



Федеральное агентство по рыболовству  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Калининградский государственный технический университет»  
(ФГБОУ ВО «КГТУ»)

УТВЕРЖДАЮ  
Директор института

Фонд оценочных средств  
(приложение к рабочей программе модуля)  
**«ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ  
СИСТЕМАХ»**

основной профессиональной образовательной программы бакалавриата  
по направлению подготовки

**13.03.02 ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**

ИНСТИТУТ

морских технологий, энергетики и строительства

РАЗРАБОТЧИК

кафедра энергетики

## 1 РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ, ПЕРЕЧЕНЬ ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ И КРИТЕРИИ ОЦЕНИВАНИЯ

### 1.1 Результаты освоения дисциплины

Таблица 1 – Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с установленными индикаторами достижения компетенций

Код и наименование компетенции	Дисциплина	Результаты обучения (владения, умения и знания), соотнесенные с компетенциями
<p>ПК-1 Способен выполнять работы по обеспечению полного цикла или отдельных стадий эксплуатации и требуемых технологических режимов работы электроустановок и электротехнического оборудования</p>	<p>Переходные процессы в электроэнергетических системах</p>	<p><u>Знать:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- основы электротехники и теории электромагнитных переходных процессов;</li> <li>- технические требования, предъявляемые к электроэнергии и возможные причины их нарушения при протекании переходных процессов;</li> <li>- методы расчета электромагнитных переходных процессов;</li> <li>- технические данные электротехнического оборудования и особенности протекания электромагнитных переходных процессов в синхронных генераторах, трансформаторах, линиях и других элементах энергосистем;</li> <li>- методы и алгоритмы расчета токов короткого замыкания в разветвленных высоковольтных сетях, в распределительных сетях и системах электроснабжения;</li> </ul> <p><u>Уметь:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- составлять расчетные схемы и соответствующие схемы замещения и определять параметры элементов этих схем;</li> <li>- определять состав и последовательность необходимых действий при выполнении работ по расчету токов короткого замыкания с использованием цифровых технологий;</li> <li>- строить векторные диаграммы, кривые изменения токов короткого замыкания и эпюры напряжений;</li> <li>- анализировать информацию, формировать представление о ситуации и определять допустимость различных видов возмущений с точки зрения их воздействия на конкретные типы электрических машин и узлы нагрузок;</li> <li>- разрабатывать мероприятия и выбирать способы для обеспечения необходимого</li> </ul>

Код и наименование компетенции	Дисциплина	Результаты обучения (владения, умения и знания), соотнесенные с компетенциями
		качества переходного процесса, устойчивости и экономичной работы электромеханического оборудования; <u>Владеть:</u> - навыками расчетов переходных процессов при трехфазных и несимметричных коротких замыканиях, а также при обрывах фаз; - навыками прогнозирования возможных вариантов развития ситуации при анализе протекания электромагнитных переходных процессов.

1.2 К оценочным средствам текущего контроля успеваемости относятся:

- тестовые задания открытого и закрытого типов;
- задания к расчетно-графической работе.

Промежуточная аттестация в форме дифференцированного зачета (зачета с оценкой) проходит по результатам прохождения всех видов текущего контроля успеваемости.

К оценочным средствам для промежуточной аттестации относятся:

- экзаменационные задания по дисциплине, представленные в виде тестовых заданий открытого и закрытого типов.

1.3 Критерии оценки результатов освоения дисциплины

Универсальная система оценивания результатов обучения включает в себя системы оценок: 1) «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно»; 2) 100 – балльную/процентную систему и правило перевода оценок в пятибалльную систему (табл. 2).

Таблица 2 – Система оценок и критерии выставления оценки

Система оценок Критерий	2	3	4	5
	0-40%	41-60%	61-80 %	81-100 %
	«неудовлетворительно»	«удовлетворительно»	«хорошо»	«отлично»
<b>1 Системность и полнота знаний в отношении изучаемых объектов</b>	Обладает частичными и разрозненными знаниями, которые не может корректно связывать между собой (только некоторые из них может связывать между собой)	Обладает минимальным набором знаний, необходимым для системного взгляда на изучаемый объект	Обладает набором знаний, достаточным для системного взгляда на изучаемый объект	Обладает полнотой знаний и системным взглядом на изучаемый объект

Система оценок Критерий	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
	<b>0-40%</b>	<b>41-60%</b>	<b>61-80 %</b>	<b>81-100 %</b>
	<b>«неудовлетворительно»</b>	<b>«удовлетворительно»</b>	<b>«хорошо»</b>	<b>«отлично»</b>
<b>2 Работа с информацией</b>	Не в состоянии находить необходимую информацию, либо в состоянии находить отдельные фрагменты информации в рамках поставленной задачи	Может найти необходимую информацию в рамках поставленной задачи	Может найти, интерпретировать и систематизировать необходимую информацию в рамках поставленной задачи	Может найти, систематизировать необходимую информацию, а также выявить новые, дополнительные источники информации в рамках поставленной задачи
<b>3 Научное осмысление изучаемого явления, процесса, объекта</b>	Не может делать научно корректных выводов из имеющихся у него сведений, в состоянии проанализировать только некоторые из имеющихся у него сведений	В состоянии осуществлять научно корректный анализ предоставленной информации	В состоянии осуществлять систематический и научно корректный анализ предоставленной информации, вовлекает в исследование новые релевантные данные	В состоянии осуществлять систематический и научно-корректный анализ предоставленной информации, вовлекает в исследование новые релевантные поставленной задаче данные, предлагает новые ракурсы поставленной задачи
<b>4 Освоение стандартных алгоритмов решения профессиональных задач</b>	В состоянии решать только фрагменты поставленной задачи в соответствии с заданным алгоритмом, не освоил предложенный алгоритм, допускает ошибки	В состоянии решать поставленные задачи в соответствии с заданным алгоритмом	В состоянии решать поставленные задачи в соответствии с заданным алгоритмом, понимает основы предложенного алгоритма	Не только владеет алгоритмом и понимает его основы, но и предлагает новые решения в рамках поставленной задачи

## 2 ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

### Тестовые задания открытого типа

1. Переходный процесс, характеризующийся изменением значений только электромагнитных величин электроустановки, называется \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

**Ответ: электромагнитный переходный процесс**

2. Переходный процесс, характеризующийся одновременным изменением значений электромагнитных и механических величин, определяющих состояние электроустановки, называется \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

**Ответ: электромеханический переходный процесс**

3. Устойчивость электроэнергетической системы — это \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

**Ответ: способность электрической системы восстанавливать исходное или практически близкое к нему состояние (режим) после возмущения, проявляющегося в отклонении значений параметров режима электрической системы от начальных значений**

4. Угловая характеристика активной мощности синхронной машины (СМ) – это \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

**Ответ: зависимость мощности СМ от угла нагрузки между векторами ЭДС  $\dot{E}$  и напряжения  $\dot{U}$  машины, где  $\dot{E} = const$ ,  $\dot{U} = const$ .**

5. Случайное или преднамеренное, не предусмотренное нормальным режимом работы электрическое соединение различных фаз с землей в электроустановке с глухозаземленной или эффективно-заземленной нейтралью, а также фаз, витков одной фазы или полюсов электроустановки постоянного тока между собой; фаз с нулевыми или защитным проводом, согласно ГОСТ 26522—2023, называется \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

**Ответ: короткое замыкание**

6. Простым замыканием в электрической системе называют \_\_\_\_\_

**Ответ: замыкание одной из фаз на землю в системах с незаземленными нейтральями или с нейтральями, заземленными через специальные компенсирующие устройства.**

7. Режим, при котором значения параметров режима остаются неизменными или изменяются медленно и нерегулярно, в пределах, соответствующих нормальной работе элементов системы с оптимальными технико-экономическими характеристиками – это \_\_\_\_\_

**Ответ: нормальный установившийся режим работы**

8. Режим, наступающий после аварийного отключения одного или нескольких элементов энергосистемы, после нарушения устойчивости работы последней из-за перегрузки с последующей ресинхронизацией – это \_\_\_\_\_

**Ответ: послеаварийный установившийся режим работы**

9. Переходный режим работы электроэнергетических систем – это \_\_\_\_\_

**Ответ: режим, который имеет место при переходе от одного установившегося режима к другому и характеризуется относительно быстрым и резким изменением параметров режима.**

10. Глубокое снижение напряжения на 30—40% в течение 1 сек и более, которое возникает при коротких замыканиях в электрической системе и образовании продольной несимметрии, достаточно, чтобы \_\_\_\_\_

**Ответ: загруженные двигатели промышленного предприятия могут остановиться.**

11. При коротких замыканиях на землю в электрической системе возникают \_\_\_\_\_

**Ответ: неуравновешенные системы токов.**

12. При расчете электромагнитного переходного процесса в современной электрической системе под относительным значением какой-либо величины следует понимать \_\_\_\_\_

**Ответ: ее отношение к другой одноименной величине, выбранной за единицу измерения.**

13. При расчете электромагнитного переходного процесса в современной электрической системе базисная мощность трехфазной системы определяется согласно выражению \_\_\_\_\_

Ответ:  $S_6 = \sqrt{3}U_6I_6$

14. При расчете электромагнитного переходного процесса в современной электрической системе базисная мощность трехфазной системы определяется согласно выражению

---

Ответ:  $z_6 = \frac{U_6}{\sqrt{3}I_6}$

15. Отключающую способность выключателя при номинальном его напряжении  $U_n$  характеризуют номинальным отключаемым током  $I_{от.н}$  или пропорциональной ему номинальной отключаемой мощностью определяется согласно выражению

---

Ответ:  $S_{от.н} = \sqrt{3}U_nI_{от.н}$

16. Когда проверка выключателя производится по отключаемой мощности, последняя должна быть сопоставлена с мощностью короткого замыкания, которая независимо от вида короткого замыкания определяется как \_\_\_\_\_

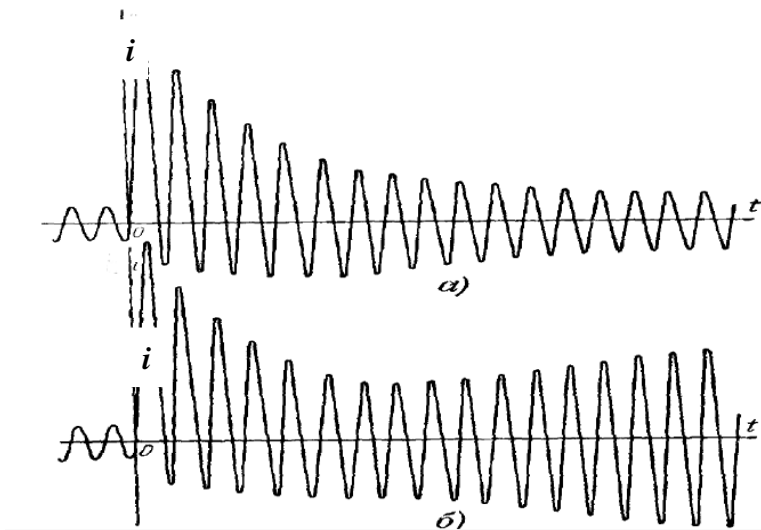
Ответ:  $S_{кт} = \sqrt{3}U_nI_{кт}$ , где  $I_{кт}$  - ток короткого замыкания, в момент  $t$  размыкания контактов выключателя;  $U_n$  - номинальное напряжение ступени, для которой найден ток короткого замыкания.

17. В практических расчетах максимальное мгновенное значение полного тока короткого замыкания, которая определяется при наибольшем значении апериодической слагающей и наступает приблизительно через полпериода, что при  $f = 50$  Гц составляет около 0,01 сек с возникновения короткого замыкания, называют \_\_\_\_\_

Ответ: ударным током короткого замыкания

18. На рисунке изображены типичные осциллограммы токов  $i$  при внезапном коротком замыкании.

Возникают токи, характерные согласно иллюстрациям осциллограмм а) и б), в различных режимах работы устройства в синхронном генераторе



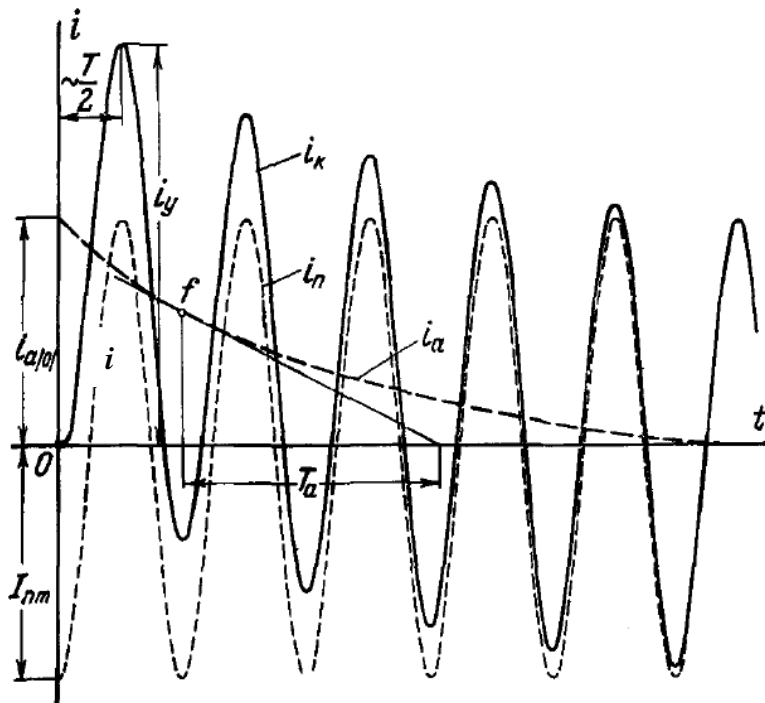
Ответ:

а) - токи при внезапном коротком замыкании при отсутствии автоматического регулирования возбуждения синхронного генератора;

б) - токи при внезапном коротком замыкании при наличии автоматического регулирования возбуждения синхронного генератора.

19. На рисунке изображена осциллограмма тока короткого замыкания при наибольшей аperiodической слагающей и ее составляющие.

Составляющие тока ( $i_y, i_n, i_a$ ) и токи  $i_{a(0)}$ ,  $I_{nm}$  - это



Ответ:  $i_y$  - ударный ток короткого замыкания;

$i_n$  - периодическую слагающую тока или принужденный ток с постоянно амплитудой;



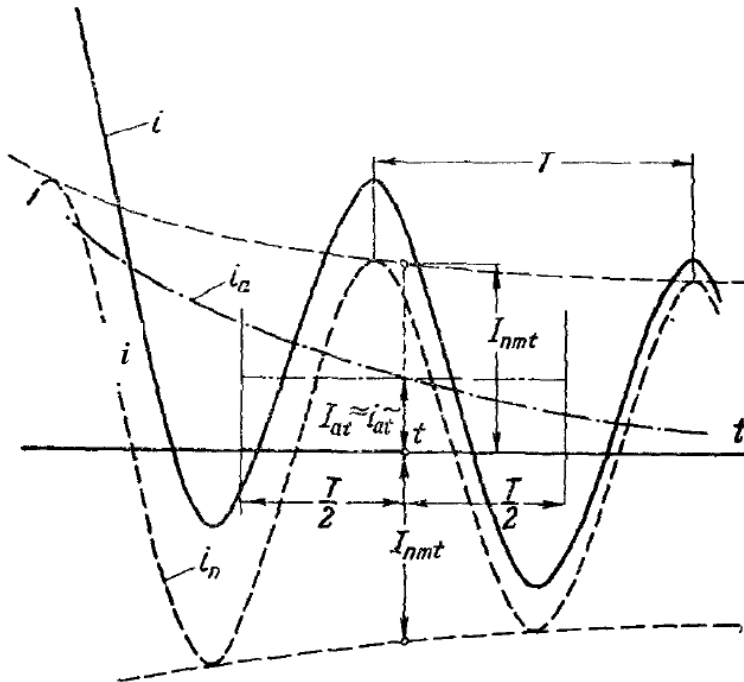
$i_a$  - затухающий по экспоненте свободный ток; его называют также аperiodической слагающей тока;

$i_a(0)$  - начальное значение аperiodической слагающей тока;

$I_{nm}$  - амплитуда принужденного тока.

20. На рисунке изображено графическое определение действующего значения тока при переходном процессе.

Выражение для определения действующего значения тока в момент  $t$  согласно приведенному рисунку имеет вид:

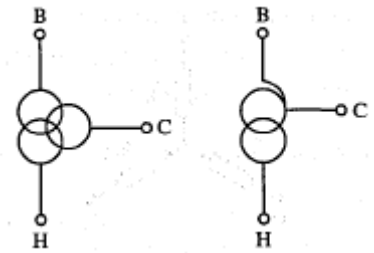


Ответ:

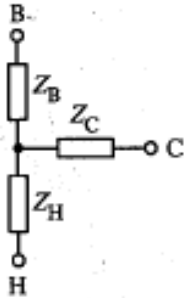
$$I_t = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} i^2 dt}$$

21. На рисунке представлены схемы трансформаторов (автотрансформаторов).

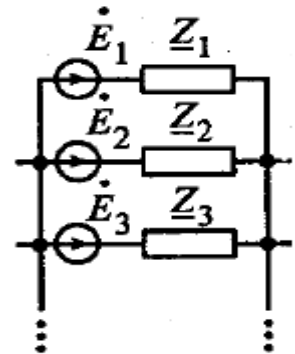
Схема замещения трансформаторов (автотрансформаторов) для расчета токов короткого замыкания и различных режимов в электроэнергетических системах, в которых электромагнитная связь между отдельными обмотками заменена электрической, имеет вид



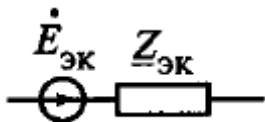
**Ответ:**



22. На рисунке представлена схема замещения прямой последовательности (из источников ЭДС и сопротивлений) при аналитических расчетах коротких замыканий и других режимов электроэнергетических систем соединения. Эквивалентная схема замещения, вид преобразования и эквивалентные параметры преобразованной схемы имеют вид:



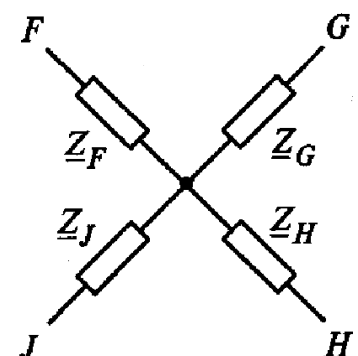
**Ответ: 1. Эквивалентная схема замещения, преобразованная путем заменой нескольких источников одним эквивалентным.**



**1. Параметры преобразованной схемы:**

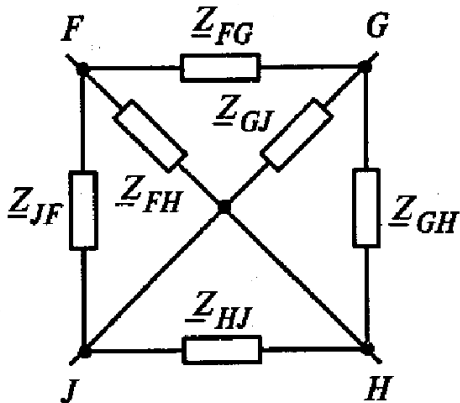
$$\dot{E}_{эк} = \frac{1}{Y_{экk=1}^n} \sum_{k=1}^n Y_k \dot{E}_k$$

22. На рисунке представлена схема замещения прямой последовательности (из сопротивлений) при аналитических расчетах коротких замыканий и других режимов электроэнергетических систем соединения. Эквивалентная схема замещения, вид преобразования и эквивалентные параметры преобразованной схемы имеют вид:



Ответ:

1. Эквивалентная схема замещения, преобразованная из многолучевой звезды в полный многоугольник.



2. Параметры преобразованной схемы:

$$Z_{FG} = Z_F Z_G \sum \underline{Y},$$

$$Z_{GH} = Z_G Z_H \sum \underline{Y},$$

.....

где  $\sum \underline{Y} = \underline{Y}_F + \underline{Y}_G + \underline{Y}_H + \underline{Y}_J$ .

23. Согласно принятым допущениям о том, что все дополнительные по отношению к обмотке возбуждения контуры ротора по каждой оси синхронной машины заменяются одним эквивалентным демпферным контуром.

Шесть уравнений напряжений (шести контуров — три контура фаз, контур возбуждения, продольный демпферный контур и поперечный демпферный контур) и одно уравнение моментов синхронной машины, которые используются при исследовании переходных процессов имеют вид

---



---



---

**Ответ:** Дифференциальные уравнения напряжений в контурах синхронной машины

$$\left. \begin{aligned} u_A &= -\frac{d\Psi_A}{dt} - Ri_A; \\ u_B &= -\frac{d\Psi_B}{dt} - Ri_B; \\ u_C &= -\frac{d\Psi_C}{dt} - Ri_C; \\ u_f &= \frac{d\Psi_f}{dt} + R_f i_f; \\ 0 &= \frac{d\Psi_{1d}}{dt} + R_{1d} i_{1d}; \\ 0 &= \frac{d\Psi_{1q}}{dt} + R_{1q} i_{1q}. \end{aligned} \right\}$$

имеют вид:

где  $R, R_f, R_{1d}, R_{1q}$  - активные сопротивления соответственно фазных обмоток якоря, обмотки возбуждения, продольного и поперечного демпферных контуров;

Дифференциальное уравнение моментов, действующих на ротор синхронной машины, имеет вид:

$$M_{\text{мх}} + M_{\text{эм}} = J \frac{d\omega}{dt},$$

$M_{\text{мх}}$  - момент механических сил;  $M_{\text{эм}}$  — момент электромагнитных сил (электромагнитный момент), обусловленный взаимодействием магнитного потока от токов обмоток якоря и магнитного потока от токов в контурах ротора;  $J$  — момент инерции агрегата;  $\omega$  — угловая скорость вращения ротора.

24. Переходные процессы в синхронных машинах, при которых сохраняется симметрия фаз, целесообразно исследовать в системе координат, вращающихся вместе с ротором. Такую систему координат называют

**Ответ:** системой  $d, q, \theta$ , так как ось  $x$  совмещают с продольной осью ротора

25. Переходные процессы в асинхронных машинах, а также несимметричные режимы синхронных машин удобно исследовать в системе координат, неподвижной в пространстве; такую систему координат называют

**Ответ:** системой  $\alpha, \beta$ . При этом ось  $\alpha$  совмещают с магнитной осью фазы  $A$  электрической машины.

26. При анализе электромагнитных переходных процессов в синхронных машинах обычно пренебрегают изменением ее угловой скорости вращения, т.е. считают скольжение равным нулю. При этом переходные процессы описываются в осях  $d$  и  $q$  уравнением Горева-Парка вида: \_\_\_\_\_

—  
**Ответ:**

$$\left. \begin{aligned} u_d &= -\frac{d\Psi_d}{d\tau} - \Psi_q - Ri_d; \\ u_q &= \Psi_d - \frac{d\Psi_q}{d\tau} - Ri_q; \\ u_f &= \frac{d\Psi_f}{d\tau} + R_f i_f; \\ 0 &= \frac{d\Psi_{1d}}{d\tau} + R_{1d} i_{1d}; \\ 0 &= \frac{d\Psi_{1q}}{d\tau} + R_{1q} i_{1q}. \end{aligned} \right\}$$

27. Способность системы восстанавливать исходный режим после малого его возмущения или режим, весьма близкий к исходному (если возмущающее воздействие не снято) называется:

—  
**Ответ: Статической устойчивостью**

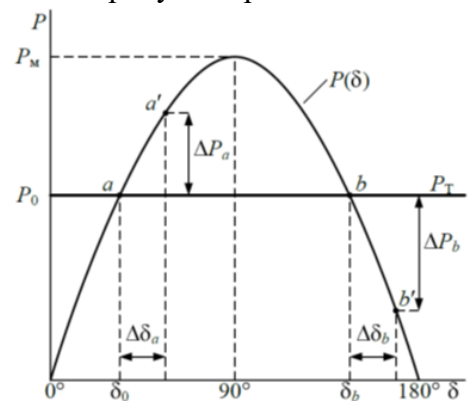
28. Способность системы восстанавливать исходное состояние, или близкое к исходному, после действия больших возмущений называется: \_\_\_\_\_

**Ответ: динамической устойчивостью.**

29. Формулой вида  $J_0 \frac{d\omega}{dt} = \Delta M$  описывается

—  
**Ответ: уравнение движения ротора.**

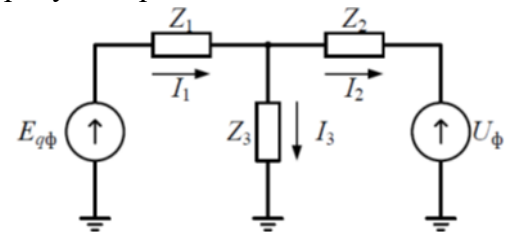
30. На рисунке представлена:



—  
**Ответ: угловая характеристика генератора.**

**Тестовые задания закрытого типа**

31. На рисунке представлена:

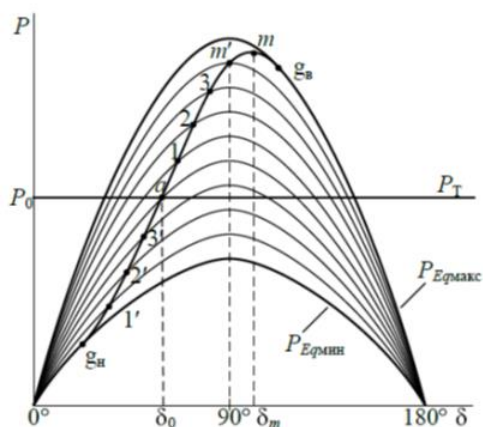


1. Т-образная схема замещения трансформатора
- 2. Т-образная эквивалентная схема одномашиной энергосистемы**
3. П-образная эквивалентная схема одномашиной энергосистемы
4. П-образная схема замещения высоковольтного двигателя

32. Метод исследования статической устойчивости энергосистем, опирающийся на линеаризацию «в малом», называется

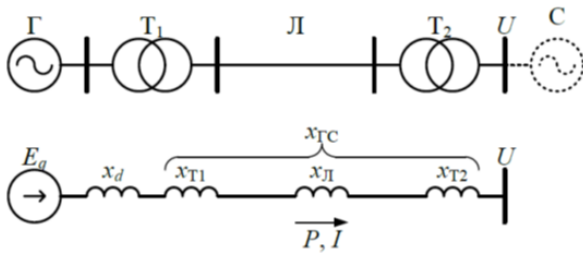
1. Методом малой мощности
- 2. Методом малых колебаний**
4. Методом малой устойчивости
3. Методом малых отрезков

33. На рисунке представлена:



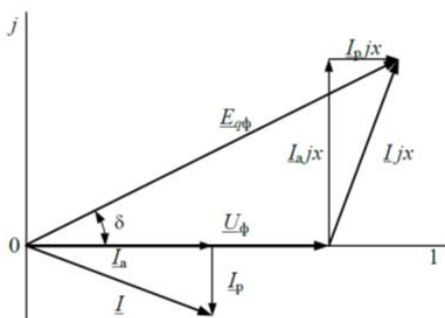
- 1. Внешняя угловая характеристика регулируемого генератора**
2. Внутренняя угловая характеристика синхронного двигателя
3. Взаимная угловая характеристика двух генераторов
4. Относительная угловая характеристика генератора

34. На рисунке представлена:



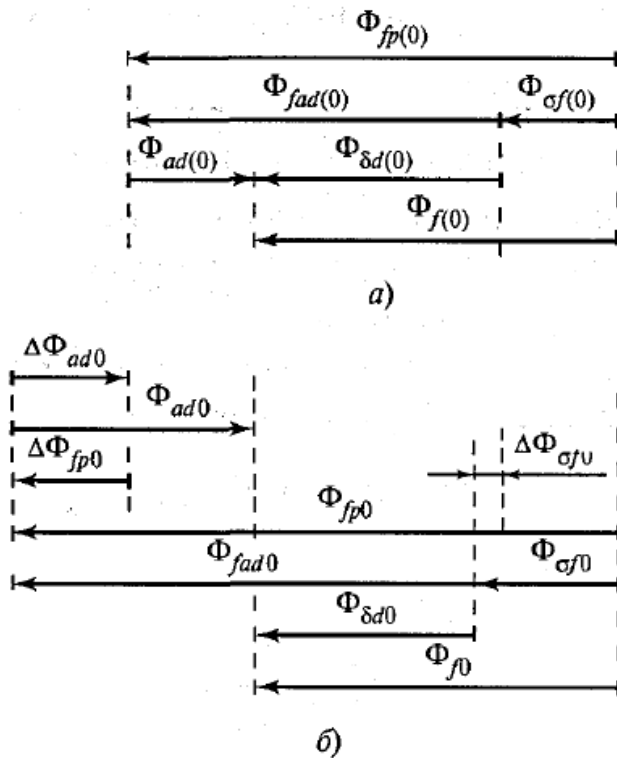
1. Динамическая модель нагрузки
2. Статическая модель нагрузки
- 3. Одномашинная модель энергосистемы**
4. Двухмашинная модель энергосистемы

35. На рисунке представлена:



1. Векторная диаграмма параметров режима генератора
2. Векторная диаграмма параметров режима нагрузки
- 3. Векторная диаграмма параметров режима одномашинной энергосистемы**
4. Векторная диаграмма параметров режима двухмашинной энергосистемы

36. На рисунке представлена:



1. Сумма магнитных потоков по продольной оси ротора:  
а — в момент короткого замыкания «(0)»;

б — после короткого замыкания «0».

2. Сумма магнитных потоков по поперечной оси ротора:

а — до короткого замыкания «(0)»;

б — в начальный момент короткого замыкания «0».

**3. Баланс магнитных потоков по продольной оси ротора:**

**а — до короткого замыкания «(0)»;**

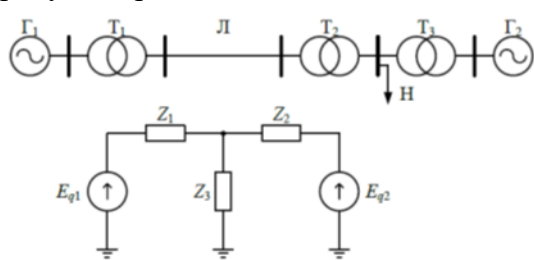
**б — в начальный момент короткого замыкания «0».**

4. Баланс магнитных потоков по продольной оси ротора:

а — в момент короткого замыкания «(0)»;

б — после короткого замыкания «0».

37. На рисунке представлена:



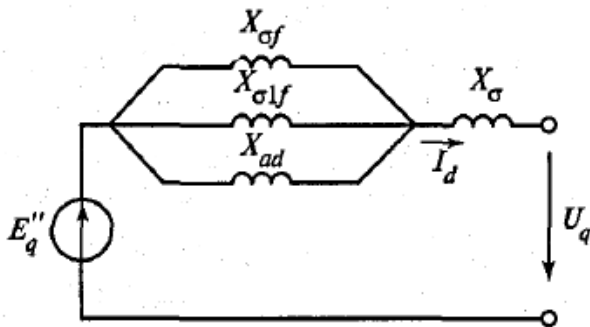
1. Устойчивая энергосистема

2. Неустойчивая энергосистема

**3. Двухмашинная энергосистема**

4. Нагруженная энергосистема

38. На рисунке представлена схема замещения синхронной машины:



1. С демпферными контурами по поперечной оси.

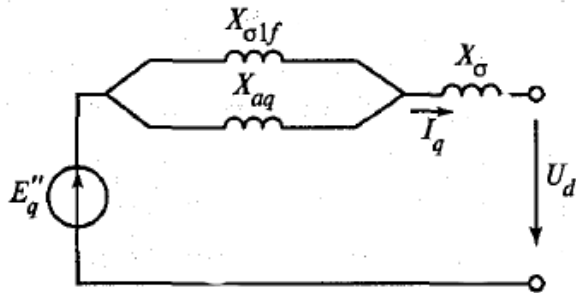
**2. С демпферными контурами по продольной оси.**

3. Без демпферных контуров.

4. Без демпферных контуров по продольной оси.

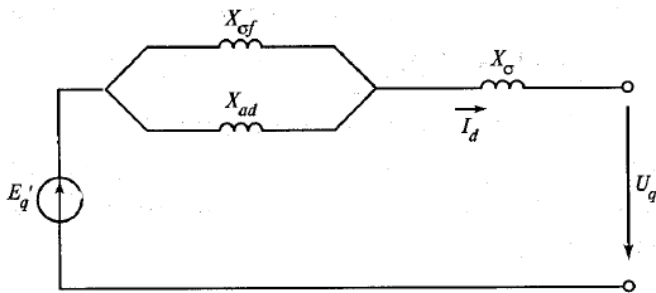
39. На рисунке представлена схема замещения синхронной машины:





1. С демпферными контурами по поперечной оси.
2. С демпферными контурами по продольной оси.
3. Без демпферных контуров по поперечной оси.
4. Без демпферных контуров.

40. На рисунке представлена схема замещения синхронной машины:



1. С демпферными контурами по поперечной оси;
2. С демпферными контурами по продольной оси;
3. **Без демпферных контуров.**
4. Без демпферных контуров поперечной оси.

### 3 ТИПОВЫЕ ЗАДАНИЯ К РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЕ

3.1 Учебным планом предусмотрено выполнение расчетно-графической работы для студентов очной и заочной формы обучения.

Расчетно-графическая работа включает следующие задачи:

Задача 1. Составить схему замещения и определить ее параметры для расчетной схемы;

Задача 2. Упростить схему замещения при коротком замыкании (КЗ) в заданной точке;

Задача 3. Определить величину установившегося тока при трехфазном КЗ в заданной точке для расчетной схемы;

Задача 4. Определить сверхпереходный и ударный ток КЗ в точке К2.

#### Типовое задание задачи 1:

Составить схему замещения и определить ее параметры для расчетной схемы, изображенной на рис. 3.1.1.

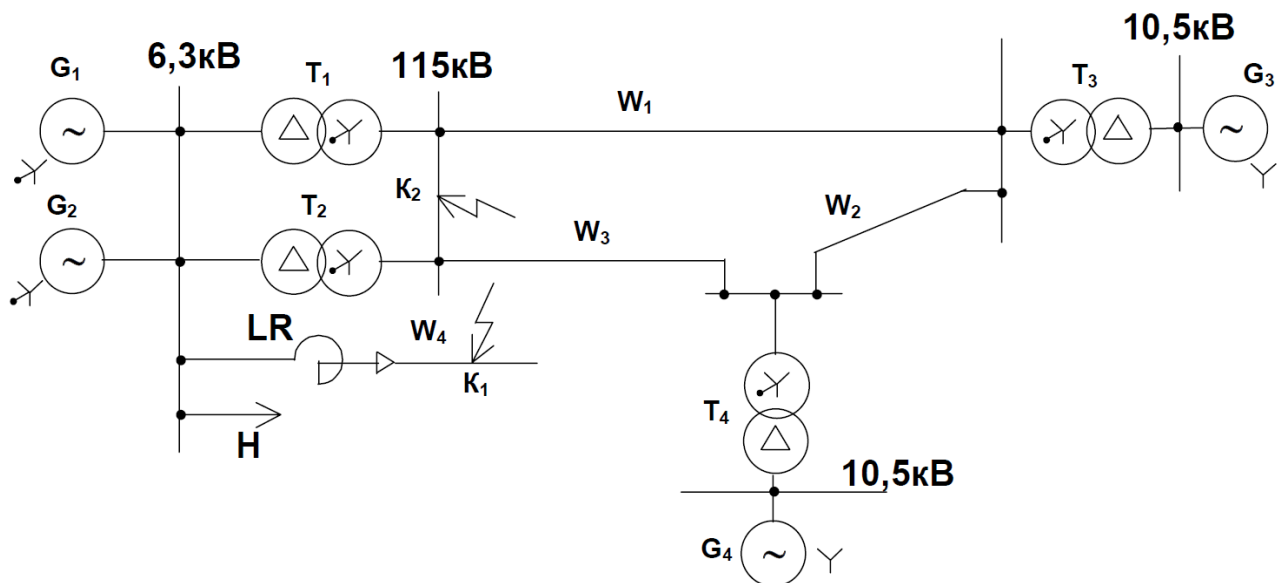


Рис. 3.1.1

Исходные данные элементов схемы:

Таблица 3.1.1 - Генераторы

№	$X_d''$	$E_{*H}$	$S_H, MVA$	$\cos\varphi$
G <sub>1</sub>	0,2	1,1	60	0,8
G <sub>2</sub>	0,15	1,08	120	0,8
G <sub>3</sub>	0,18	1,1	80	0,8
G <sub>4</sub>	0,12	1,05	100	0,8

Таблица 3.1.2 - Линии электропередач

№	$l, км$
W <sub>1</sub>	80
W <sub>2</sub>	70

$W_3$	60
$W_4$	5

Таблица 3.1.3 - Трансформаторы

№	$S_H, MVA$	$U_k, \%$
T <sub>1</sub>	80	10
T <sub>2</sub>	120	12
T <sub>3</sub>	120	14
T <sub>4</sub>	140	8

Таблица 3.1.4 - Реакторы

№	$X_p, \%$	$I_H, A$	$U_H, kV$
LR	6	1000	6

Таблица 3.1.5 - Нагрузка

№	$S_H, MVA$	$E^*_{*H}$	$X^*_{*H}$
Z <sub>1</sub>	30	0.8	6

$X_{уд}$  – удельное сопротивление 1 км:

- для воздушных линий принимается равным 0,4 Ом/км,
- для кабельных – 0,08 Ом/км;

Схема замещения для расчётов токов КЗ представлена на рис. 3.1.2.

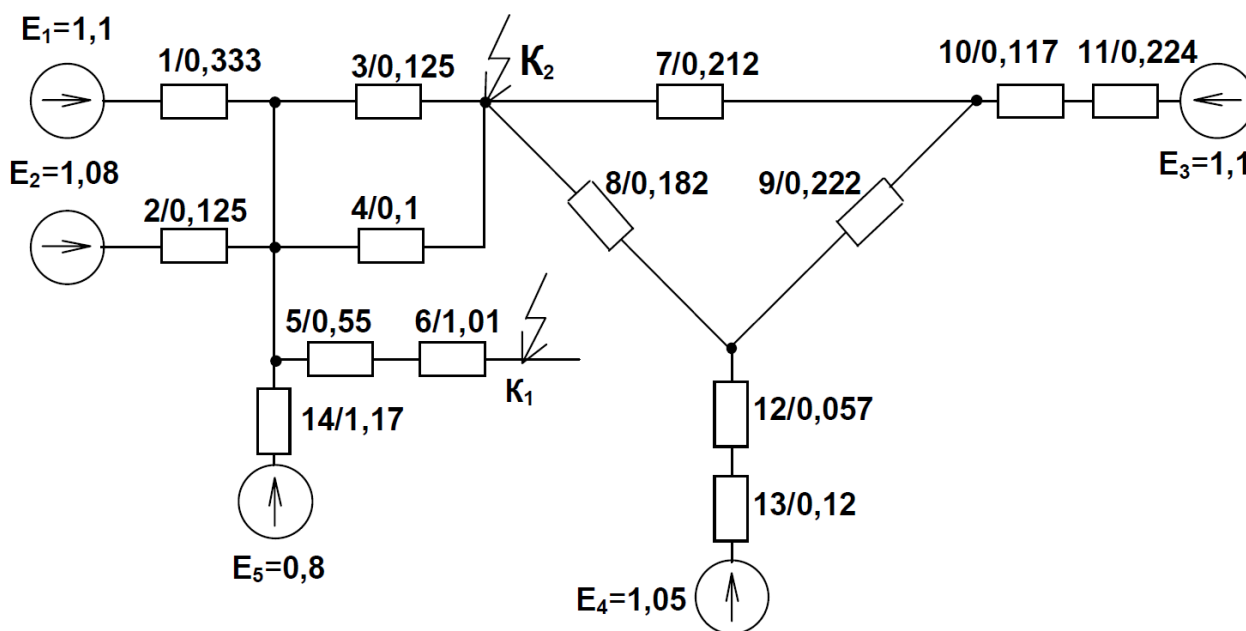


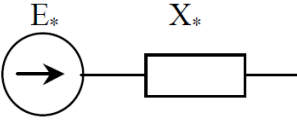
Рис. 3.1.2

Определим параметры элементов этой схемы замещения при  $S_6 = 100 MVA$ ;  $U_6 = 6,3 kV$ ;

$$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3} U_6}; \text{ тогда } I_6 = 9.15 \text{ kA.}$$

По формулам из таблицы 3.1.6 определим параметры генераторов  $E^*$  и  $X^*$ .

Таблица 3.1.6 – Формула для расчета параметров генераторов

Элемент электроустановки	Исходный параметр	Схема замещения	Формулы для расчета параметров в о.е.
1	2	3	4
Генератор	$E_{*H}$ $X_{*H}$ $S_{*H}$		$E_* = E_{*H}$ $X_* = X_{*H} \frac{S_6}{S_H}$

Результаты расчётов представлены в таблице 3.1.7

Таблица 3.1.7

Номер генератора	Номер индекса ЭДС	$E_* = E_{*H}$	Номер индекса сопротивления	$X_* = X_d'' \frac{S_6}{S_H}$
G <sub>1</sub>	E <sub>1</sub>	1,1	X <sub>1</sub>	$0,2 \cdot \frac{100}{60} = 0,333$
G <sub>2</sub>	E <sub>2</sub>	1,08	X <sub>2</sub>	$0,15 \cdot \frac{100}{120} = 0,125$
G <sub>3</sub>	E <sub>3</sub>	1,1	X <sub>11</sub>	$0,18 \cdot \frac{100}{80} = 0,224$
G <sub>4</sub>	E <sub>4</sub>	1,05	X <sub>13</sub>	$0,12 \cdot \frac{100}{100} = 0,12$

Определим сопротивления трансформаторов по формуле  $X_* = \frac{U_k \% S_6}{100 S_H}$

Результаты расчётов представлены в таблице 3.1.8

Таблица 3.1.8

Номер трансформатора	Номер сопротивления трансформатора	$X_* = \frac{U_k \% S_6}{100 S_H}$
T <sub>1</sub>	X <sub>3</sub>	$\frac{10}{100} \cdot \frac{100}{80} = 0,125$
T <sub>2</sub>	X <sub>10</sub>	$\frac{14}{100} \cdot \frac{100}{120} = 0,117$
T <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	$\frac{12}{100} \cdot \frac{100}{120} = 0,1$
T <sub>4</sub>	X <sub>12</sub>	$\frac{8}{100} \cdot \frac{100}{140} = 0,057$

Определим сопротивления линии электропередач по формуле:

Результаты расчётов представлены в таблице 3.1.9

$$X_* = X_{уд} \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{ср.н}^2}$$

Таблица 3.1.9

Номер линии	Номер сопротивления линии	$X_* = X_{уд} \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{ср.н}^2}$
W <sub>4</sub>	X <sub>6</sub>	$0,08 \cdot 5 \cdot \frac{100}{6,3^2} = 1,01$
W <sub>1</sub>	X <sub>7</sub>	$0,4 \cdot 80 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,212$
W <sub>3</sub>	X <sub>8</sub>	$0,4 \cdot 60 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,182$
W <sub>2</sub>	X <sub>9</sub>	$0,4 \cdot 70 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,222$

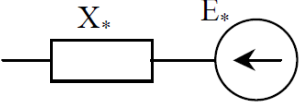
Определим сопротивления реактора **LR** по формуле:

$$X_* = \frac{X_p \%}{100} \cdot \frac{I_{\delta}}{I_H} \cdot \frac{U_H}{U_{ср.н}}$$

$$X_5 = \frac{6}{100} \cdot \frac{9,16}{1} \cdot \frac{6}{6,3} = 0,55$$

По формулам из таблицы 3.1.10 определим параметры нагрузки  $E_*$  и  $X_*$ .

Таблица 3.1.10 – Формула для расчета параметров нагрузки

Элемент электроустановки	Исходный параметр	Схема замещения	Формулы для расчета параметров в о.е.
1	2	3	4
Обобщенная нагрузка	$E_{*H}$ $X_{*H}$ $S_H$		$E_* = E_{*H}$ $X_* = X_{*H} \frac{S_{\delta}}{S_H}$

Результаты расчётов представлены в таблице 3.1.11

Таблица 3.1.11

	Номер индекса ЭДС	$E_* = E_{*H}$	Номер индекса сопротивления	$X_* = X_{*H} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_H}$
Нагрузка	$E_5$	0,8	$X_{14}$	$0,35 \cdot \frac{100}{30} = 1,17$

**Типовое задание задачи 2:**

Упростить схему замещения (см. рис. 3.1.2) при КЗ в точке К1.

Заменим несколько сопротивлений одним:

$$X_{15} = X_5 + X_6 = 0,55 + 1,01 = 1,56;$$

$$X_{16} = X_{10} + X_{11} = 0,117 + 0,224 = 0,341;$$

$$X_{17} = X_{12} + X_{13} = 0,057 + 0,12 = 0,177;$$

$$X_{18} = X_3 \cdot X_4 / (X_3 + X_4) = (0,125 \cdot 0,1) / (0,125 + 0,1) = 0,057.$$

Используя указанные преобразования (заменяя  $\Delta$  сопротивлений  $X_7, X_8, X_9$  в  $Y$   $X_{19}, X_{20}, X_{21}$  и ветви с  $E_1, X_1$  и  $E_2, X_2$  в ветвь  $E_6, X_{22}$  с учетом последовательного и параллельного соединения сопротивлений), можно схему, изображенную на рис. 3.1.2, привести к более простой (рис. 3.1.3) и определить ее новые параметры по формулам из таблицы 3.1.12 (Виды преобразований – Замена нескольких источников одним эквивалентным, Преобразование треугольника в звезду и Преобразование звезды в треугольник).

Таблица 3.1.12

Основные формулы преобразования схем

Вид преобразования	Исходная схема	Преобразованная схема	Эквивалентные параметры преобразованной схемы
Последовательное соединение			$Z_{эк} = Z_1 + Z_2 + \dots + Z_n$
Параллельное соединение			$Z_{эк} = \frac{1}{Y_{эк}},$ где $Y_{эк} = Y_1 + Y_2 + \dots + Y_n;$ $Y_1 = \frac{1}{Z_1}; Y_2 = \frac{1}{Z_2}; Y_n = \frac{1}{Z_n}.$ При двух ветвях: $Z_{эк} = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2}$
Замена нескольких источников одним эквивалентным			$E_{эк} = \frac{1}{Y_{эк}} \sum_{k=1}^n Y_k E_k.$ При двух ветвях: $E_{эк} = \frac{E_1 Z_2 + E_2 Z_1}{Z_1 + Z_2}$
Преобразование треугольника в звезду			$Z_F = \frac{Z_{FG} Z_{HF}}{Z_{FG} + Z_{GH} + Z_{HF}},$ $Z_G = \frac{Z_{FG} Z_{GH}}{Z_{FG} + Z_{GH} + Z_{HF}},$ $Z_H = \frac{Z_{GH} Z_{HF}}{Z_{FG} + Z_{GH} + Z_{HF}}$
Преобразование трехлучевой звезды в треугольник			$Z_{GH} = Z_G + Z_H + \frac{Z_G Z_H}{Z_F},$ $Z_{FG} = Z_F + Z_G + \frac{Z_F Z_G}{Z_H},$ $Z_{HF} = Z_H + Z_F + \frac{Z_H Z_F}{Z_G}$
Преобразование многолучевой звезды в полный многоугольник			$Z_{FG} = Z_F Z_G \sum Y,$ $Z_{GH} = Z_G Z_H \sum Y,$ ..... где $\sum Y = Y_F + Y_G + Y_H + Y_J.$ Аналогично и при большем числе ветвей

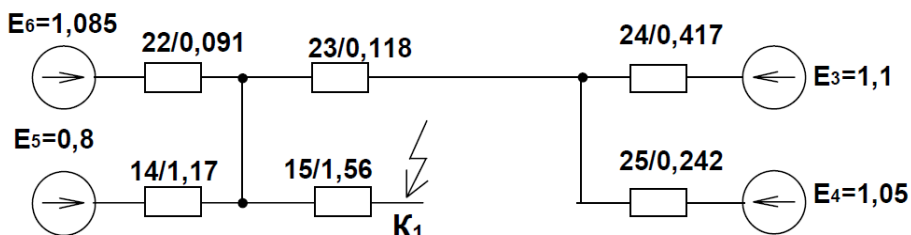


Рис. 3.1.3

$$X_{19} = \frac{X_7 \cdot X_8}{X_7 + X_8 + X_9} = \frac{0,212 \cdot 0,182}{0,212 + 0,182 + 0,222} = 0,0625;$$

$$X_{20} = \frac{X_7 \cdot X_9}{X_7 + X_8 + X_9} = \frac{0,212 \cdot 0,222}{0,212 + 0,182 + 0,222} = 0,0765;$$

$$X_{21} = \frac{X_8 \cdot X_9}{X_7 + X_8 + X_9} = \frac{0,182 \cdot 0,212}{0,212 + 0,182 + 0,222} = 0,0655;$$

$$X_{22} = \frac{X_1 \cdot X_2}{X_1 + X_2} = \frac{0,333 \cdot 0,125}{0,333 + 0,125} = 0,091;$$

$$E_6 = \frac{E_1 \cdot X_2 + E_2 \cdot X_1}{X_1 + X_2} = \frac{1,1 \cdot 0,125 + 1,08 \cdot 0,333}{0,333 + 0,125} = 1,085;$$

$$X_{23} = X_{18} + X_{19} = 0,057 + 0,0625 = 0,118;$$

$$X_{24} = X_{16} + X_{20} = 0,341 + 0,0765 = 0,417;$$

$$X_{25} = X_{17} + X_{21} = 0,177 + 0,0655 = 0,242.$$

Схему на рис. 3.1.3 дальше приводится к простейшему виду с помощью рассмотренных преобразований. По найденным результирующей ЭДС и результирующему сопротивлению определяем периодическую составляющую тока в месте КЗ.

После этого, постепенно разворачивая схему, можно найти токи в отдельных ветвях и напряжения в различных точках исходной схемы.

Преобразование схемы должно производиться в следующей очередности:

1. Необходимо проверить, нет ли в схеме точек одинакового потенциала и, если таковые обнаруживаются, совместить их.
2. Сложить последовательные и параллельные сопротивления.
3. Применить преобразование треугольника в звезду, или наоборот.
4. Определить относительное результирующее сопротивление всей схемы до места КЗ.

### Типовое задание задачи 3:

Определить величину установившегося тока при трехфазном КЗ в точке К2 для расчетной схемы (см. рис. 3.1.1), в которой все генераторы без АРВ и до КЗ работали с номинальными параметрами.

Примем следующие базисные величины:  $S_6 = 100$  МВ·А;  $U_6 = 115$  кВ.

В этом случае генераторы будут введены в схему замещения следующими значениями ЭДС и сопротивлений:

1. Генераторы G<sub>1</sub>, G<sub>2</sub>

$$E_1 = E_2 = \sqrt{(1 \cdot 0,8)^2 + (1 \cdot 0,6 + 1 \cdot \frac{1,2}{0,7})^2} = 2,45;$$

$$X_1 = X_d \frac{S_6}{S_H} = \frac{C}{K_c} \frac{S_6}{S_H} = \frac{1,2}{0,7} \frac{100}{60} = 2,857;$$

$$X_2 = X_d \frac{S_{\delta}}{S_H} = \frac{1,2}{0,7} \frac{100}{120} = 1,428 ;$$

## 2. Генераторы G<sub>3</sub>, G<sub>4</sub>

$$E_3 = E_4 = \sqrt{(1 + 0,8)^2 + (1 \cdot 0,6 + 1 \cdot \frac{1,06}{1,1})^2} = 1,75 ;$$

$$X_{11} = X_d \frac{S_{\delta}}{S_H} = \frac{1,06}{1,1} \frac{100}{80} = 1,193 ;$$

$$X_{13} = X_d \frac{S_{\delta}}{S_H} = \frac{1,06}{1,1} \frac{100}{100} = 0,954 .$$

Нагрузка в схему замещения вводится  $E_5 = E_{*H} = 0$

и сопротивлением  $X_{14} = X_{*H} \frac{S_{\delta}}{S_H} = 1,2 \frac{100}{30} = 4 .$

Сопротивления пассивных элементов (линии, трансформаторы, реакторы) останутся теми же, что и в схеме, изображенной на рис. 3.1.2.

Используя методы преобразования схем, получим результирующую схему (рис. 3.1.4).

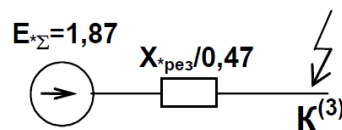


рис. 3.1.4

По результирующим  $E_{*\Sigma}$  и  $X_{*рез}$  относительно места повреждения определяется ток КЗ в точке  $K^{(3)}$ :

$$I_{*\infty}^{(3)} = \frac{E_{*\Sigma}}{X_{*рез}} = \frac{1,87}{0,47} = 3,97 .$$

Для получения установившегося тока трехфазного КЗ в именованных единицах необходимо полученный результат умножить на базисный ток:

$$I_{\infty}^{(3)} = I_{*\infty}^{(3)} \cdot I_{\delta} = 3,97 \cdot 0,5 = 1,987 \text{ кА},$$

где  $I_{\delta} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3}U_{\delta}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 115} = 0,5 \text{ кА}.$

### Типовое задание задачи 4:

Определить установившийся ток трехфазного КЗ для схемы, изображенной на рис 3.1.5, и остаточное напряжение на выводах генератора.



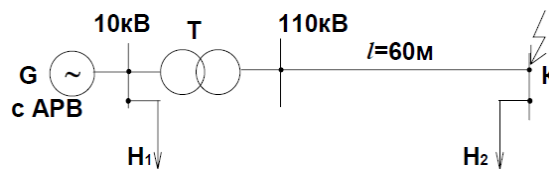


рис. 3.1.5

Исходные данные:

1. Генератора G

$$S_H = 240 \text{ МВ}\cdot\text{А}; \quad K_c = 0,7; \quad I_{*нр} = 3;$$

2. Трансформатор T

$$S_H = 240 \text{ МВ}\cdot\text{А}; \quad U_K\% = 10,5\%;$$

3. Нагрузка H<sub>1</sub>  $S_H = 24 \text{ МВ}\cdot\text{А};$

4. Нагрузка H<sub>2</sub>  $S_H = 10 \text{ МВ}\cdot\text{А}.$

Принимаем базисные условия:  $S_б = 240 \text{ МВ}\cdot\text{А}; U_б = 115 \text{ кВ}.$

Схема замещения представлена на рис. 3.1.6 (нагрузка H<sub>2</sub> отсекается трехфазным КЗ, поэтому она в схему замещения не введена).

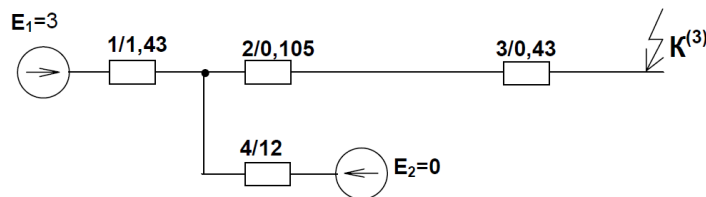


рис. 3.1.6

Определим параметры схемы замещения:

$$E_1 = I_{*нр} = 3;$$

$$X_1 = X_d \frac{S_б}{S_H} = \frac{1}{K_c} \cdot \frac{S_б}{S_H} = \frac{1}{0,7} \cdot \frac{240}{240} = 1,43;$$

$$X_2 = \frac{U_K\%}{100} \cdot \frac{S_б}{S_H} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{240}{240} = 0,105;$$

$$X_3 = X_{уд} \cdot l \cdot \frac{S_б}{U_{ср.н}^2} = 0,4 \cdot 60 \cdot \frac{240}{115^2} = 0,43;$$

$$X_4 = X_{*н} \frac{S_б}{S_H} = 1,2 \cdot \frac{240}{24} = 12;$$

$$X_\Sigma = \frac{X_1 \cdot X_4}{X_1 + X_4} + X_2 + X_3 = \frac{1,43 \cdot 12}{1,43 + 12} + 0,105 + 0,43 = 1,81.$$

Установим режим работы генератора:

$$X_{кр} = X_1 \frac{U_H}{E_1 - U_H} = 1,43 \frac{1}{3 - 1} = 0,715;$$

$$X_{вн} = ((X_2 + X_3) \cdot X_4) / (X_2 + X_3 + X_4)$$

$$X_{вн} = \frac{(0,105 + 0,43)12}{0,105 + 0,43 + 12} = 0,51.$$

$$X_{кр} > X_{вн},$$

получаем режим предельного возбуждения.

Определим эквивалентную ЭДС:

$$E_э = \frac{E_1 \cdot X_4 + E_2 \cdot X_1}{X_1 + X_4} = \frac{3 \cdot 12}{1,43 + 12} = 2,7.$$

Определим результирующее сопротивление:

$$X_{\Sigma} = \frac{X_1 \cdot X_4}{X_1 + X_4} + X_2 + X_3 = \frac{1,43 \cdot 12}{1,43 + 12} + 0,105 + 0,43 = 1,81.$$

Вычислим установившийся ток трехфазного КЗ:

$$I_{*\infty}^{(3)} = \frac{E_э}{X_{\Sigma}} = \frac{2,7}{1,81} = 1,49;$$

$$I_{\infty}^{(3)} = I_{*\infty}^{(3)} \cdot I_6 = 1,49 \cdot 1,2 = 1,8 \text{ кА.}$$

Для определения остаточного напряжения необходимо вычислить падение напряжения от протекания установившегося тока КЗ по сопротивлению от точки КЗ до рассматриваемой точки.

$$U_{*ост} = I_{*\infty} (X_2 + X_3) = 1,49(0,105 + 0,43) = 0,8;$$

$$U_{ост} = U_{*ост} \cdot \frac{U_6}{\sqrt{3}} = 0,8 \cdot \frac{10,5}{\sqrt{3}} = 4,6 \text{ кВ.}$$

**4 СВЕДЕНИЯ О ФОНДЕ ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ И ЕГО СОГЛАСОВАНИИ**

Фонд оценочных средств для аттестации по дисциплине «Переходные процессы в электроэнергетических системах» представляет собой компонент основной профессиональной образовательной программы бакалавриата по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника.

Преподаватель-разработчик –к.т.н, С.А. Панкратов

Фонд оценочных средств рассмотрен и одобрен заведующим кафедрой энергетики.

Заведующий кафедрой



В.Ф. Белей

Фонд оценочных средств рассмотрен и одобрен методической комиссией ИМТЭС (протокол № 8 от 26.08.2024 г).

Председатель методической комиссии ИМТЭС



О.А. Бельх