



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Кафедра «Цифровые технологии и платформы в электроэнергетике»

Задания и методические указания к контрольной работе по дисциплине

Переходные электромеханические процессы в энергетических системах

Автор
Шелест В.А.



Ростов-на-Дону, 2025

Аннотация

Задания и методические указания к контрольной работе предназначены для подготовки бакалавров заочной формы обучения по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» и профилю «Электроэнергетические системы и сети».

Автор

к.т.н., доцент кафедры «Цифровые технологии и платформы в электроэнергетике»
Шелест В.А.



Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ОБЩИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЕ.....	5
1.СОДЕРЖАНИЕ КОНТРОЛЬНОГО ЗАДАНИЯ.....	6
2.ВЫБОР НОМИНАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ И СЕЧЕНИЯ ПРОВОДОВ ДВУХЦЕПНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ.....	8
3.ВЫБОР НОМИНАЛЬНЫХ МОЩНОСТЕЙ И КОЛИЧЕСТВА ГЕНЕРАТОРОВ И ТРАНСФОРМАТОРОВ.....	10
4.СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ И РАСЧЕТ НОМИНАЛЬНОГО (ИСХОДНОГО) РЕЖИМА РАБОТЫ СИСТЕМЫ.....	11
5.ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЗАПАСА СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПО ИДЕАЛЬНОМУ И ДЕЙСТВИТЕЛЬНОМУ ПРЕДЕЛАМ МОЩНОСТИ.....	14
6.РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ НАГРУЗКИ УЗЛА СИСТЕМЫ.....	16
7. РАСЧЕТ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ.....	19
8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ОТКЛЮЧЕНИЯ ТРЕХФАЗНОГО К.З.....	20
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	22
ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....	23

ВВЕДЕНИЕ

Специалистам в энергетике необходимо иметь современное научное глубокое понимание физики протекающих в энергосистемах процессов.

Инженер должен представлять энергосистему как живой, динамично развивающийся организм. Основной задачей является поддержание требуемого режима работы энергосистемы путём ограничения изменений параметров режима в таких пределах, при которых сохраняется её устойчивость, т.е. способность системы восстанавливать исходный или близкий к нему режим после его нарушения под воздействием различных возмущений.

Для предвидения характера переходного процесса и управления им необходимо овладеть способами изменения соответствующего режима работы энергосистемы в желательном направлении. Устойчивость системы определяется на основании расчёта и анализа электромеханических переходных процессов с учётом нормального и послеаварийного установившихся режимов.

Настоящие методические указания должны помочь студентам овладеть техникой упрощённых расчетов статической и динамической устойчивости электрических систем. На конкретном примере контрольного задания показан порядок расчета и анализ получающихся общих результатов. Указания способствуют созданию у студентов достаточно четких представлений о некоторых расчетных методах и применяемых при различных допущениях способах расчета.

ОБЩИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЕ.Общее:

- Контрольная работа по заданию пишется техническим языком, не допускается использования бытовых речевых оборотов, разговорной речи, а также дословное переписывание материала из литературных источников.
- Обязательным является использование современных аналитических и статистических материалов, Интернет-сайтов международных организаций и компаний и т.д.
- Текстовая часть контрольной работы должна содержать чёткий и развёрнутый ответ на теоретический вопрос. По мере необходимости текстовый материал дополняется графиками, формулами и таблицами.

Оформление контрольной работы и отчета по домашним заданиям:

- Контрольная работа и отчет по домашним заданиям должны быть оформлена в соответствии с «Правилами оформления письменных работ обучающимися для технических направлений подготовки».
- Титульный лист необходимо сверить с последним образцом возле аудитории 10-311.
- Работу следует сброшюровать.
- Работа должна быть подписана студентом.

Проверка контрольной работы и допуск к экзамену:

- Проверив работу, преподаватель проставляет оценку «зачтена» или «не зачтена», а также отмечает её недостатки
- Оценка «зачтено» предполагает, что студент допускается к сдаче экзамена по дисциплине «Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах».
- К экзамену студент должен освоить все темы программы курса.
- При подготовке к экзамену тщательно проработайте лекционный и учебный материал.

1. СОДЕРЖАНИЕ КОНТРОЛЬНОГО ЗАДАНИЯ

Для простейшей электрической системы (рис.1) необходимо выполнить упрощенный анализ статической и динамической устойчивости системы. Для этого требуется решить следующие частные задачи:

а) Выбрать номинальные напряжения и провода линии электропередачи Л1 по кривым ВГПИ "Энергосетьпроект" и таблицам экономической плотности тока.

б) Выбрать номинальные мощности и определить по каталогам параметры генераторов и трансформаторов.

в) Определить коэффициенты запаса статической устойчивости по идеальному и действительному пределам мощности.

г) Выполнить расчет статической устойчивости нагрузки узла системы.

д) Определить предельное время отключения трехфазного к.з. в точке "К" (рис.1) для сохранения динамической устойчивости.

Вместе со схемой системы электропередачи в задании должны быть указаны следующие исходные параметры (см. стр.):

- передаваемая мощность P_0 и $\cos \varphi$;
- дальность передачи l ;
- мощность генераторов станции $P_{\bar{A}1}$ с указанием типа генераторов;
- мощность приемной системы $P_{\bar{A}2}$ с указанием типа генераторов;
- величина нагрузок P_{i1} , $\cos \varphi_{i1}$ и P_{i2} , $\cos \varphi_{i2}$;
- напряжение на шинах нагрузки;
- отвлечения на трансформаторах.

Исходные параметры системы записывают в соответствующие таблицы для генераторов, трансформаторов, линии и нагрузки. Таблицы заполняются по мере выполнения разделов 1, 2, 3.

Таблица 1. Генераторы

Тип и число генераторов	S_{Σ} , МВА	U_H , кВ	T_J , сек	X^*
Гидрогенераторы Γ_1 , $n_1 = 4$	300	10,5	7	$X_d = 1,1$ $X_q = 0,65$ $X'_d = 0,28$ $X_2 = 0,35$ $X_d = 1,7$
Турбогенераторы Γ_2 , $n_2 = 4$	1200	10,5	10	$X'_d =$ $X_2 =$

Таблица 2. Трансформаторы

Суммарная мощность, МВА	U_K , %	Коэффициент трансформации
T_1 300	12	$K_1 = 254,1/10,5$
T_2 280	12	$K_2 = 209/121$
T_3 1200	14	$K_3 = 121/10,5$

Таблица 3. Линии

	Длина, км	X_1 , Ом/км на одну цепь	X_0 , Ом/км
Л	220	0,42	$5 \cdot X_1$

Таблица 4. Исходный режим системы

	Мощность, МВт	Коэффициент мощности	Напряжение
Нагрузка Н-1	$P_{H1} = 175$	$\cos \varphi_{H1} = 0,85$	$U = 115$ кВ
Нагрузка Н-2	$P_{H2} = 925$	$\cos \varphi_{H2} = 0,85$	$U = 115$ кВ
Передаваемая мощность	$P_0 = 175$	$\cos \varphi_0 = 0,85$	

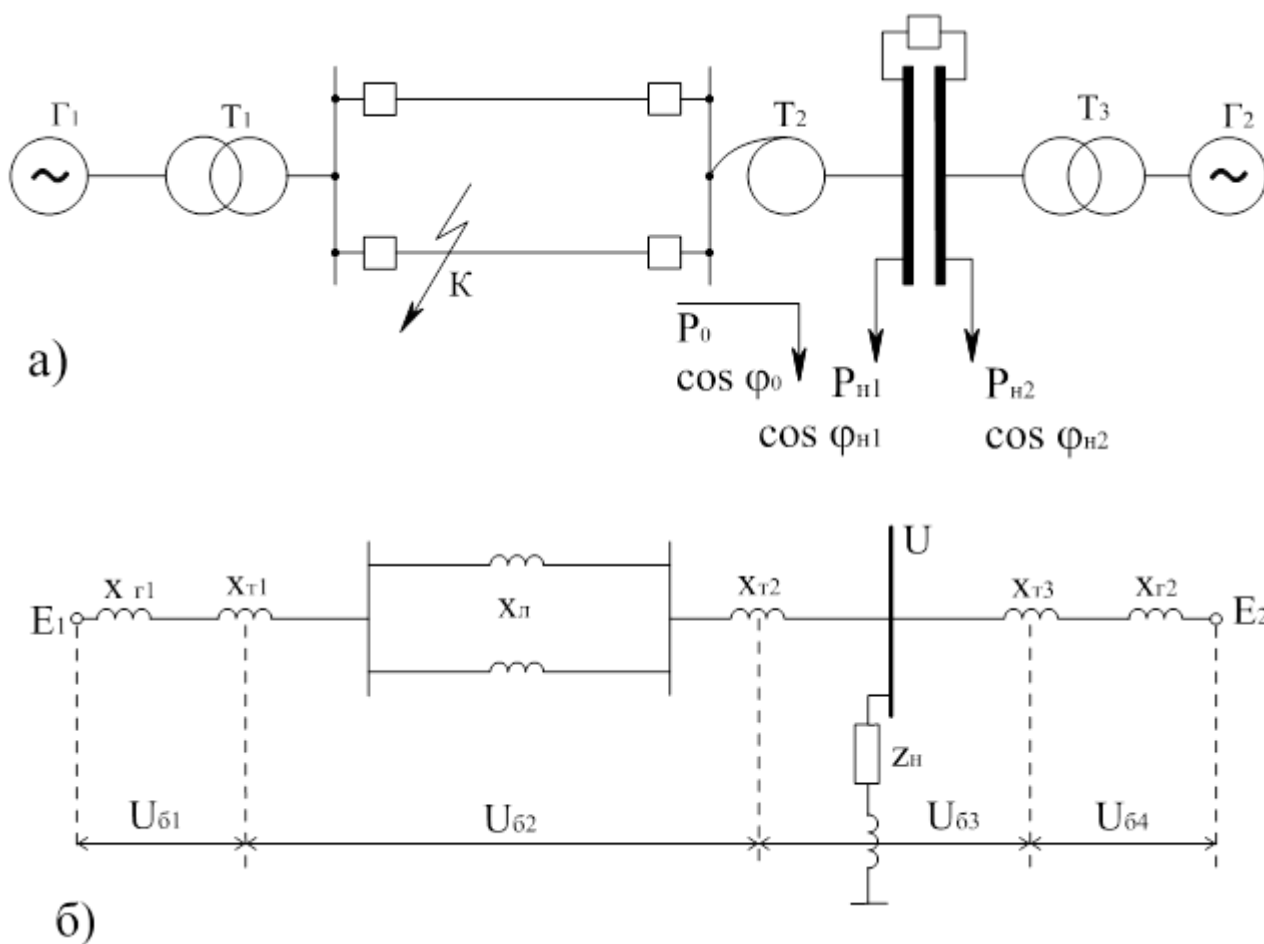


Рис.1. Схема системы (электропередачи) и ее схема замещения

На рис.1 и в приведенных таблицах даны схема и исходные параметры системы, для которой ниже выполнен типовой расчет устойчивости.

2.ВЫБОР НОМИНАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ И СЕЧЕНИЯ ПРОВОДОВ ДВУХЦЕПНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Исходными данными для выбора напряжения являются расчетная нагрузка одной цепи и дальность электропередачи.

1. Предварительный (приближенный) выбор напряжения основывается обычно на практическом опыте проектных организаций. ВГПИ и НИИ "Энергосетьпроект" рекомендуют определять номинальное напряжение линии по "экономическим зонам" $U = \varphi(P \cdot l)$, представленным на рис.2.

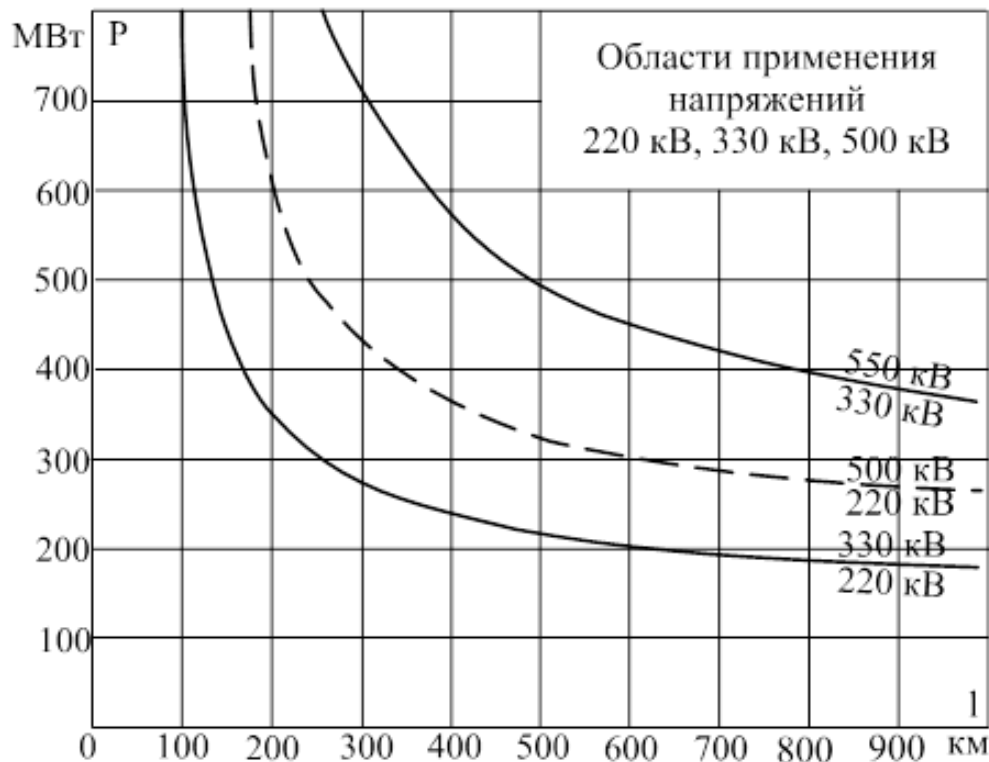


Рис. 2. Экономические зоны

2. Выбранное по рис.2 номинальное напряжение линии, в случае простейшей схемы электропередачи, можно проверить по формуле:

$$0,5 \cdot P_0 = \frac{U^2}{x_1 \cdot l} \cdot \sin \delta_0 \quad (1)$$

где $0,5P_0$ - расчетная нагрузка одной цепи,

δ_0 - рабочий угол линии, который не должен превышать 50 - 60°.

При достаточно ограниченном угле δ_0 , который представляет собой сдвиг по фазе векторов напряжений на концах линии ($U_1=U_2=U$), электропередача должна работать устойчиво.

При заданных условиях ($P_0 = 175$ МВт, $l = 220$ км) по рис.2 находим $U_n = 220$ кВ, а по формуле (1):

$$U = \sqrt{\frac{0,5 \cdot P_0 \cdot x_1 \cdot l}{\sin 50^\circ}} = \sqrt{\frac{0,5 \cdot 175 \cdot 0,42 \cdot 220}{0,766}} = 103 \text{ кВ}$$

При передаче всей мощности P_0 по одной цепи, необходимо напряжение:

$$U = \sqrt{\frac{175 \cdot 0,42 \cdot 220}{0,766}} = 146 \text{ кВ}$$

Выбираем окончательно стандартное напряжение $U = 220 \text{ кВ}$.

Выбор сечений проводов простейших линий электропередачи (с напряжением 220 кВ и ниже) производят по нормированной экономической плотности тока j , А/мм² (таблица 5).

Таблица 5. Нормированная экономическая плотность тока.

Алюминиевые и сталеалюминевые провода	Продолжительность использования максимума нагрузки T_m , час		
	1000 - 3000	3000 - 5000	Более 5000
Европейская часть	1,3	1,1	1,0
Центральная Сибирь	1,5	1,4	1,3

Полученное по формуле:

$$q_{\text{эк}} = \frac{I_0}{j_{\text{эк}}} \quad (2)$$

экономическое сечение $q_{\text{эк}}$ должно обязательно проверяться на отсутствие коронирования. Правила устройства электроустановок (ПУЭ) рекомендуют принимать для линий с номинальным напряжением 110 кВ провода с диаметром не менее 11мм (АС-70), при напряжении 220 кВ - АСО-240, а при 330 кВ - АСО- 240 х 2.

Принимая для заданной электропередачи $T_m=5000$ час и $j_{\text{эк}}=1 \text{ А/мм}^2$, находим :

$$q_{\text{эк}} = \frac{0,5 \cdot P_0}{\sqrt{3} \cdot U \cdot j_{\text{эк}} \cdot \cos \varphi_0} = \frac{175 \cdot 0,5 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 1 \cdot 0,85} = 260 \text{ мм}^2$$

Принимаем ближайшее стандартное сечение = 300 мм² (АСО-300).

3.ВЫБОР НОМИНАЛЬНЫХ МОЩНОСТЕЙ И КОЛИЧЕСТВА ГЕНЕРАТОРОВ И ТРАНСФОРМАТОРОВ

На электростанциях, работающих на электропередачи, генераторы непосредственно соединяются с трансформаторами в блоки. Принимая на удаленной ГЭС $n_1 = 4-6$ блоков, по формуле:

$$S_{нг1} = \frac{S_{\Sigma 1}}{n_1} \quad (3)$$

Определим мощность блока и ближайшие стандартные мощности генераторов и трансформаторов. Если не задана суммарная мощность станции $S_{\Sigma 1}$, то ее следует принять

$$S_{\Sigma 1} = (1,5 \div 2) \cdot \frac{P_0}{\cos \varphi_0}$$

Аналогично определяется мощность турбогенератора $S_{нг2}$ приемной системы:

$$S_{\Sigma 2} = (4 \div 6) \cdot S_{\Sigma 1}$$

$$S_{\Sigma \Delta 2} = (4 \div 6) S_{\Sigma 1} \quad (4)$$

n_2 - количество блоков турбогенераторов.

При расчете $S_{нг1}$, $S_{нг2}$ следует ориентироваться на современные крупные блоки. Величины $S_{нг}$ необходимы для определения (выбора) по каталогам всех параметров блоков.

На подстанциях связи электропередачи с приемной системой (T_2 , рис.1) устанавливаются автотрансформаторы. Их мощность должна соответствовать мощности передачи P_0 . При двух автотрансформаторах мощность каждого выбирается равной $0,65-0,7$ максимальной нагрузки подстанции ($P_0 / \cos \varphi_0$).

При отсутствии специальных указаний ответвления у трансформаторов электропередачи могут быть приняты номинальные.

4.СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ И РАСЧЕТ НОМИНАЛЬНОГО (ИСХОДНОГО) РЕЖИМА РАБОТЫ СИСТЕМЫ

В схемах замещения для расчетов устойчивости генераторы, трансформаторы и линии представляются также, как и для расчетов токов к.з. - их реактивными сопротивлениями. Активное сопротивление в упрощенных расчетах может не учитываться, т.к. оно много меньше реактивного. Емкостные проводимости линии и индуктивные проводимости трансформаторов не учитываются.

Нагрузки могут быть представлены полными (комплексными) сопротивлениями или статическими характеристиками.

Расчет выполняется в относительных единицах. Значения реактивных сопротивлений в относительных единицах при выбранных $S_{баз}$ и $U_{баз}$ вычисляются по формуле:

$$x_* = \frac{X_{(ОМ)}}{Z_{баз}} \cdot K^2 \quad (5)$$

где $Z_{баз} = \frac{U_{баз}^2}{S_{баз}}$ - базисное сопротивление;

$\hat{e} = \frac{U_{\hat{a}\hat{c}}}{U_{\hat{m}}}$ - коэффициент трансформации к базисной ступени.

Сопротивления генераторов и трансформаторов задаются не в Омах, а в относительных единицах, отнесенных к номинальным напряжению и мощности элемента. В этом случае следует определить сопротивление в Омах, а затем воспользоваться формулой (5)

$$x_* = x_{*H} \cdot \frac{U_H^2}{S_H} \cdot \frac{S_{баз}}{U_{баз}^2} \cdot K^2 \quad (6)$$

Практически удобнее предварительно вычислить базисные напряжения для каждой ступени трансформации:

$$U_{бн} = \frac{U_{баз}}{K} \quad (7)$$

и воспользоваться формулой:

$$x_* = x_{*H} \cdot \frac{U_H^2}{S_H} \cdot \frac{S_{баз}}{U_{бн}^2} \quad (8)$$

Для рассматриваемого примера реактивные сопротивления в относительных единицах при $S_{баз}=300$ МВА, $U_{баз}=200$ кВ и базисных напряжениях каждой ступени 1, 2, 3, 4 (рис.1):

$$U_{б1} = 200 \text{ кВ};$$

$$U_{б2} = 200 \cdot \frac{10,5}{254} = 8,25 \text{ кВ};$$

$$U_{б3} = 200 \cdot \frac{121}{209} = 116 \text{ кВ};$$

$$U_{б4} = 200 \cdot \frac{10,5}{121} \cdot \frac{121}{209} = 10,04 \text{ кВ}.$$

будут иметь следующие значения:

Сопротивления:

- турбогенераторов

$$x_{d1} = 1,1 \cdot \frac{10,5^2}{8,25^2} \cdot \frac{300}{300} = 1,78 ;$$

$$x'_{d1} = 0,28 \cdot \frac{10,5^2}{8,25^2} \cdot \frac{300}{300} = 0,454 ;$$

$$x_2 = 0,35 \cdot \frac{10,5^2}{8,25^2} \cdot \frac{300}{300} = 0,566 ;$$

- гидрогенераторов

$$x_{d2} = 1,7 \cdot \frac{10,5^2}{10,04^2} \cdot \frac{300}{1200} = 0,464$$

- трансформаторов

$$x_{01} = 0,12 \cdot \frac{254,1^2}{200^2} \cdot \frac{300}{300} = 0,194 ;$$

$$x_{02} = 0,12 \cdot \frac{209^2}{200^2} \cdot \frac{300}{300} = 0,141 ;$$

$$x_{03} = 0,14 \cdot \frac{121^2}{116^2} \cdot \frac{300}{1200} = 0,038.$$

- линии

$$x_{л} = \frac{0,42}{2} \cdot 220 \cdot \frac{300}{200^2} = 0,346$$

- нагрузки

$$z_i = \frac{U^2}{S_i} (\cos \varphi_i + j \sin \varphi_i) \cdot \frac{S_{\dot{a}\dot{a}\zeta}}{U_{\dot{a}\dot{a}\zeta}^2} \hat{E}^2 = \frac{115^2}{S_i} (0,85 + j0,527) \cdot \frac{300}{200^2} =$$

$$= 0,197 + j0,12$$

Для определения э.д.с. станции производим электрический расчет номинального режима работы системы:

- базисное напряжение на шинах приемной системы

$$U_* = \frac{U}{U_{\text{баз}}} \cdot K = \frac{U}{U_{63}} = \frac{115}{116} = 0,99$$

- мощность, поступающая на шины приемной системы от удаленной станции Г₁, в относительных единицах

$$P_{0*} + jQ_{0*} = \frac{P_0}{S_{*}} + j \frac{Q_0}{S_{*}} \cdot \operatorname{tg} \varphi_0 = \frac{175}{300} + j \frac{175}{300} \cdot \operatorname{tg} \varphi_0 = 0,584 + j0,362$$

- суммарное реактивное сопротивление от станции Г₁ до шин приемной системы

$$x_1 = x_{d1} + x_{r1} + x_{л} + x_{r2} = 1,78 + 0,194 + 0,346 + 0,141 = 2,461$$

- найденные мощности, напряжение шин приемной системы и сопротивление позволяют определить э.д.с. генераторов Г₁:

$$E_{d1} = \sqrt{\left(U_* + \frac{Q_0 \cdot x_1}{U_*} \right)^2 + \left(\frac{P_{0*} \cdot x_1}{U_*} \right)^2} = \sqrt{\left(0,99 + \frac{0,362 \cdot 2,46}{0,99} \right)^2 + \left(\frac{0,584 \cdot 2,46}{0,99} \right)^2} = 2,38$$

- угол сдвига вектора э.д.с. E_{d1} относительно вектора напряжения U равен

$$\delta_0 = \arctg \frac{P_{0*} \cdot x_1}{U_*^2 + Q_{0*} \cdot x_1} = \arctg \frac{1,45}{1,89} = 37,5^\circ$$

- мощность, поступающая на шины приемной системы от генераторов Г₂

$$P_{2*} + jQ_2 = \frac{925}{300} + j \frac{925}{300} \cdot \operatorname{tg} \varphi_{i2} = 3,08 + j1,91$$

- суммарное реактивное сопротивление от станции Г₂ до шин приемной системы
 $x_2 = x_{d2} + x_{T3} = 0,464 + 0,038 = 0,502$

- э.д.с. генераторов Г₂

$$E_{d2} = \sqrt{\left(0,99 + \frac{1,91 \cdot 0,502}{0,99}\right)^2 + \left(\frac{3,08 \cdot 0,502}{0,99}\right)^2} = 2,5$$

- угол сдвига вектора э.д.с. E_{d2} относительно вектора напряжения U равен

$$\delta = \arctg \frac{P_{2*} \cdot x_2}{U_*^2 + Q_{2*} \cdot x_2} = \arctg \frac{1,56}{1,96} = 38,5^\circ$$

Результаты расчетов параметров схемы замещения системы и э.д.с. в нормальном режиме в дальнейшем используются для расчетов статической устойчивости системы.

5.ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЗАПАСА СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПО ИДЕАЛЬНОМУ И ДЕЙСТВИТЕЛЬНОМУ ПРЕДЕЛАМ МОЩНОСТИ

Запас статической устойчивости электропередачи, связывающей электростанцию с энергосистемой, определяется по формуле:

$$K_c = \frac{P_{np} - P_0}{P_0} \cdot 100\% \quad (9)$$

где K_c - коэффициент запаса устойчивости;

P_0 - передаваемая мощность;

P_{np} - предельная мощность.

K_c должен иметь значение не менее 20% - в нормальном режиме и 8% - в кратковременном послеаварийном режиме (1 цепь).

Максимальная мощность, которую можно передавать по линии электропередачи при ее медленном увеличении, называется предельной мощностью.

Для электропередачи, связывающей электростанцию с системой несоизмеримо большей мощности, на шинах которой поддерживается $U = \text{const}$, передаваемая в систему мощность определяется по формуле:

$$P = \frac{E_{d1} \cdot U}{x_1} \cdot \sin \delta = P_{np} \cdot \sin \delta \quad (10)$$

где P_{np} - идеальный предел мощности, определяемый без учета АРВ генераторов, активных сопротивлений, параллельных проводимостей передачи и при фиксации напряжения на шинах приемной системы.

Для рассматриваемого примера

$$P_{np} = \frac{2,38 \cdot 0,99}{2,46} = 0,958$$

Коэффициент запаса статической устойчивости

$$K_c = \frac{0,958 - 0,584}{0,584} \cdot 100 = 64\%$$

Построенная по полученным данным угловая характеристика мощности электропередачи показана на рис.3, а.

Если мощность приемной системы соизмерима с мощностью электропередачи, то напряжение на шинах нагрузки не остается постоянным при утяжелении режима электропередачи (при увеличении передаваемой от Γ_1 мощности). В этом случае предельная мощность P_{np} определяется по действительной характеристике мощности, учитывающей снижение напряжения U на шинах нагрузки.

Нагрузка может быть представлена постоянным сопротивлением z_n , а действительный предел мощности определяют на основании действительной угловой характеристики мощности при сложной связи генераторов Γ_1 , Γ_2 системы (рис.3, б).

$$P_{1np} = \frac{E_1^2}{z_{11}} \cdot \sin \alpha_{11} + \frac{E_1 \cdot E_2}{z_{12}} \quad (11)$$

где z_{11} и z_{12} - собственное и взаимное сопротивления системы, определяемые для станции Γ_1 .

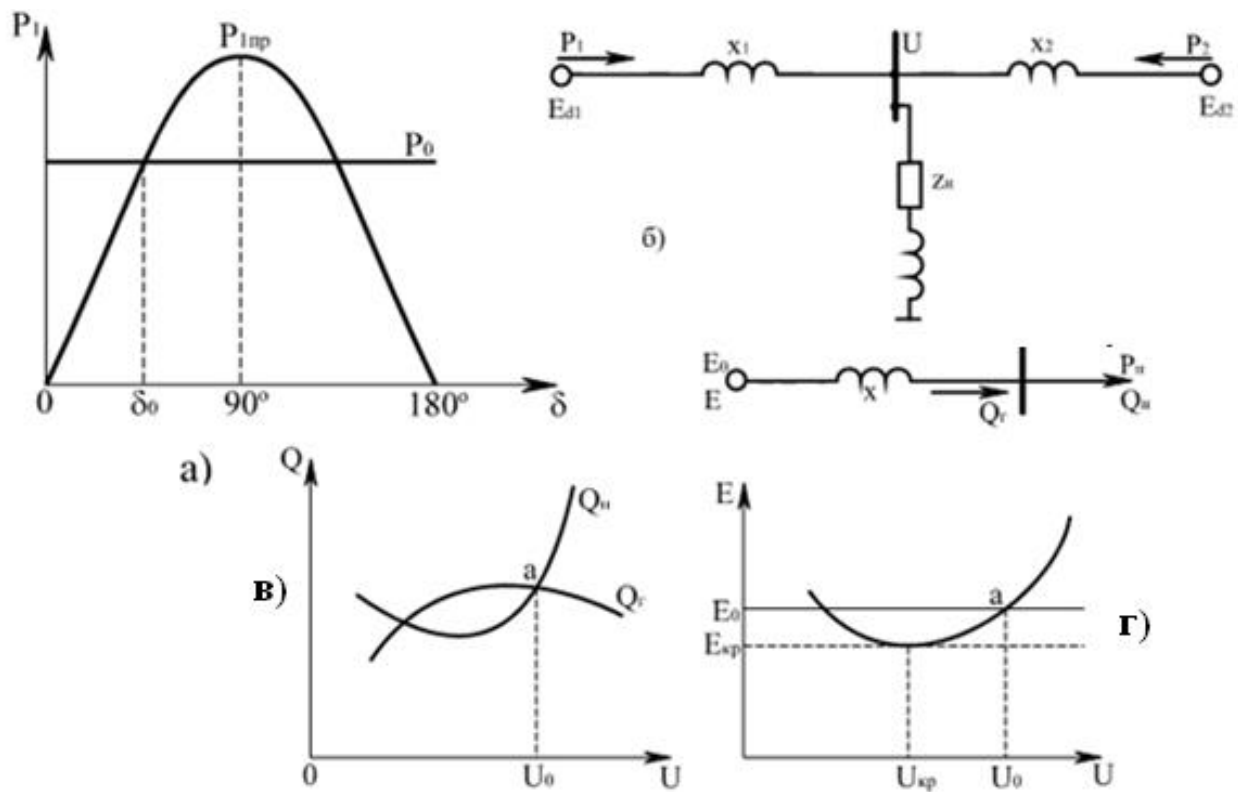


Рис. 3. Статическая устойчивость, а) - угловая характеристика мощности электропередачи, б) – схема замещения сложной связи генераторов Γ_1 , Γ_2 системы, в) – зависимости реактивных мощностей от напряжения и г) – зависимость ЭДС от напряжения.

Для рассматриваемого примера

$$z_{11} = jx_1 + \frac{jx_2 \cdot z}{jx_2 + z} = j2,48 + \frac{j0,502 \cdot (0,197 + j0,122)}{j0,502 + 0,197 + j0,122} = 0,115 + j2,56 = 2,56e^{j87,4^\circ}$$

$$\alpha_{11} = 90^\circ - 87,4^\circ = 2,6^\circ$$

$$z_{11} = jx_1 + jx_2 + \frac{jx_2 \cdot jx_1}{z_H} = j2,46 + j0,502 + \frac{j0,502 \cdot j2,46}{0,197 + j0,122} = -4,56 + j5,78 = 7,36e^{j128,3^\circ}$$

$$\alpha_{12} = 90^\circ - 128,3^\circ = -38,3^\circ$$

Подставив найденное сопротивление в (11), определим действительный предел мощности :

$$P_{1np} = \frac{2,38^2}{2,56} \cdot \sin 2,6 + \frac{2,38 \cdot 2,5}{7,36} = 0,906$$

$$K_c = \frac{0,908 - 0,584}{0,584} \cdot 100 = 55\%$$

Более точный расчет действительного предела мощности может быть выполнен при представлении нагрузки статическими характеристиками (Л.3, стр.220 - 223). По данным указанного расчёта получаем $P_{1np} = 0,74$ и запас устойчивости

$$K_c = \frac{0,74 - 0,584}{0,584} \cdot 100 = 26,7\%$$

6. РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ НАГРУЗКИ УЗЛА СИСТЕМЫ

Асинхронные двигатели, которые обычно представляют основную часть нагрузки электрических систем, при значительном снижении напряжения на их зажимах могут опрокинуться и остановиться.

Изменение напряжения узла нагрузки связано с нарушением баланса реактивной мощности. Потребляемая нагрузкой реактивная мощность зависит от уровня напряжения U и характеризуется т.н. статическими характеристиками (Л.3, стр.436). В свою очередь реактивная мощность электрической станции, передаваемая нагрузке, также зависит от напряжения узла нагрузки. Точка "а" пересечения обеих этих характеристик (рис.3, в) отражает режим работы системы.

При нарушении баланса Q вследствие уменьшения Q_r (отделение электропередачи от системы, отключение цепи и т.п.) понижается напряжение U и может наступить опрокидывание асинхронных двигателей, сопровождающееся значительным увеличением Q_n и лавинообразным снижением напряжения U .

Анализ приведенных на рис.3, в характеристик позволяет записать критерий устойчивости нагрузки в форме:

$$\frac{dQ}{dU} \cdot \frac{d(Q_A - Q_f)}{dU} < 0 \quad (12)$$

Оценка устойчивости нагрузки по кривым (рис.3, в) и критерию (12) не отражает в явной форме влияния э.д.с. генераторов.

В данной системе величина Q_r зависит от э.д.с. генераторов

$$E = \sqrt{\left(U + \frac{Q_n \cdot x}{U} \right)^2 + \left(\frac{P_n \cdot x}{U} \right)^2} \quad (13)$$

Совместное рассмотрение заданной э.д.с. станции и характеристики $E = f(U)$, построенной с учетом статических характеристик нагрузки (рис.3, г), позволяет определить запас статической устойчивости нагрузки.

Характеристики $E=f(U)$ и $E_0=\text{const}$ пересекаются в точке "а", для которой производная

$$\frac{dE}{dU} > 0 \quad (14)$$

При уменьшении э.д.с. E_0 прямая $E_0=\text{const}$ становится касательной в точке минимума кривой $E=f(U)$, а производная $\frac{dE}{dU} = 0$, что означает предельный режим работы двигателей. Этому режиму соответствует критическое напряжение $U_{кр}$ (рис.3, г).

Запас устойчивости характеризуется коэффициентом

$$K_U = \frac{U_0 - U_{кр}}{U_0} \cdot 100\% \quad (15)$$

Для промышленной нагрузки величина K_U считается достаточной, если в нормальном режиме $K_U \geq 20\%$ и в послеаварийном - $K_U \geq 10\%$.

В рассматриваемом примере требуется проверить, будет ли устойчива часть комплексной нагрузки ($P_{н1}$), имеющей типовые характеристики, после отключения выключателя "В" (рис.1).

Расчет необходимо выполнить для двух режимов передачи:

а) обе цепи передачи находятся в работе;

б) одна цепь передачи отключена одновременно с выключателем "В" при условии, что на генераторах Γ_1 автоматических регуляторов напряжения нет.

Для режима передачи мощности по одной цепи повторить расчет при условии, что на генераторах Γ_1 установлены автоматические регуляторы напряжения пропорционального типа без зоны нечувствительности.

Статические характеристики комплексной нагрузки ($P_{H1} + jQ_{H1}$) приведены в таблице 6.

Таблица 6. Статические характеристики комплексной нагрузки.

U^*	1	0,9	0,8	0,7
P^*	1	0,941	0,89	0,855
Q^*	1	0,885	0,844	0,8

Вычисляем зависимость $E_{d1}=f(U)$ и $E'_{d1}=f(U)$ по (13), задаваясь различными напряжениями U на шинах нагрузки S_{H1} и определяя соответствующие значения мощностей P_H и Q_H :

$$P_H = P_0 \cdot P^* \quad \text{и} \quad Q_H = Q_0 \cdot Q^* \quad (16)$$

где P_0 и Q_0 - составляющие мощности нагрузки P_{H1} при $U = 1$;

P^* и Q^* - относительные изменения мощностей, взятые из таблицы 6.

В схеме для определения E_d , где генераторы Γ_1 введены без учета АРВ (x_d), суммарное сопротивление системы :

а) при двух цепях передачи

$$x = x_{d1} + x_{T1} + x_L + x_{T2} = 1,78 + 0,194 + 0,346 + 0,141 = 2,461 ;$$

б) при одной цепи передачи

$$x = x_{d1} + x_{T1} + 2x_L + x_{T2} = 1,78 + 0,194 + 0,692 + 0,141 = 2,807$$

В схеме для определения E'_d генераторы Γ_1 введены с учетом АРВ (x'_d) и суммарное сопротивление системы при одной цепи

$$x = x'_{d1} + x_{T1} + 2x_L + x_{T2} = 0,454 + 0,194 + 0,692 + 0,141 = 1,481$$

Результаты расчетов сведены в таблицу 7 и представлены на рис.4.

Таблица 7. Результаты расчетов ЭДС.

U	Отключена одна цепь		Включены две цепи (E_d)
	E_d	E'_d	
1,0	2,60	1,76	2,38
0,9	2,38	1,6	2,16
0,8	2,21	1,47	2,00
0,7	2,13	1,39	1,93

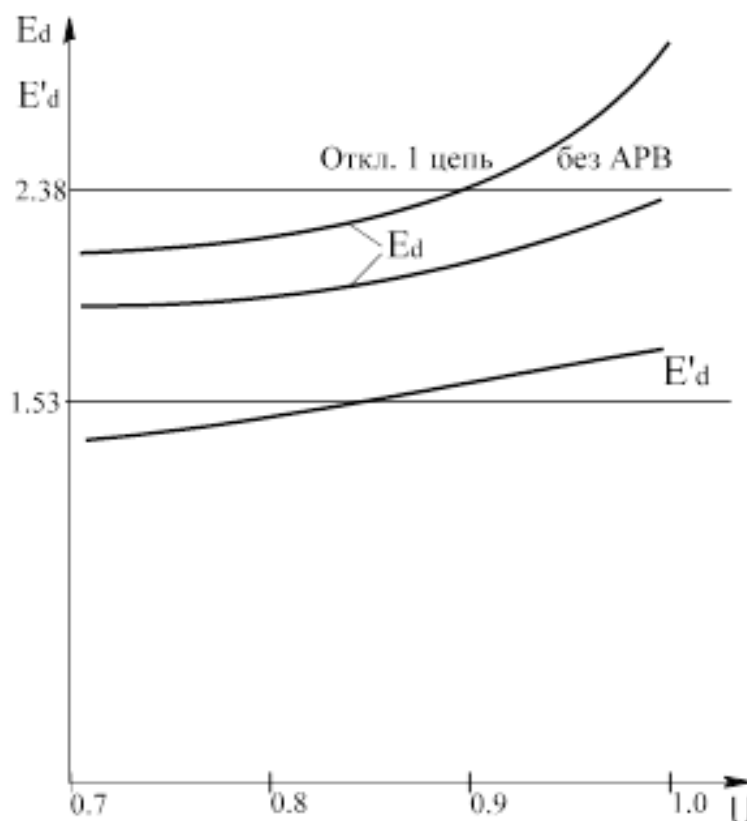


Рис. 4. Зависимости ЭДС о напряжения.

Величина E'_d для номинального режима, когда включены две цепи и отсутствует переток мощности через выключатель "В" :

$$E'_{d0} \approx \sqrt{\left(1 + \frac{0,362 \cdot 1,135}{1}\right)^2 + \left(\frac{0,584 \cdot 1,135}{1}\right)^2} = 1,53$$

где $x' = x'_{d1} + x_{T1} + x_l + x_{T2} = 0,454 + 0,194 + 0,346 + 0,141 = 1,135$

Величина $E_d = 2,38$ и $E'_{d0} = 1,53$ при $U = 1$ для нормального режима являются исходными величинами, остающимися неизменными. Как следует из рис.4 при всех режимах устойчивость нагрузки сохраняется, АРВ увеличивает запас устойчивости нагрузки.

Если считать, что $U_{кр} = 0,7$, то коэффициент запаса устойчивости нагрузки по напряжению при отключении одной цепи в отсутствии АРВ

$$K_U = \frac{U - U_{кр}}{U} \cdot 100\% = \frac{0,9 - 0,7}{0,9} \cdot 100 = 22,2\%$$

7. РАСЧЕТ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ

Упрощенные расчеты динамической устойчивости имеют целью:

- определить предельное время отключения повреждения (к.з.), необходимое для выбора выключателей а так же типа и уставок релейной защиты;
- установить предельную передаваемую мощность по линии по условиям динамической устойчивости.

Упрощенные методы применимы в тех случаях, когда рассматриваемая электрическая система может быть приведена к одной из простейших схем, изображенных на рис.5:

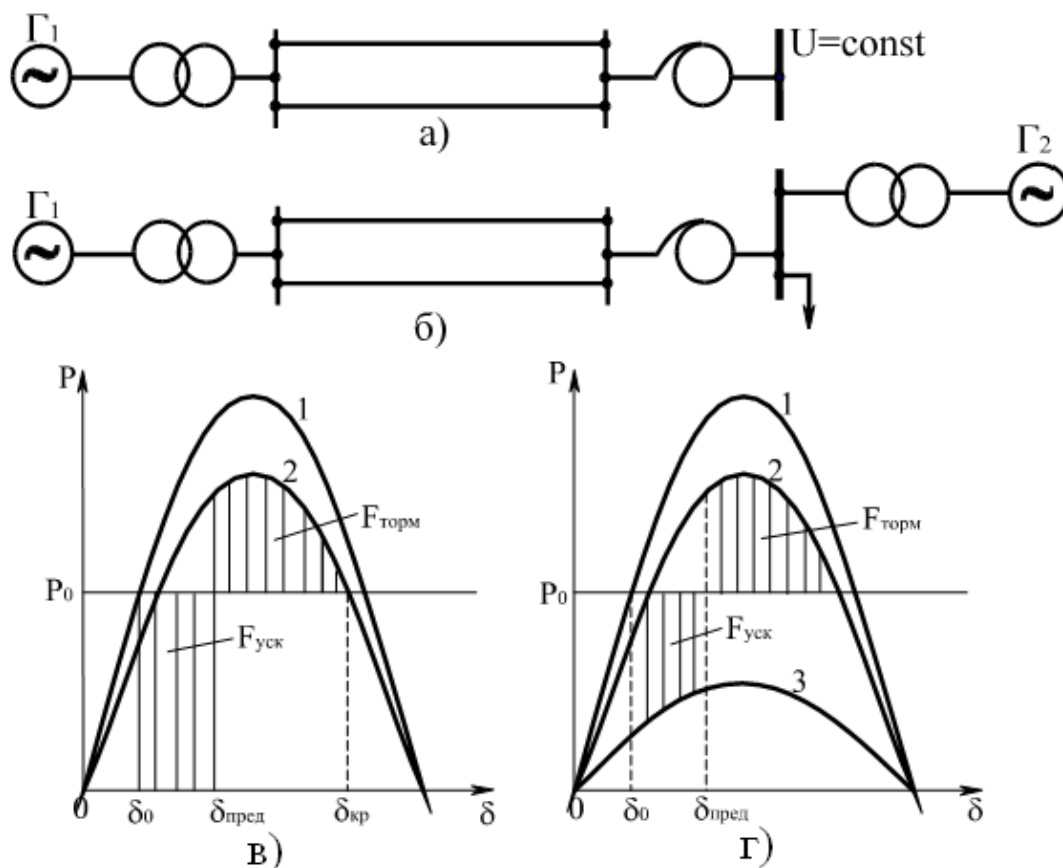


Рис. 5. Расчет динамической устойчивости, а) и б) – простейшие электрические системы, в) – угловая характеристика мощности при трехфазном КЗ, г) – угловая характеристика мощности при двухфазном КЗ.

а) система, состоящая из генератора, работающего на шины постоянного напряжения, что соответствует бесконечной мощности приемной системы;

б) система, состоящая из двух станций.

Упрощенные расчеты проводятся при следующих допущениях :

- постоянство условной э.д.с. E' за переходным реактивным сопротивлением генератора x'_d ;
- отсутствия нагрузок или замещения их постоянными сопротивлениями;
- постоянство мощности первичного двигателя.

Наиболее тяжелой аварией, с внезапным и большим изменением передаваемой от генераторов мощности, является трехфазное к.з. Далее в порядке облегчения идет двухфазное к.з. на землю и т.д.

8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ОТКЛЮЧЕНИЯ ТРЕХФАЗНОГО К.З.

Уравнение движения ротора эквивалентного генератора электростанции имеет следующий вид:

$$\frac{T_J}{\omega_0} \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_0 - P \quad (17)$$

где $\omega_0 = 360f = 18000$ эл град/с - угловая скорость;

T_J , с - постоянная инерции, приведенная к базисной мощности

$$T_J = T_J^{\text{ном}} \cdot \frac{S_H}{S_{\text{баз}}} \quad (18)$$

P_0 - мощность турбины.

Определение электрической мощности P связано со схемой замещения системы.

Если принять $U = \text{const}$, то для рассматриваемого примера расчета устойчивости в номинальном режиме

$$x'_1 = x'_{d1} + x_{T1} + x_L + x_{T2} = 0,454 + 0,194 + 0,346 + 0,141 = 1,135$$

электрическая мощность

$$P'_{\text{лп}} = \frac{E'_{d1} \cdot U}{x'_1} \cdot \sin \delta = P_{m1} \cdot \sin \delta = \frac{1,53 \cdot 0,99}{1,135} \cdot \sin \delta = 1,335 \cdot \sin \delta$$

При трехфазном к.з., сопровождающемся полным нарушением связи между станцией и системой ($x'_3 = \infty$) $P = 0$. Уравнение движения упрощается

$$T_J \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \omega_0 \cdot P_0 \quad (18.1)$$

Интегрируя это уравнение дважды получим

$$\delta = \frac{1}{2} \cdot P_0 \cdot \frac{\omega_0}{T_J} \cdot t^2 + \delta_0 \quad (19)$$

δ_0 - угол между векторами E'_{d0} и U в нормальном режиме.

$$\delta_0 = \arcsin \frac{P_0}{P'_{\text{лп}}} = \arcsin \frac{0,584}{1,335} = 25,4^\circ$$

Подставляя в (19) значение $\delta = \delta_{\text{пред}}$, можно найти предельное время отключения к.з. :

$$t_{\text{пред}} = \sqrt{\frac{2 \cdot T_J \cdot (\delta_{\text{пред}} - \delta_0)}{18000 \cdot P_0}}, \text{ с} \quad (20)$$

Предельный угол находят способом площадей - из условия равенства площадей ускорения ($F_{\text{уск}}$) и торможения ($F_{\text{торм}}$), построенных при помощи нагрузочно-угловых характеристик номинального, аварийного и послеаварийного режимов, соответственно 1, 3, 2 на рис.5, в.

- сопротивление электропередачи в послеаварийном режиме, когда одна цепь отключена

$$x'_2 = x'_{d1} + x_{T1} + 2x_L + x_{T2} = 0,454 + 0,194 + 0,692 + 0,141 = 1,481$$

- электрическая мощность

$$P = P_{m2} \cdot \sin \delta = \frac{1,53 \cdot 0,99}{1,481} \cdot \sin \delta = 1,042 \cdot \sin \delta$$

- из условия равенства площадей $F_{\text{уск}} = F_{\text{торм}}$ (рис.5, в) имеем :

$$\cos \delta_{\text{пред}} = \frac{\frac{\pi}{180} \cdot P_0 \cdot (\delta_{\text{кр}} - \delta_0) + P_{m2} \cdot \cos \delta_{\text{кр}} - P_{m3} \cdot \cos \delta_0}{P_{m2} - P_{m3}} \quad (21)$$

$$\cos \delta_{\text{пред}} = \frac{\frac{\pi}{180} \cdot 0,584 \cdot (145,8^\circ - 25,4^\circ) + 1,042 \cdot \cos 145,8^\circ - 0}{1,042 - 0} = 0,346$$

$$\delta_{\text{кр}} = 180^\circ - \arcsin \frac{P_0}{P_{m2}} = 180^\circ - \arcsin \frac{0,584}{1,042} = 145,8^\circ$$

$$\delta_{\text{пред}} = 69,8^\circ$$

Подставляя полученное значение $\delta_{\text{пред}} = 69,8^\circ$ в (20), найдем:

$$t_{\text{пред}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 7 \cdot (69,8 - 24,5)}{18000 \cdot 0,584}} = 0,242 \text{ с}$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В.А.Веников, Переходные электромеханические процессы в электрических системах, Изд-во "Высшая школа", 1970.
2. И.П. Сиуда. Переходные электромеханические процессы в электрических системах: Учебное пособие. - Новочеркасск: Изд-во НПИ, 1977. – 92 с.
3. И.С.Жданов, Устойчивость электрических систем, ГЭИ, 1948.
4. Н.Д.Анисимова, В.А.Веников и др., Переходные процессы в электрических системах в примерах и иллюстрациях /под ред. В.А.Веникова, Изд-во "Энергия", 1967.
5. Справочник по проектированию электрических систем /под ред. С.С.Рокотяна и И.М.Шапиро, Изд-во "Энергия", 1971.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Задание № _____
по курсу "Переходные электромеханические процессы в
электрических системах"

1. Схема электрической системы

Рис. 1

2. Расчетные данные

Таблицы №№ 1,2,3,4

При заполнении таблиц 1, 2, 3, 4 следует руководствоваться соотношениями:

$$P_{Г1} = (1,5 \div 2)P_0;$$

$$P_{Г2} = (4 \div 6)P_{Г1};$$

$$P_{Н1} = P_0;$$

$$P_{Н2} = 0,8P_{Г2}.$$

Ответвления у трансформаторов Т1, Т2, Т3 - номинальные

Таблица П1.1. Варианты заданий

P ₀ , МВт	l , км								
	180	200	210	220	230	240	260	280	300
180	1	2	3	4	5	6	7	8	9
190	10	11	12	13	14	15	16	17	18
200	19	20	21	22	23	24	25	26	27
210	28	29	30	31	32	33	34	35	36
220	37	38	39	40	41	42	43	44	45
230	46	47	48	49	50	51	52	53	54
240	55	56	57	58	59	60	61	62	63
250	64	65	66	67	68	69	70	71	72
260	73	74	75	76	77	78	79	80	81
270	82	83	84	85	86	87	88	89	90
280	91	92	93	94	95	96	97	98	99
290	100	101	102	103	104	105	106	107	108
300	109	110	111	112	113	114	115	116	117
320	118	119	120	121	122	123	124	125	126