sin = 1$

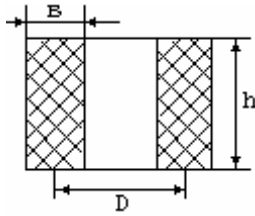


Рис.181.

$$x_p = 10,5 \cdot \omega \cdot W^2 \cdot D \cdot \left(\frac{D}{B}\right)^k \cdot 10^{-9} \text{ (Ом); } B = 2 \cdot (b+h); k=0,5; \frac{h}{D} = \frac{B}{D} = 0,34 - \text{ мини-}$$

$$\text{мальный расход меди. } W^2 \cdot D = \frac{x_p}{3,53 \cdot 10^5}, \text{ при } k=0,5$$

Схемы и устройства грубой синхронизации генераторов.

Условия грубой синхронизации: $\Delta f \leq 0,5 \dots 1,5$ Гц; $\Delta U \leq 10\%$.

Принцип работы реле разности частот (РРЧ) типа РСС.

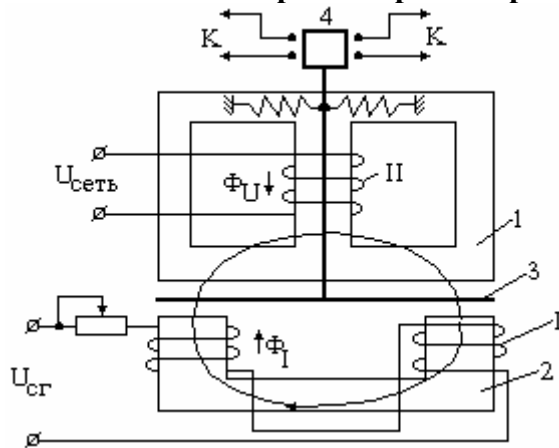


Рис.182.

- 1 - Ш-образный магнит;
- 2 - П-образный магнит;
- II - катушка с 6000 витков;
- I - катушка с толстым проводом.
- 3- алюминиевый диск со стрелкой на конце находится грузик;
- 4 - может замыкать контакты.

Φ_I и Φ_U - с разными частотами действуют на 3. $F_j = F_m \cdot \sin\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}t\right) \cdot \cos\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}t\right)$

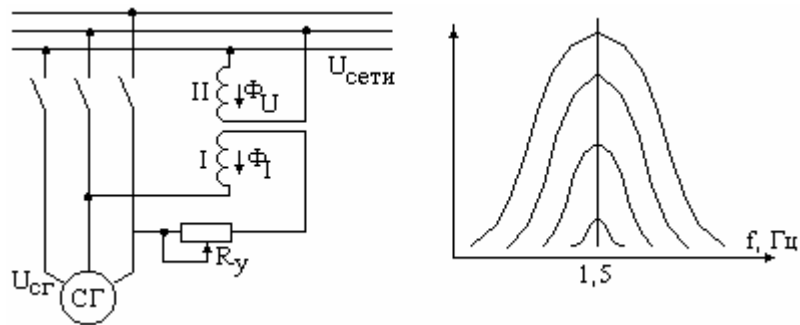


Рис.183.

При $\omega_1 - \omega_2 = \Delta\omega = 1,5$ Гц. Стрелка реагирует на огибающую биений магнитного потока, т.к. ее разностная частота очень низкая и практически не реагирует на заполнение. При приближении к резонансной частоте (1,5 Гц) начинают замыкаться контакты К, которые дают разрешение на синхронизацию. Недостаток: низкая ударостойкость.

Схема грубой синхронизации с применением РСС.

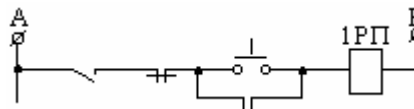


Рис.184.

Данная схема позволяет синхронизировать Г1 и Г2. Сначала замыкается 1КР и синхронизация происходит через x_p (ограничивает бросок тока), затем через 2 сек. включается 1А (КР - размыкается). Аналогично происходит синхронизация Г2.

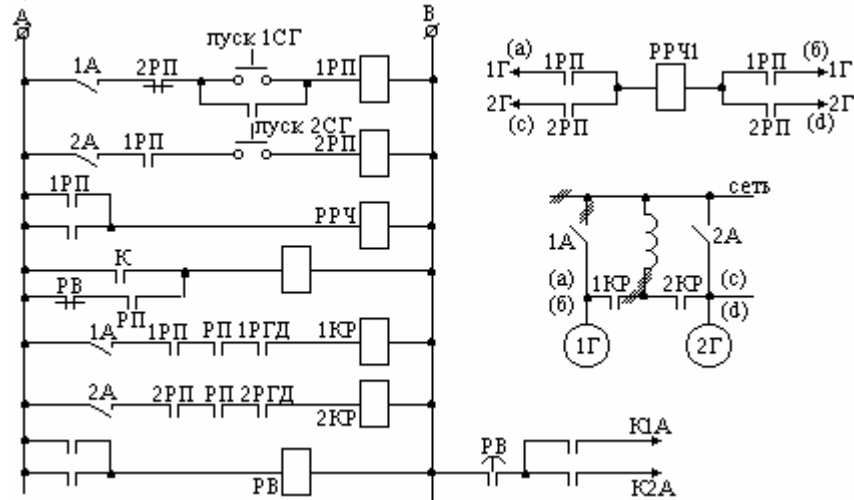


Рис.185.

Пусть $1Г \rightarrow +1ГП \rightarrow +РРЧ(П) \rightarrow$ при $\Delta f = 1,5$ Гц $\rightarrow +К \rightarrow +РП \rightarrow +1КР \rightarrow +1ГРД \rightarrow +РВ + \Delta t \rightarrow -РП \rightarrow +1А \rightarrow -КР \rightarrow -1КР$ - генератор подключен.

- РП - промежуточное реле;
- РВ - реле времени;
- КР - контакторы силовые;
- РРЧ - катушка напряжения.

Самосинхронизация генераторов.

Недовозбужденный генератор подключают к сети, а затем на него подается возбуждение. Применение данного способа позволяет уменьшить величину уравнивающего тока в 2 раза. Метод прост, подключаемый генератор при отключении $U_{сети}$ от нормы. Метод проще грубой синхронизации, т.к. не требует слежения за напряжением и частотой подключаемого генератора.

Расчет уравнивающего тока.

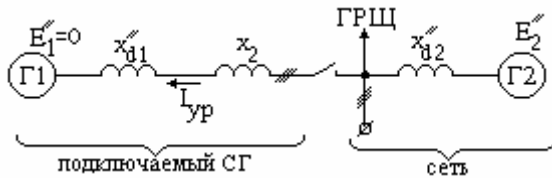


Рис.186.

$$I_{урmax} = \frac{K_y \cdot \sqrt{2} \cdot E_2''}{x_{d1}'' + x_{d2}'' + x_c}; \quad U_0 = E_2'' - x_{d2}'' \cdot I_{урmax};$$

$$U_c = E_2'' - \frac{x_{d2}'' \cdot K_y \cdot \sqrt{2} \cdot E_2''}{x_{d1}'' + x_{d2}'' + x_c} - \text{минимальное напряжение при подключении генератора.}$$

Физические процессы протекающие при самосинхронизации.

СГ работает в режиме (в 1 момент) АД, однако из-за конструкции ротора имеет свои особенности: поле ротора является пульсирующим, ударный момент возникающий при синхронизации, электромагнитный момент возникающий при синхронизации. $M_{пд} - M_T = M_c + M_{ac} + M_j + M_p$, где:

- $M_{пд}$ - момент приводного двигателя;
- M_T - момент трения;
- M_{ac} - асинхронный момент;
- M_c - синхронный момент;
- M_j - динамический момент;
- M_p - реактивный момент.

В установившемся режиме: $M_{пд} - M_T = M_c$. В динамическом режиме еще появляется: $M_{ac} + M_j + M_p$.

$$M_c = \frac{E_d \cdot U}{x_d} \cdot \sin \Theta; \quad \angle \Theta = \overline{E_d}, \overline{U};$$

$$M_{ac} = \frac{U^2}{2} \cdot \left[\frac{x_d - x_d''}{x_d \cdot x_d''} \cdot \frac{S \cdot T_d'}{1 + (S \cdot T_d'')^2} + \frac{x_d' - x_d''}{x_d' \cdot x_d''} \cdot \frac{S \cdot T_d''}{1 + (S \cdot T_d'')^2} \cdot \frac{x_q - x_q''}{x_q \cdot x_q''} \cdot \frac{S \cdot T_q''}{1 + (S \cdot T_q'')^2} \right], \quad S - \text{скольжение};$$

T_d' - постоянная времени статора при замкнутой обмотке ротора по продольной оси;

T_d'' - сверхпереходная постоянная времени статора при замкнутой обмотке ротора по продольной оси;

T_q'' - сверхпереходная постоянная времени статора при замкнутой обмотке ротора по поперечной оси;

$M_j = T_j \cdot \frac{d\omega}{dt}$, где T_j - механическая постоянная времени вращающихся частей.

$$M_p = U^2 \cdot \frac{x_d - x_q}{2 \cdot x_d \cdot x_q} \cdot \sin 2\Theta$$

Схемы синхронизации.

а) ручная синхронизация осуществляется с помощью реле РСС.

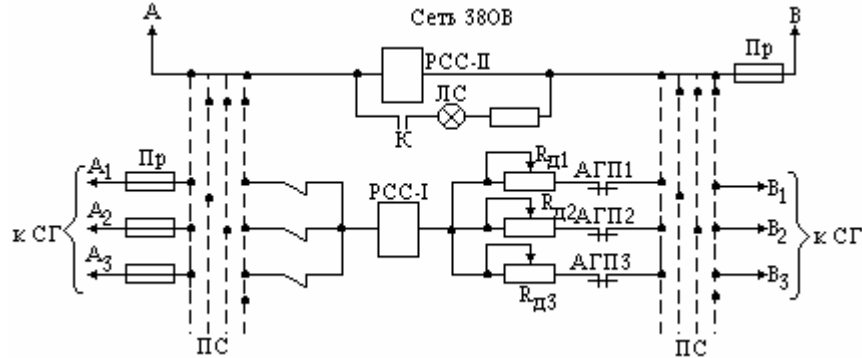


Рис.187.

Через катушку РСС-I в начале протекает ток за счет ЭДС остаточное намагничивание при $\omega_s \leq 1,5 \dots 2,5$ Гц начинает замыкаться контакт К, ЛС мигает, оператор нажимает кнопку включения автомата А1 (А2, А3), подается возбуждение на генератор. АНП1 (АГП2, 3) размыкается, начинается втягивание в синхронизм.

б) автоматическая самосинхронизация. Для двух синхронизирующих генераторов.

ПРС - полупроводниковое реле скольжения;

1РП...3РП - промежуточное реле;

АГП - автомат гашения поля;

СВГ - система возбуждения генератора;

VT1, VT2 - тиристорный ключ;

РВ - реле времени;

ТС - согласующий трансформатор;

РВ - выдержка 2...3 сек.

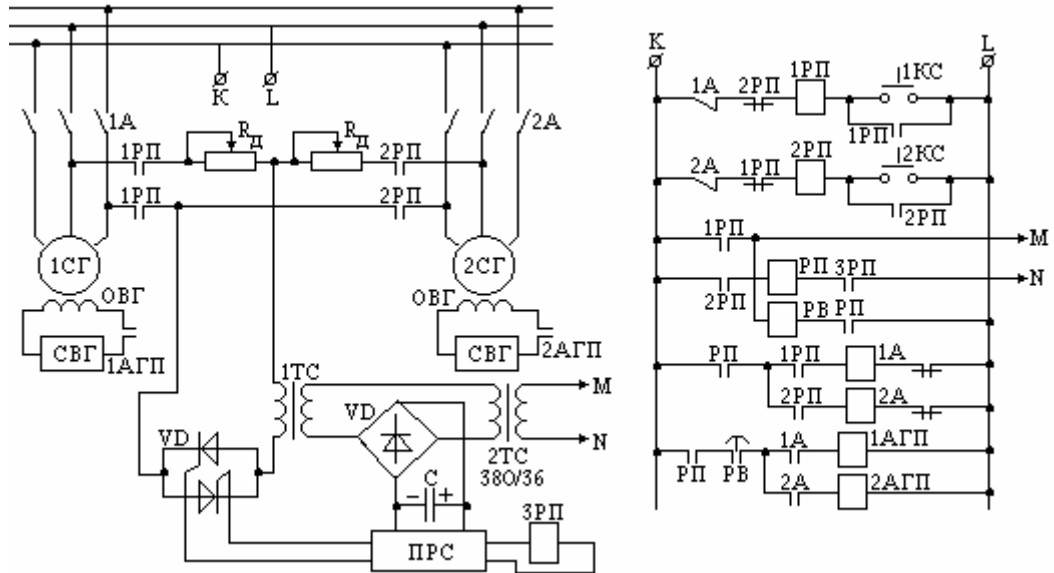


Рис.188.

Для синхронизации Г1, нажимаем 1КС включается 1РГ и рвет цепь 2РП. При $f_{бисн} = 2,5$ Гц ПРС включает 3РП.

Элементы устойчивости СЭС.

В СЭС возможны колебания напряжения и частоты.

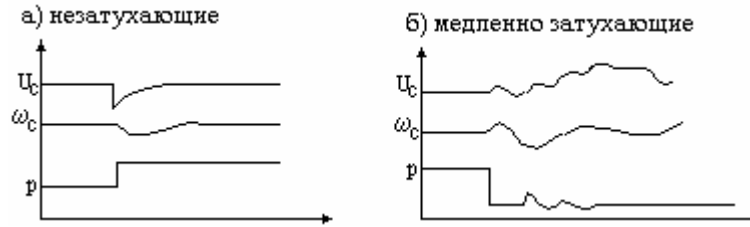


Рис.189.

Существует два понятия устойчивости:

- статическая. Система статически устойчива, если она переходит в состояние равновесия при бесконечно - медленном изменении возмущающего воздействия.
- динамическая. Система динамически устойчива, если она приходит в состояние равновесия после скачкообразного изменения возмущающего воздействия.

При неправильной настройке статически устойчивая система может быть динамически неустойчива. Для анализа статической устойчивости:

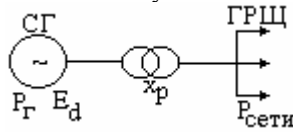


Рис.190.

$$P_{\text{сети}} \geq 10 \cdot P_{\Gamma}; U = \text{const}; x_p = x_a + x_{\text{сети}}$$

$$P = U \cdot I_{\Gamma} \cdot \cos \varphi = \frac{E_d \cdot U}{x_p} \cdot \sin \Theta$$

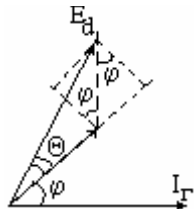


Рис.191.

$$\frac{dP}{d\Theta} > 0 - \text{устойчивая зона};$$

$$\frac{dP}{d\Theta} < 0 - \text{неустойчивая зона};$$

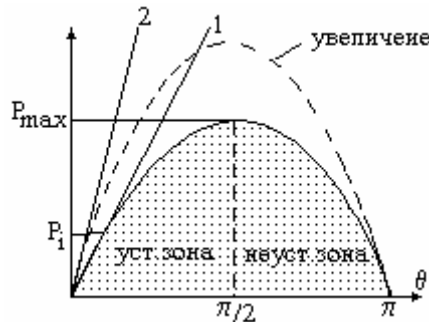
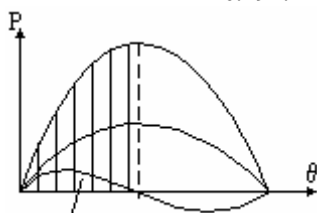


Рис.192.

Устойчивость СМ подключаемой к сети возрастает с увеличением ее тока возбуждения. На устойчивом участке приращение угла соответствует положительному приращению мощности. Запас устойчивости:

$$Z_y = \frac{P_{\text{max}}}{P_i}. \text{ Данные формулы относятся к неявнополюсным СМ.}$$



зона устойчивости

Рис.193.

Если СМ явнополюсная, то формулы:

$$P_{\Gamma} = \frac{E_d \cdot U}{x_d} \cdot \sin \Theta + \frac{U^2}{2} \cdot \frac{x_d - x_q}{x_d \cdot x_q} \cdot \sin 2\Theta$$

Зона устойчивости сужается, зато крутизна характеристики возрастает.

Динамическая устойчивость.

Динамическая нагрузка: наброс и сброс нагрузки.

ω_0 - синхронная скорость, ω_1 - максимальное значение скорости.

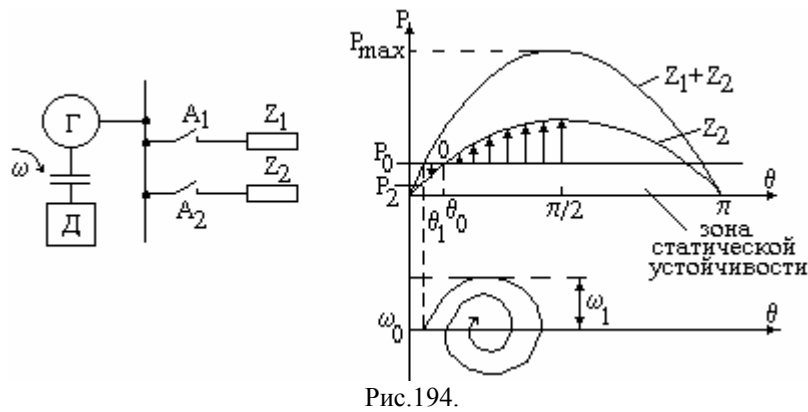


Рис.194.

$Z=Z_1+Z_2$ - до сброса нагрузки.

$Z=P_0$

Z_2 - после сброса нагрузки.

$P=U \cdot I \cdot \cos \varphi_n$

$P=f(\Theta)$ - опустилась вследствие снижения нагрузки.

$P_d=P_0$ - отключения нагрузки мощность дизеля соответствует мощности нагрузки. При отключении нагрузки, в первый момент времени, т.к. рейка топливного насоса еще не сдвинута, то дизель по прежнему вырабатывает P_0 , появится избыток энергии ΔP , нагрузка стала P_2 , $\Delta P=P_0-P_2$. Угловое положение ротора в момент отключения нагрузки равен Θ , то за счет избытка мощности ротор Γ будет ускоряться и угол будет возрастать. В точке 0 избыток мощности и начинает уменьшаться скорость за счет $-\Delta P$ и уходит до скорости:

а) если $\omega=f(\Theta)$ в виде улитки,

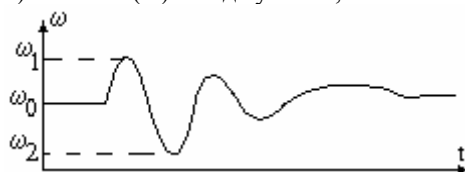


Рис.195.

а $\omega(t)$ является убывающей синусоидой, то данный процесс колебания ротора Γ является устойчивым, данная система устойчива.

б) если $\omega=f(\Theta)$ в форме спирали.

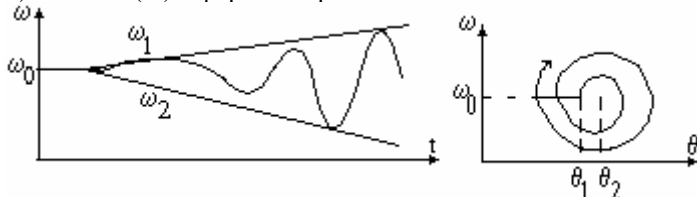


Рис.196

Этот процесс неустойчивый. При $\Theta > \pi/2$ наступает опрокидывание Γ , т.е. попадаем в зону статической неустойчивости.

в) Колебательные процессы.

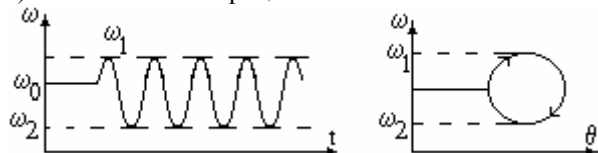


Рис.197.

Колебательная система: все данные рассуждения относятся к случаю, что рейка топливного насоса не меняет положения, то на самом деле процесс будет затухать, т.к. рейка

топливного насоса будет перемещаться в сторону уменьшения подачи топлива и ΔP будет уменьшаться.

Мероприятия по повышению динамической устойчивости.

1. Установка в электростанции генераторов одинакового типа и мощности, в этом случае разность углов между роторами будет минимальна.
2. Установка демферных обмоток на ротор генератора.
3. Уменьшение времени протекания переходных процессов за счет применения быстродействующей аппаратуры.
4. Применение маховиков у дизель - генераторов. Улитка сожмется в вертикальной плоскости.
5. Применение быстродействующих автоматических регуляторов возбуждения, за счет этого поддерживается запас устойчивости системы в динамике.

Защита судовых электрических сетей.

Защитой называют автоматическое устройство, состоящее из одного или нескольких аппаратов, предназначенных для отключения элементов СЭС от питающей сети при возникновении ненормальных режимов работы под которыми понимаются:

- превышение токов в 10-ки раз за короткий промежуток времени (от ном.)(К3);
- превышение тока в 1,5-2 раза от НОМ. за длительное время (перегрузка);
- снижение U на 40-60% от ном.;

- нарушение изоляции кабелей и эл.машин (обрыв фаз, замыкание между витками);
- перенапряжения.

Защита в основном работает не на отключение, а на сигнал. Это связано с обеспечением жизнеспособности судна и экипажа.

ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ЗАЩИТЕ.

1. СЕЛЕКТИВНОСТЬ (ИЗБИРАТЕЛЬНОСТЬ) ЗАЩИТЫ.

Защита должна отключать только повреждённый участок сети или эл.машину, а всю остальную схему, оставить в рабочем состоянии. Тем самым обеспечивается надёжность эл. снабжения. Селективность защиты в сочетании с резервированием генераторов и других элементов схемы, в принципе, исключает повреждение эл. снабжения.

2. БЫСТРОТА ДЕЙСТВИЯ ЗАЩИТЫ.

Она повышает устойчивость СЭС. Сохраняет работоспособность приёмников эл. энергии при кратковременных понижениях напряжения. Уменьшаются повреждения при К.З. (деформация шин в ГРЩ, деформация обмоток в генераторе и т.д.)

3. НАДЁЖНОСТЬ ЗАЩИТЫ.

Защита срабатывает редко, однако вероятность срабатывания должна быть близка к 100%. Для этого конструкция защиты должна быть максимально простой, а так же целесообразно резервирование некоторых участков. Для надёжности срабатывания требуется периодический контроль её работоспособности.

4. ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ЗАЩИТЫ.

Она характеризуется коэффициентом чувствительности: $K = I_k / I_{сз}$, где $I_{сз}$ -ток срабатывания защиты; I_k - первичный ток К.З. Этот коэффициент характеризует динамические качества защиты.

УСТРОЙСТВО ПЛАВКИХ ВСТАВОК.

Плавкие вставки изготавливают из нержавеющей материалов, чтобы при коррозии их сечение, а следовательно, и сопротивление, не изменялись.

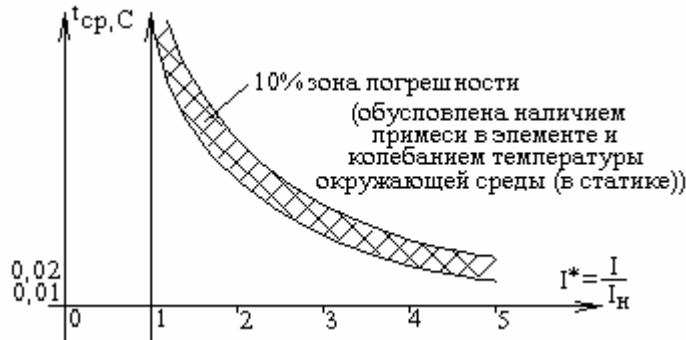


Рис.198.

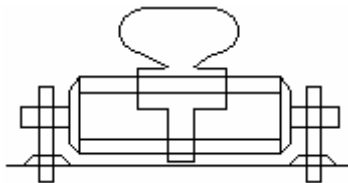


Рис.199.

Пр-2 : (5-60)А - отсутствует рукоятка
U = 380В. Корпус из текстолита.

Пробочные предохранители ПД.



Рис.200.

Предохранители НПН, ПН-2.

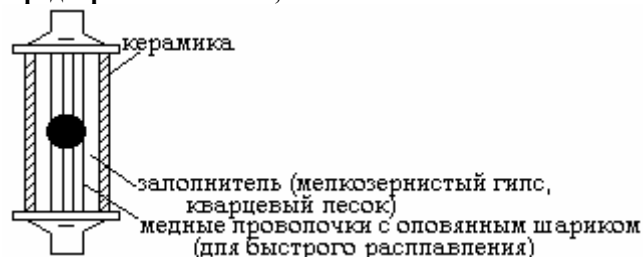


Рис.201.

Конструкция НПН и ПН-2 одинаковая, только у ПН-2 корпус не керамический, а стеклянный.

ПНБ-2 - быстродействующий предохранитель.

40-600; $V = 500$ В. Плавкая вставка специальной конструкции из очень тонких проводников; за счет этого время срабатывания уменьшается в 10-12 раз. Применяются ПНБ-2 для защиты преобразователей (VS, VD, VT). У быстродействующих плавких вставок со взрывным патроном $t_{сраб.} = 0,03$ мс.

Существуют также предохранители для защиты А.Д. с большими пусковыми токами. Для защиты А.Д. применяются так называемые инерционные предохранители (устанавливаются на щитке вблизи самого А.Д.).

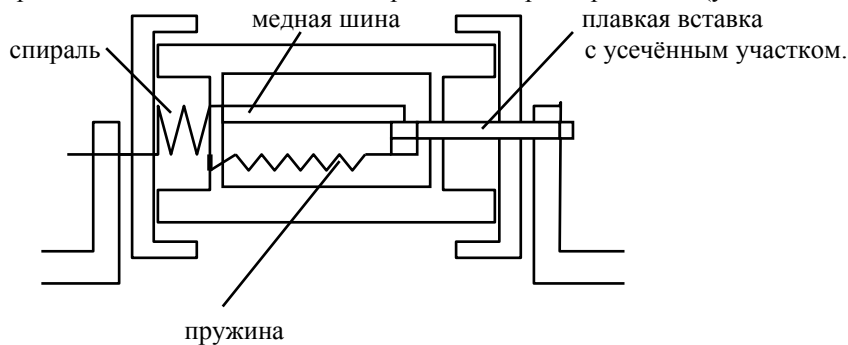


Рис.202.

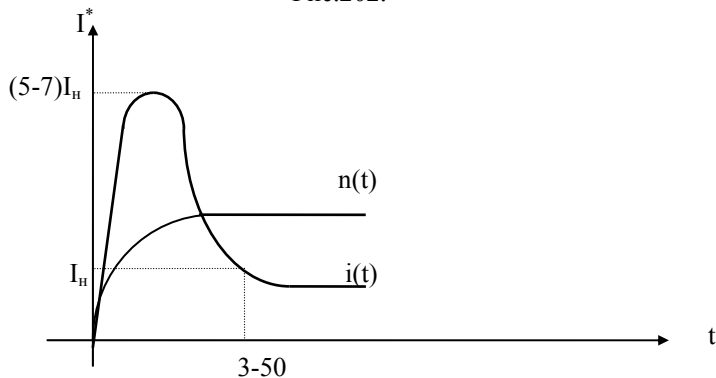


Рис.203.

Температура размягчения припоя 60-70 С задержка 15-20 сек., т.е. если не состоялся пуск и ток остаётся на уровне пускового (обрыв фазы, заклинивание механизма). Тепловая волна достигает место припоя, пружина отдёргивает неподвижный контакт и двигатель отключается от сети.

В случае К.З. фазы на корпус или меж-дуфазного замыкания ток превышает пусковой ($I = 8-10 I_n$), при этом перегорает тонкая часть плавкой вставки. При перегрузке двигателя также перегорает плавкая вставка (через 15-20 мин). Преимуществом плавких вставок является простота обслуживания.

Недостатки:

1. Невозможность использования предохранителей в качестве коммутационных аппаратов.
 2. Невозможность отключения сразу 3-х фаз при аварии.
 3. Неудовлетворительная защита потребителей (двигателей) при малых перегрузках.
 4. Зависимость температуры плавления вставки от окружающей среды.
- Плавкие вставки применяются на судах, как правило только для защиты осветительных сетей.

АВТОМАТИЧЕСКИЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ.

Для автоматического отключения одновременно 3-х фаз при превышении тока в любой фазе и нечастых коммутаций силовой сети. Следующие типы АВ применяются на судах: А - 3100; АК;А - 3300; АМ; А - 3700; АП; АС и др. Независимо от типа АВ, все они имеют:

1. контактную систему;
2. дугогасительное устройство;
3. механизм свободного расцепления;
4. автоматическое расцепляющее устройство.

Контактная система АВ состоит из следующих контактов.

1. Главные контакты - несут основную токовую нагрузку.
2. Предварительные контакты.
3. Дугогасительные контакты.

При замыкании контактов вначале срабатывают (2), которые принимают на себя бросок тока и дугу при включении. Затем замыкаются главные контакты (1). При отключении сначала размыкаются (1), ток переходит на (2), а затем на (3). Это сделано для защиты главных контактов от обгорания (эл. дуга).

Дугогасительное устройство: индуктивность, находящаяся в цепи, возникает E самоиндукции, которая в несколько раз превышает $U_{пит}$. Дуга, возникающая в АВ, гасится следующим образом в дугогасительной камере (ДК): ответное магнитное поле от токов Фуко втягивает её в ДК разрезая при этом её на части. У каждого АВ своя конструкция ДК.

Механизм свободного расцепления:

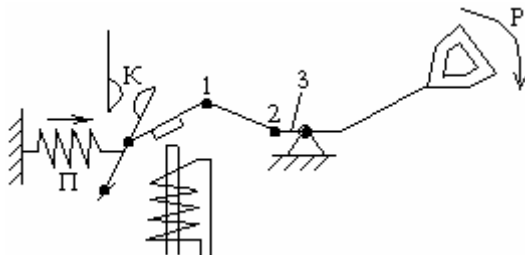


Рис.204.

При включении рычаги 1,2 остаются в спрямлённом состоянии, сжимается пружина и размыкается контакт.

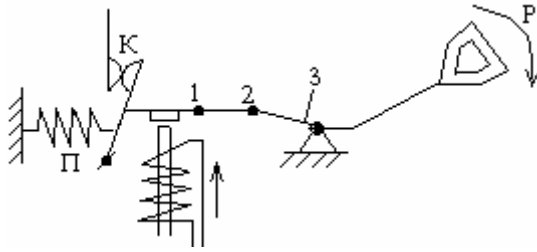


Рис.205.

Якорь подпружинен, при подаче на него питания он ударяет по рычагу 1, рычаги 1,2 выходят из устойчивого положения и автомат отключается под действием сжатой пружины. Автоматическое расцепляющее устройство: (может срабатывать от различных факторов)

1. Превышение или снижение напряжения.
2. Токовая перегрузка.
3. Сверхтоки при КЗ ($5-10, 12 \cdot I_n$)
4. Обратная мощность.

Автоматические включающие устройства.

Это различного рода реле. Каждый автоматический судовой выключатель имеет моторный привод. **Дистанционное управление автоматическим выключателем.**

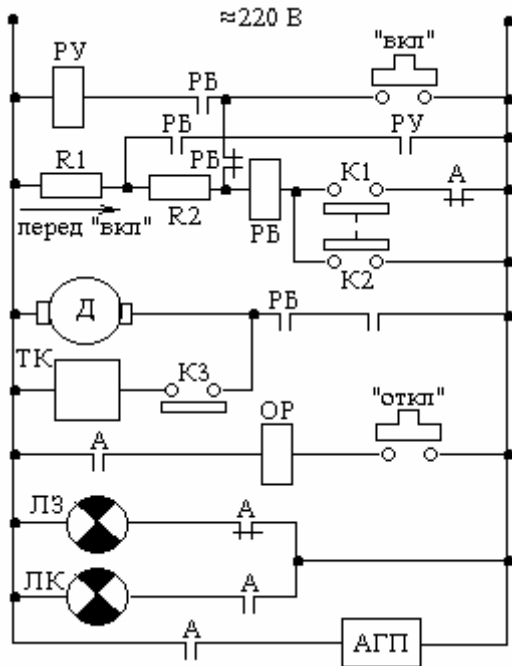


Рис.206.

А - блок контактов автомата.

—|—|— - нормально закрытый контакт.

РУ - реле установки.

РБ - реле блокировки.

ОР - отключающий расцепитель.

R1, R2 - сопротивления для уменьшения тока через реле блокировки.

K1, K2, K3 - контакты конечного выключателя.

Д - высокомоментный коллекторный двигатель.

ЛЗ, ЛК - лампы о состоянии автомата сигнализации.

Во включённом состоянии: $K1 \downarrow, K2 \uparrow, K3 \uparrow$. При нажатии кнопки "ВКЛ" (РБ до этого находился под питанием, контакт РБ замкнут) РУ встаёт на самоблокировку; РУ и РБ срабатывают и включают двигатель; на эл-м тормоз (ТК) подаётся напряжение, двигатель растормаживается, начинает крутиться и взводит пружину.

Контактами кулачкового переключателя K1 размыкается, а K2 замыкается. После того, как конечный выключатель встанет в крайнее положение и рвёт цепь K2, реле РБ обесточивается, контакт РБ отключается и двигатель останавливается с помощью электромагнита, который затормаживается в обесточенном состоянии. Лампа ЛК загорается, ЛЗ гаснет. Для отключения автомата нужно нажать кнопку "ОТКЛ", на ОР подаётся питание и А размыкается, автомат отключается.

Установочные автоматы.

Это упрощенные автоматические выключатели; у них отсутствует моторный привод; упрощена контактная система; имеется всего одна пара контактов. ПК перекачивается по НК.



Рис.207.

ПК - подвижный контакт; НК - неподвижный контакт.

ВКЛЮЧЕНИЕ: 1,2,3; ОТКЛЮЧЕНИЕ: 3,2,1.

Часть 1 включается первой и отключается последней - принимает на себя основную дугу. Установочные АВ имеют встроенные реле:

1. Тепловое реле.
2. Максимальное реле (max.1).

В некоторых конструкциях отсутствует тепловое реле. Тепловые выключатели (расцепители) имеют несколько калиброванных вставок. Если АВ имеет электромагнитный расцепитель, то он тоже калибруется на определённые величины срабатывания, кратные по номинальному току (6,8,10,12).

Устройство:

Тепловой расцепитель - биметаллическая пластинка (сталь и медь сварены).

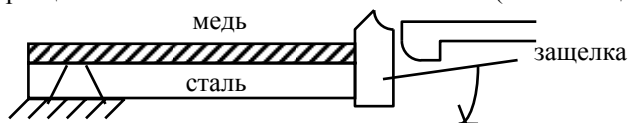


Рис.208.

Электромагнитный расцепитель - катушка в каждой фазе, толкатель.

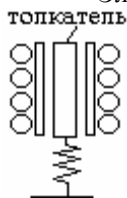


Рис.209.

При К.З. пружина сжимается, толкатель вниз, воздействие на защёлку у теплового расцепителя и АВ отключается. Толкатель срабатывает мгновенно. Защёлки работают по мере нагрева.

Установочные АВ служат для защиты цепей от перегрузок и К.З., а также нечастых коммутаций. На судах применяются главным образом УАВ типов АК, АП, А3000, А3300, А3700. Последние три - групповые выключатели на большие токи.

Защита групповых щитов и мощных потребителей.

Токо-временная характеристика.

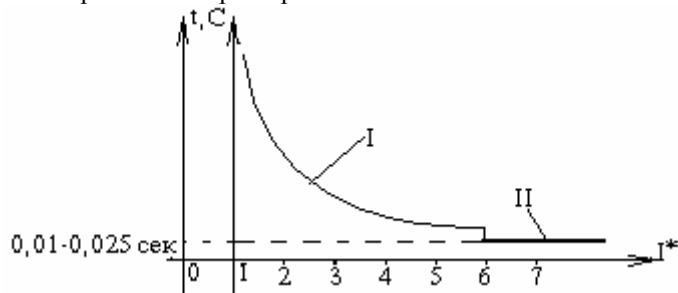


Рис.210.

t_c - Время срабатывания (время от момента скачка тока).
 I - Защита от перегрузки. Формируется тепловым расцепителем.
 II - Защита от К.З. Времянезависимая характеристика.

Чтобы осуществить селективность защиты АУВ могут иметь замедлитель срабатывания максимальной защиты: 0,01÷0,025 секунд - время срабатывания замедлителя. Селективность может быть обеспечена с помощью настройки на определённые токи срабатывания.

ПРИМЕР:

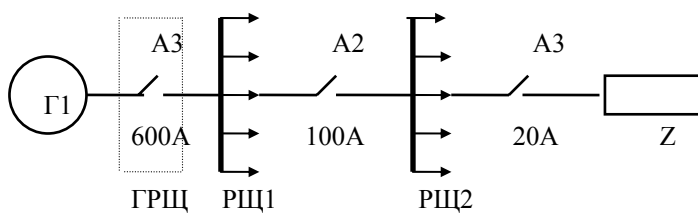


Рис.211.

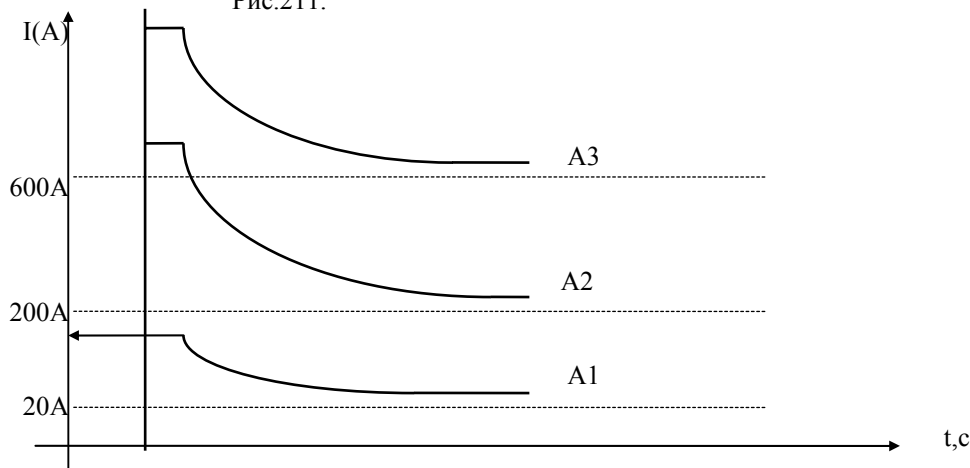


Рис.212.

Недостаток АУВ: невозможность немедленного включения после срабатывания теплового расцепителя. Необходимость подождать несколько секунд для его остывания.

Реле защиты. Предназначены для получения сигналов о ненормальных режимах работы различных сетей и устройств. Классификация:

1. Электрические.
2. Газовые.
3. Механические.

По принципу действия:

1. Электромагнитные.
2. Индукционные.
3. Электронные.
4. Тепловые.

По роду воспринимаемой ими величины:

1. Токовые.
2. Реле напряжения.
3. Реле температуры.
4. Реле мощности.
5. Реле давления.

По способу коммутации силовой цепи:

1. Контактные реле.
2. Бесконтактные реле.

По способу включения в защищаемую сеть:

1. Первичные реле (якорь реле непосредственно воздействует на отключающие устройства).
2. Вторичные реле (имеется промежуточная цепь).

Защита судовых сетей.

В электрических сетях могут возникнуть как правило, только два ненормальных режима работы - перегрузка и короткое замыкание, которые должны автоматически прерываться защитными аппаратами. В обоих случаях по фидерам или по магистралям протекают токи, превышающие рабочее значения (на основании которых выбирается сечение кабелей). Под действием этих токов резко сокращается срок службы кабелей (возможно также их возгорание). Защита сетей распределения электроэнергии обычно осуществляется по отдельным участкам. Участок сети между ГРЩ и генератором выбирается по номинальному току генератора. В связи с этим защита от перегрузки данного участка обычно осуществляется средствами, которые защищают генератор.

Схема защиты силовой сети распределения электрической энергии от токов перегрузки и токов К.З.

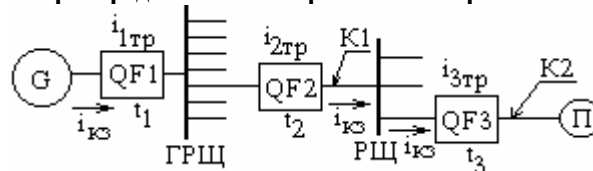


Рис.213.

Участки сети между ГРЩ и приёмниками электроэнергии П, а также между РЩ и П выбирают по номинальным токам соответствующих приёмников. В связи с этим защита от перегрузки данных участков осуществляется средствами, которые защищают приёмники электроэнергии. Перегрузка участков сети между ГРЩ и РЩ, а также между двумя любыми другими РЩ возможна в случае существенной перегрузки приёмников, т.к. сечения кабелей этих участков выбирают по суммарному току приёмников (с учётом коэффициента одновременности) наиболее загруженного режима. Как показывает практика, такие случаи маловероятны. Поэтому при значительном количестве приёмников, питающихся от РЩ, кабели, подающие энергию к РЩ, от перегрузки не защищаются. В случае перегрузки любого приёмника его должна отключить собственная защита (на участке РЩ-П). Тем самым устраняется возможная перегрузка кабелей между РЩ.

КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ может возникнуть в любой точке сети распределения электроэнергии. Предположим, что К.З. произошло в точке К1 электросистемы. При этом ток К.З. ($i_{кз}$) потечёт от Г к ГРЩ, от ГРЩ к РЩ, от РЩ в К1 проходя ряд участков сети и защитные аппараты (QF1, QF2, QF3). Значение тока К.З. обычно оказывается больше тока установки этих защитных аппаратов, вследствие чего они получают импульс на отключение. При этом может произойти отключение генераторного аппарата и полное обесточивание электросистемы. Тогда произойдёт включение аварийных источников электроэнергии и судно окажется в аварийном режиме работы.

Защитные аппараты, прерывающие ненормальный режим работы, вызванный коротким замыканием в электросетях, должны обеспечивать избирательное отключение участков сети. В данном случае отключиться должен только аппарат QF3, ближайший к точке К.З. После этого ток К.З. исчезнет, а остальные аппараты останутся включёнными. Электросистема будет продолжать нормальное функционирование.

Избирательность защиты сети при К.З. можно получить настройкой защитных аппаратов по току срабатывания. Избирательность защиты по времени достигается использованием селективных автоматов, допус-

кающих регулирование времени их отключения в зоне К.З.(согласно времятоковой характеристике). При этом необходимо, чтобы время отключения автоматов уменьшалось ступенями от источника электроэнергии к приёмникам, т.е. должно соблюдаться условие $t_1 > t_2 > t_3$.

В связи с этим ближайшими к приёмникам аппаратами защиты (QF3) должны быть автоматы серий АС-25, АК-50 или АЗ700БР, время отключения токов КЗ которых равно 0,04с. В качестве аппаратов QF2, QF1 следующих ступеней защиты (по направлению к генераторам) должны применяться автоматы серии АЗ700СР допускающие уставки по времени 0,1; 0,25; 0,4 сек. или автоматы серии АМ, ВА, допускающие уставки по времени 0,18; 0,38; 0,63; 1,0 сек. Избирательность защиты сети по току срабатывания можно обеспечить при условии, что при данном (ожидаемом) токе К.З. аппарат, расположенный ближе к точке К.З. имеет ток трогания меньше тока К.З., а аппарат, расположенный дальше от точки К.З. - больше. При этом ближайший к точке К.З. аппарат отключится, а удалённые от неё аппараты не будут реагировать на нарушение режима работы. Например при коротком замыкании в точке К1 избирательность защиты по току будет обеспечена, если $i_{1тр} < i_{2тр} < i_{кз1} < i_{3тр}$, где $i_{1тр}$, $i_{2тр}$, $i_{3тр}$ - токи срабатывания автоматов QF1, QF2, QF3; $i_{кз1}$ - ток К.З. при коротком замыкании в точке К1. При коротком замыкании в точке К2 избирательность защиты по току обеспечивается, если $i_{1тр} > i_{кз2} > i_{2тр}$. Из этих условий следует, что построение избирательной защиты по току связано с выполнением многократных расчётов токов К.З. Если токи К.З. превышают токи трогания последовательно включённых аппаратов, то избирательность по току построить невозможно.

В случае отказа в работе аппарата, ближайшего к точке К.З., возникает пожар, так как последующие в цепи аппараты на данный ток К.З. не реагируют. Поэтому защита по времени является более надёжной, чем защита по току. Практически приходится применять смешанный тип защиты электросетей от токов К.З., а именно, особо ответственная часть сети обеспечивается избирательной защитой по времени, другая по току. Однако во всех случаях необходимо обеспечивать избирательную защиту по времени между Г, ГРЩ и РЩ.

При использовании автоматов вместе с предохранителями избирательность защиты достигается в том случае, если время отключения автомата не менее 0,15 сек., так как время згорания плавкой вставки предохранителя при К.З. примерно 0,05-0,1 секунда.

Защита генераторных агрегатов.

Они являются источниками электроэнергии судна. Их выход из строя приводит к тяжёлым последствиям, поэтому они должны иметь развитую систему защиты.

1. Потеря вращающего момента первичным двигателем (уменьшение или прекращение подачи топлива).
2. Потеря или снижение напряжения возбуждения генератора.
3. Поломка соединительной муфты между генератором и двигателем.

Во всех вышеперечисленных случаях генератор переходит в двигательный режим, если имеется параллельная работа. Если её нет, то происходит уменьшение напряжения, уменьшение частоты и потеря выработки электроэнергии. При наличии параллельной работы, для того, чтобы исключить переход в двигательный режим, устанавливается защита от обратной мощности. Кроме того, при работе генераторов возможно возникновение режимов перегрузки и К.З. (3-х фазное, 2-х фазное, 1 фазное на землю). От 2-х и 3-х фазных К.З. защищаются специальным максимальным реле. Однофазные К.З. контролируются с помощью увеличения контроля изоляции. Кроме того, в генераторе могут возникать замыкания обмотки на корпус. Для контроля таких режимов ставится дифференциальная защита, а для предохранения ОВ от перенапряжений, возникающих при К.З. и отключения генератора от сети, устанавливается устройство гашения поля.

Защита от обратной мощности (направленная защита).

Защита выполняется двух типов:

1. С помощью реле ИМ-149 (электромеханическое реле обратной мощности)
2. Поляризованное реле (срабатывает в зависимости от направления тока, имеет постоянный магнит).

Реле ИМ-149. Отключает сигнал по току и сигнал по напряжению.

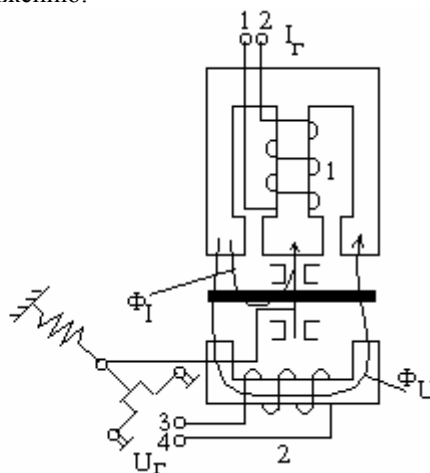
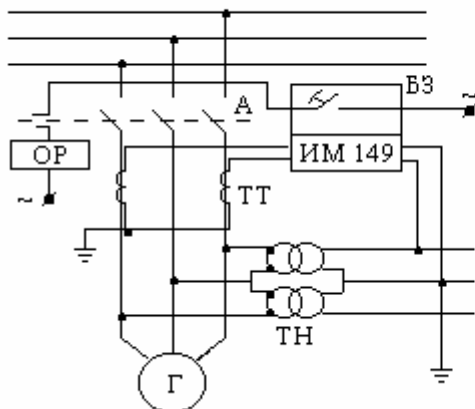
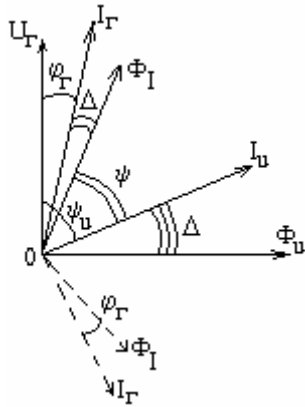


Рис.214.

Под действием двух полей в диске наводятся токи Фуко и возникает вращающий момент.
 $M = k \cdot \Phi_U \cdot \Phi_I \cdot \sin \psi$



Так как катушка 2 имеет много витков, то I отстаёт от $U \approx 90^\circ$. Угол ψ определяет величину и знак вращающегося момента. Если первичный двигатель потерял момент (или U_b понизилось) - вектор I_G поворачивается, момент действует на диск, меняет знак, контакт К замыкается и включается реле времени РВ с выдержкой времени 12 секунд. Если эти контакты замкнуты больше 12 секунд, то замыкается контакт РВ, подаётся питание на расцепитель ОР и автоматом А генератор отключается от сети. Выдержка времени нужна для исключения ложных срабатываний системы в различных переходных режимах генератора.

Рис.215.

Схема с использованием 2-х катушечного поляризованного реле.

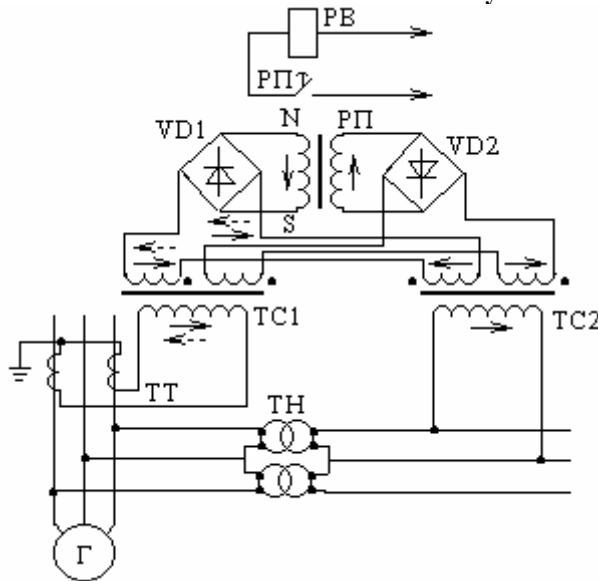


Схема включения ПР та же, что и в предыдущем случае, но вместо ИМ-149 включён ПР.

Рис.217.

Защита от обратной мощности генераторов постоянного тока.

Выполнена с помощью электромеханического реле типа ДТ.

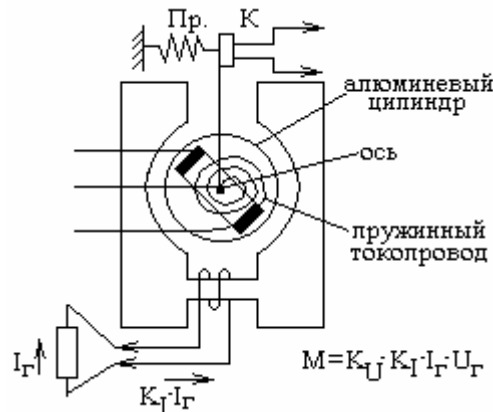


Рис.218.

Типовая система УРГ.

Общая структурная схема разгрузки.

U_1, U_2, U_3, U_4 - катушки отключающих расцепителей автоматических выключателей. В1, В2, В3, В4 - реле времени. Выдержки времени: В1 - 4 с, В2 - 8 с, В3 - 14 с, В4 - 20 с.

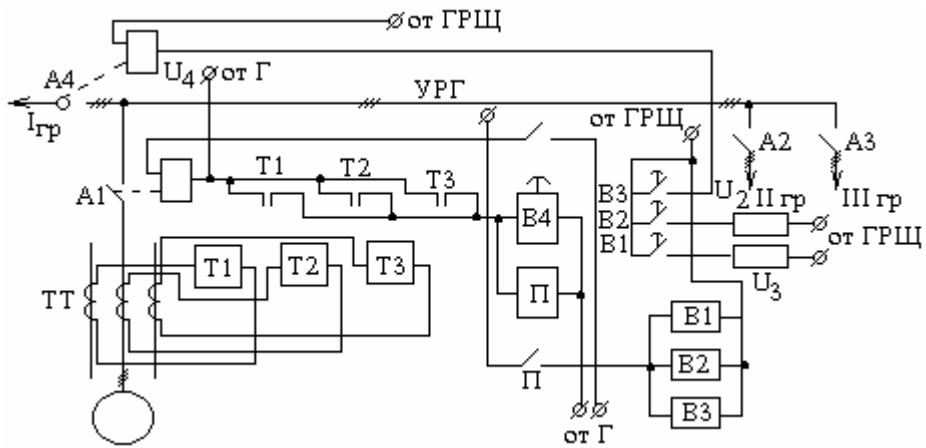


Рис.219.

Автомат А1 отключается через 20 секунд, выключая генератор. При этом должен включиться резервный или аварийный генератор.

Защита от замыкания обмотки статора генератора на корпус

(дифференциальная защита).

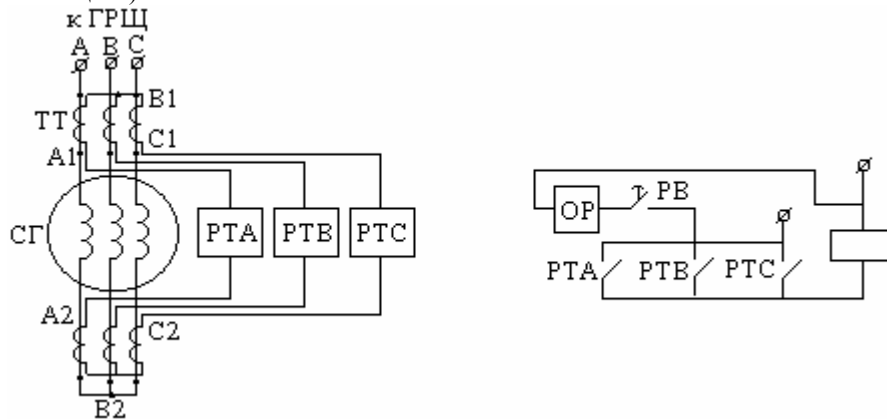


Рис.220.

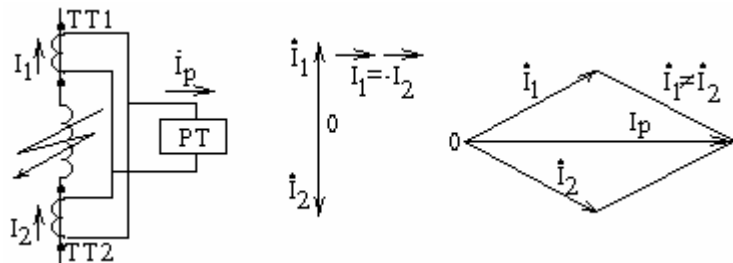


Рис.221.

При возникновении междуфазного К.З. (виткового К.З.) подаётся питание на РТ, затем РТ срабатывает и подаётся питание на РВ, который срабатывает и отключает генератор от сети.

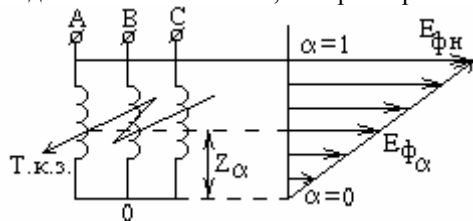
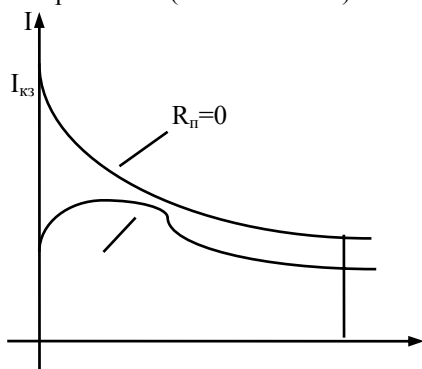


Рис.222.

$R_n=0$ глухое (металлическое) к.з.

$R_n \neq 0$ - нормальное (обыкновенное) к.з.



$$R_\alpha = \alpha \cdot R_a ; X_\alpha = \alpha \cdot X_a \quad Z_\alpha = R_\alpha + j \cdot X_\alpha + R. \text{ Отсюда } \Rightarrow$$

$$I_{кз} \approx \frac{a \cdot E_{фн}}{\sqrt{(R_{\Pi} + a \cdot R_a)^2 + a^4 \cdot X_a^2}} = \frac{E_{фн}}{\sqrt{\left(\frac{R_{\Pi}}{a} + R_a\right)^2 + a^2 \cdot X_a^2}}$$

$$R_n \neq 0$$

α

0

1

Рис.223.

Защита ОБ СГ от повышения напряжения (превышения).

Устройство гашения поля: снижение тока возбуждения необходимо производить так, чтобы возникающая на обмотке э.д.с. самоиндукции $E_{см}$ не превышала допустимого значения для её изоляции. (Кратковременно допустимо ≈ 1500 В). Для этого величину броска тока при оключении обмотки ограничивают добавочным резистором, включаемого последовательно с обмоткой; включением так называемой деионной решётки вместо резистора или сбросом энергии магнитного поля ОБ в питающую сеть посредством вентильного преобразователя в инверторном режиме.

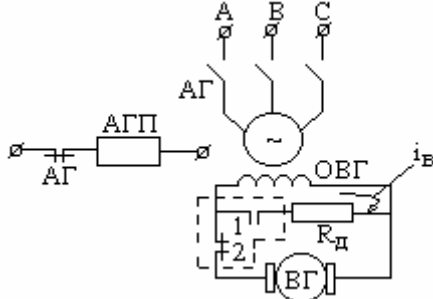


Рис.224.

Контакты 1 и 2 работают с перекрытием по времени на 1-2 с (чтобы не было дуги от увеличения U) Через секунду K2 размыкается, а K1 остаётся замкнутым.

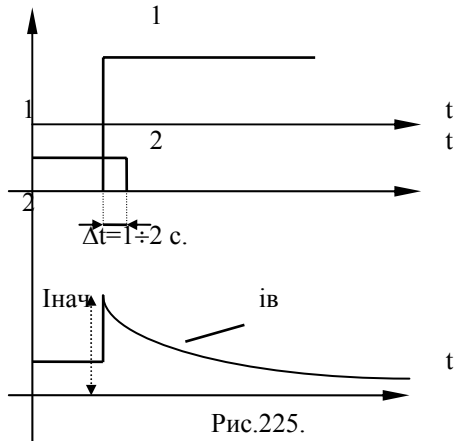


Рис.225.

$$L_B \frac{di_B}{dt} + (R_d + r_B) \cdot i = 0; i_B = I_{н} \cdot e^{-\frac{t}{T_B}};$$

$$T_B = \frac{L_B}{R_d + r_B}$$

Расчёт добавочного сопротивления R_d .

- 1) Для сетей с $U_B = 110 \div 220$ В : $R_d = (4 \div 5)r_B$
 - 2) Для сетей с $U_B = 24 \div 48$ В : $R_d = (7 \div 8)r_B$
- $U_{доп\ max} \leq K_n U_{осл} \quad K_n = 0,6.$
2. Применение деионной решётки.

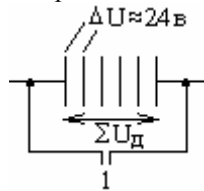


Рис.226.

АПП остаётся, но его конструкция меняется: контакт 1 имеет деионную решётку. Это набор стальных пластин.

Порядок работы: K1 замыкается, а потом размыкается. $\Sigma U_d \leq U_{доп\ max}$

$$K = \frac{U_{доп\ max}}{r_B \cdot I_{нач}}$$

где K - количество пластин; $I_{нач}$ - начальный ток.

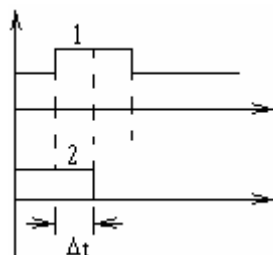


Рис.227.

Время горения дуги определяется по формуле: $t = T_B \cdot \ln \frac{k+1}{k}$; $T_B = \frac{L_B}{r_B}$

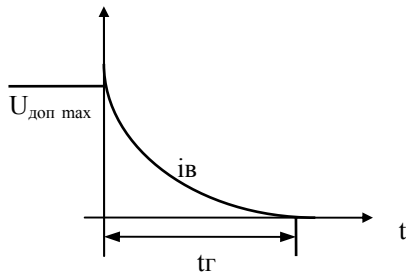


Рис.228.

В качестве R_d иногда применяют специальный полупроводниковый резистор, сопротивление которого зависит от приложенного к нему напряжения, $\uparrow U \rightarrow \uparrow R$.

3. Применение тиристорного преобразователя путём перевода его в инверторный режим.

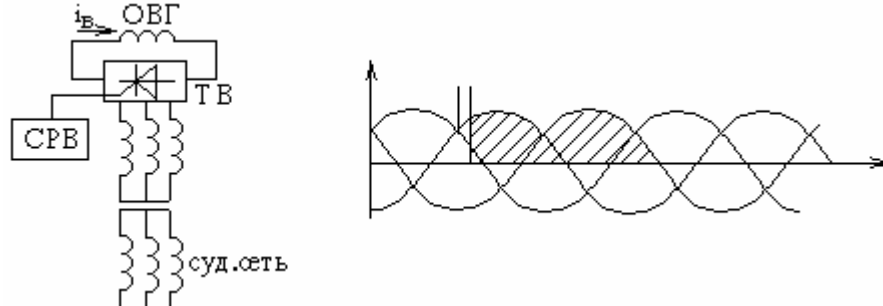


Рис.229.

ТВ - тиристорный возбудитель; $+P = +i_B \cdot U_d$; $-P = +i_B \cdot (-U_d)$

Защита генераторов от К.З. с помощью максимальных реле (реле max. тока), встроенных в АВ или устанавливаемых отдельно. Селективность обеспечивается с помощью регулируемой выдержки времени.

Защита судовых электродвигателей.

Основными ненормальными режимами для АД являются:

Перегрузка, возникающая из-за:

- превышения нагрузки на двигатель над его P : $S \uparrow, I \uparrow$;
- перегрузка вследствие обрыва фазы (т.к. ток через 1 фазу равен 0, а две другие фазы перегружаются);
- выработка подшипников. При этом возникают радиальные биения;
- неправильная перемотка двигателя (асимметрия токов из-за неравного количества витков или иной марки провода). Вся мощность тока обратной последовательности идёт на нагрев ротора.

Различного рода К.З. внутри двигателя: замыкания на корпус; замыкания между фазами.

Защита двигателя от многофазных К.З. осуществляется:

- с помощью максимальных токовых реле, встраиваемых в фазы;
- с помощью встроенных реле максимального тока в установочные выключатели.

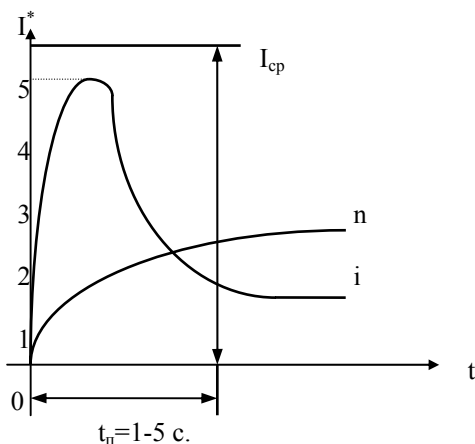
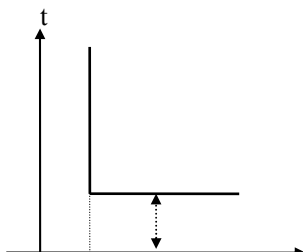


Рис.230.

$I_{ср} > I_{п}$, где $I_{п}$ - пусковой ток; $I_{ср}$ - ток срабатывания. $I_{ср} = K_n \cdot I_{г}$, $K_n - 1,4 \div 1,5$ - коэффициент надёжности.

Ток срабатывания максимальной защиты (max реле) должен примерно в полтора раза превышать пусковой ток $I_{п}$ для исключения ложных срабатываний.

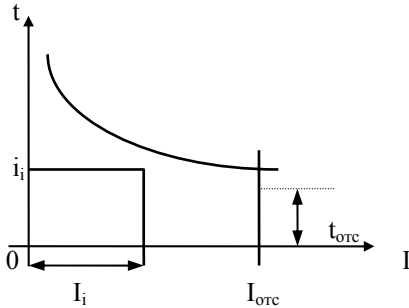


$$t_p \approx 0,5 \text{ с.}$$

I_{cp}

Рис.231.

2. Защита спомощью установочных выключателей.



$$t_{отс} = 0,02 \div 0,04 \text{ с}$$

УСЛОВИЕ:

$$I_{п} < I_{отс}$$

$$I_{п} \cdot t_{п} < I_i \cdot t_i$$

Рис.232.

3. Если защита осуществляется с помощью плавких вставок:

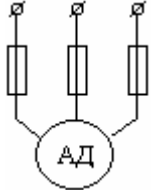


Рис.233.

$$I_{пвс} = I_{п} / K_{н}$$

$K_{н} = 2,5$ - нормальные условия; $K_{н} = 1,6 \div 2$ - тяжёлые условия пуска.

Защита двигателя от перегрузки.

Защита осуществляется с помощью тепловых реле, встраиваемых в установочные выключатели.

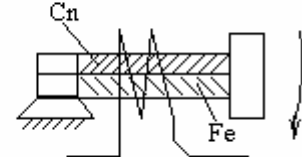
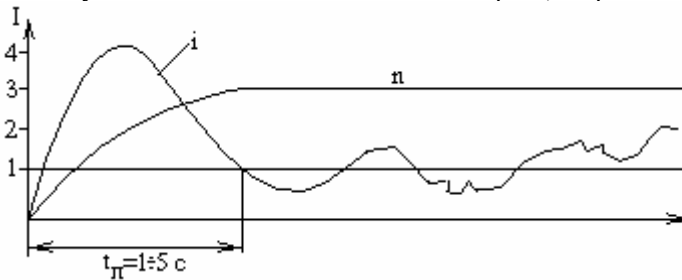


Рис.234.

$$I_{уст} = K_{н} \cdot I_{нд}, \text{ где } K_{н} = 1,2; 1,3; 1,4$$

Недостаток - зависимость от окружающей температуры.

Защита от снижения напряжения.

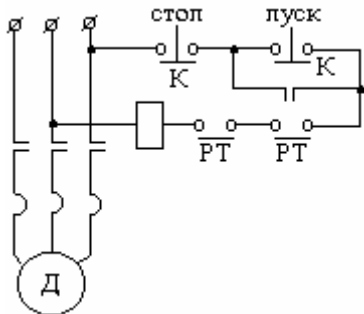
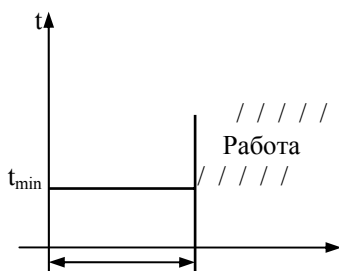


Рис.235.

При $\downarrow U_{сети}$, $\downarrow n$, $\uparrow S$, $\downarrow r_{дв}$, $\uparrow I$, уменьшается вращающий момент. $U_{min} = 0,6 \div 0,8 U_{ном}$

Необходимо двигатель отключить от сети. При этом двигатели отключаются не все сразу, а по категориям важности, так же как и при перегрузке. Защита осуществляется с помощью реле минимального напряжения. Распространённая форма защиты - использование магнитных пускателей.



/// /

U

U_{min}

Рис.236.

Защита выполняется таким образом в 95% случаев.

Защита от обрыва фазы.

При обрыве фазы ток, потребляемый двигателем, возрастает в 1,4 раза. Тепловая защита отключит такой двигатель через 15-20 мин. и более, что не допустимо, т.к. двигатель сгорит. Типовая защита от обрыва фазы (ОФ), применяемая на судах:

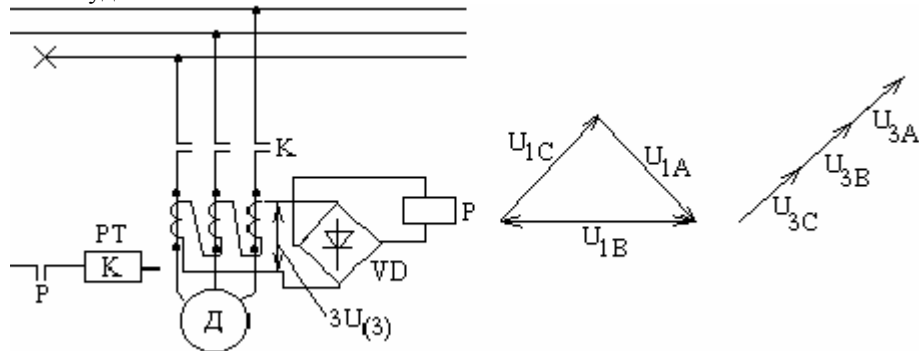


Рис.237.

При обрыве фазы наступает компенсация: реле Р обесточивается и рвётся цепь питания катушки К, что приводит к отключению двигателя от сети.

Устройство автоматической разгрузки генераторов по частоте.

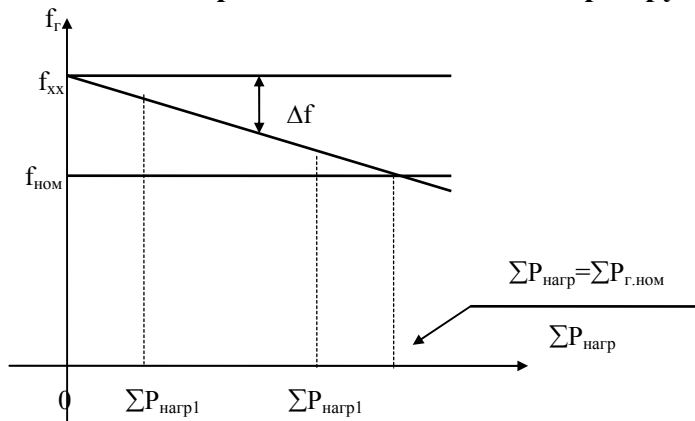


Рис.238.

Данное устройство осуществляет контроль нагрузки генераторов по частоте тока в системе. Данное устройство отключает потребители по степени их важности, если частота в системе снижается ниже нормы.

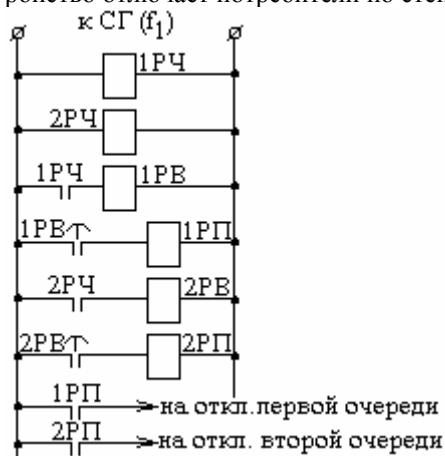


Рис.239.

Устройство реле частоты.

Конструкция и устройство:

РЧ - реле частоты.

РВ - реле времени.

РП - исполнительное реле.

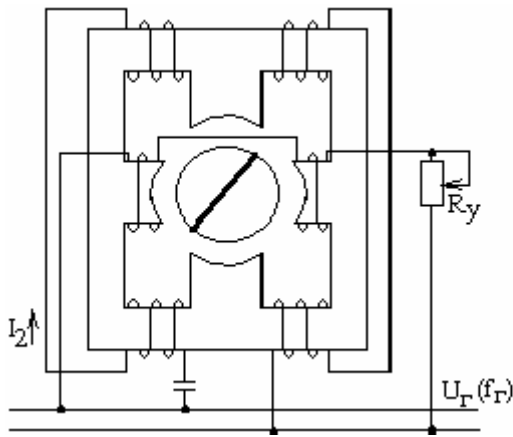
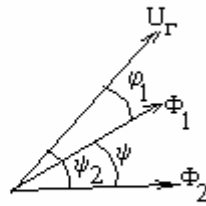


Рис.240.

При уменьшении частоты ротор повернётся по часовой стрелке и контакты замкнутся. Одно реле настраивается на 49 Гц, а другое - на 48 Гц.



$$M = K \cdot \Phi_1 \cdot \Phi_2 \cdot \sin \psi ; \operatorname{tg} \psi_1 = \frac{X_1}{R_1} ;$$

$$X_1 = \omega \cdot L_1 - \frac{1}{\omega_c} ; \operatorname{tg} \psi_2 = \frac{X_2}{R_{2\Sigma}} ;$$

$$X_2 = \omega \cdot L_2 ; R_{2\Sigma} = R_2 + K_y$$

С помощью сопротивления R_y можно настроить схему так, что поток Φ_1 и Φ_2 , и момент, действующий на этот ротор, будут равны "0". В нормальном режиме момент равен 0. С ростом частоты сопротивление в одном контуре растёт(с), а в другом уменьшается.

Режимы К.З. в СЭС.

Это основной аварийный режим. При К.З. возникает :

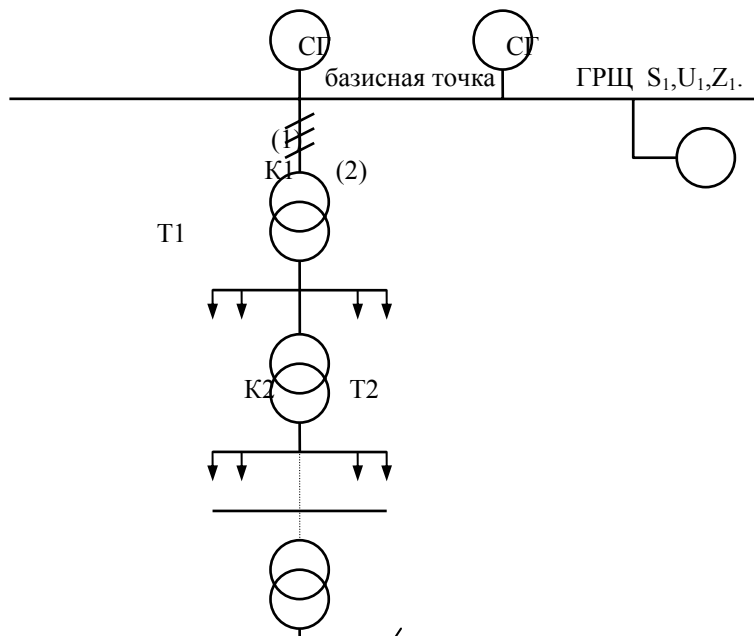
1. Повышение тока до 10-12 $I_{ном}$.
2. Значительное снижение U до $0,2 \div 0,1 U_n$.
3. Выделение большого количества тепла $\Delta P \approx I \cdot r$.
4. Размягчение обмоток ЭМ и шинопроводов.
5. Под действием сильного магнитного поля происходит деформация размягчённых шинопроводов и лобовых частей обмоток эл. машин.

Различают виды КЗ:

1. Трёхфазное (симметричное замыкание).
2. Двухфазное.
3. Однофазное (замыкание на нулевой провод).
4. 2-х и 3-х несимметричные замыкания.

На практике чаще всего встречается двухфазное КЗ, если его вовремя не отключить возникает трёхфазное КЗ. Симметричное КЗ рассчитывается для одной фазы. Эквивалентная схема замещения и результирующее сопротивление цепи КЗ. Расчёт может производиться в именованных (МОм) и о.е. При наличии нескольких ступеней трансформации необходимо производить пересчёт всех сопротивлений, напряжений и токов, входящих в цепь КЗ, в базисные о.е. В базисной точке все величины (I, U, R) будут реальными, а в других точках будут зависеть от коэффициентов трансформации трансформаторов.

ПРИВЕДЕНИЕ:



Kn

n+1; K_{n+1}
точка к.з.

Рис.241.

$$r_{n+1(d)} = (K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_n)^2 \cdot r_{n+1}; \quad x_{n+1(d)} = (K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_n)^2 \cdot x_{n+1}$$

$$E_{n+1(d)} = (K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_n) \cdot E_{n+1}; \quad I_{n+1(d)} = \left(\frac{1}{K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_n} \right) \cdot I_{n+1}$$

$$K_i = \frac{U_{\text{в}i}}{U_{\text{н}i}} > 1$$

Результирующее сопротивление цепи КЗ: $Z_{\text{рез}(d)} = \sqrt{(\sum r_{i(d)})^2 + (\sum x_{i(d)})^2}$

Пиведённое к базисной точке:

$$\sum r_{i(б)} = r_1 + r_{2(б)} + \dots + r_{(n+1)(б)}$$

$$\sum x_{i(б)} = x_1 + x_{2(б)} + \dots + x_{(n+1)(б)}$$

Напряжение в базисной точке не равно напряжению в точке 2 (см.рис.). Это обусловлено падением напряжения на кабеле.

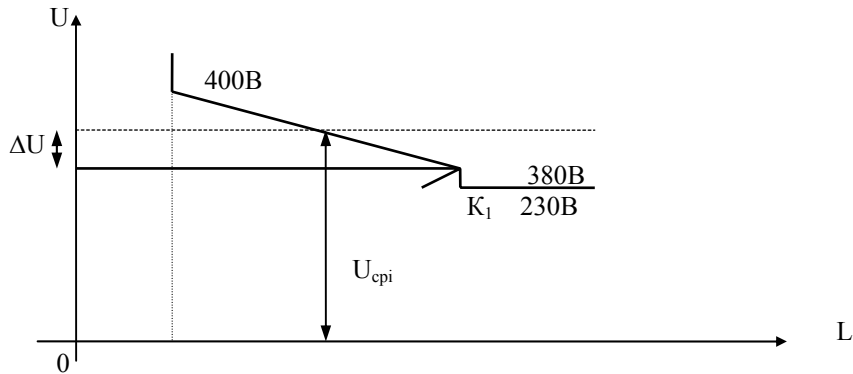


Рис.242.

Соотношения не учитывают падение напряжения на кабельных трассах, т.е. в качестве $U_{\text{в}i}=380\text{В}$, а $U_{\text{н}i}=230\text{В}$. Для того, чтобы не производить расчёт ΔU при определении K_i вводится понятие усреднённого напряжения участка. $K_i=f(\Delta U)$

$$r_{(n+1)(d)} = \left(\frac{U_{\text{с п}1}}{U_{\text{с п}(n+1)}} \right)^2 \cdot r_{(n+1)}; \quad x_{(n+1)(d)} = \left(\frac{U_{\text{с п}1}}{U_{\text{с п}(n+1)}} \right)^2 \cdot x_{(n+1)}$$

$$E_{(n+1)(d)} = \left(\frac{U_{\text{с п}1}}{U_{\text{с п}(n+1)}} \right) \cdot E_{(n+1)}; \quad I_{(n+1)(d)} = \left(\frac{U_{\text{с п}1(n+1)}}{U_{\text{с п}1}} \right) \cdot I_{(n+1)}$$

В качестве $U_{\text{ср}} = 12 \text{ В}; 24 \text{ В}; 127 \text{ В}; 230 \text{ В}; 230 \text{ В}; 400 \text{ В}; 0,625 \text{ кВ}; 3,15 \text{ кВ}$. Расчёт в относительных единицах. Базисные единицы:

- Базисное напряжение - фазное напряжение генератора.
- За базисный ток - фазный ток генератора (1 генератор).

Если электростанция состоит из двух генераторов, то базисный ток рассчитывают через базисную мощность.

$$I_{б}^* = \frac{I}{I_{б}}; \quad U_{(б)}^* = \frac{U}{U_{фб}}; \quad S_{(б)}^* = \frac{S}{S_{б}}; \quad S_{б} = \sum S_{бi}$$

$$S_{б} = 3 \cdot I_{б} \cdot U_{фб} = \sqrt{3} \cdot I_{б} \cdot U_{лб} \Rightarrow I_{б} = \frac{S_{б}}{\sqrt{3} \cdot U_{лб}} = \frac{S_1 + S_2}{\sqrt{3} \cdot U_{лб}}$$

$$U_{лб} = \sqrt{3} \cdot U_{фб}; \quad Z_{(б)}^* = \frac{U_{(б)}^*}{I_{(б)}^*} = \frac{U \cdot I_{(б)}}{I \cdot U_{фб}} = Z \cdot \frac{I_{(б)}}{I} = Z_{(ом)} \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot I_{б}}{U_{лб}}; \quad Z_{(б)}^* = Z_{(ом)} \cdot \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{U_{лб} \cdot I_{б}}{U_{фб} \cdot U_{лб}} = Z_{(ом)} \cdot \frac{S_{б}}{U_{лб}^2}$$

Для того, чтобы делать расчёт в о.е. при наличии нескольких ступеней трансформатора сначала необходимо все сопротивления преобразовать с учётом ступеней трансформации к базисной точке в именованных еди-

ницах, а затем полученные результаты перевести в о.е. Или можно поступить следующим образом:

$$Z_{(6)}^* = Z_{(0.м)} \cdot \frac{S_6}{U_{лб}^2} - \text{в базисные величины.}$$

$$\text{Для базисной точки: } Z_1^* = Z_1 \cdot \frac{S_1}{U_1^2}; \quad \frac{Z_{(6)}^*}{Z_1^*} = \frac{S_6}{U_{лб}^2} \cdot \frac{U_1^2}{S_1}; \quad Z_{(d)}^* = Z_1 \cdot \frac{S_6 \cdot U_1^2}{S_1 \cdot U_{лб}^2};$$

где S_1, Z_1, U_1 - некоторые параметры, которые мы хотим перевести к базисным величинам (эквивалентный двигатель, участок цепи). Практические расчёты токов К.З.

1. Определение периодической составляющей тока с помощью расчётных кривых.

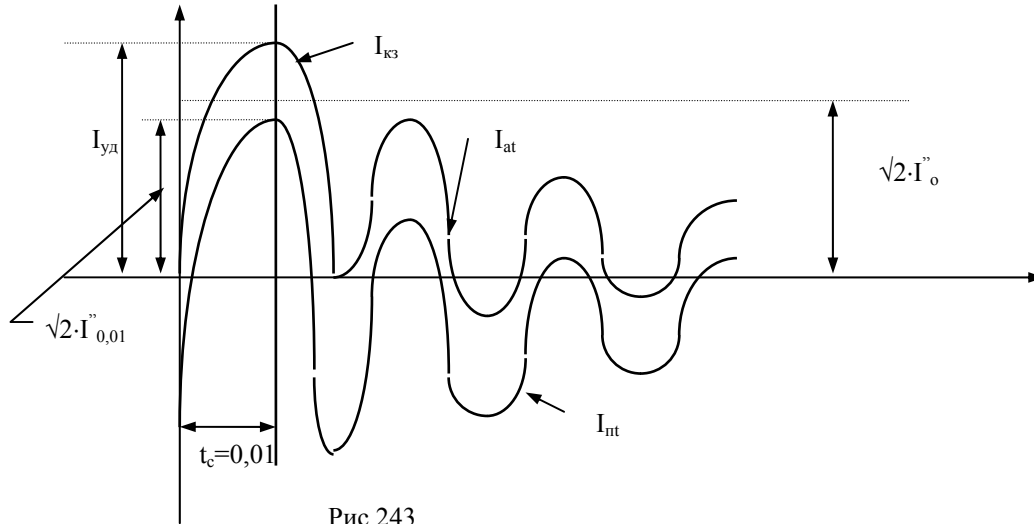


Рис.243.

$$I_{кз} = I_{ат} + I_{пт} \cdot i_{уд} = \sqrt{2} I''_{0,01} + \sqrt{2} I''_0 \cdot e^{-\frac{t}{T_a}}, \text{ где } I'' - \text{сверхпереходный ток К.З.}$$

Метод расчётных кривых.

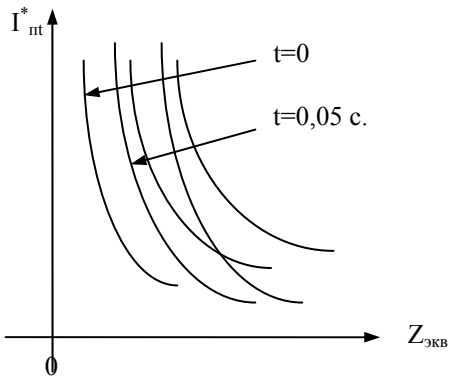


Рис.244.

$I_{0,01} \rightarrow t=0,01$; $I_0 \rightarrow t=0$

Виды схем:

- 1) Симметричная схема, когда точка К.З. питает несколько одинаковых генераторов через одинаковые кабели.
- 2) Несимметричная, когда генераторы и кабели разные.
- 3) Генераторы и кабели разные, но имеется общий участок цепи, через который проходит ток К.З.

1. Расчёт по общему изменению.

$S_1=S_2=\dots=S_n$; $Z_{\text{рез}1}=Z_{\text{рез}2}=\dots=Z_{\text{рез}n}$; $i_{\text{уд(т.к.з.)}}=n \cdot i_{\text{yi}}$; где n -количество генераторов.

Генераторы разные: $S_6=\sum S_i$; $I_6=I_{\text{фн}}$

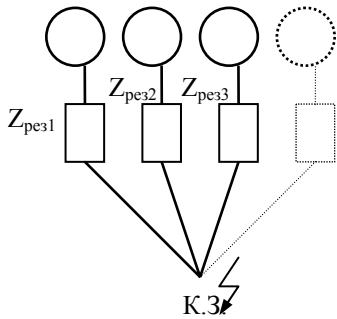


Рис.245.

2. $S_1 \neq S_2 \neq S_3 \neq \dots S_n$; $Z_{\text{рез}1} \neq Z_{\text{рез}2} \neq Z_{\text{рез}3} \neq Z_{\text{рез}n}$

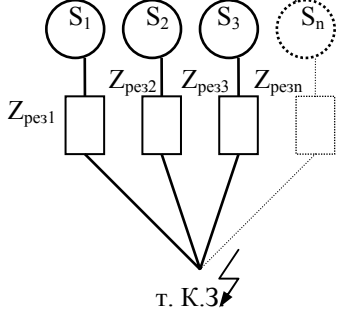


Рис.246.

$$1) S_6 = \sum_{i=1}^n S_i; \quad 2) I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{лб}}}; \quad 3) i_{\text{уд}} = \sum_{i=1}^n i_{\text{уд}i}$$

Можно произвести расчёт в именованных единицах для каждой цепи отдельно, затем результаты складываются и переводятся в о.е. Расчёт по методу условных сопротивлений. Применяется, когда между генератором и точкой К.З. имеется общий участок сопротивления.

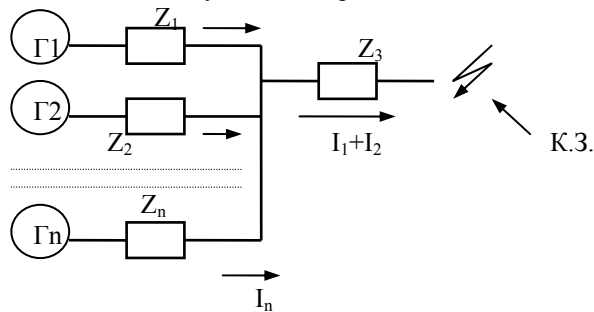


Рис.247.

$$S_{\delta} = S_{\text{НГ1}} + S_{\text{НГ2}}; Z_{\delta} = Z \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{\text{лб}}^2}; I_{\delta} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3}U_{\text{лб}}}$$

$$E_1 = I_1 \cdot Z_1 + (I_1 + I_2) \cdot Z_3;$$

$$E_2 = I_2 \cdot Z_2 + (I_1 + I_2) \cdot Z_3;$$

$$I_2 = \frac{E_2}{Z_2 + Z_3 + \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_1}} + \frac{E_2 - E_1}{Z_1 + Z_2 + \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_3}}; I_1 = \frac{E_1}{Z_1 + Z_3 + \frac{Z_1 \cdot Z_3}{Z_2}} + \frac{E_1 - E_2}{Z_1 + Z_2 + \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_3}};$$

$$I = I_1 + I_2 = \frac{E_1}{Z_1 + Z_3 + \frac{Z_1 \cdot Z_3}{Z_2}} + \frac{E_2}{Z_2 + Z_3 + \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_1}} = \frac{E_1}{Z_{1y}} + \frac{E_2}{Z_{2y}};$$

Z_{1y}, Z_{2y} - условные сопротивления для двухлучевой схемы.

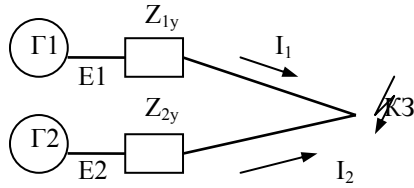


Рис.248.

Расчитать ток К.З.в каждой ветви и найти суммарный ток К.З., используя расчётные кривые. Условные сопротивления пересчитываем к мощности каждого генератора.

$$\frac{Z_{1y(16)}}{Z_{1y}} = \frac{S_{\delta 1}}{S_{\delta}}; \frac{Z_{2y(16)}}{Z_{2y}} = \frac{S_{\delta 2}}{S_{\delta}}; Z_{1y(16)} = Z_{1y} \cdot \frac{S_{\delta 1}}{S_{\delta}}; Z_{2y(16)} = Z_{2y} \cdot \frac{S_{\delta 2}}{S_{\delta}};$$

$Z_{1y(16)}$ - рассчитывается при мощности $S_{\text{НГ1}}$

Z_{1y} - рассчитывается при мощности S_{δ}

ДАЛЕЕ ПО РАСЧЕТНЫМ КРИВЫМ:

$$I_{\text{пт}}(A) = I_{\text{пт}(16)}^* \cdot I_{\delta 1} + I_{\text{пт}(26)}^* \cdot I_{\delta 2}$$

Подобный расчёт справедлив и для n лучей.

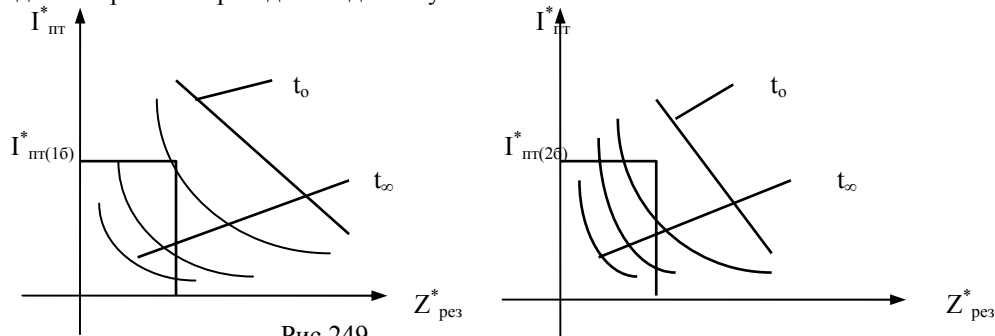


Рис.249.

К.З. в СЭС постоянного тока.

Дифференциальные уравнения для машин постоянного тока.

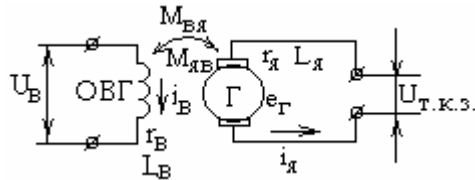


Рис.250.

$M_{\text{в\у}} - \text{взаимодействие якоря и ОВГ.}$

$$i_{\text{я}} \cdot r_{\text{я}} + L_{\text{я}} \cdot \frac{di_{\text{я}}}{dt} + M_{\text{в\у}} \cdot \frac{di_{\text{в}}}{dt} = e_{\text{г}} - U_{\text{т.к.з.}}; i_{\text{в}} \cdot r_{\text{в}} + L_{\text{в}} \cdot \frac{di_{\text{в}}}{dt} + M_{\text{яв}} \cdot \frac{di_{\text{я}}}{dt} = U_{\text{в}}$$

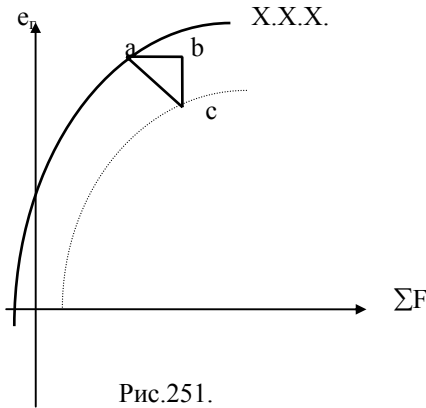


Рис.251.

$M_{\text{в\у}}$ и $M_{\text{яв}}$, $L_{\text{я}}$ и $L_{\text{в}}$ - нелинейны и зависят от тока якоря. В целом система Д.У. нелинейна. По принципу постоянства потокосцепления:

$$\psi_{\text{в}} = \sum i_{\text{в}} \cdot W_i = \text{const.}$$

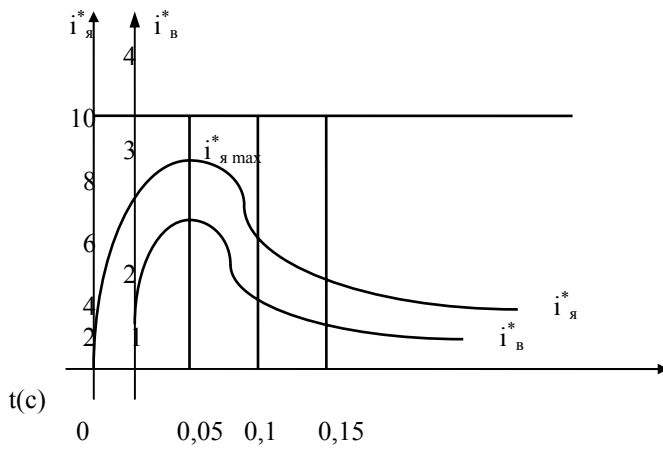


Рис.252.

Рост тока возбуждения объясняется по принципу постоянства потокосцепления. Растёт потокосцепление в якоря, а контуры возбуждения и якоря магнитно связаны, следовательно растёт и $i_{\text{в}}$. Снижение тока из-за наличия реакции якоря и из-за торможения П.Д. Порядок расчёта:

Фиктивное сопротивление генератора в режиме К.З. вводится для практических целей. Кривую К.З. знать не обязательно, а надо знать максимальное значение тока К.З.

И этот максимальный ток К.З. ($I_{\text{кз}}$) можно достаточно точно определить, введя в расчёт фиктивное сопротивление.

$$r_{\text{фг}} = \frac{E_{\text{гн}}}{K_{\text{г}} \cdot I_{\text{гн}}}$$

Максимальное значение тока К.З. $\approx i_{\text{я, макс}}^* = 10$. При расчёте надо знать и токи К.З. двигателей. При К.З. двигатели переходят в генераторный режим, получая момент вращения за счёт инерции приводного механизма:

$$K_{\text{д}} = 4 \text{ для } P \leq 4 \text{ кВт}; K_{\text{д}} = 6 \text{ для } 10 \leq P \leq 100 \text{ кВт}; r_{\text{фд}} = \frac{E_{\text{дн}}}{K_{\text{д}} \cdot I_{\text{дн}}}; K_{\text{д}} = 8 \text{ для } P > 100 \text{ кВт};$$

Расчёт цепи постоянного тока с учётом коэффициентов:

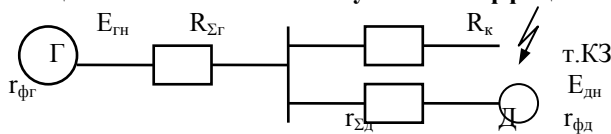


Рис.253.

Допущения:

$$E_{ГН1}=E_{ГН2}=...=E_{ДН1}=E_{ДН2}$$

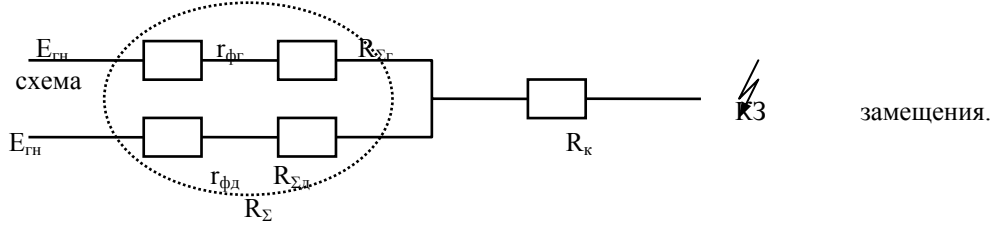


Рис.254.

Далее схема сворачивается в последовательную и определяются эквивалентное сопротивление: $R_{эКВ} = R_{\Sigma} + R_{к}$; $I_{КЗ} = E_{ГН}/R_{эКВ}$.

На судах применяются компаундированные генераторы с положительной обратной связью по току. Пытаются стабилизировать напряжение. При К.З. кратность тока может достигать 12.

К.З. в цепи переменного тока.

Физические явления в цепи генератора переменного тока в упрощённом варианте. Допускается:

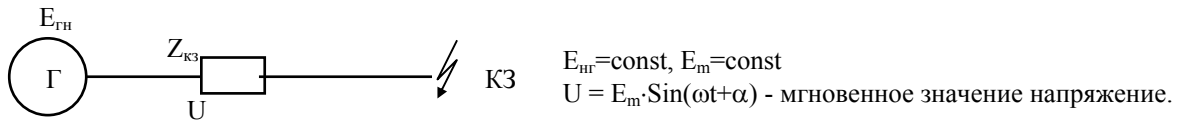


Рис.255.

$$i = r_{кз} + L_{кз} \cdot \frac{di}{dt} = E_m \cdot \sin(\omega t + \alpha); \quad i = i_{вын} + i_{св} = I_{м.кз} \cdot \sin(\omega t + \alpha - j_{кз}) + i_{осв} \cdot e^{-\frac{t}{T_a}}$$

$$I_{мкз} = \frac{E_m}{r_{кз}}; \quad \varphi_{кз} = \arctg(\omega \cdot \frac{L_{кз}}{r_{кз}}); \quad T_a = \frac{L_{кз}}{r_{кз}}; \quad Z_{кз} = r_{кз} + jX_{кз} = \sqrt{r_{кз}^2 + \omega^2 L_{кз}^2}$$

$$i_0 = i_{овын} + i_{осв} = I_{мкз} \cdot \sin(\alpha - \varphi_{кз}) + i_{осв} = I_{мн} \cdot \sin(\alpha - \varphi_{нач})$$

$$i = i_{св} + i_{вын}$$

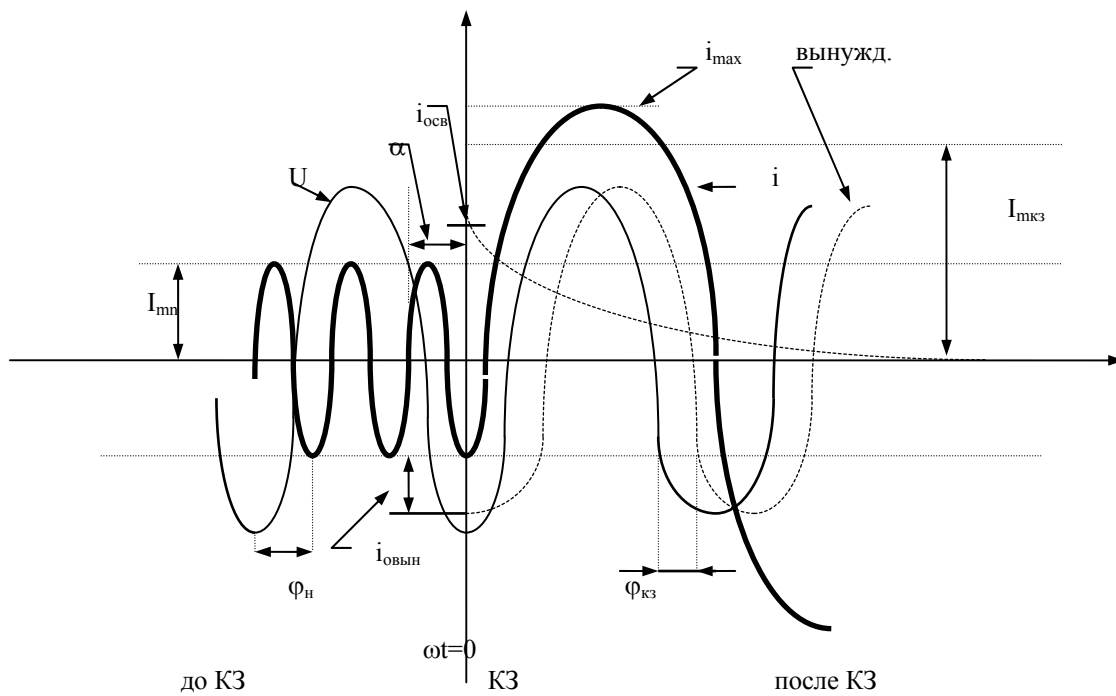


Рис.256.

Максимальное значение тока в первом полупериоде колебания, называется ударным током. В практических целях надо знать ударный ток. Анализ кривых показывает, что i_{max} зависит от: предварительной нагрузки генераторов, момента возникновения К.З. относительно напряжения генератора. Поэтому для расчёта берут самый тяжёлый режим.

$$\alpha - \varphi_{кз} = \pm 90^\circ$$

$$\alpha - \varphi_{н} = \pm 90^\circ$$

$$i_{\text{вын}} = I_{\text{мкз}} \cdot \sin(-90^\circ) = -I_{\text{мкз}}$$

$$i_{\text{осв}} = -I_{\text{мкз}} \cdot \sin(-90^\circ) = I_{\text{мкз}}$$

$$i_{\text{вын}} = I_{\text{мкз}} \cdot \sin(\omega t - 90^\circ) = -I_{\text{мкз}} \cdot \cos(\omega t)$$

$$i_{\text{св}} = I_{\text{мкз}} \cdot e^{-\frac{t}{T_a}}; \quad i = i_{\text{вын}} + i_{\text{св}} = I_{\text{мкз}} \left(e^{-\frac{t}{T_a}} - \cos \omega t \right)$$

При $\omega t = \pi, t = 0,01 \text{ с}$ Условие: $\alpha = \pm 90^\circ$

ударный ток: $i_{\text{уд}} = I_{\text{мкз}} \left(e^{\frac{0,01}{T_a}} + 1 \right)$, где P - ударный коэффициент; $P = \frac{i_{\text{уд}}}{I_{\text{мкз}}}$

Физический смысл: $I_{\text{мкз}}$ - амплитудное значение Sin. $T_a = \frac{L_{кз}}{r_{кз}}$; $P = 1 \div 2$; $T_a = 0 \rightarrow P = 1$; $T_a = \infty \rightarrow P = 2$

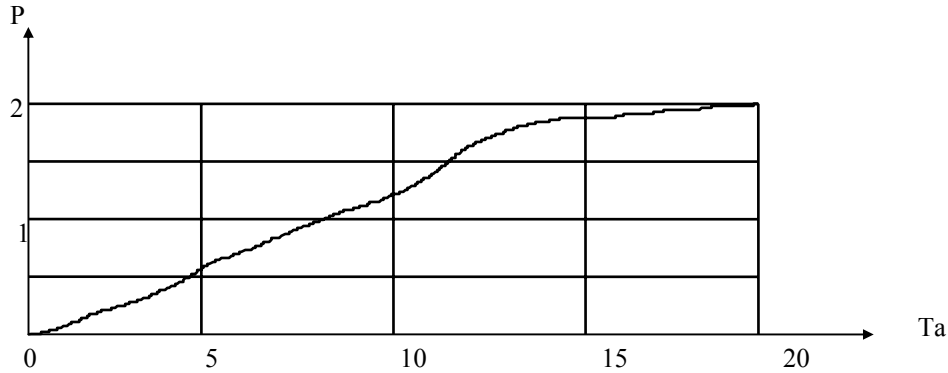


Рис.257.

Ток i раскладывается:

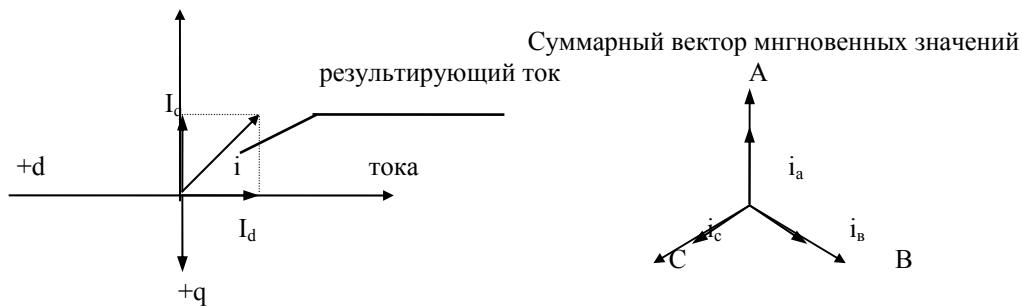


Рис.258.

Результирующий вектор будет вращаться со скоростью ωt - частота тока i_a

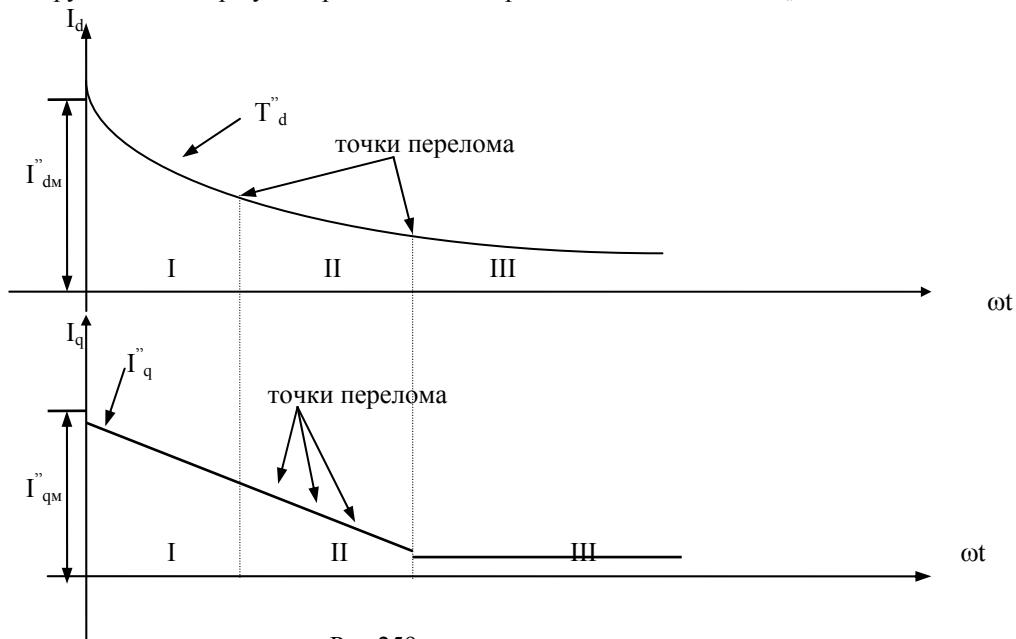


Рис.259.

I - участок соответствует схеме замещения 1СМ (см.за прошлый семестр). Имеется переходный ток в демпферном контуре по оси q и d. Когда имеются трансформируемые токи в демпферных обмотках, процесс называется сверхпереходным.

II - участок соответствует наличию переходного тока в О.В., т.е. в демпферной обмотке по оси d ток отсутствует, но имеется сверхпереходный ток в демпферной обмотке по оси q.

III - участок. Затухает переходный ток в О.В.и демпферной обмотке по оси q. Наступает установившийся режим К.З.

Определение токов на участке:

1 участок	2 участок	3 участок
$I_d'' = E_d''/X_d$	$I_d' = E_d'/X_d$	$I_{d\infty} = E_{d\infty}/X_d$
$I_q'' = E_q''/X_q$	$I_q' = E_q'/X_q$	$I_{q\infty} = E_{q\infty}/X_q$

I_d'' - сверхпереходный ток по оси d.

E_d'' - сверхпереходная ЭДС по оси d.

$E_d^{*''} = 1,05 \div 1,19$ о.е.; $E_d' = 1,01 \div 1,05$ о.е.; $E_q^{*''} = 1,02 \div 1,09$ о.е.

$E_{d\infty}$ - установившееся значение ЭДС К.З.

$I_{d\infty}$ - установившееся значение тока.

$E_{d\infty}$ и $E_{q\infty}$ зависят от системы О.В. генератора.

$E_{d\infty}^* = 0,1 \div 0,3$ о.е.

Начальное значение тока К.З.: $i_{мКЗ} = \sqrt{(I_{dm}'')^2 + (I_{qm}'')^2}$

Расчёт несимметричных токов К.З.

Двухфазное К.З.

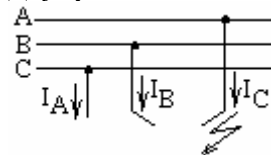


Рис.260.

Метод симметричных составляющих.

Несимметричная схема раскладывается на S симметричные схемы прямой, обратной и нулевой последовательности. Каждая схема рассчитывается отдельно, потом результаты суммируются.

$E_{1\text{рез}} = U_1 + I_1 \cdot Z_{1\text{рез}}$ - прямая последовательность;

$E_{2\text{рез}} = U_2 + I_2 \cdot Z_{2\text{рез}} = 0$ - обратная;

$E_{0\text{рез}} = U_0 + I_0 \cdot Z_{0\text{рез}} = 0$ - нулевая/

Генератор вырабатывает только $E_{1\text{рез}}$. U_1, U_2, U_0 - напряжение в точке К.З. Добавим ещё уравнения:

$I_a = 0, I_b + I_c = 0, U_{bc} = U_b - U_c = 0$

Получим 6 уравнений и 6 неизвестных. Решая 1 и 2, получим:

$$I_1 = \frac{E_{1\text{рез}}}{Z_{1\text{рез}} + Z_{2\text{рез}}}$$

$I_b = -j\sqrt{3} \cdot I_1$ I_1 - прямая последовательность.

$I_c = j\sqrt{3} \cdot I_1$

$U_b = U_0 = 0,5 \cdot U_a$.

Расчёт токов однофазного К.З.

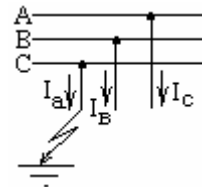


Рис.261.

Уравнения те же: $I_1 = \frac{E_{1\text{рез}}}{Z_{1\text{рез}} + Z_{2\text{рез}} + Z_{0\text{рез}}}$; $I_a = 3 \cdot I_1$

Анализируя полученные результаты можно получить общее выражение для расчёта тока любого вида К.З.

$I = m \cdot I_1$, где n - вид К.З.

$I_1 = \frac{E_{1\text{рез}}}{Z_{1\text{рез}} + Z_{\Delta}}$, где Z_{Δ} - добавочное сопротивление, зависит от вида К.З.

Вид К.З.	Z_{Δ}	m
1	$Z_{2рез} + Z_{орез}$	3
2	$Z_{2рез}$	$\sqrt{3}$
3	0	1

Таким образом находится периодическая составляющая тока К.З.

Расчёт тока несимметричных К.З.с помощью расчётных кривых

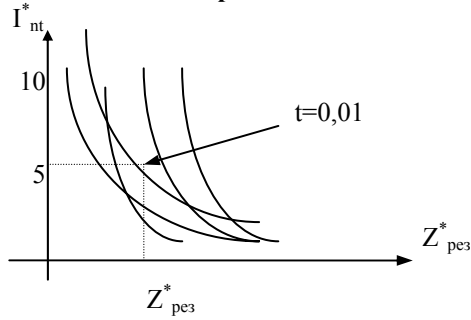


Рис.262.

$$Z_{рез}^* = Z_{1рез}^* + Z_{\Delta}^*$$

$$I_{нт} = m \cdot I_{нт}^* \cdot I_6 \quad (\text{A})$$

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot I_{нт} \cdot P \quad (\text{A}), \quad P - \text{находится по кривым.}$$

Ограничение токов К.З.

Способы ограничения токов К.З.

1. Отказ от параллельной работы генераторов и трансформаторов.
 2. Установка токоограничивающих реакторов между генераторами и потребителями.
- Реакторы - линейные и секционные.

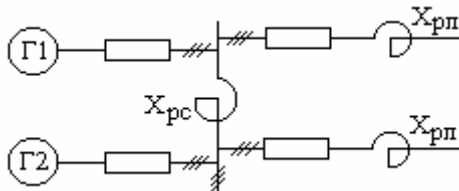


Рис.263.

$$X_{рл} = 8-10\% Z^*_{баз}$$

$$X_{рс} = 12\% Z^*_{баз}$$

$$X_{р\%} = X_{р(ом)} \cdot (\sqrt{3} I_{раб} / U_N) \cdot 100\% = X_{р(ом)} \cdot 1 \cdot 100\% / Z_{баз}$$

Расчёт величины реактора.

По расчётным кривым токов К.З.

Задаёмся величиной $I_{нт}$ и получаем $X^*_{рез}$.

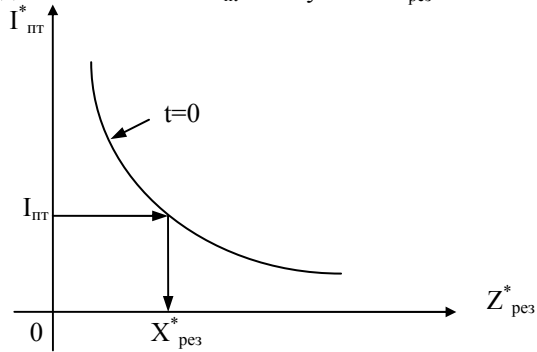


Рис.264.

Схема замещения:

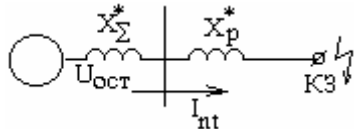


Рис.265.

$$X_p^* = X_{рез}^* - X_{\Sigma}^*$$

$$I_6 = S_T / \sqrt{3} \cdot U_n; \quad I_{пт}^* = I_{пт} / I_6, \text{ где } U_{ост} - \text{остаточное напряжение.}$$

При К.З. на шинах ГРЩ образуется $U_{ост}$. При наличие реактора его величина возрастает, что повышает работоспособность аппаратуры.

$$U_{ост} = \sqrt{3} \cdot I_{пт} \cdot X_{p(ом)} = X_{p\%} \cdot \frac{U_n \cdot I_{пт}}{100\% \cdot I_{раб}}$$