

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Методические указания

по выполнению практических работ

по дисциплине «Проблемы статической и динамической
устойчивости электроэнергетических систем»

для студентов направления подготовки /специальности

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

**Профиль "Мониторинг и управление режимами электрических сетей на
базе интеллектуальных информационно-измерительных систем и
технологий"**

Практическое занятие 1

1. Векторные диаграммы синхронных генераторов

1.1. Общие положения

Перед выполнением расчетов устойчивости необходимо составить расчетную схему (схему замещения) простейшей электроэнергетической системы, включающую в себя схемы замещения отдельных элементов. Генераторы, трансформаторы и линии электропередачи представляются простейшими схемами замещения, т.е. индуктивными сопротивлениями. Нагрузку рекомендуется представлять в комплексном виде.

Элементы схемы замещения и параметры режима (напряжения, токи, мощности) определяются в относительных единицах [1]. Используется приближенное приведение по средним коэффициентам трансформации. За базисные величины рекомендуется принимать номинальную мощность генератора $S_{\text{б}} = S_{\text{ген.ном}}$ и напряжение на шинах нагрузки системы $U_{\text{б}} = U_{\text{сист.}}$ ($U_{*(\text{б})\text{с}} = 1$). Также в относительных единицах (в радианах) рекомендуется рассчитывать значения углов между различными векторами, т.к. в наиболее часто используемом пакете прикладных программ *Mathcad* при работе с тригонометрическими функциями углы, по умолчанию, берутся в радианах. Постоянные инерции T и время развития переходного процесса t оставляются в именованных единицах. Перечисленными рекомендациями определяется форма записи уравнений движения, используемых для описания переходного процесса и рассматриваемых далее.

1.2. Определение параметров схемы замещения

Расчет параметров схем замещения отдельных элементов электроэнергетической системы выполняется по известным формулам [1]. Если сопротивление элемента задано в относительных единицах:

$$x_{*(6)} = x_{*(ном)} \cdot \frac{S_6}{S_{ном}};$$

если в именованных:

$$x_{*(6)} = x_{(ном)} \cdot \frac{S_6}{U_6^2}.$$

Ниже, в табл. 1, приведены расчетные формулы для отдельных элементов системы.

Таблица 1

Элемент системы	Исходные данные	Сопротивление в о.е., приведенное к базисным условиям
Синхронный генератор	$x_d ; x'_d ; x_q ; x_2 ; S_{ген.ном}$	При условии $S_6 = S_{ген.ном}$ все исходные величины используются без пересчета
Силовой трансформатор	$\Delta U_K (\%) ; S_{т.ном}$	$x_{*т(6)} = \frac{\Delta U_K}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{т.ном}}$
Линия электропередачи	x_0 (Ом/км); $l_{линии}$ (км); $U_{л.ном}$	$x_{*л(6)} = x_0 \cdot l_{линии} \cdot \frac{S_6}{U_{л.}^2}$

Параметры элементов для схем отдельных последовательностей определяются по рекомендациям [1].

Если в качестве базисной выбрана мощность, отличающаяся от мощности элемента (генератора, двигателя), то соответствующие постоянные инерции необходимо привести к базисной мощности:

$$T_{J(6)} = T_{J(ном)} \cdot \frac{S_{ном}}{S_6}. \quad (1)$$

Если в схеме замещения необходимо эквивалентировать несколько агрегатов, то для них определяются эквивалентные постоянные инерции [8].

Например, при установке на КЭС $n_{ген.}$ агрегатов единичной мощностью

$P_{ген.ном}$:

$$T_{J\Sigma(6)} = T_{J(ном)} \cdot \frac{n_{ген.} \cdot P_{ном} / \cos \phi_{ген.ном}}{S_6}. \quad (2)$$

Переводу в относительные единицы подлежат значения всех мощностей,

напряжений и э.д.с. При этом следует помнить, что к базисным условиям приводятся как полные мощности, так и их составляющие:

$$S_{*(ном)} = \frac{S_{ном}}{S_6}; \quad P_{*(ном)} = \frac{P_{ном}}{S_6}; \quad Q_{*(ном)} = \frac{Q_{ном}}{S_6}.$$

Комплексная нагрузка может быть представлена в виде последовательно соединенных активного и индуктивного сопротивлений. Связь с величинами мощностей – следующая:

$$z_{*нагр} = r_{*нагр} + j \cdot x_{*нагр} = \frac{S_6}{S_{нагр}} \cdot (\cos\phi_{нагр} + j \cdot \sin\phi_{нагр}).$$

Активное сопротивление нагрузки для схемы замещения обратной последовательности берется равным $r_{2нагр} = 0,2$ при номинальной мощности и номинальном напряжении нагрузки.

Пример 1. Для простейшей электроэнергетической системы (ЭЭС), приведенной на рис. 1, составить схему замещения и привести параметры этой схемы к базисным условиям с пересчетом в относительные единицы. Исходные данные для элементов ЭЭС приведены в табл. 2. Все величины в табл. 2 отнесены к номинальной мощности соответствующего элемента и его номинальному напряжению.

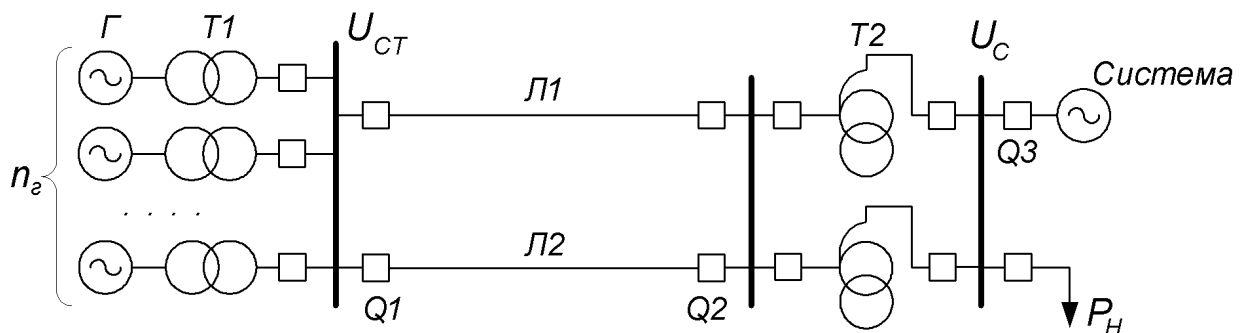


Рис. 1. Принципиальная схема простейшей электроэнергетической системы.

Таблица 2

Генератор									
Тип	$S_{\text{ном'}}$ МВА	$n_{\tilde{a}}$	x_d	x_q	x_d'	x_2	T_J , с	T_{do} , с	T_e , с
ТГ	75	4	1,6	-	0,28	0,24	7,4	4,9	0,12
Трансформаторы							Линия		
Т1			Т2						

$S_{\text{ном}},$ МВА	$U_{\text{к}},$ %	Группа соед.	$S_{\text{ном}},$ МВА	$U_{\text{кВН}},$ %	Группа соед.	k_{T2}	$l,$ км	$U_{\text{ном}},$ кВ	$x_0,$ Ом/км
80	10,5	$\triangle/\text{Y}$	2x125	11,0	Y/Y	$\frac{110}{220}$	75	110	0,4
Мощность, передаваемая в систему								Напряжение системы	
$P_{\text{с}},$ МВт	$\cos\varphi$		Скольжение s_0		$T_j,$ с		$U_{\text{с}},$ кВ		
150	0,83		0,03		6		220		

Решение. Примем в качестве независимых базисных величин $S_6 = S_{\text{ном.ген}}$ и $U_6 = U_{\text{ном.линии}}$. Приведение к базисным условиям выполним приближенное - по средним коэффициентам трансформации. Схема замещения показана на рис. 2.

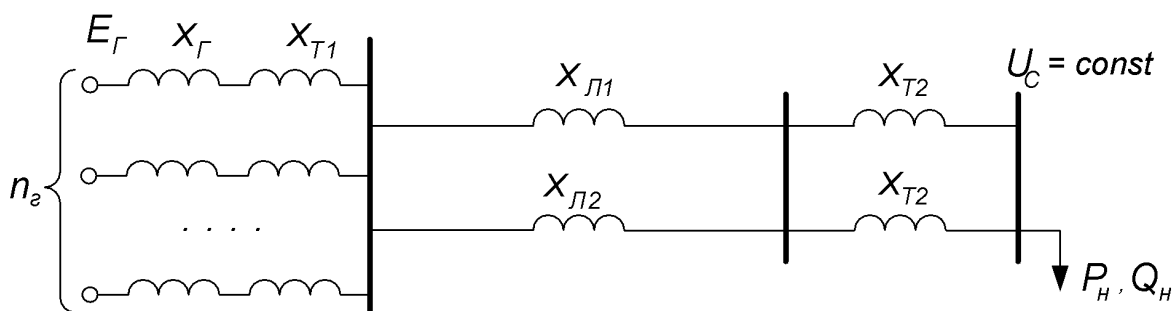


Рис. 2. Схема замещения простейшей электроэнергетической системы.

В соответствии с исходными данными и принятыми базисными условиями имеем:

- для турбогенератора, для всех сопротивлений из таблицы 2:

$$X_{*Г(баз)} = X_{\Gamma} = X_{\Gamma(исх)} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{ном}}} = X_{\Gamma(исх)} \cdot \frac{75}{80} = X_{\Gamma(исх)};$$

- для трансформаторов (у автотрансформатора Т2 во внимание принимается только сопротивление обмотки высокого напряжения (ВН), т.к. сопротивление обмотки СН всегда принимается равным нулю, а обмотка НН в данном примере не нагружена и поэтому ее сопротивление в схему замещения не включается):

$$X_{*Т1(баз)} = X_{Т1} = \frac{\Delta U_{\text{к.Т1}}}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{ном}}} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{75}{80} = 0,098;$$

$$X_{*Т2(баз)} = X_{Т2} = \frac{\Delta U_{\text{к.ВН.Т2}}}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{ном}}} = \frac{11,0}{100} \cdot \frac{75}{125} = 0,066;$$

- для линий

$$X_{*Л1(баз)} = X_{*Л2(баз)} = X_{Л1} = X_{Л2} = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_6^2} = 0,4 \cdot 75 \cdot \frac{75}{110^2} = 0,186;$$

- напряжение системы

$$U_{C(баз)} = \frac{U_{C(исх)}}{U_6} \cdot (k_{T2}) = \frac{220}{110} \cdot \left(\frac{110}{220}\right) = 1;$$

- нагрузка

$$P_{*H(баз)} = P_H = \frac{P_{H(исх)}}{S_6} = \frac{150}{75} = 2;$$

$$Q_{*H(баз)} = Q_H = P_H \cdot tg(\phi) = P_H \cdot \frac{\sqrt{1-\cos^2(\phi)}}{\cos(\phi)} = 2 \cdot \frac{\sqrt{1-0,83^2}}{0,83} = 1,344$$

1.3. Векторные диаграммы синхронных генераторов

Генератор при расчетах в схеме замещения представляется индуктивным сопротивлением $x_{\tilde{a}}$ и приложенной за ним э.д.с. E_{Γ} . Величины сопротивления и э.д.с. зависят от типа генератора, отсутствия или наличия АРВ и способа регулирования. Выбирать следует такие параметры, которые не изменяются в первый момент при любом резком изменении режима, т.е. позволяют связать состояние системы, предшествовавшее нарушению режима с новым состоянием, наступающим после нарушения [3].

При отсутствии АРВ:

для турбогенераторов (неявнополюсных синхронных машин): $x_{\Gamma} = x_d'$;

$E_{\Gamma} = E_q$ – синхронные сопротивления и э.д.с.;

для гидрогенераторов (явнополюсных синхронных машин): $x_{\Gamma} = x_q'$;

$E_{\Gamma} = E_q$ – синхронное сопротивление по поперечно оси и фиктивная расчетная э.д.с.

При наличии регулятора пропорционального действия (АРВ ПД): $x_{\Gamma} = x_d'$;
 $E_{\Gamma} = E_q'$ – переходное сопротивление и поперечная составляющая переходной э.д.с., обусловленной результирующим полным потокоцеплением обмотки возбуждения [3].

При регуляторах сильного действия (АРВ СД): $x_{\Gamma} = 0$; $E_{\Gamma} = U_{gq}$ – поперечная составляющая напряжения генератора.

Расчет величин э.д.с. может производиться по формуле

$$E_{\Gamma} = \sqrt{\left(U_c + \frac{Q_{\text{нагр}} \left(\frac{x_{\Gamma}}{n_{\Gamma}} + x_{\text{внеш.}} \right)}{U_c} \right)^2 + \left(\frac{P_{\text{нагр}} \left(\frac{x_{\Gamma}}{n_{\Gamma}} + x_{\text{внеш.}} \right)}{U_c} \right)^2}, \quad (3)$$

где $x_{\text{внеш.}} = \frac{x_{T1}}{n_{T1}} + \frac{x_{\text{линии}}}{2} + \frac{x_{T2}}{2}$ в исходном (нормальном) режиме;

n_{Γ}, n_{T1} – число генераторов и трансформаторов T1 на станции.

Углы $\delta_0, \delta'_0, \delta_{0u}$, характеризующие сдвиг вектора соответствующей

э.д.с. относительно вектора напряжения U_c , определяются по формуле:

$$\delta_{\tilde{a}} = \arctg \frac{P_{i \tilde{a} \tilde{a} \tilde{a}} \left(\frac{\tilde{\delta}_{\tilde{a}}}{n_{\tilde{a}}} + \tilde{\delta}_{\tilde{a} i \tilde{a} \tilde{a}} \right)}{U_c^2 + Q_{i \tilde{a} \tilde{a} \tilde{a}} \left(\frac{\tilde{\delta}_{\tilde{a}}}{n_{\tilde{a}}} + \tilde{\delta}_{\tilde{a} i \tilde{a} \tilde{a}} \right)}.$$

(4)

Определяются продольные составляющие переходной э.д.с. $\dot{A}'_q$ и

напряжения генератора $U_{\tilde{a}q}$:

$$\dot{E}'_q = \dot{E}' \cos(\delta_0 - \delta'_0), \quad (5)$$

$$U_{\Gamma q} = U_{\Gamma} \cos(\delta_0 - \delta_{0u}). \quad (6)$$

По рассчитанным значениям э.д.с. и углов и заданному значению $U^* = 1$

в координатной плоскости d, q в масштабе строится векторная диаграмма.

Пример 2. Для простейшей электроэнергетической системы содержащей неявнополюсные синхронные машины, схема замещения которой приведена на рис. 2, рассчитать параметры исходного установившегося режима для трех возможных вариантов регулирования возбуждения: нерегулируемый генератор; генератор с АРВ ПД; генератор с

АРВ СД и построить векторную диаграмму.

Решение. По формулам (3) – (6) рассчитаем э.д.с., приложенные за сопротивлениями, соответствующими способу регулирования возбуждения.

- турбогенератор без АРВ:

$$x_{ГЭВ.1} = \frac{x_d}{n_r} = \frac{1,6}{4} = 0,4;$$

$$x_{внеш.} = \frac{x_{T1}}{n_{T1}} + \frac{x_{линии}}{2} + \frac{x_{T2}}{2} = \frac{0,098}{4} + \frac{0,186}{2} + \frac{0,066}{2} = 0,15;$$

$$E_q = \sqrt{\left(U_c + \frac{Q_n(x_{ГЭВ.1} + x_{внеш.})}{U_c} \right)^2 + \left(\frac{P_n(x_{ГЭВ.1} + x_{внеш.})}{U_c} \right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(1 + \frac{1,344(0,4 + 0,15)}{1} \right)^2 + \left(\frac{2,0(0,4 + 0,15)}{1} \right)^2} = 2,058;$$

$$\delta_0 = \arctg \frac{P_i(\tilde{A}_{\tilde{y}\hat{e}\hat{a}.1} + \tilde{\delta}_{\hat{a}i\hat{a}\emptyset.})}{U_c^2 + Q_i(\tilde{A}_{\tilde{y}\hat{e}\hat{a}.1} + \tilde{\delta}_{\hat{a}i\hat{a}\emptyset.})} = \arctg \frac{2,0(0,4 + 0,15)}{1 + 1,344(0,4 + 0,15)} = 0,566 \text{ [рад.]};$$

$$\delta_0[\text{град.}] = \delta_0[\text{рад.}] \cdot \frac{180}{3,14} = 0,566 \cdot \frac{180}{3,14} = 32,4[\text{град.}].$$

- турбогенератор с АРВ ПД:

$$x_{ГЭВ.2} = \frac{x_d'}{n_r} = \frac{0,28}{4} = 0,07;$$

$$E' = \sqrt{\left(U_c + \frac{Q_n(x_{ГЭВ.2} + x_{внеш.})}{U_c} \right)^2 + \left(\frac{P_n(x_{ГЭВ.2} + x_{внеш.})}{U_c} \right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(1 + \frac{1,344(0,07 + 0,15)}{1} \right)^2 + \left(\frac{2,0(0,07 + 0,15)}{1} \right)^2} = 1,368;$$

$$\delta'_0 = \arctg \frac{P_i(\tilde{A}_{\tilde{y}\hat{e}\hat{a}.2} + \tilde{\delta}_{\hat{a}i\hat{a}\emptyset.})}{U_c^2 + Q_i(\tilde{A}_{\tilde{y}\hat{e}\hat{a}.2} + \tilde{\delta}_{\hat{a}i\hat{a}\emptyset.})} = \arctg \frac{2,0(0,07 + 0,15)}{1 + 1,344(0,07 + 0,15)} = 0,327 \text{ [рад.]};$$

$$\delta'_0[\text{град.}] = \delta'_0[\text{рад.}] \cdot \frac{180}{3,14} = 0,327 \cdot \frac{180}{3,14} = 18,8[\text{град.}];$$

$$A'_q = A' \cdot \cos(\delta_0 - \delta'_0) = 1,368 \cdot \cos(32,4 - 18,8) = 1,329;$$

- турбогенератор с АРВ СД:

$$x_{ГЭВ.3} = 0;$$

$$U_{\Gamma} = \sqrt{\left(U_c + \frac{Q_{\text{н}} \cdot x_{\text{внеш.}}}{U_c}\right)^2 + \left(\frac{P_{\text{н}} \cdot x_{\text{внеш.}}}{U_c}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(1 + \frac{1,344 \cdot 0,15}{1}\right)^2 + \left(\frac{2,0 \cdot 0,15}{1}\right)^2} = 1,238;$$

$$\delta_{0u} = \arctg \frac{P_i \cdot \tilde{\delta}_{\text{ái áø}}}{U_c^2 + Q_i \cdot \tilde{\delta}_{\text{ái áø}}} = \arctg \frac{2,0 \cdot 0,15}{1 + 1,344 \cdot 0,15} = 0,245 \quad [\text{рад.}];$$

$$\delta_{0u} [\text{град.}] = \delta_{0u} [\text{рад.}] \cdot \frac{180}{3,14} = 0,245 \cdot \frac{180}{3,14} = 14,0 [\text{град.}]$$

$$U_{\tilde{A}q} = U_{\tilde{A}} \cdot \cos(\delta_0 - \delta_{0u}) = 1,238 \cdot \cos(0,566 - 0,245) = 1,175$$

Векторная диаграмма системы приведена на рис. 3.

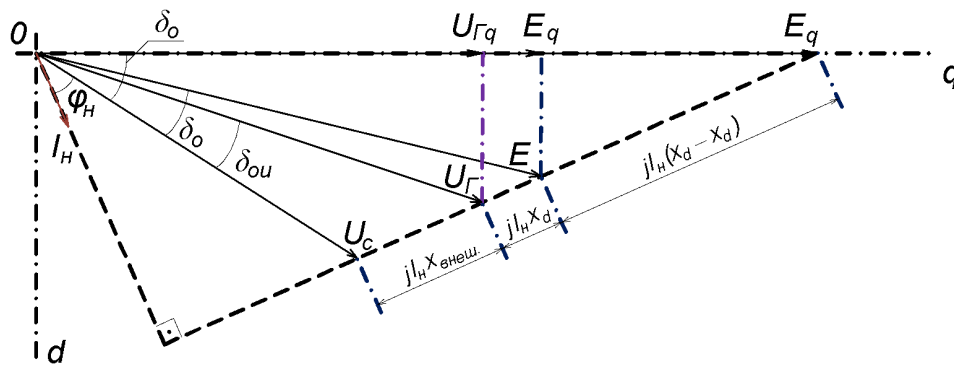


Рис. 3. Векторная диаграмма системы, содержащей неявнополюсный синхронный генератор (турбогенератор).

Пример 3. Рассчитать параметры исходного установившегося режима для трех возможных вариантов регулирования возбуждения, аналогично примеру 2, для простейшей электроэнергетической системы, содержащей явнополюсные синхронные машины и построить векторную диаграмму. Сделаем допущение, что параметры элементов системы те же, что и в предыдущем примере, за одним исключением – для явнополюсной машины

дополнительно задана величина $\tilde{\delta}_q = 0,96$.

Решение. Поскольку параметры элементов системы остались такими же, как в предыдущем примере, дополнительный расчет необходимо провести только для представления генератора, не имеющего АРВ, сопротивлением x_q , определив фиктивную

расчетную э.д.с. E_Q и сопутствующие ей величины δ_{0Q} , E'_{q2} и U_{Gq2} . Все остальные параметры берутся такими же, как и в примере 2.

$$x_{\Gamma_{\text{ЭКВ.4}}} = \frac{x_q}{n_r} = \frac{0,96}{4} = 0,24;$$

$$E_Q = \sqrt{\left(U_c + \frac{Q_n(x_{\Gamma_{\text{ЭКВ.4}}} + x_{\text{внеш.}})}{U_c}\right)^2 + \left(\frac{P_n(x_{\Gamma_{\text{ЭКВ.4}}} + x_{\text{внеш.}})}{U_c}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(1 + \frac{1,344(0,24 + 0,15)}{1}\right)^2 + \left(\frac{2,0(0,24 + 0,15)}{1}\right)^2} = 1,712;$$

$$\delta_{0Q} = \arctg \frac{P_i(\delta_{\tilde{A}, \tilde{y} \hat{e} \hat{a}.4} + \delta_{\hat{a} i \hat{a} \emptyset})}{U_c^2 + Q_i(\delta_{\tilde{A}, \tilde{y} \hat{e} \hat{a}.4} + \delta_{\hat{a} i \hat{a} \emptyset})} = \arctg \frac{2,0(0,24 + 0,15)}{1 + 1,344(0,24 + 0,15)} = 0,473 \text{ [рад.]};$$

$$\delta_{0Q} [\text{град.}] = \delta_{0Q} [\text{рад.}] \cdot \frac{180}{3,14} = 0,473 \cdot \frac{180}{3,14} = 27,1 [\text{град.}].$$

$$A'_{q2} = A' \cdot \cos(\delta_{0Q} - \delta'_0) = 1,368 \cdot \cos(0,473 - 0,327) = 1,353$$

$$U_{\Gamma q2} = U_{\Gamma} \cdot \cos(\delta_{0Q} - \delta_{0u}) = 1,238 \cdot \cos(0,473 - 0,245) = 1,206$$

Векторная диаграмма системы, содержащей явнополюсные генераторы, приведена на рис. 4.

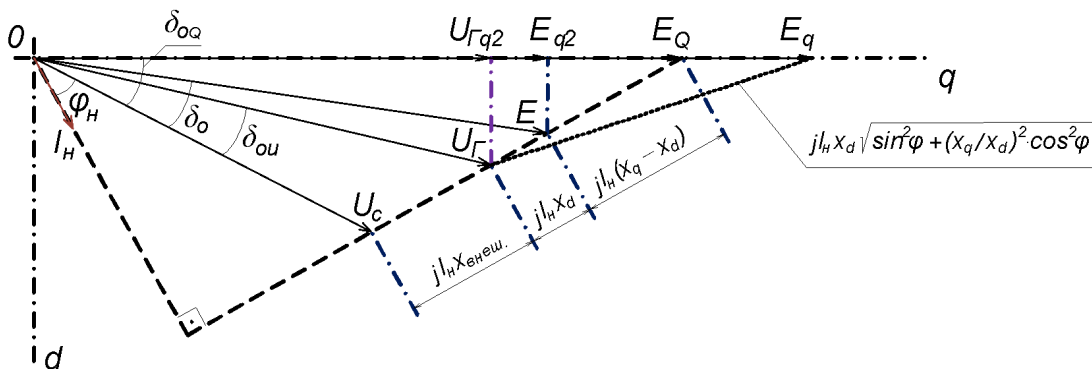


Рис. 4. Векторная диаграмма системы, содержащей явнополюсный генератор.

Практическое занятие 4,5,6,7,8,9

РАСЧЕТ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ

2.1. Общие положения

Исследования динамической устойчивости основываются на методах численного решения дифференциального уравнения относительного движения ротора генератора. В случае необходимости учета реакции якоря, действия АРВ, переходных процессов в обмотке ротора вводятся дополнительные

дифференциальные уравнения и соотношения, характеризующие действие регуляторов.

При выполнении упрощенных расчетов принимаются следующие основные допущения [3, 4]:

- мощность турбины считается неизменной в течение всего переходного режима;
- мощность, вырабатываемая генератором, считается изменяющейся мгновенно при изменении в схеме электропередачи вследствие короткого замыкания или коммутации;
- выполнение расчетов несимметричных режимов производится с учетом только параметров режима прямой последовательности, с использованием правила эквивалентности прямой последовательности [1];
- апериодические моменты, обусловленные потерями мощности, не учитываются.

С учетом указанных допущений для простейшей схемы электропередачи дифференциальное уравнение относительного движения ротора может быть записано в виде [3, 4]:

$$T_J \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_0 - P_{gi} \quad \text{или} \quad T_J \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_0 - \frac{E'_q \cdot U_c}{x_{12}^{(i)}} \cdot \sin\delta. \quad (1)$$

Здесь T_J – постоянная инерции ротора генератора;

$P_0 = P_{\text{нагр.}}$ – мощность турбины (для электропередачи без потерь – равна мощности нагрузки);

P_{gi} – электрическая мощность генератора для состояния « i » электропередачи;

$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \alpha$ – ускорение ротора рассматриваемого генератора;

$x_{12}^{(i)}$ – взаимное сопротивление между точкой приложения э.д.с. E'_q и шинами системы U_c для состояния « i » электропередачи.

Для определения собственного $x_{11}^{(i)}$ и взаимного $x_{12}^{(i)}$ сопротивлений схему замещения электропередачи для рассматриваемого режима необходимо преобразовать к эквивалентной трехлучевой звезде. Например, для второго аварийного режима – отключения к.з. в начале линии с одной стороны, исходная схема замещения (рис. 11):

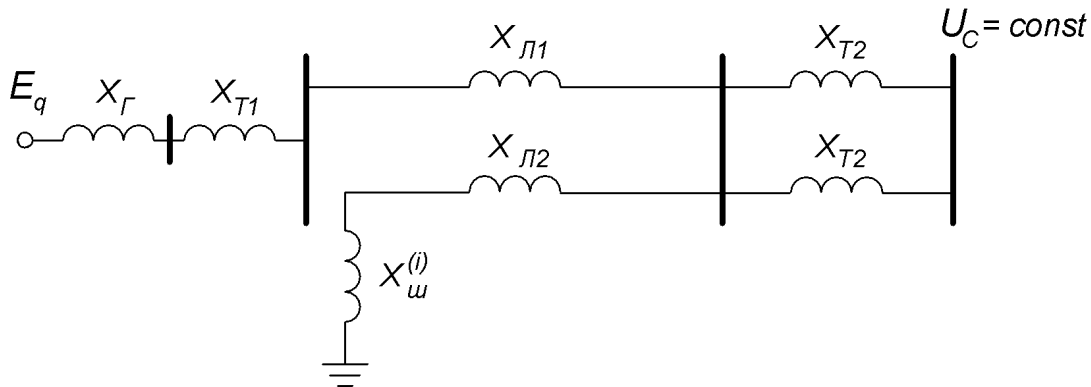


Рис. 1. Исходная схема замещения системы для второго аварийного режима.

На рис. 1 $x_{ш}^{(i)}$ – сопротивление аварийного шунта для рассматриваемого режима.

Преобразованная схема для этого же режима (рис. 2):

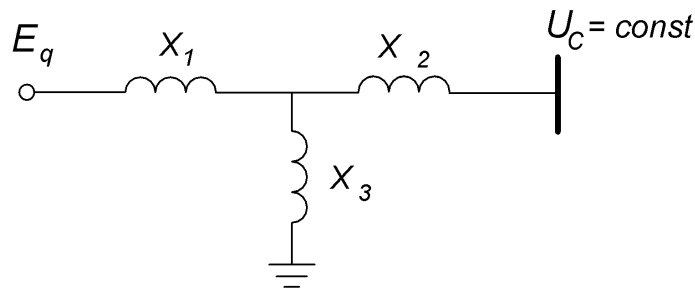


Рис. 2. Преобразованная схема замещения для второго аварийного режима

На рис. 2: $x_1 = x_{Г} + x_{T1} + x_{Л1}$; $x_2 = \frac{x_{T2}}{2}$; $x_3 = x_{Л2} + x_{ш}^{(i)}$.

Собственное $x_{11}^{(i)}$ сопротивление схемы, изображенной на рис. 2:

$$x_{11}^{(i)} = x_1 + \frac{x_2 \cdot x_3}{x_2 + x_3} \quad (16)$$

Взаимное $x_{12}^{(i)}$ сопротивление:

$$x_{12}^{(i)} = x_1 + x_2 + \frac{x_1 \cdot x_2}{x_3}. \quad (3)$$

Величины, входящие в уравнение относительного движения ротора, могут быть выражены или в именованных единицах, или частично – в относительных, частично – в именованных [3]. В приведенной выше записи уравнения размерность δ , t , T_J - в радианах, P_0 и P_{gi} - в относительных единицах. В курсовой работе рекомендуется время t и постоянную инерции T_J выражать в секундах – (с), мощности - в относительных единицах, а угол δ - в электрических градусах (эл. град), или в радианах (рад).

В первом случае, когда угол выражен в электрических градусах, уравнение (15) имеет следующий вид:

$$\frac{T_J}{360 \cdot f_0} \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_0 - P_{gi}, \quad (4)$$

где $f_0 = 50$ Гц.

Выразив угол в радианах, получим уравнение (15) в виде:

$$\frac{T_J}{\omega_0} \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_0 - P_{gi}, \quad (5)$$

где $\omega_0 = 2\pi f_0 = 314$.

Рекомендуется использовать последнюю запись уравнения относительного движения ротора – (5), т.к. в наиболее часто используемом при выполнении расчетов пакете прикладных программ *Mathcad* при работе с тригонометрическими функциями углы, по умолчанию, берутся в радианах.

При выполнении уточненного расчета для конкретности принимается, что изменение синхронной э.д.с. E_{qe} происходит до установившегося значения по экспоненциальному закону с постоянной времени T_e . Максимальная кратность тока возбуждения и соответствующая э.д.с. принимается равной $E_{qe(\text{пред})} = 5$. При этом к дифференциальному уравнению движения ротора (19) добавляется дифференциальное уравнение переходной э.д.с. и уравнение изменения

синхронной э.д.с.:

$$T_{d0} \cdot \frac{dE_q'}{dt} = E_{qe} - E_q', \quad (6)$$

$$E_{qe} = E_{qe(0)} + (E_{qe(\text{пред})} - E_{qe(0)}) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_e}}\right).$$

(7)

Здесь T_{d0} – постоянная времени обмотки возбуждения, (с);

T_e – постоянная времени возбудителя, (с).

В выражении (20) синхронная э.д.с. E_q является величиной переменной.

Для неявнополюсной машины (турбогенератора) её изменение во времени описывается выражением

$$E_{q(t)} = \frac{E_{q(t)}' - U_c \cdot \frac{\frac{x_d'}{n_r} - \frac{x_d'}{n_r}}{x_{12}^{(i)}} \cdot \cos \delta_{(t)}}{1 - \frac{\frac{x_d'}{n_r} - \frac{x_d'}{n_r}}{x_{11}^{(i)}}}. \quad (7)$$

В случае явнополюсной машины (гидрогенератор) по формуле (22) вычисляется фиктивная э.д.с. $E_{q(t)}$. При этом в формулу (22) вместо $\frac{x_d'}{n_r}$ подставляется

сопротивление $\frac{x_q}{n_r}$. Необходимое для решения дифференциального уравнения

значение $E_{q(t)}$ определяется по выражению:

$$\ddot{A}_q = \ddot{Q} \frac{x_d - x_d'}{x_q - x_d'} - \dot{A}_q' \frac{x_d - x_q}{x_q - x_d'}.$$

Численное интегрирование уравнений (5) и (6) выполняется методом последовательных интервалов.

2.2. Расчет по правилу площадей

При выполнении приближенного расчета, в соответствии с заданным алгоритмом развития переходного процесса, строятся угловые характеристики мощности для нормального (исходного) P_r , аварийного P_{II} (или нескольких

аварийных - P_{II-1}, P_{II-2} и т.п.) и послеаварийного P_{III} режимов при $E'_q = const$.

Генератор вводится в схему замещения своим переходным сопротивлением x'_d .

Собственное и взаимное сопротивления $x_{11}^{(i)}$ и $x_{12}^{(i)}$ для схем замещения соответствующих режимов определяются с учетом сопротивления аварийного шунта $x_{ш}^{(i)}$, зависящего от вида к.з. и определяемого по эквивалентным сопротивлениям обратной и нулевой последовательностей относительно точки к.з. [1]. Ниже дан пример построения угловых характеристик для одного из возможных алгоритмов развития переходного процесса.

Пример 1. В электрической системе, приведенной на рис. 3, произошло двухфазное к.з. на землю на расстоянии l_a от шин станции. Выключатель $Q1$ со стороны станции отключен первой ступенью дистанционной защиты, действующей без выдержки времени. Выключатель $Q2$ – со стороны системы – отключен второй ступенью дистанционной защиты, имеющей выдержку времени на срабатывание 0,5 сек. Определить сопротивления исходного, аварийных и послеаварийного режимов и построить угловые характеристики мощности.

Решение. В исходном режиме – при отсутствии к.з. – эквивалентное сопротивление электропередачи:

$$x_{н.р.} = x_I = \frac{x_\Gamma}{n} + \frac{x_{T1}}{n} + \frac{x_{Л1}}{2} + \frac{x_{T2}}{2} = \frac{x_\Gamma}{n} + x_{внеш.}.$$

Для схемы замещения первого аварийного режима, когда к.з. только возникло и еще включены оба выключателя поврежденной линии – рис. 13,б, треугольник, образованный сопротивлениями линий, преобразуем в звезду:

$$a = \frac{l_a}{l_{линии}},$$

$$x'_{Л2} = a \cdot x_{Л2}$$

$$x''_{Л2} = (1 - a) \cdot x_{Л2}$$

$$x_1 = \frac{x_{Л1} \cdot x'_{Л2}}{x_{Л1} + x'_{Л2} + x''_{Л2}} = \frac{x_{Л1} \cdot x'_{Л2}}{2 \cdot x_{Л1}} = \frac{x'_{Л2}}{2},$$

$$x_2 = \frac{x_{Л1} \cdot x''_{Л2}}{x_{Л1} + x'_{Л2} + x''_{Л2}} = \frac{x_{Л1} \cdot x''_{Л2}}{2 \cdot x_{Л1}} = \frac{x''_{Л2}}{2};$$

$$x_3 = \frac{\frac{x'_{Л2} \cdot x''_{Л2}}{x_{Л1} + x'_{Л2} + x''_{Л2}}}{2 \cdot x_{Л1}} = \frac{x'_{Л2} \cdot x''_{Л2}}{2 \cdot x_{Л1}}.$$

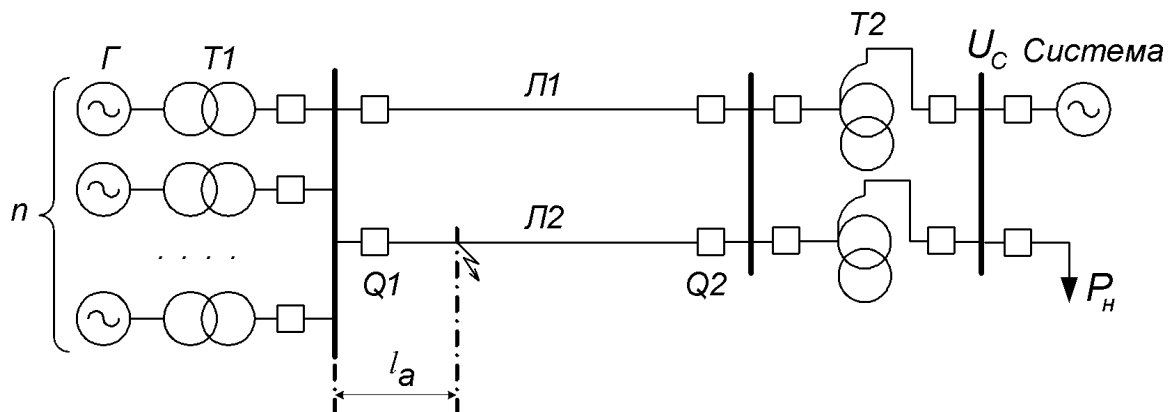
Для получившейся эквивалентной схемы замещения – рис. 3 – определим сопротивление шунта, соответствующее заданному виду к.з.

Напомним, что в зависимости от вида к.з. величина аварийного шунта определяется по формулам, приведенным в таблице 1 [1]:

Таблица 1

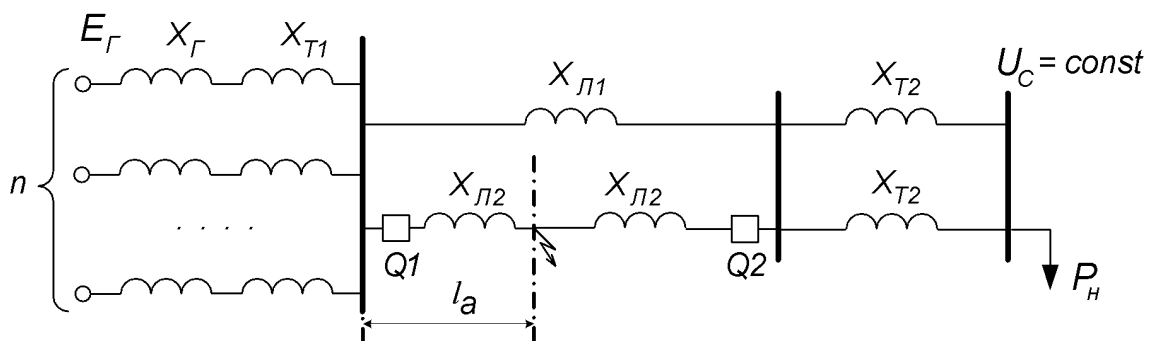
Вид к.з.	Обозначение к.з.	Формула для определения аварийного шунта
Трёхфазное	$K^{(3)}$	$x_{ш}^{(3)} = 0$
Двухфазное	$K^{(2)}$	$x_{ш}^{(2)} = x_{э\text{кв.О.П.}}$
Однофазное	$K^{(1)}$	$x_{ш}^{(1)} = x_{э\text{кв.О.П.}} + x_{э\text{кв.Н.П.}}$
Двухфазное на землю	$K^{(1,1)}$	$x_{ш}^{(1,1)} = \frac{(x_{э\text{кв.О.П.}} \cdot x_{э\text{кв.Н.П.}})}{(x_{э\text{кв.О.П.}} + x_{э\text{кв.Н.П.}})}$

В таблице 1 $x_{э\text{кв.О.П.}}$ - эквивалентное сопротивление схемы обратной последовательности системы, преобразованное к точке к.з.



а)

Рис. 3(а). Электрическая система для примера 5.



б)

Рис. 3(б). Схема замещения электрической системы для примера 5.

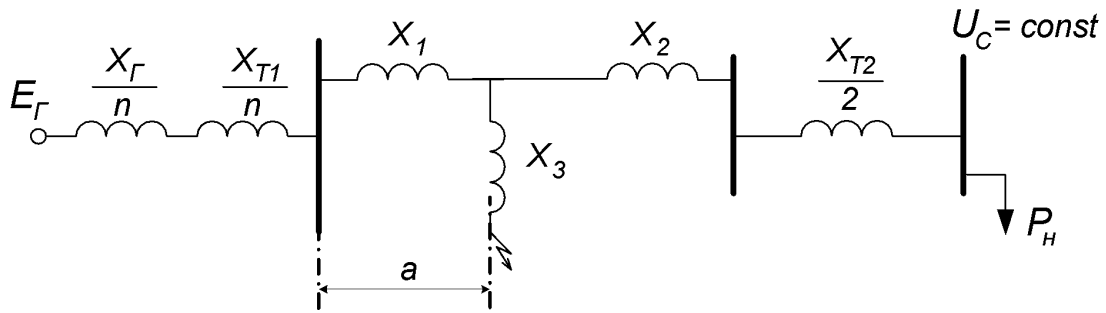


Рис. 4. Эквивалентная схема замещения

Для рис. 4:

$$x_4 = \frac{x_{Г.ОП}}{n} + \frac{x_{T1}}{n} + x_1; \quad x_5 = x_2 + \frac{x_{T2}}{2}.$$

Здесь $x_{Г.ОП}$ – сопротивление обратной последовательности генератора.

$$x_{1экв.О.П.} = \frac{x_4 \cdot x_5}{x_4 + x_5} + x_3.$$

$x_{экв.Н.П.}$ – эквивалентное сопротивление схемы нулевой последовательности системы, преобразованное к точке к.з. Для рис. 4:

$$x_6 = \frac{x_{T1}}{n} + 3 \cdot x_1; \quad x_7 = 3 \cdot x_2 + \frac{x_{T2}}{2}.$$

$$x_{1экв.Н.П.} = \frac{x_6 \cdot x_7}{x_6 + x_7} + 3 \cdot x_3.$$

Сопротивление шунта, соответствующее заданному виду к.з.:

$$x_{ш1} = x_{ш}^{(1,1)} = \frac{x_{1экв.О.П.} \cdot x_{1экв.Н.П.}}{x_{1экв.О.П.} + x_{1экв.Н.П.}}.$$

Добавив сопротивление шунта $x_{ш1}$ в схему прямой последовательности рассматриваемой системы – рис. 15, определяем сопротивление схемы для первого аварийного режима.

$$x_8 = \frac{x_G}{n} + \frac{x_{T1}}{n} + x_1; \quad x_9 = x_2 + \frac{x_{T2}}{2}; \quad x_{10} = x_3 + x_{ш1},$$

$$x_{ав.р.1} = x_{II-1} = x_8 + x_9 + \frac{x_8 \cdot x_9}{x_{10}}.$$

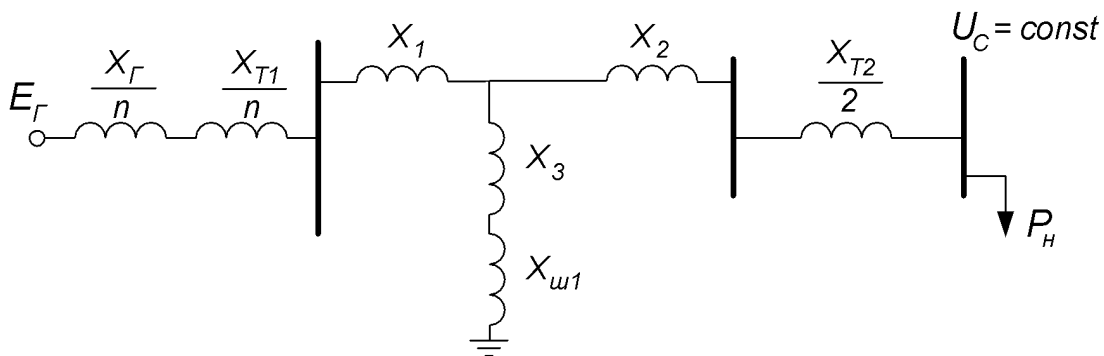


Рис. 5. Схема прямой последовательности с аварийным шунтом $x_{ш1}$.

Для схемы замещения второго аварийного режима, когда к.з. уже отключено с одной стороны – выключен выключатель $Q1$ – необходимо вновь определить сопротивление аварийного шунта:

$$x_{11} = \frac{x_{Г.ОП}}{n} + \frac{x_{T1}}{n} + x_{Л1}; \quad x_{12} = \frac{x_{T2}}{2}.$$

$$x_{2\text{экв.О.П.}} = \frac{x_{11} \cdot x_{12}}{x_{11} + x_{12}} + x_{Л2}''.$$

$$x_{13} = \frac{x_{T1}}{n} + 3 \cdot x_{Л1}; \quad x_{14} = x_{12} = \frac{x_{T2}}{2}.$$

$$x_{2\text{экв.Н.П.}} = \frac{x_{13} \cdot x_{14}}{x_{13} + x_{14}} + 3 \cdot x_{Л2}''.$$

Сопротивление шунта для второй аварийной схемы:

$$x_{ш2} = x_{ш}^{(1,1)} = \frac{x_{2\text{экв.О.П.}} \cdot x_{2\text{экв.Н.П.}}}{x_{2\text{экв.О.П.}} + x_{2\text{экв.Н.П.}}}.$$

Добавив сопротивление шунта $x_{ш2}$ в схему прямой последовательности рассматриваемой системы – рис. 16, определяем сопротивление схемы для второго аварийного режима.

$$x_{15} = \frac{x_{Г}}{n} + \frac{x_{T1}}{n} + x_{Л1}; \quad x_{16} = \frac{x_{T2}}{2}; \quad x_{17} = x_{Л2}'' + x_{ш2},$$

$$x_{\text{ав.р.2}} = x_{II-2} = x_{15} + x_{16} + \frac{x_{15} \cdot x_{16}}{x_{17}}.$$

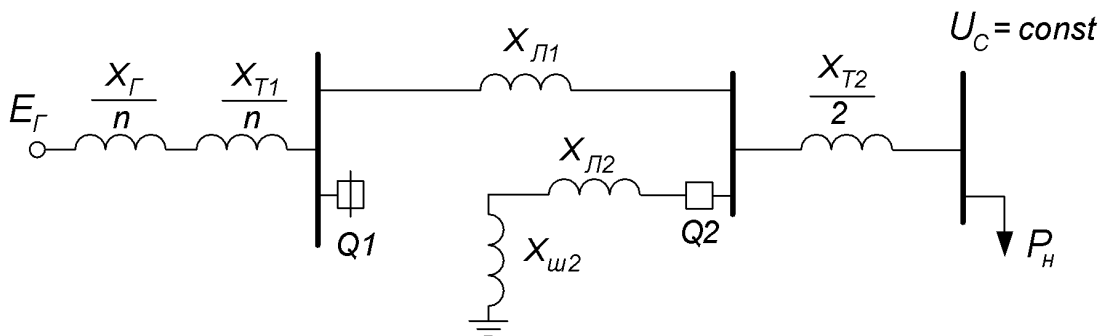


Рис. 6. Схема прямой последовательности с аварийным шунтом $x_{ш2}$

В послеаварийном режиме – после отключения поврежденной линии с обеих сторон – эквивалентное сопротивление электропередачи:

$$x_{п/а.р.} = x_{III} = \frac{x_{Г}}{n} + \frac{x_{T1}}{n} + x_{Л1} + \frac{x_{T2}}{2}.$$

Формулы для угловых характеристик сведены в табл. 4. В этих формулах угол δ -

текущая координата, изменяющаяся от 0 до π рад. Характеристики построены на рис. 17.

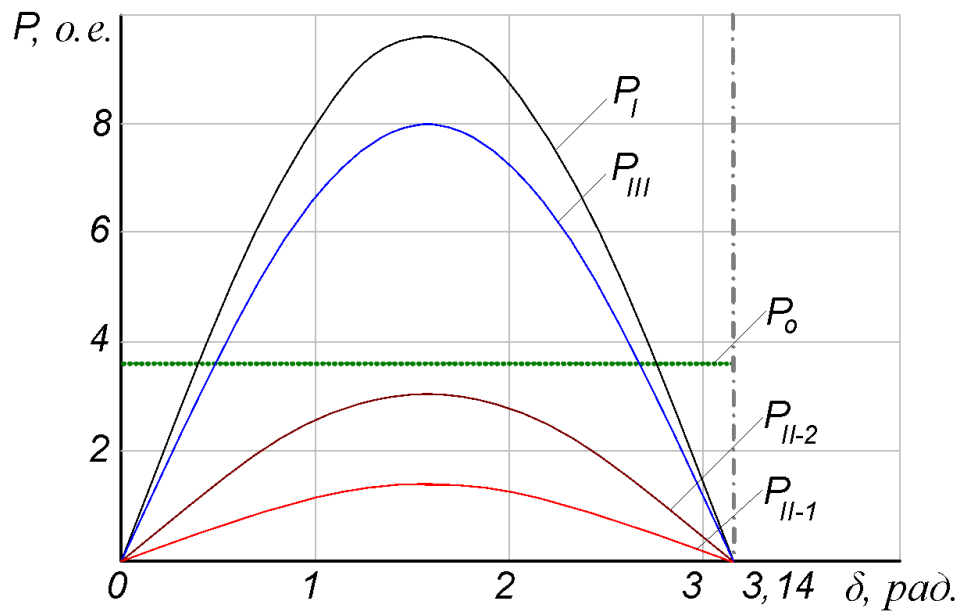


Рис. 7. Угловые характеристики мощности для примера 1.

Таблица 2

Режим	Формула для расчета угловой характеристики	Режим	Формула
Нормальный	$P_I = \frac{E'_q \cdot U_c}{x_{н.р.}} \cdot \sin \delta = \frac{E'_q \cdot U_c}{x_I} \cdot \sin \delta$	Второй аварийный	$P_{II-2} = \frac{E'_q \cdot U_c}{x_{II-2}} \cdot \sin \delta$
Первый аварийный	$P_{II-1} = \frac{E'_q \cdot U_c}{x_{II-1}} \cdot \sin \delta$	После-аварийный	$P_{III} = \frac{E'_q \cdot U_c}{x_{III}} \cdot \sin \delta$

По правилу площадей непосредственно оценить предельный угол отключения к.з. $\delta_{откл.пред.}$ (далее в тексте - $\delta_{пр.}$) можно лишь для частного случая одновременного отключения поврежденной линии с двух сторон и отсутствия АПВ. При этом должны быть равны между собой площадки, характеризующие избыточные кинетические энергии ускорения и торможения [3,4]:

$$A_{уск.} = A_{торм.} \quad (9)$$

$$\text{Здесь } A_{уск.} = \int_{\delta_0}^{\delta_{пр.}} \Delta P_{(i)} d\delta,$$

$$A_{\text{торм.}} = \int_{\delta_{\text{пр.}}}^{\delta_{\text{кр.}}} \Delta P_{(i)} d\delta,$$

$$\Delta P_{(i)} = P_0 - \frac{E'_q \cdot U_c}{x_{12}^{(i)}} \cdot \sin \delta,$$

$$\delta_{\text{кр.}} = \pi - \arcsin\left(\frac{P_0}{P_{mIII}}\right).$$

Предельный угол отключения в этом случае [3, 4]:

$$\delta_{\text{пр.}} = \arccos\left(\frac{P_0(\delta_{\text{кр.}} - \delta_0) + P_{mIII} \cos \delta_{\text{кр.}} - P_{mII} \cos \delta_0}{P_{mIII} - P_{mII}}\right). \quad (10)$$

Графическая иллюстрация приведена на рис. 18.

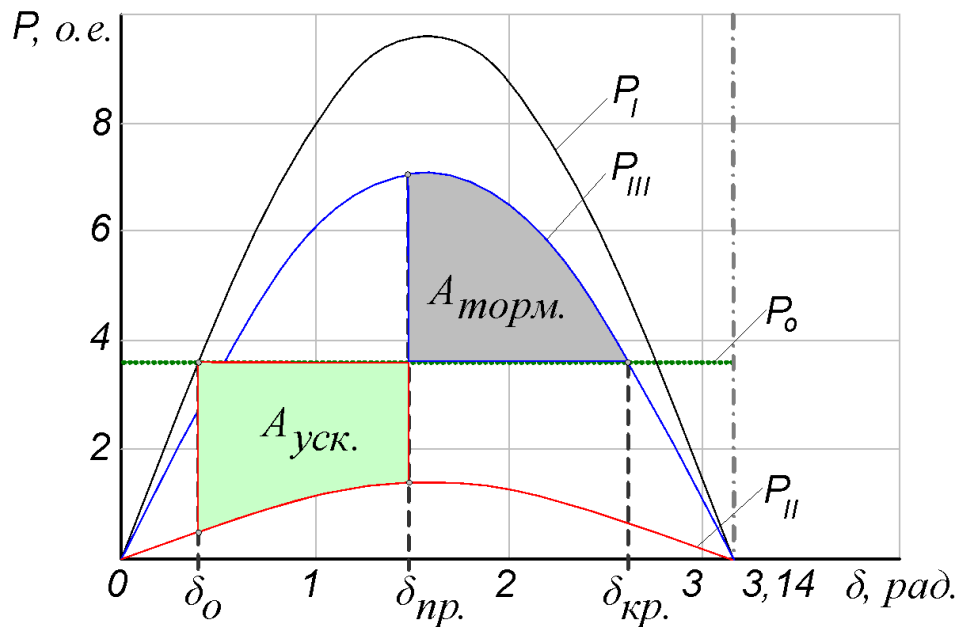


Рис. 8. Соотношение площадок ускорения и торможения при определении предельного угла отключения к.з.

При отключении выключателей на поврежденной линии в разное время, успешном или неуспешном АПВ, конфигурация площадок ускорения и торможения сложная, появляются дополнительные значения углов, соответствующие моментам отключения линии с каждой стороны, последующей проверки состояния линии с помощью АПВ с контролем отсутствия напряжения (АПВ КОН) и, в случае устранения повреждения – включения линии под нагрузку с помощью АПВ с контролем наличия

напряжения (АПВ КНН) – рис. 9,а; при устойчивом повреждении происходит возврат переходного процесса на соответствующую аварийную характеристику – рис. 9,б. В результате предельный угол отключения к.з. можно определить только путем последовательного подбора предельного времени отключения к.з., т.е. путем численного эксперимента.

По отношению площадки возможного торможения к площадке фактического ускорения оценивается запас динамической устойчивости:

$$k_{\text{зап.дин}} = \frac{A_{\text{возм.торм.}}}{A_{\text{уск.}}} = \frac{\int_{\delta_{\text{отк.}}}^{\delta_{\text{кр.}}} \Delta P_{(i)} d\delta}{\int_{\delta_0}^{\delta_{\text{отк.}}} \Delta P_{(i)} d\delta}, \quad (11)$$

где $\delta_{\text{отк.}}$ – угол отключения к.з.

При сложной конфигурации площадок величины $A_{\text{уск.}}$ и $A_{\text{возм.торм.}}$ определяются вычислением нескольких интегралов. Например, для рис. 19,а:

$$k_{\text{зап.дин}} = \frac{A_{\text{возм.торм.}}}{A_{\text{уск.}}} = \frac{\int_{\delta_{Q2}}^{\delta_{\text{КНН}}} (P_0 - P_{mIII} \sin \delta) d\delta + \int_{\delta_{\text{КНН}}}^{\delta_{\text{кр.}}} (P_0 - P_{mI} \sin \delta) d\delta}{\int_{\delta_0}^{\delta_{Q1}} (P_0 - P_{mII-1} \sin \delta) d\delta + \int_{\delta_{Q1}}^{\delta_{Q2}} (P_0 - P_{mII-2} \sin \delta) d\delta}. \quad (12)$$

Пример 2. В электрической системе, приведенной на рис. 10, произошло двухфазное к.з. на расстоянии $l_a = 15$ км от шин ТЭС. Выключатель $Q1$ со стороны станции отключен первой ступенью дистанционной защиты, действующей без выдержки времени: $t_{\text{рз.1}} = 0$ с., $t_{\text{отк.}Q1} = 0,1$ с. Выключатель $Q2$ – со стороны системы – отключен второй ступенью дистанционной защиты, имеющей выдержку времени на срабатывание: $t_{\text{рз.2}} = 0,15$ с., $t_{\text{отк.}Q2} = 0,1$ с. АПВ с контролем отсутствия напряжения (АПВ КОН) установлена на выключателе $Q1$: $t_{\text{апв.кон}} = 0,15$ с., $t_{\text{вкл.}Q1} = 0,1$ с. АПВ с контролем наличия напряжения (АПВ КНН) установлена на выключателе $Q2$: $t_{\text{апв.кнн}} = 0,1$ с., $t_{\text{вкл.}Q2} = 0,1$ с.

Исходные данные для элементов системы взять из примера 1.

Выполнить приближенную оценку устойчивости динамического перехода при $E'_q = \text{const}$ для двух вариантов электромеханического переходного процесса:

- 1) АПВ успешное;
- 2) АПВ неуспешное, действие защиты линии – как и при первом отключении к.з.

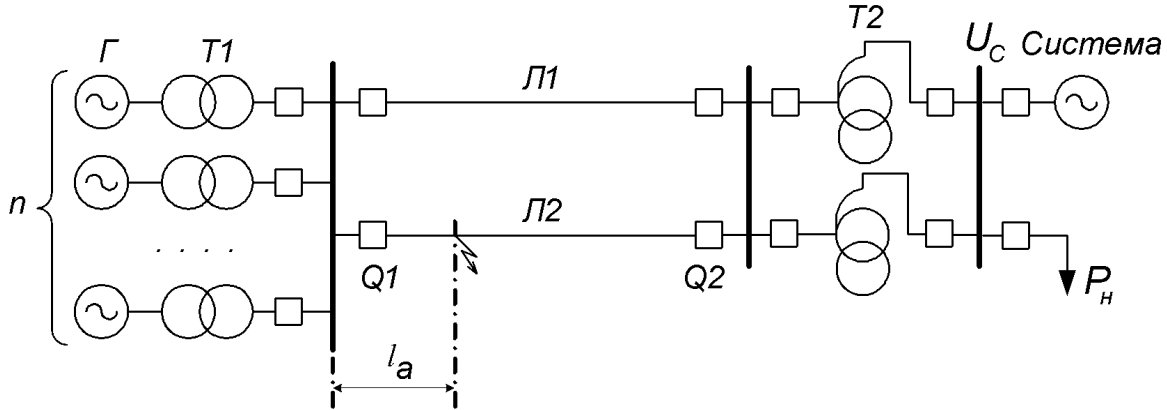


Рис. 9. Электрическая система для примера 2.

Решение. Алгоритм развития аварийного процесса и исходные данные элементов системы взяты такими же, как и в предыдущих примерах для того, чтобы можно было использовать часть рассчитанных ранее величин без дополнительного пересчета.

Схема замещения системы в начальный момент переходного процесса:

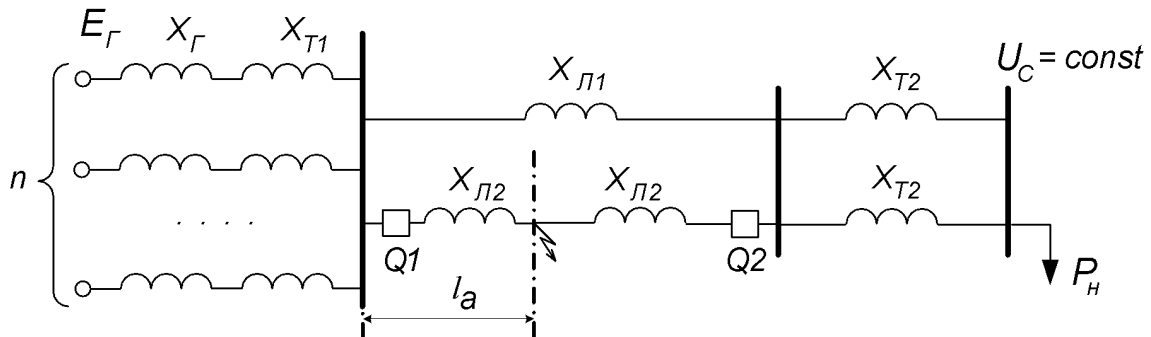


Рис. 10. Схема замещения системы в момент возникновения к.з.

Параметры элементов системы и параметры режима, определенные для базисных условий в примере 1 (в относительных единицах):

$$\begin{aligned}
 x_{\Gamma} = x'_d &= 0,28; & n_{\Gamma} &= 4; & x_{\Gamma.оп} = x_2 &= 0,24; \\
 x_{T1} &= 0,098; & x_{T2} &= 0,066; & x_{Л1} = x_{Л2} &= 0,186; \\
 U_c &= 1; & P_H &= 2; & Q_H &= 1,344.
 \end{aligned}$$

Поперечная составляющая переходной э.д.с., рассчитанная для генератора с АРВ ПД в примере 2:

$$E'_q = 1,329.$$

Определим сопротивления участков линии 2 и рассчитаем сопротивления нормального, аварийных и послеаварийного режимов по алгоритму, изложенному в примере 5.

Исходный режим:

$$x_{\text{н.р.}} = x_I = \frac{x_\Gamma}{n_\Gamma} + \frac{x_{T1}}{n_\Gamma} + \frac{x_{Л1}}{2} + \frac{x_{T2}}{2} = \frac{0,28}{4} + \frac{0,098}{4} + \frac{0,186}{2} + \frac{0,066}{2} = 0,22.$$

Первый аварийный режим – включены оба выключателя (рис. 22):

$$a = \frac{l_a}{l_{\text{линии}}} = 15/75 = 0,2;$$

$$x'_{Л2} = a \cdot x_{Л2} = 0,2 \cdot 0,186 = 0,0372;$$

$$x''_{Л2} = (1 - a) \cdot x_{Л2} = 0,8 \cdot 0,186 = 0,149;$$

$$x_1 = \frac{x'_{Л2}}{2} = \frac{0,0372}{2} = 0,0186; \quad x_2 = \frac{x''_{Л2}}{2} = \frac{0,149}{2} = 0,0744; \quad x_3 = \frac{x'_{Л2} \cdot x''_{Л2}}{2 \cdot x_{Л1}} = 0,0037.$$

Вид к.з. – тот же, что и в примере 5, поэтому для определения сопротивления аварийного шунта используем уже полученные формулы:

$$x_4 = \frac{x_{\Gamma.ОП}}{n_\Gamma} + \frac{x_{T1}}{n_\Gamma} + x_1 = \frac{0,24}{4} + \frac{0,098}{4} + 0,0186 = 0,1031;$$

$$x_5 = x_2 + \frac{x_{T2}}{2} = 0,0744 + \frac{0,066}{2} = 0,1074.$$

$$x_{1\text{экв.О.П.}} = \frac{x_4 \cdot x_5}{x_4 + x_5} + x_3 = \frac{0,1031 \cdot 0,1074}{0,1031 + 0,1074} + 0,0037 = 0,0563.$$

$$x_6 = \frac{x_{T1}}{n_\Gamma} + 3 \cdot x_1 = \frac{0,098}{4} + 3 \cdot 0,0186 = 0,0803;$$

$$x_7 = 3 \cdot x_2 + \frac{x_{T2}}{2} = 3 \cdot 0,0744 + \frac{0,066}{2} = 0,2562.$$

$$x_{1\text{экв.Н.П.}} = \frac{x_6 \cdot x_7}{x_6 + x_7} + 3 \cdot x_3 = \frac{0,0803 \cdot 0,2562}{0,0803 + 0,2562} + 3 \cdot 0,0037 = 0,0722.$$

Сопротивление шунта, соответствующее заданному виду к.з.:

$$x_{\text{ш1}} = x_{\text{ш}}^{(1,1)} = \frac{x_{1\text{экв.О.П.}} \cdot x_{1\text{экв.Н.П.}}}{x_{1\text{экв.О.П.}} + x_{1\text{экв.Н.П.}}} = \frac{0,0563 \cdot 0,0722}{0,0563 + 0,0722} = 0,0316.$$

Добавив сопротивление шунта $x_{\text{ш1}}$ в схему прямой последовательности, определяем сопротивление схемы для первого аварийного режима.

$$x_8 = \frac{x_\Gamma}{n_\Gamma} + \frac{x_{T1}}{n_\Gamma} + x_1 = \frac{0,28}{4} + \frac{0,098}{4} + 0,0186 = 0,1131;$$

$$x_9 = x_2 + \frac{x_{T2}}{2} = 0,0744 + \frac{0,066}{2} = 0,1074;$$

$$x_{10} = x_3 + x_{ш1} = 0,0037 + 0,0316 = 0,0353,$$

$$x_{ав.р.1} = x_{II-1} = x_8 + x_9 + \frac{x_8 \cdot x_9}{x_{10}} = 0,1131 + 0,1074 + \frac{0,1131 \cdot 0,1074}{0,0353} = 0,565.$$

Второй аварийный режим – выключатель QI отключен (рис. 23):

$$x_{11} = \frac{x_{Г.оп}}{n} + \frac{x_{T1}}{n} + x_{Л1} = \frac{0,24}{4} + \frac{0,098}{4} + 0,186 = 0,27;$$

$$x_{12} = \frac{x_{T2}}{2} = \frac{0,066}{2} = 0,033.$$

$$x_{2эв.О.П.} = \frac{x_{11} \cdot x_{12}}{x_{11} + x_{12}} + x_{Л2}'' = \frac{0,27 \cdot 0,033}{0,27 + 0,033} + 0,149 = 0,178.$$

$$x_{13} = \frac{x_{T1}}{n} + 3 \cdot x_{Л1} = \frac{0,098}{4} + 3 \cdot 0,186 = 0,582; \quad x_{14} = x_{12} = \frac{x_{T2}}{2} = 0,033.$$

$$x_{2эв.Н.П.} = \frac{x_{13} \cdot x_{14}}{x_{13} + x_{14}} + 3 \cdot x_{Л2}'' = \frac{0,582 \cdot 0,033}{0,582 + 0,033} + 3 \cdot 0,149 = 0,478.$$

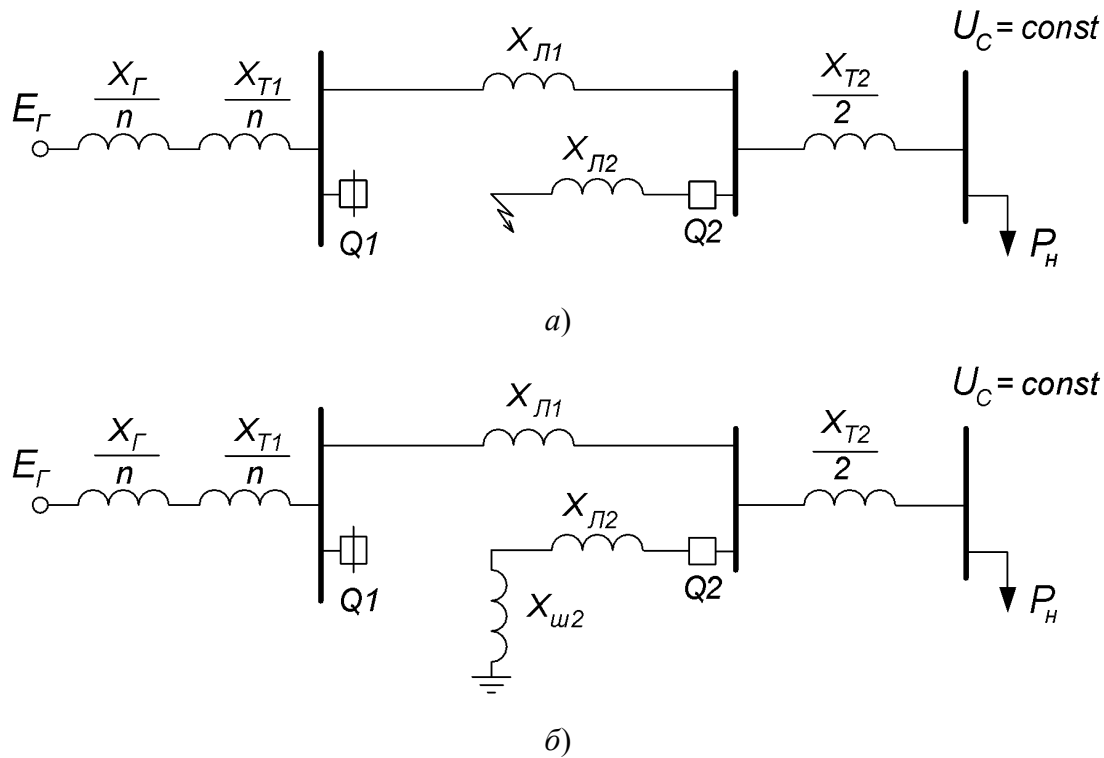


Рис. 11. Схема замещения для второго аварийного режима (а) и схема прямой последовательности с аварийным шунтом $x_{ш2}$ - (б).

Сопротивление шунта для второй аварийной схемы:

$$x_{ш2} = x_{ш}^{(1,1)} = \frac{x_{2эв.О.П.} \cdot x_{2эв.Н.П.}}{x_{2эв.О.П.} + x_{2эв.Н.П.}} = \frac{0,178 \cdot 0,478}{0,178 + 0,478} = 0,089.$$

Сопротивление схемы для второго аварийного режима (рис. 11, б).

$$x_{15} = \frac{x_{\Gamma}}{n_r} + \frac{x_{T1}}{n_r} + x_{Л1} = \frac{0,28}{4} + \frac{0,098}{4} + 0,186 = 0,28;$$

$$x_{16} = \frac{x_{T2}}{2} = 0,033; \quad x_{17} = x_{Л2}'' + x_{ш2} = 0,149 + 0,089 = 0,238,$$

$$x_{ав.р.2} = x_{II-2} = x_{15} + x_{16} + \frac{x_{15} \cdot x_{16}}{x_{17}} = 0,28 + 0,033 + \frac{0,28 \cdot 0,033}{0,238} = 0,352.$$

Если на отключившейся линии произойдет неуспешное АПВ КОН на выключателе $Q1$, возникнет третий аварийный режим – выключатель $Q1$ включен, выключатель $Q2$ отключен (рис. 12):

$$x_{18} = \frac{x_{\Gamma.оп}}{n} + \frac{x_{T1}}{n} = \frac{0,24}{4} + \frac{0,098}{4} = 0,0845;$$

$$x_{19} = x_{Л1} + \frac{x_{T2}}{2} = 0,186 + \frac{0,066}{2} = 0,219;$$

$$x_{3эв.О.П.} = \frac{x_{18} \cdot x_{19}}{x_{18} + x_{19}} + x_{Л2}' = \frac{0,0845 \cdot 0,219}{0,0845 + 0,219} + 0,0372 = 0,098.$$

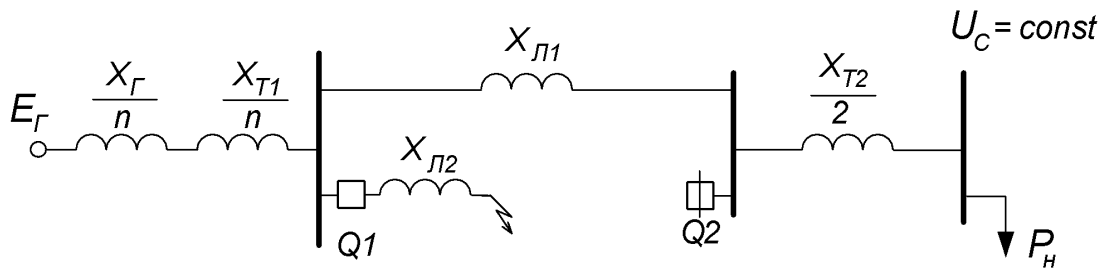


Рис. 12. Схема прямой последовательности в момент неуспешного АПВ КОН.

$$x_{20} = \frac{x_{T1}}{n} = \frac{0,098}{4} = 0,0245; \quad x_{21} = 3 \cdot x_{Л1} + \frac{x_{T2}}{2} = 3 \cdot 0,186 + 0,033 = 0,591;$$

$$x_{3эв.Н.П.} = \frac{x_{20} \cdot x_{21}}{x_{20} + x_{21}} + 3 \cdot x_{Л2}' = \frac{0,0245 \cdot 0,591}{0,0245 + 0,591} + 3 \cdot 0,0372 = 0,135$$

Сопротивление шунта для третьей аварийной схемы:

$$x_{ш3} = x_{ш}^{(1,1)} = \frac{x_{3эв.О.П.} \cdot x_{3эв.Н.П.}}{x_{3эв.О.П.} + x_{3эв.Н.П.}} = \frac{0,098 \cdot 0,135}{0,098 + 0,135} = 0,057.$$

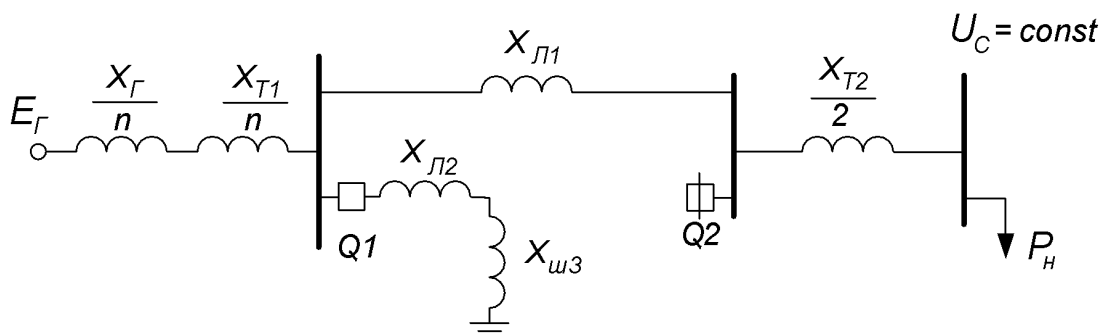


Рис. 13. Схема прямой последовательности с аварийным шунтом $x_{ш3}$.

Сопротивление схемы для третьего аварийного режима.

$$x_{22} = \frac{x_{\Gamma}}{n_r} + \frac{x_{T1}}{n_r} = \frac{0,28}{4} + \frac{0,098}{4} = 0,0945;$$

$$x_{23} = x_{19} = x_{Л1} + \frac{x_{T2}}{2} = 0,186 + \frac{0,066}{2} = 0,219;$$

$$x_{24} = x'_{Л2} + x_{ш3} = 0,0372 + 0,057 = 0,0942,$$

$$x_{ав.р.3} = x_{II-3} = x_{22} + x_{23} + \frac{x_{22} \cdot x_{23}}{x_{24}} = 0,0945 + 0,219 + \frac{0,0945 \cdot 0,219}{0,0942} = 0,533.$$

Эквивалентное сопротивление электропередачи в послеаварийном режиме, после отключения поврежденной линии с обеих сторон:

$$x_{п/а.р.} = x_{III} = \frac{x_{\Gamma}}{n_r} + \frac{x_{T1}}{n_r} + x_{Л1} + \frac{x_{T2}}{2} = \frac{0,28}{4} + \frac{0,098}{4} + 0,186 + \frac{0,066}{2} = 0,313.$$

Сведем полученные результаты в табл. 5. и определим выражения для построения угловых характеристик.

Таблица 3

Режим	Эквивалентное сопротивление схемы замещения, о.е.	Выражение для построения угловой характеристики
1	2	3
Нормальный	$x_{н.р.} = x_I = 0,22$	$P_I = \frac{E_q \cdot U_c}{x_I} \cdot \sin \delta = \frac{1,329 \cdot 1}{0,22} \cdot \sin \delta = 6,041 \cdot \sin \delta$
Первый аварийный	$x_{II-1} = 0,565$	$P_{II-1} = \frac{E_q \cdot U_c}{x_{II-1}} \cdot \sin \delta = 2,352 \cdot \sin \delta$
Второй аварийный	$x_{II-2} = 0,352$	$P_{II-2} = \frac{E_q \cdot U_c}{x_{II-2}} \cdot \sin \delta = 3,776 \cdot \sin \delta$
Третий аварийный	$x_{II-3} = 0,533$	$P_{II-3} = \frac{E_q \cdot U_c}{x_{II-3}} \cdot \sin \delta = 2,493 \cdot \sin \delta$
После-аварийный	$x_{III} = 0,313$	$P_{III} = \frac{E_q \cdot U_c}{x_{III}} \cdot \sin \delta = 4,246 \cdot \sin \delta$

Для точки баланса $P_o = P_{ml} \sin \delta_o$ определяем исходный угол δ_o и критический угол для характеристики нормального режима $\delta_{кр.1}$:

$$\delta_o = \arcsin\left(\frac{P_o}{P_{ml}}\right) = \arcsin\left(\frac{2,0}{6,041}\right) = 0,337 \text{ [рад.]},$$

$$\delta_{кр.1} = \pi - \delta_o = 3,142 - 0,337 = 2,805 \text{ [рад.]}. \quad \delta_{кр.1}$$

Критический угол для характеристики послеаварийного режима:

$$\delta_{кр.2} = \pi - \arcsin\left(\frac{P_o}{P_{mII}}\right) = \pi - \arcsin\left(\frac{2,0}{4,246}\right) = 3,142 - 0,49 = 2,652 \text{ [рад.]}$$

Поскольку генераторов – четыре, по формуле (2) определяем эквивалентную постоянную инерции:

$$T_{J\Sigma} = T_{J(\text{НОМ})} \cdot \frac{n_{\text{ген}} \cdot P_{\text{г.НОМ}} / \cos(\phi_{\text{ген.НОМ}})}{S_6} = 7,4 \cdot \frac{4 \cdot 75}{75} = 29,6 \text{ [с.]}$$

Методом последовательных интервалов оцениваем динамическую устойчивость рассматриваемой системы для первого варианта – успешного АПВ.

Первый интервал – от 0 до 0,05 с.; в начале интервала на линии 2 произошло двухфазное к.з. на землю. По формулам (29) - (31) определяем величину угла к концу первого интервала:

$$\Delta P_{(1)} = P_o - P_{mII-1} \sin(\delta_o) = 2,0 - 2,352 \cdot \sin(0,337) = 2,0 - 0,778 = 1,222;$$

$$\alpha_{(1)} = \frac{\Delta P_{(1)}}{T_{J\Sigma}} \cdot \omega_o = \frac{1,222}{29,6} \cdot 314 = 12,963;$$

$$\Delta \delta_{(1)} = \alpha_{(1)} \cdot \frac{(\Delta t)^2}{2} = 12,963 \cdot \frac{(0,05)^2}{2} = 0,0162 \text{ [рад.]};$$

$$\delta_{(1)} = \delta_o + \Delta \delta_{(1)} = 0,337 + 0,0162 = 0,3532 \text{ [рад.]}$$

Второй интервал – от 0,05 до 0,1 с.

$$\Delta P_{(2)} = P_o - P_{mII-1} \sin(\delta_{(1)}) = 2,0 - 2,352 \cdot \sin(0,3532) = 2,0 - 0,814 = 1,186$$

;

$$\alpha_{(2)} = \frac{\Delta P_{(2)}}{T_{J\Sigma}} \cdot \omega_o = \frac{1,186}{29,6} \cdot 314 = 12,581;$$

$$\Delta \delta_{(2)} = \Delta \delta_{(1)} + \alpha_{(1)} \cdot (\Delta t)^2 = 0,0162 + 12,581 \cdot (0,05)^2 = 0,0476 \text{ [рад.]};$$

$$\delta_{(2)} = \delta_{(1)} + \Delta \delta_{(2)} = 0,3532 + 0,0476 = 0,4 \text{ [рад.]}$$

Третий интервал – от 0,1 до 0,15 с.; в начале интервала на линии 2 отключается выключатель Q1 и происходит переход от первого аварийного режима ко второму.

$$\Delta P_{(3.1)} = P_o - P_{mII-1} \sin(\delta_{(2)}) = 2,0 - 2,352 \cdot \sin(0,4) = 2,0 - 0,915 = 1,085;$$

$$\Delta P_{(3.2)} = P_o - P_{mII-2} \sin(\delta_{(2)}) = 2,0 - 3,776 \cdot \sin(0,4) = 2,0 - 1,469 = 0,531;$$

$$\alpha_{(3.1)} = \frac{\Delta P_{(3.1)}}{T_{J\Sigma}} \cdot \omega_o = \frac{1,085}{29,6} \cdot 314 = 11,51;$$

$$\alpha_{(3.2)} = \frac{\Delta P_{(3.2)}}{T_{J\Sigma}} \cdot \omega_o = \frac{0,531}{29,6} \cdot 314 = 5,633;$$

$$\alpha_{(3)} = \frac{(\alpha_{(3.1)} + \alpha_{(3.2)})}{2} = \frac{(11,51 + 5,633)}{2} = 8,571;$$

$$\Delta \delta_{(3)} = \Delta \delta_{(2)} + \alpha_{(3)} \cdot (\Delta t)^2 = 0,0476 + 8,571 \cdot (0,05)^2 = 0,069 \text{ [рад.]};$$

$$\delta_{(3)} = \delta_{(2)} + \Delta\delta_{(3)} = 0,4 + 0,069 = 0,469 \text{ [рад.]}$$

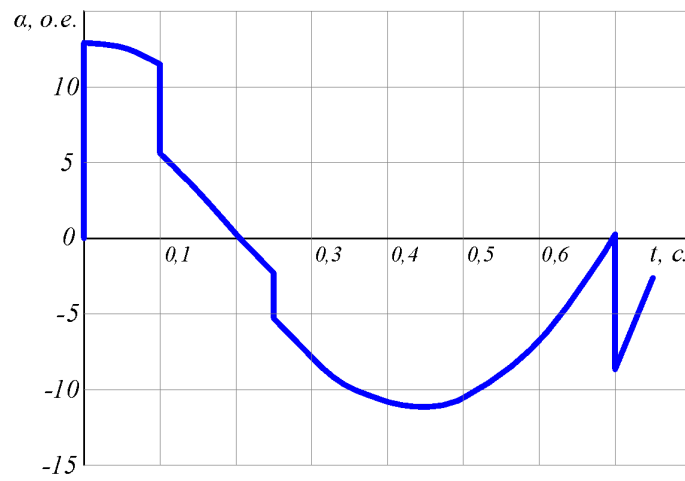
На остальных интервалах расчеты ведутся аналогичным образом. Результаты расчетов сведены в табл. 4.

Поскольку в первом варианте принято условие успешного АПВ, расчеты можно было прекратить после 10 интервала, т.к. $\Delta\delta_{(10)}$ стал отрицательным, т.е. процесс торможения закончился и угол δ начал уменьшаться.

Таблица 4

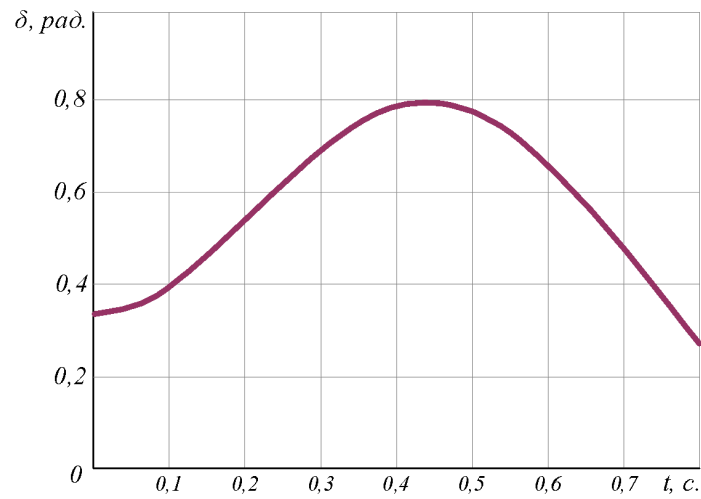
Номер интервала – (i)	$\Delta P_{(i)}$, о.е.	$\alpha_{(i)}$, о.е.	$\Delta\delta_{(i)}$, рад.	$\delta_{(i)}$, рад.	Примечание
0				0,337	Исходный режим
1	1,222	12,963	0,0162	0,3532	К.з. на линии Л2, первый аварийный режим
2	1,186	12,581	0,0476	0,4	
3	1,085 0,531	11,51 5,633	0,069	0,469	Отключение Q1, переход от первого ко второму аварийному режиму
4	0,293	3,108	0,077	0,546	
5	0,04	0,424	0,078	0,624	
6	-0,205 -0,48	-2,177 -5,088	0,0767	0,7	Отключение Q2, переход от второго аварийного режима к послеаварийному
7	-0,734	-7,791	0,057	0,757	
8	-0,917	-9,728	0,033	0,79	
9	-1,015	-10,574	0,0066	0,7966	
10	-1,036	-10,99	-0,021	0,776	
11	-0,972	-10,311	-0,047	0,729	Включение Q1, к.з. устранилось, Л2 – на холостом ходу, режим не изменился
12	-0,828	-8,783	-0,069	0,658	
13	-0,598	-6,344	-0,085	0,573	
14	-0,301	-3,193	-0,093	0,48	
15	0,038 -0,791	0,407 -8,391	-0,103	0,377	Включение Q2, переход режима от послеаварийного к нормальному
16	-0,223	-2,366	-0,109	0,268	

На рис. 14 а, б, приведены зависимости $\delta_1 = f(t)$, $\alpha_1 = \phi(t)$, а на рис.15 и 16 – конфигурация площадок ускорения и торможения для первого варианта электромеханического переходного процесса.



a)

Рис. 14 (a). Изменение ускорения ротора α_1 при успешном АПВ;



б)

Рис. 14 (б). Изменение угла δ_1 при успешном АПВ.

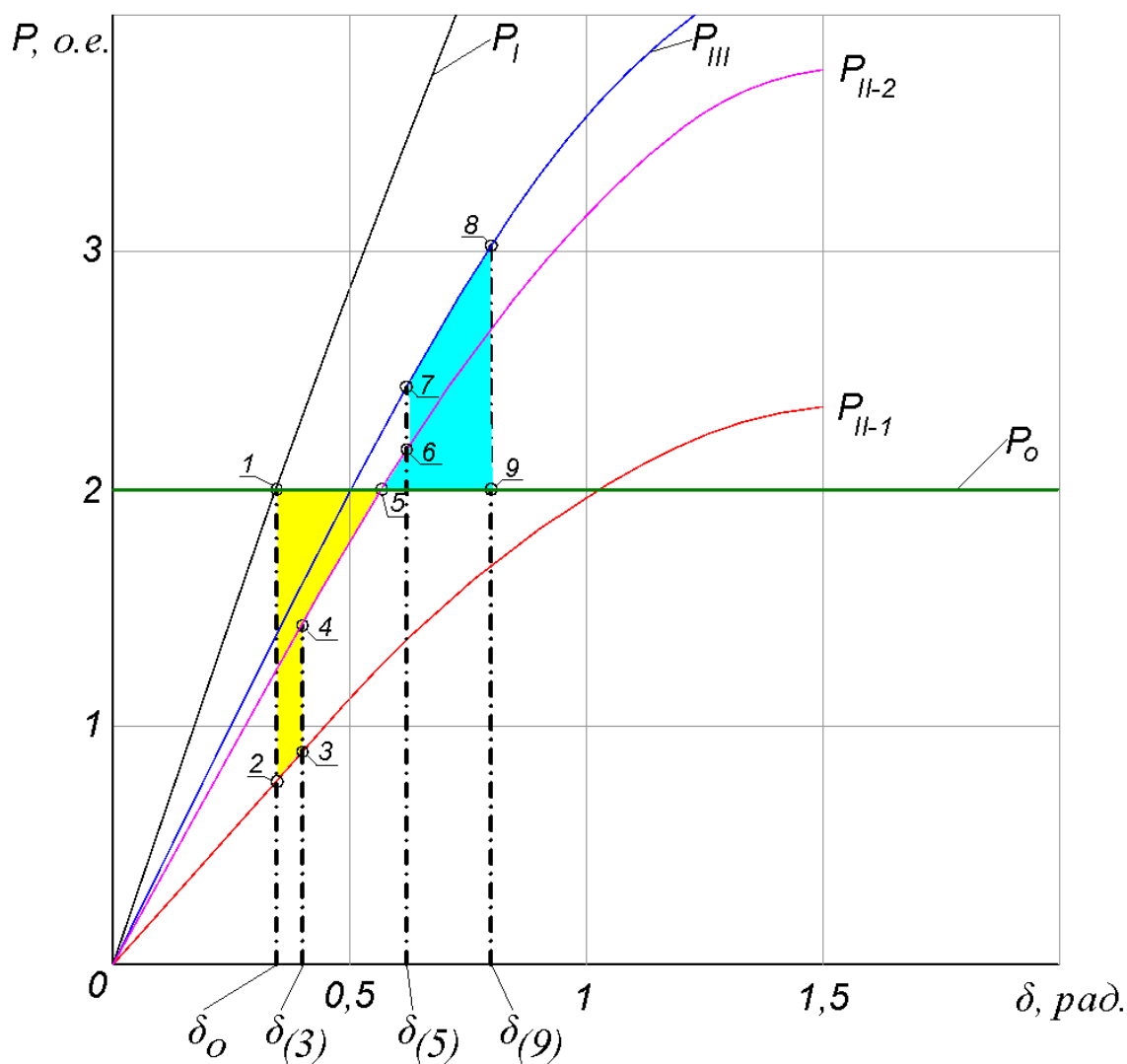


Рис. 15. Площадки ускорения $A_{\text{уск.1}}$ и торможения $A_{\text{торм.1}}$ в первой фазе переходного процесса.

В точке 8 движение ротора вправо прекращается, ротор останавливается. Но в этой точке нет баланса мощности турбины P_0 и генератора $P_{III(10)}$. Начинается вторая фаза переходного процесса – движение ротора от точки 8 влево – рис. 16.

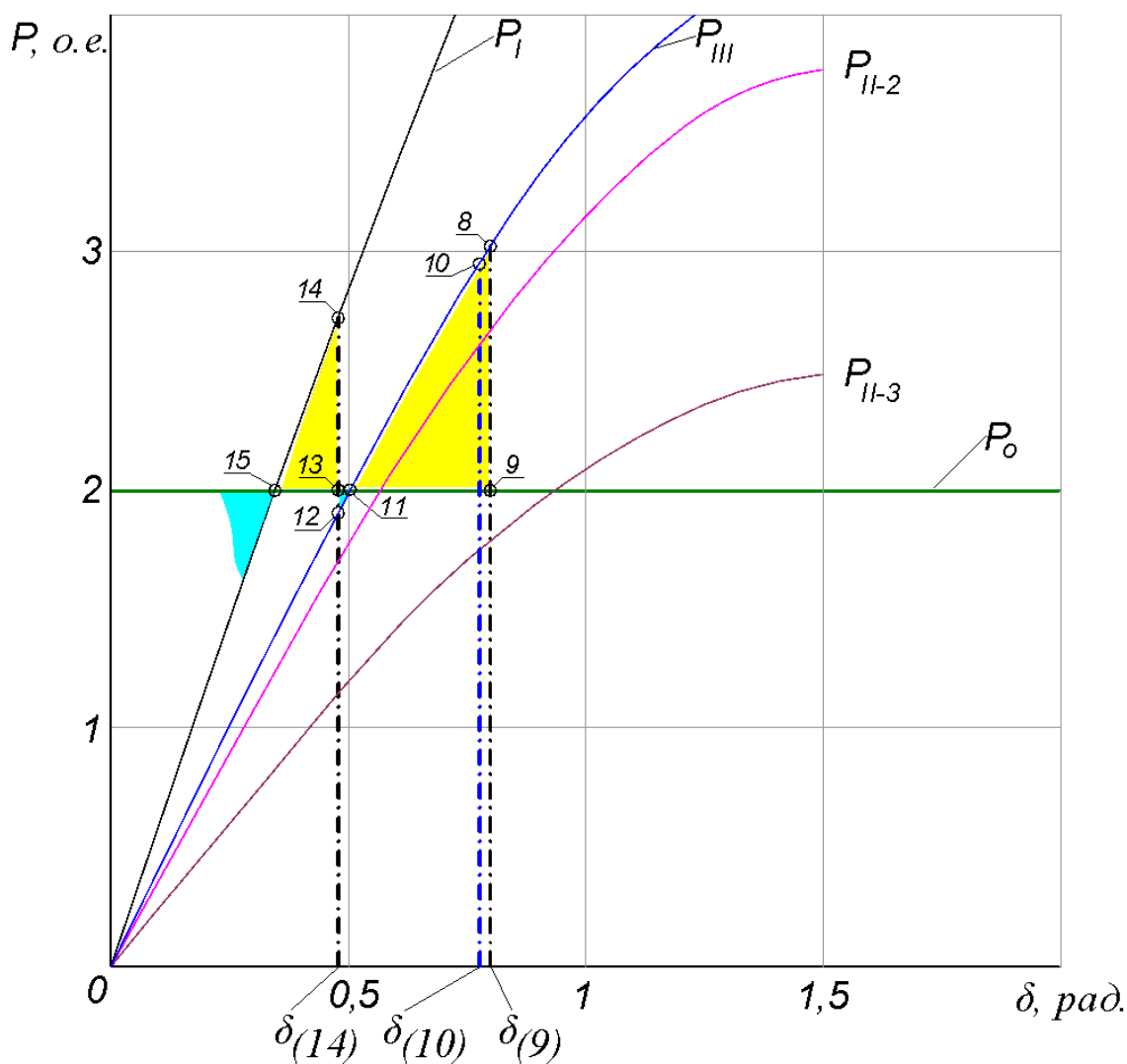


Рис. 16. Площадки обратного ускорения $A_{\text{обр.уск.2.1}}$, $A_{\text{обр.уск.2.2}}$ и торможения $A_{\text{торм.2}}$ во второй фазе переходного процесса.

Площадка обратного ускорения $A_{\text{обр.уск.2.1}}$ – фигура ограничена точками 8-9-11-10-8. После того, как процесс пройдет точку 11, начинается обратное торможение: $A_{\text{торм.2}}$ – треугольник, ограниченный точками 11-12-13-11. Но в точке 12, в результате АПВ КНН, включается выключатель Q_2 , система возвращается в нормальный режим; на рис. 28 это возвращение – переход процесса из точки 12 в точку 14. В этой точке вновь нет баланса мощности, и ротор эквивалентного генератора продолжает движение влево, но уже по характеристике нормального режима – к точке 15. Площадка обратного ускорения $A_{\text{обр.уск.2.2}}$ – фигура ограничена точками 13-14-15-13. Обратное торможение ротора продолжится левее точки 15.

На рис. 16 показана точка 10, в которой, в результате АПВ КОН включился

выключатель $Q1$. По условиям первого рассматриваемого варианта АПВ – успешное, поэтому включение выключателя $Q1$ не приводит к изменению режима, он остается послеаварийным: передача мощности по отключившейся линии еще не происходит, она включена только с одной стороны и работает на холостом ходу.

Рассмотрим второй вариант переходного процесса: АПВ неуспешное, действие защиты линии – как и при первом отключении к.з.

Циклограмма второго варианта показана на рис. 17.

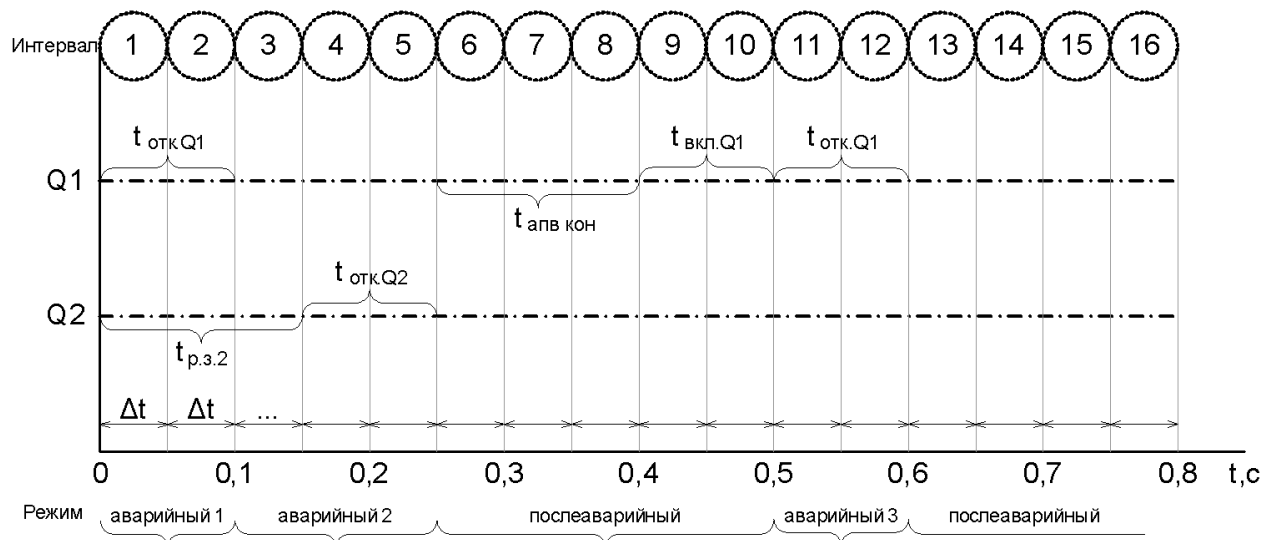


Рис. 17. Циклограмма развития переходного процесса для второго варианта.

Сравнивая рис. 9 и 17, можно отметить, что первые десять интервалов переходный процесс идет так же, как и в первом варианте, и лишь в начале одиннадцатого интервала, из-за включения выключателя $Q1$ на устойчивое к.з., происходит переход от послеаварийного режима к третьему аварийному P_{II-3} . Все необходимые предварительные данные были получены выше. Расчет для интервала 11 выполняется в том же порядке, что и для третьего интервала. Результаты расчетов сведем в табл. 5.

Зависимости $\alpha_2 = \phi(t)$, $\delta_2 = f(t)$ приведены, соответственно, на рис. 18 и 19.

Сплошная линия – изменение параметра при развитии переходного процесса по второму варианту; штриховая линия – изменение того же параметра по данным первого варианта. Площадки ускорения и торможения в первой фазе развития переходного процесса аналогичны варианту 1, поэтому на рис. 32 приведены площадки обратного ускорения и торможения только для второй фазы переходного процесса. Площадка обратного ускорения $A_{обр.уск.3.1}$ – фигура, ограниченная точками 8-9-11-10-8. В точке 10, в результате АПВ КОН, выключателем $Q1$ на линию 2 подается напряжение и происходит включение на устойчивое

к.з. Система переходит из послеаварийного в третий аварийный режим; на рис. 20 этот переход – из точки 10 в точку 12. Движение ротора влево замедляется, начинается обратное торможение: $A_{\text{обр.торм.3.1}}$ - фигура, ограниченная точками 11-12-13-14-11.

Таблица 5

Номер интервала – (i)	$\Delta P_{(i)}$, о.е.	$\alpha_{(i)}$, о.е.	$\Delta \delta_{(i)}$, рад.	$\delta_{(i)}$, рад.	Примечание
0				0,337	Исходный режим
1	1,222	12,963	0,0162	0,3532	К.з. на линии Л2, первый аварийный режим
2	1,186	12,581	0,0476	0,4	
3	1,085 0,531	11,51 5,633	0,069	0,469	Отключение Q1, переход от первого ко второму аварийному режиму
4	0,293	3,108	0,077	0,546	
5	0,04	0,424	0,078	0,624	
6	-0,205 -0,48	-2,177 -5,088	0,0767	0,7	Отключение Q2, переход от второго аварийного режима к послеаварийному
7	-0,734	-7,791	0,057	0,757	
8	-0,917	-9,728	0,033	0,79	
9	-1,015	-10,574	0,0066	0,7966	
10	-1,036	-10,99	-0,021	0,776	
11	-0,972 0,255	-10,313 2,704	-0,0305	0,7455	Включение Q1, <u>к.з. не устранилось</u> , переход от послеаварийного режима к третьему аварийному
12	0,31	3,286	-0,0223	0,7232	
13	0,35 -0,811	3,709 -8,602	-0,0284	0,695	Отключение Q1, переход от третьего аварийного режима к послеаварийному
14	-0,717	-7,606	-0,0474	0,647	
15	-0,56	-5,944	-0,0623	0,585	
16	-0,344	-3,647	-0,0714	0,513	

После отключения выключателя Q1 - точка 13 – процесс возвращается на послеаварийную характеристику – в точку 15. В этой точке вновь нет баланса мощности, и ротор эквивалентного генератора продолжает движение влево, но уже по характеристике послеаварийного режима – к точке 16. Площадка обратного ускорения $A_{\text{обр.уск.3.2}}$ – фигура ограниченная точками 14-15-16-14. Обратное торможение ротора продолжится левее точки 16.

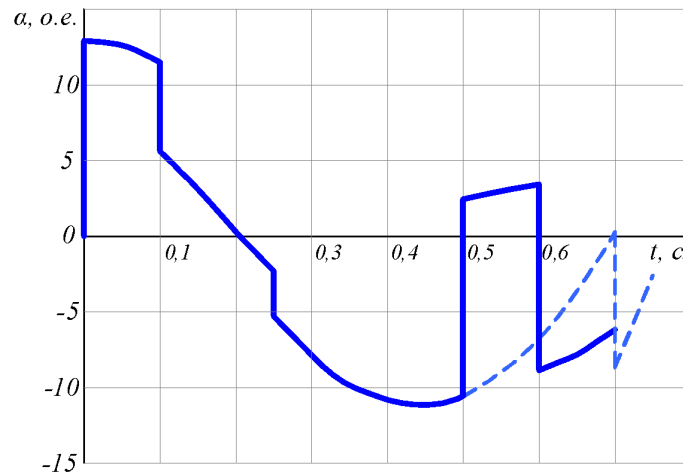


Рис. 18. Изменение ускорения ротора α_2 при неуспешном АПВ.

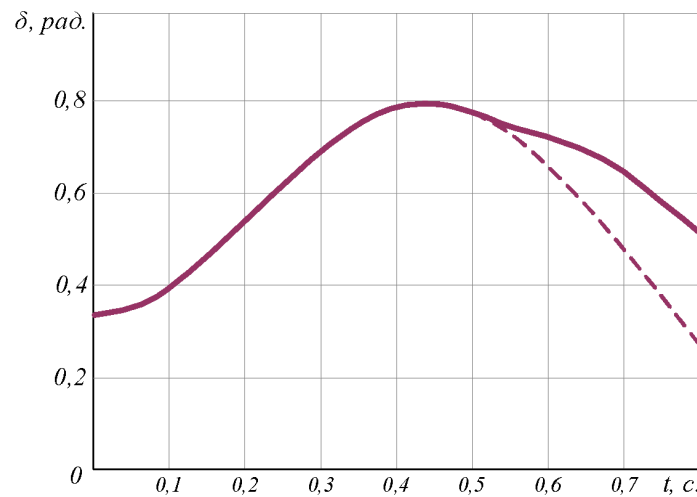


Рис. 19. Изменение угла δ_2 при неуспешном АПВ.

При выполнении уточненного расчета с учетом реакции якоря и действия АРВ совместно с уравнением движения ротора решается дифференциальное уравнение . Расчет выполняется в следующем порядке [2, 3, 4]:

1. Для исходного режима определяются значения начального угла δ_0 , продольной составляющей э.д.с. за переходным индуктивным сопротивлением E'_{q0} , э.д.с. холостого хода E_{q0} . Вынужденная э.д.с. холостого хода E_{qe0} в исходном (нормальном) режиме совпадает с э.д.с. холостого хода: $E_{q0} = E_{qe0}$.

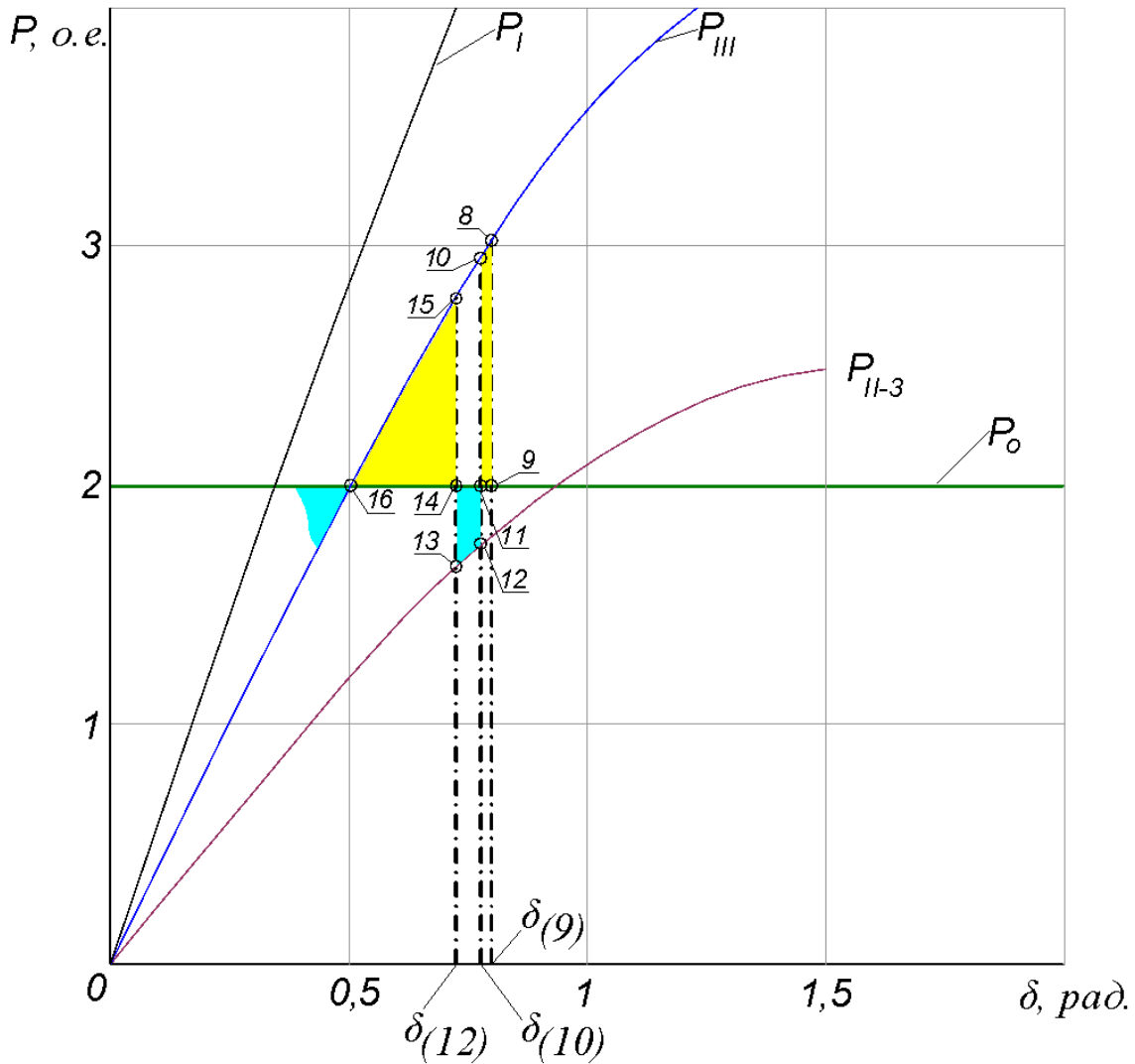


Рис. 20. Площадки обратного ускорения $A_{\text{обр.уск.3.1}}$, $A_{\text{обр.уск.3.2}}$ и торможения $A_{\text{обр.торм.3.1}}$ во второй фазе переходного процесса для второго варианта.

2. Вычисляются собственные $x_{11(j)}$ и взаимные $x_{12(j)}$ индуктивные сопротивления для всех расчетных ситуаций. При этом турбогенератор вводится в схему замещения сопротивлением x_d , гидрогенератор – x_q .

3. При наличии в схеме возбуждения генератора релейной форсировки возбуждения изменение вынужденной э.д.с. за рассчитываемый интервал времени определяется по формуле (21):

$$E_{qe(i)} = E_{qe(0)} + (E_{qe(\text{пред})} - E_{qe(0)}) \cdot \left(1 - e^{-\left(\frac{t_{(i)}}{T_e}\right)}\right),$$

которую удобнее записать в несколько иной форме, выполнив несложные преобразования:

$$\begin{aligned}
 E_{qe(i)} &= E_{qe(\text{пред})} - (E_{qe(\text{пред})} - E_{qe(0)}) \cdot e^{-\left(\frac{t_{(i)}}{T_e}\right)} = \\
 &= E_{qe(0)} \cdot k_{\text{форс.}} - (E_{qe(0)} \cdot k_{\text{форс.}} - E_{qe(0)}) \cdot e^{-\left(\frac{t_{(i)}}{T_e}\right)} = \\
 &= E_{qe(0)} \cdot \left(k_{\text{форс.}} - (k_{\text{форс.}} - 1) \cdot e^{-\left(\frac{t_{(i)}}{T_e}\right)} \right). \quad (22)
 \end{aligned}$$

Здесь $k_{\text{форс.}}$ – кратность форсировки возбуждения; рекомендуется принимать $k_{\text{форс.}} = 2,0 \div 2,5$;

$t_{(i)}$ – время, соответствующее правой границе расчетного интервала, (с);

T_e – постоянная времени возбудителя, (с).

В расчетах используется среднее значение $E_{qe(i)\text{ср.}}$ за расчетный интервал времени:

$$E_{qe(i)\text{ср.}} = \frac{E_{qe(i-1)} + E_{qe(i)}}{2}, \quad (23)$$

т.е. за первый интервал:

$$E_{qe(1)\text{ср.}} = \frac{E_{qe(0)} + E_{qe(1)}}{2} = \frac{E_{qe0} + E_{qe(1)}}{2},$$

за второй:

$$E_{qe(2)\text{ср.}} = \frac{E_{qe(1)} + E_{qe(2)}}{2},$$

и т.д.

По формулам (22) и (23) расчет производится при простейшем учете автоматического регулирования возбуждения, когда необходимо оценить только первый вылет угла δ . В этом случае не контролируют напряжение на шинах генератора, полагая, что все время при коротком замыкании и после его отключения E_{qe} увеличивается.

4. По (8) с учетом замечаний для гидрогенераторов вычисляется э.д.с. холостого хода для первого момента нарушения режима $E_{q(0)}$:

$$E_{q(0)}' = \frac{E_{q(0)}' - U_c \cdot \frac{\frac{x_d' - x_d}{n_r} \cdot \frac{x_d'}{n_r} \cdot \cos \delta_0}{x_{12(ав.р.1)}}}{1 - \frac{\frac{x_d' - x_d}{n_r} \cdot \frac{x_d'}{n_r}}{x_{11(ав.р.1)}}}$$

5. Определяются изменение переходной э.д.с. в течение первого расчетного интервала

$$\Delta E_{q(1)}' = \frac{E_{qe(1)ср.} - E_{q(0)}'}{T_{d0}} \cdot \Delta t$$

и величина переходной э.д.с. в конце первого интервала

$$E_{q(1)}' = E_{q(0)}' + \Delta E_{q(1)}'$$

6. Находятся активная мощность генератора в начале первого интервала

$$P_{(0)} = \frac{E_{q(0)}' \cdot U_c}{x_{12(ав.р.1)}} \cdot \sin(\delta_0)$$

и небаланс мощности $\Delta P_{(0)} = P_o - P_{(0)}$.

7. В соответствии с выражениями (16), (17) метода последовательных интервалов определяется приращение угла $\Delta \delta_{(1)}$.

8. Находится угол $\delta_{(1)}$ в начале следующего интервала:

$$\delta_{(1)} = \delta_0 + \Delta \delta_{(1)}.$$

В результате расчета определены значения $E_{q(1)}'$ и $\delta_{(1)}$ в начале второго интервала, по которым определяется величина э.д.с. $E_{q(1)}$ и расчет повторяется для следующего интервала. При изменении режима в начале k -го интервала приращение угла $\Delta \delta_{(k)}$ определяют по формулам (19) – (21). Вид остальных уравнений при изменении режима остается неизменным, меняются лишь значения собственных и взаимных сопротивлений схемы замещения [4].

По результатам уточненного расчета строятся зависимости во времени угла δ , величин E_q' , E_q , E_{qe} и делаются выводы о характере их изменения.

Пример 3. – Для электрической системы, изображенной на рис. 33, выполнить уточненную оценку устойчивости динамического перехода при простейшем учете действия АРВ и отсутствии контроля напряжения на шинах генератора. Станция – ТЭС с

неявнополюсными турбогенераторами. Для уменьшения объема расчетов алгоритм развития аварии и параметры элементов системы взять из примера 2. Кратность форсировки возбуждения принять $k_{\text{форс.}} = 2, 5$. Рассмотреть только вариант успешного АПВ.

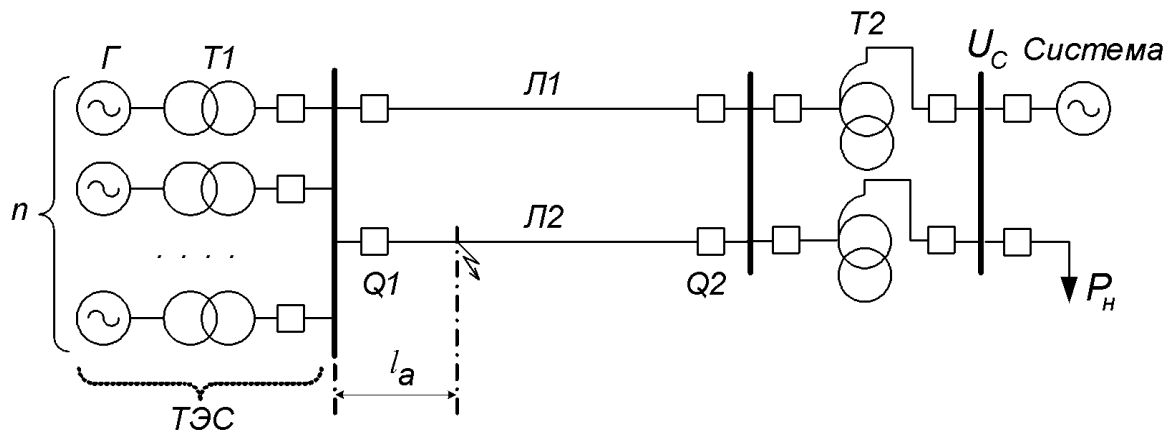


Рис. 21. Электрическая система для примера 3.

Решение. Схема замещения системы в начальный момент переходного процесса:

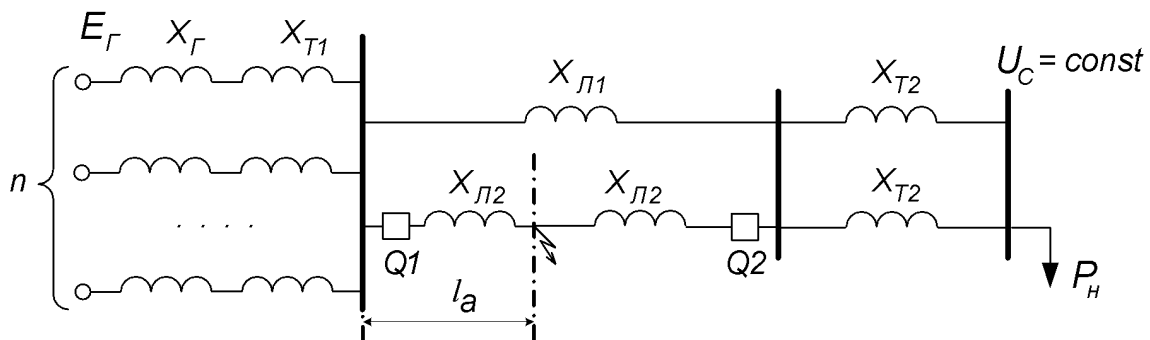


Рис. 22. Схема замещения системы в момент возникновения к.з.

Параметры элементов системы и параметры режима (из предыдущих примеров, в относительных единицах).

Генератор: $x_d = 1,6$; $x'_d = 0,28$; $x_{Г.оп} = x_2 = 0,24$; $n_r = 4$.

Остальные элементы системы и параметры режима:

$x_{Т1} = 0,098$; $x_{Т2} = 0,066$; $x_{Л1} = x_{Л2} = 0,186$;

$U_c = 1$; $P_H = 2$; $Q_H = 1,344$.

Э.д.с. за сопротивлением x_d :

$$x_{Г_{\text{экв.1}}} = \frac{x_d}{n_r} = \frac{1,6}{4} = 0,4;$$

$$x_{\text{внеш.}} = \frac{x_{Т1}}{n_{Т1}} + \frac{x_{Л1}}{2} + \frac{x_{Т2}}{2} = \frac{0,098}{4} + \frac{0,186}{2} + \frac{0,066}{2} = 0,15;$$

$$E_q = \sqrt{\left(U_c + \frac{Q_n(x_{\Gamma, \text{экв.1}} + x_{\text{внеш.}})}{U_c}\right)^2 + \left(\frac{P_n(x_{\Gamma, \text{экв.1}} + x_{\text{внеш.}})}{U_c}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(1 + \frac{1,344(0,4+0,15)}{1}\right)^2 + \left(\frac{2,0(0,4+0,15)}{1}\right)^2} = 2,058;$$

$$\delta_i = \arctg \frac{P_i(\tilde{A} \cdot \tilde{y} \hat{e} \hat{a} \cdot 1 + \tilde{\delta}_{\hat{a}i} \hat{a} \emptyset \cdot)}{U_c^2 + Q_i(\tilde{A} \cdot \tilde{y} \hat{e} \hat{a} \cdot 1 + \tilde{\delta}_{\hat{a}i} \hat{a} \emptyset \cdot)} = \arctg \frac{2,0(0,4+0,15)}{1+1,344(0,4+0,15)} = 0,566$$

[рад.]

Э.д.с. за переходным сопротивлением x_d' :

$$x_{\Gamma \text{экв.2}} = \frac{x_d'}{n_r} = \frac{0,28}{4} = 0,07;$$

$$E' = \sqrt{\left(U_c + \frac{Q_n(x_{\Gamma, \text{экв.2}} + x_{\text{внеш.}})}{U_c}\right)^2 + \left(\frac{P_n(x_{\Gamma, \text{экв.2}} + x_{\text{внеш.}})}{U_c}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(1 + \frac{1,344(0,07+0,15)}{1}\right)^2 + \left(\frac{2,0(0,07+0,15)}{1}\right)^2} = 1,368;$$

$$\delta_i' = \arctg \frac{P_i(\tilde{A} \cdot \tilde{y} \hat{e} \hat{a} \cdot 2 + \tilde{\delta}_{\hat{a}i} \hat{a} \emptyset \cdot)}{U_c^2 + Q_i(\tilde{A} \cdot \tilde{y} \hat{e} \hat{a} \cdot 2 + \tilde{\delta}_{\hat{a}i} \hat{a} \emptyset \cdot)} = \arctg \frac{2,0(0,07+0,15)}{1+1,344(0,07+0,15)} = 0,327$$

[рад.];

$$E_q' = E' \cdot \cos(\delta_o - \delta_o') = 1,368 \cdot \cos(0,566 - 0,327) = 1,329$$

Определим собственные и взаимные сопротивления схемы замещения для всех возможных режимов системы.

Исходный (нормальный) режим:

$$x_{11(\text{н.р.})} = x_{12(\text{н.р.})} = \frac{x_d}{n_r} + \frac{x_{T1}}{n_r} + \frac{x_{Л1}}{2} + \frac{x_{T2}}{2} = \frac{1,6}{4} + \frac{0,098}{4} + \frac{0,186}{2} + \frac{0,066}{2} = 0,55$$

Первый аварийный режим (см. пример 7, $x_{\Gamma} = x_d = 1,6$, $x_{ш1} = 0,0316$)

$$x_8 = \frac{x_{\Gamma}}{n_r} + \frac{x_{T1}}{n_r} + x_1 = \frac{1,6}{4} + \frac{0,098}{4} + 0,0186 = 0,443;$$

$$x_9 = x_2 + \frac{x_{T2}}{2} = 0,0744 + \frac{0,066}{2} = 0,1074;$$

$$x_{10} = x_3 + x_{ш1} = 0,0037 + 0,0316 = 0,0353.$$

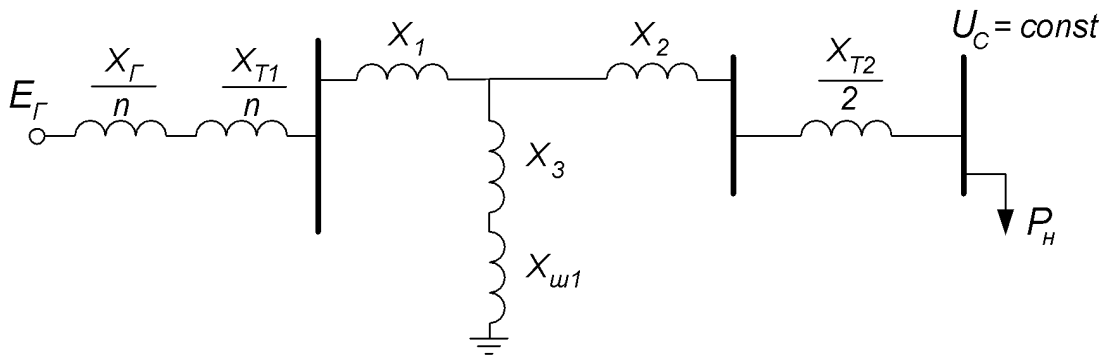


Рис. 23. Схема замещения прямой последовательности для определения собственного и взаимного сопротивления первого аварийного режима.

$$x_{11(\text{ав.п.1})} = x_8 + \frac{x_9 \cdot x_{10}}{x_9 + x_{10}} = 0,443 + \frac{0,1074 \cdot 0,0353}{0,1074 + 0,0353} = 0,469;$$

$$x_{12(\text{ав.п.1})} = x_8 + x_9 + \frac{x_8 \cdot x_9}{x_{10}} = 0,443 + 0,1074 + \frac{0,443 \cdot 0,1074}{0,0353} = 1,898.$$

Второй аварийный режим (см. пример 3, рис. 23, б: $x_r = x_d = 1,6$, $x_{ш2} = 0,089$)

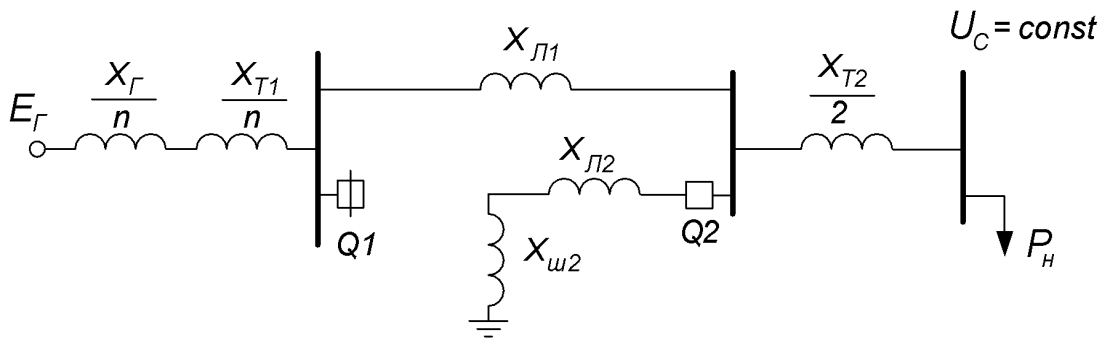


Рис. 24. Схема замещения прямой последовательности для определения собственного и взаимного сопротивления второго аварийного режима.

$$x_{15} = \frac{x_r}{n_r} + \frac{x_{T1}}{n_r} + x_{Л1} = \frac{1,6}{4} + \frac{0,098}{4} + 0,186 = 0,61;$$

$$x_{16} = \frac{x_{T2}}{2} = \frac{0,066}{2} = 0,033;$$

$$x_{17} = x_{Л2}'' + x_{ш2} = 0,149 + 0,089 = 0,238.$$

$$x_{11(\text{ав.п.2})} = x_{15} + \frac{x_{16} \cdot x_{17}}{x_{16} + x_{17}} = 0,61 + \frac{0,033 \cdot 0,238}{0,033 + 0,238} = 0,639;$$

$$x_{12(\text{ав.п.2})} = x_{15} + x_{16} + \frac{x_{15} \cdot x_{16}}{x_{17}} = 0,61 + 0,033 + \frac{0,61 \cdot 0,033}{0,238} = 0,728.$$

Третий аварийный режим (см. пример 7, рис. 25: $x_r = x_d = 1,6$, $x_{ш3} = 0,057$)

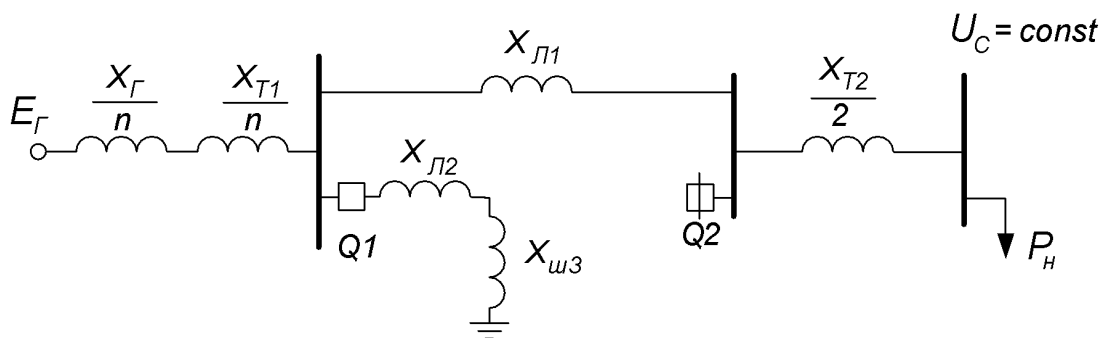


Рис. 25. Схема замещения прямой последовательности для определения собственного и взаимного сопротивления третьего аварийного режима.

$$x_{22} = \frac{x_{\Gamma}}{n_{\Gamma}} + \frac{x_{T1}}{n_{\Gamma}} = \frac{1,6}{4} + \frac{0,098}{4} = 0,4245;$$

$$x_{23} = x_{\Gamma1} + \frac{x_{T2}}{2} = 0,186 + \frac{0,066}{2} = 0,219;$$

$$x_{24} = x'_{\Gamma2} + x_{ш2} = 0,0372 + 0,057 = 0,0942.$$

$$x_{11(\text{ав.п.3})} = x_{22} + \frac{x_{23} \cdot x_{24}}{x_{23} + x_{24}} = 0,4245 + \frac{0,219 \cdot 0,0942}{0,219 + 0,0942} = 0,49;$$

$$x_{12(\text{ав.п.3})} = x_{22} + x_{23} + \frac{x_{22} \cdot x_{23}}{x_{24}} = 0,4245 + 0,219 + \frac{0,4245 \cdot 0,219}{0,0942} = 1,63.$$

Послеаварийный режим:

$$x_{11(\text{п/а.п.})} = x_{12(\text{п/а.п.})} = \frac{x_d}{n_{\Gamma}} + \frac{x_{T1}}{n_{\Gamma}} + x_{\Gamma1} + \frac{x_{T2}}{2} = \frac{1,6}{4} + \frac{0,098}{4} + 0,186 + \frac{0,066}{2} = 0,643$$

Оцениваем динамическую устойчивость рассматриваемой системы для первого варианта – успешного АПВ.

Первый интервал – от 0 до 0,05 с.; в начале интервала на линии 2 произошло двухфазное к.з. на землю.

Изменение вынужденной э.д.с. за рассчитываемый интервал ($t_{(1)} = 0,05$, $T_e = 0,12$)

$$\begin{aligned} E_{qe(1)} &= E_{qe(0)} \cdot \left(k_{\text{форс.}} - (k_{\text{форс.}} - 1) \cdot e^{-\left(\frac{t_{(1)}}{T_e}\right)} \right) = \\ &= 2,058 \cdot \left(2,5 - (2,5 - 1) \cdot e^{-\left(\frac{0,05}{0,12}\right)} \right) = 3,11. \end{aligned}$$

Среднее значение $E_{qe(1)\text{ср.}}$ за первый интервал:

$$E_{qe(1)\text{ср.}} = \frac{E_{qe(0)} + E_{qe(1)}}{2} = \frac{E_{qe0} + E_{qe(1)}}{2} = \frac{2,058 + 3,11}{2} = 2,584.$$

Э.д.с. холостого хода для первого момента нарушения режима $E_{q(0)}$ (в начале первого

интервала, $E'_{q(0)} = E'_q = 1,329$, $\delta_0 = 0,566$ [рад.]):

$$E_{q(0)} = \frac{E_{q(0)} - U_c \cdot \frac{\frac{x_d}{n_r} - \frac{x_d}{n_r}}{x_{12(a,p,1)}} \cdot \cos \delta_0}{1 - \frac{\frac{x_d}{n_r} - \frac{x_d}{n_r}}{x_{11(a,p,1)}}} = \frac{1,329 - 1 \cdot \frac{\frac{1,6}{4} - \frac{0,28}{4}}{1,898} \cdot \cos(0,566)}{1 - \frac{\frac{1,6}{4} - \frac{0,28}{4}}{0,469}} = 3,989.$$

Изменение переходной э.д.с. в течение первого расчетного интервала ($T_{d0} = 4,9$ [с]):

$$\Delta E_{q(1)}' = \frac{E_{qe(1)cp.} - E_{q(0)}}{T_{d0}} \cdot \Delta t = \frac{2,584 - 3,989}{4,9} \cdot 0,05 = -0,0143.$$

Величина переходной э.д.с. в конце первого интервала

$$E'_{q(1)} = E'_{q(0)} + \Delta E'_{q(1)} = 1,329 - 0,0143 = 1,3147.$$

Активная мощность генератора в начале первого интервала

$$P_{(0)} = \frac{E_{q(0)} \cdot U_c}{x_{12(aB,D,1)}} \cdot \sin(\delta_0) = \frac{3,989 \cdot 1}{1,898} \cdot \sin(0,566) = 1,127,$$

небаланс мощности $\Delta P_{(0)} = P_o - P_{(0)} = 2,0 - 1,127 = 0,873$.

$$\alpha_{(1)} = \frac{\Delta P_{(0)}}{T_{\beta}} \cdot \omega_o = \frac{0,873}{29,6} \cdot 314 = 9,261;$$

$$\Delta\delta_{(1)} = \alpha_{(1)} \cdot \frac{(\Delta t)^2}{2} = 9,261 \cdot \frac{(0,05)^2}{2} = 0,0116 \text{ [рад.]};$$

$$\delta_{(1)} = \delta_o + \Delta\delta_{(1)} = 0,566 + 0,0116 = 0,5776 \text{ [рад.]}$$

Второй интервал – от 0,05 до 0,1 с.

Изменение вынужденной э.д.с. за рассчитываемый интервал ($t_{(2)} = 0, 1$)

$$E_{qe(2)} = E_{qe(0)} \cdot \left(k_{\text{форс.}} - (k_{\text{форс.}} - 1) \cdot e^{-\left(\frac{t_{(2)}}{T_e}\right)} \right) =$$

$$= 2,058 \cdot \left(2,5 - (2,5 - 1) \cdot e^{-\left(\frac{0,1}{0,12}\right)} \right) = 3,803.$$

Среднее значение $E_{qe(2)cp.}$ за второй интервал:

$$E_{qe(2)cp.} = \frac{E_{qe(1)} + E_{qe(2)}}{2} = \frac{3,11 + 3,803}{2} = 3,4565.$$

Э.д.с. холостого хода в конце первого интервала (она же – в начале второго интервала):

$$E_{q(1)} = \frac{E'_{q(1)} - U_c \cdot \frac{\frac{x_d}{n_r} - \frac{x_d}{n_r}}{x_{12(a.u.p.)}}} {1 - \frac{\frac{x_d}{n_r} - \frac{x_d}{n_r}}{x_{13(a.u.p.)}}} \cdot \cos \delta_{(1)} = \frac{1,3147 - 1 \cdot \frac{\frac{1,6}{4} - \frac{0,28}{4}}{1,898} \cdot \cos(0,5776)} {1 - \frac{\frac{1,6}{4} - \frac{0,28}{4}}{0,469}} = 3,944.$$

Изменение переходной э.д.с. в течение второго расчетного интервала:

$$\Delta E'_{q(2)} = \frac{E_{qe(2)cp} - E_{q(1)}}{T_{d0}} \cdot \Delta t = \frac{3,4565 - 3,944}{4,9} \cdot 0,05 = -0,00497.$$

Величина переходной э.д.с. в конце второго интервала

$$E'_{q(2)} = E'_{q(1)} + \Delta E'_{q(2)} = 1,3147 - 0,00497 = 1,3097.$$

Активная мощность генератора в начале второго интервала

$$P_{(1)} = \frac{E_{q(1)} \cdot U_c}{x_{12(av,p.1)}} \cdot \sin(\delta_{(1)}) = \frac{3,944 \cdot 1}{1,898} \cdot \sin(0,5776) = 1,135,$$

$$\text{небаланс мощности } \Delta P_{(1)} = P_o - P_{(1)} = 2,0 - 1,135 = 0,865.$$

$$\alpha_{(2)} = \frac{\Delta P_{(1)}}{T_{j\Sigma}} \cdot \omega_o = \frac{0,865}{29,6} \cdot 314 = 9,176;$$

$$\Delta \delta_{(2)} = \Delta \delta_{(1)} + \alpha_{(2)} \cdot (\Delta t)^2 = 0,0116 + 9,176 \cdot (0,05)^2 = 0,0345 \text{ [рад.]};$$

$$\delta_{(2)} = \delta_{(1)} + \Delta \delta_{(2)} = 0,5776 + 0,0345 = 0,612 \text{ [рад.]}. \quad \delta_{(2)}$$

Третий интервал – от 0,1 до 0,15 с. В начале интервала – отключение QI , переход от первого ко второму аварийному режиму. $t_{(3)} = 0,15$.

$$E_{qe(3)} = E_{qe(0)} \cdot \left(k_{\text{форс.}} - (k_{\text{форс.}} - 1) \cdot e^{-\left(\frac{t_{(3)}}{T_e}\right)} \right) =$$

$$= 2,058 \cdot \left(2,5 - (2,5 - 1) \cdot e^{-\left(\frac{0,15}{0,12}\right)} \right) = 4,261.$$

$$E_{qe(3)cp} = \frac{E_{qe(2)} + E_{qe(3)}}{2} = \frac{3,803 + 4,261}{2} = 4,032.$$

Э.д.с. холостого хода в конце второго интервала (до отключения выключателя QI):

$$E_{q(2.1)} = \frac{E'_{q(2)} - U_c \cdot \frac{\frac{x_d}{n_r} \cdot \frac{x_d}{n_r}}{x_{12(av,p.1)}} \cdot \cos \delta_{(2)}}{1 - \frac{\frac{x_d}{n_r} \cdot \frac{x_d}{n_r}}{x_{11(av,p.1)}}} = \frac{1,3097 - 1 \cdot \frac{\frac{1,6}{4} \cdot \frac{0,28}{4}}{1,898} \cdot \cos(0,612)}{1 - \frac{\frac{1,6}{4} \cdot \frac{0,28}{4}}{0,469}} = 3,938.$$

Э.д.с. холостого хода после отключения выключателя QI (в начале третьего интервала):

$$E_{q(2.2)} = \frac{E'_{q(2)} - U_c \cdot \frac{\frac{x_d}{n_r} \cdot \frac{x_d}{n_r}}{x_{12(av,p.2)}} \cdot \cos \delta_{(2)}}{1 - \frac{\frac{x_d}{n_r} \cdot \frac{x_d}{n_r}}{x_{11(av,p.2)}}} = \frac{1,3097 - 1 \cdot \frac{\frac{1,6}{4} \cdot \frac{0,28}{4}}{0,728} \cdot \cos(0,612)}{1 - \frac{\frac{1,6}{4} \cdot \frac{0,28}{4}}{0,639}} = 1,941.$$

Изменение переходной э.д.с. в течение третьего расчетного интервала:

$$\Delta E'_{q(3)} = \frac{E_{qe(3)cp} - E_{q(2.2)}}{T_{d0}} \cdot \Delta t = \frac{4,032 - 1,941}{4,9} \cdot 0,05 = 0,0213.$$

Величина переходной э.д.с. в конце третьего интервала

$$E'_{q(3)} = E'_{q(2)} + \Delta E'_{q(3)} = 1,3097 + 0,0213 = 1,331.$$

Активная мощность генератора в начале третьего интервала

$$P_{(2.1)} = \frac{E_{q(2.1)} \cdot U_c}{x_{12(\text{ав.р.1})}} \cdot \sin(\delta_{(2)}) = \frac{3,938 \cdot 1}{1,898} \cdot \sin(0,612) = 1,193,$$

$$P_{(2.2)} = \frac{E_{q(2.2)} \cdot U_c}{x_{12(\text{ав.р.2})}} \cdot \sin(\delta_{(2)}) = \frac{1,941 \cdot 1}{0,728} \cdot \sin(0,612) = 1,533,$$

небалансы мощности

$$\Delta P_{(2.1)} = P_o - P_{(2.1)} = 2,0 - 1,193 = 0,807;$$

$$\Delta P_{(2.2)} = P_o - P_{(2.2)} = 2,0 - 1,533 = 0,467;$$

$$\alpha_{(3.1)} = \frac{\Delta P_{(2.1)}}{T_{JE}} \cdot \omega_o = \frac{0,807}{29,6} \cdot 314 = 8,561;$$

$$\alpha_{(3.2)} = \frac{\Delta P_{(2.2)}}{T_{JE}} \cdot \omega_o = \frac{0,467}{29,6} \cdot 314 = 4,953;$$

$$\alpha_{(3)} = \frac{\alpha_{(3.1)} + \alpha_{(3.2)}}{2} = \frac{8,561 + 4,953}{2} = 6,757$$

$$\Delta \delta_{(3)} = \Delta \delta_{(2)} + \alpha_{(3)} \cdot (\Delta t)^2 = 0,0345 + 6,757 \cdot (0,05)^2 = 0,0514 \text{ [рад.]};$$

$$\delta_{(3)} = \delta_{(2)} + \Delta \delta_{(3)} = 0,612 + 0,0514 = 0,663 \text{ [рад.]}. \quad \delta_{(3)}$$

На остальных интервалах расчеты ведутся аналогичным образом. Результаты расчетов сведены в табл. 8. Изменение во времени э.д.с. иллюстрируются на рис. 26, 27 и 28.

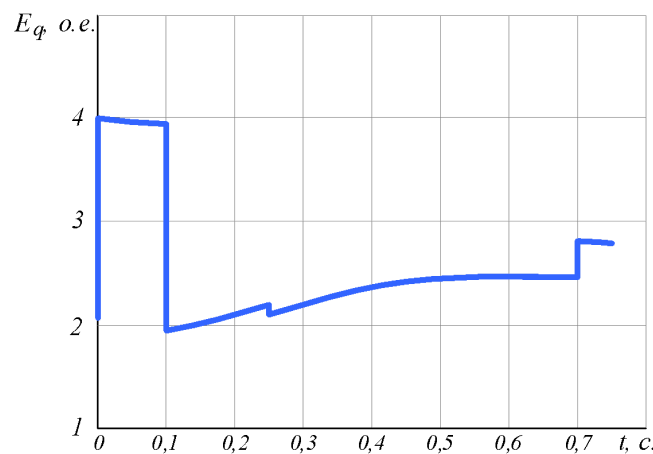


Рис. 26. Изменение во времени э.д.с. холостого хода E_q .

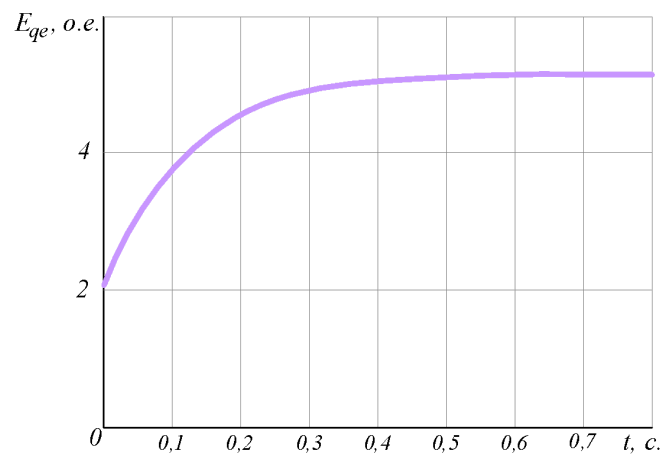


Рис. 27. Изменение во времени вынужденной э.д.с. холостого хода E_{qe} при отсутствии контроля напряжения на шинах генератора.

Таблица 6

Результаты расчетов по интервалам для примера 8.

Номер интервал а (i)	$E_{q(i)}$, о.е.	$E_{qe(i)}$, о.е.	$E_{qe(i)cp.}$, о.е.	$\Delta E'_{q(i)}$, о.е.	$E'_{q(i)}$, о.е.	$P_{(i)}$, о.е.	$\Delta P_{(i)}$, о.е.	$\alpha_{(i)}$, о.е.	$\Delta \delta_{(i)}$, рад.	$\delta_{(i)}$, рад.	Примечание
0	2,058	2,058			1,329					0,566	Исходный режим
1	3,989	3,11	2,584	-0,0143	1,315	1,126	0,873	9,261	0,0116	0,578	К.з. на линии Л2, первый аварийный режим
2	3,944	3,803	3,456	-0,0050	1,310	1,135	0,865	9,176	0,0345	0,612	
3	3,938 1,941	4,261	4,032	0,0213	1,331	1,193 1,533	0,807 0,467	8,561 4,954	0,0514	0,663	Отключение Q1, переход от первого ко второму аварийному режиму
4	2,014	4,562	4,411	0,0245	1,355	1,701	0,299	3,168	0,0593	0,722	
5	2,099	4,761	4,661	0,0261	1,381	1,906	0,094	0,999	0,0618	0,784	
6	2,192 2,091	4,892	4,826	0,0279	1,409	2,126 2,296	-0,126 -0,296	-1,338 -3,140	0,0562	0,840	Отключение Q2, переход от второго аварийного режима к послеаварийному
7	2,191	4,978	4,935	0,0280	1,437	2,539	-0,539	-5,713	0,0419	0,882	
8	2,281	5,035	5,006	0,0278	1,465	2,739	-0,739	-7,835	0,0223	0,904	
9	2,358	5,072	5,053	0,0275	1,492	2,882	-0,882	-9,361	-0,0011	0,903	
10	2,413	5,097	5,084	0,0272	1,520	2,946	-0,946	-10,034	-0,0262	0,877	
11	2,448	5,113	5,105	0,0271	1,547	2,928	-0,928	-9,841	-0,0508	0,826	Включение Q1, АПВ КОН успешное, линия Л2 – на холостом ходу, продолжается послеаварийный режим
12	2,463	5,124	5,118	0,0271	1,574	2,815	-0,815	-8,650	-0,0724	0,754	
13	2,465	5,131	5,127	0,0272	1,601	2,622	-0,622	-6,600	-0,0889	0,665	
14	2,459	5,136	5,133	0,0273	1,628	2,359	-0,359	-3,814	-0,0984	0,566	
15	2,455 2,805	5,139	5,137	0,0238	1,652	2,047 2,734	-0,047 -0,734	-0,497 -7,782	-0,109	0,457	Включение Q2, переход режима от послеаварийного к нормальному
16	2,784	5,141	5,14	0,0240	1,676	2,233	-0,233	-2,468	-0,115	0,342	

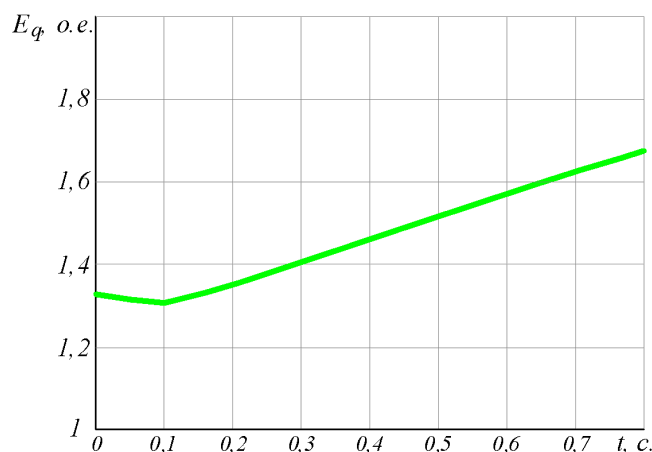


Рис. 28. Изменение во времени переходной э.д.с. E_q' .

Сравнение результатов расчета изменения угла δ в таблицах 4 и 6 позволяет отметить, что при уточненном расчете возрастание угла прекратилось на один интервал раньше - приращение угла $\Delta\delta$ стало отрицательным не на десятом, как в таблице 6, а на девятом интервале (соответствующая ячейка таблицы 8 выделена цветной заливкой). Однако сравнение абсолютных величин угла в обоих примерах недостаточно наглядно иллюстрирует, как влияет учет действия АРВ, даже в простейшей форме, на динамическую устойчивость системы, т.к. начальный угол в примерах отличается. Ниже, в табл. 7, вылет угла для сравниваемых примеров дан в долях от соответствующего $\delta_{нач,j} = \delta_{0,j}$, где j – номер примера.

Таблица 7

Сопоставление изменения угла вылета ротора для примеров 2 и 3 при выражении угла $\delta_{(i)}$ в долях от соответствующего начального угла $\delta_{0,j}$

Номер интервала – (i)	Пример 2, упрощенный расчет, данные из таблицы 6; $\delta_{0,7} = 0,337$ [рад.]		Пример 3, уточненный расчет, данные из таблицы * $\delta_{0,8} = 0,566$ [рад.]		Примечание
	$\delta_{(i)}$, рад.	$k_{упр.} = \frac{\delta_{(i)}}{\delta_{0,7}}$	$\delta_{(i)}$, рад.	$k_{утч.} = \frac{\delta_{(i)}}{\delta_{0,8}}$	
1	2	3	4	5	6
0	0,337	1	0,566	1	Исходный режим
1	0,3532	1,048	0,578	1,021	Возникновение к.з.
2	0,4	1,187	0,612	1,081	
3	0,469	1,392	0,663	1,171	Отключение Q1
4	0,546	1,620	0,722	1,276	
5	0,624	1,852	0,784	1,385	
6	0,7	2,077	0,840	1,484	Отключение Q2
7	0,757	2,246	0,882	1,558	
8	0,79	2,344	0,904	1,597	
9	0,7966	2,364	0,903	1,595	
1	2	3	4	5	6
10	0,776	2,303	0,877	1,549	

11	0,729	2,163	0,826	1,459	Включение Q1
12	0,658	1,952	0,754	1,332	
13	0,573	1,700	0,665	1,175	
14	0,48	1,424	0,566	1	
15	0,377	1,119	0,457	0,807	Включение Q2
16	0,268	0,752	0,342	0,604	

Очевидно (рис. 29), что при APB динамическая устойчивость системы выше.

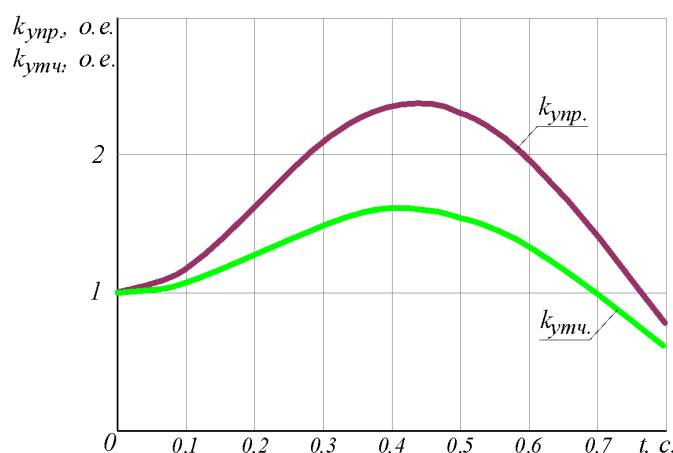


Рис. 29. Иллюстрация к табл. 7.

В случае, если напряжение на шинах генератора превышает номинальное (или заданное, например $U_{г.зад.} = 1,03$), необходимо снять форсировку возбуждения. Изменение вынужденной э.д.с. $E_{qe(\eta)}$ в режиме снятия форсировки, определяется по формуле [8]:

$$E_{qe(\eta)} = E_{qe(0)} + (E_{qe(\eta-1)} - E_{qe(0)}) \cdot e^{-\left[\frac{(t_{(i)} - t_{(\eta)})}{T_e}\right]}, \quad (24)$$

где η – номер расчетного интервала, на котором снимается форсировка;

$E_{qe(\eta-1)}$ – значение вынужденной э.д.с. на момент снятия форсировки, т.е. в конце предыдущего интервала. Эта э.д.с. определялась еще по формуле (24);

$t_{(\eta)}$ – время, соответствующее левой границе интервала, на котором началось снятие форсировки возбуждения;

$t_{(i)}$ – время, соответствующее правой границе расчетного интервала, (с).

Пример 4. – Для электрической системы, исходные и расчетные данные которой определены в примере 3, выполнить уточненную оценку устойчивости динамического

перехода при простейшем учете действия АРВ и наличии контроля напряжения на шинах генератора. Принять $U_{г.зад.} = 1,03$. Рассмотреть только вариант успешного АПВ.

Решение. Поскольку все необходимые величины уже определены в предыдущем примере, расчет начинаем с первого интервала. Необходимые данные берем из табл. 8 и заполняем аналогичную табл. 8. Отличие этой таблицы от предыдущей: для того, чтобы графы заполнялись в последовательности расчетов, столбец $P_{(i)}$ поставлен вторым, и после него добавлен столбец $U_{г(i)}$. Таблица 8 приведена после расчетов для четвертого интервала.

Первый интервал – от 0 до 0,05 с.;

$$E_{q(0)} = \frac{E'_{q(0)} - U_c \cdot \frac{\frac{x_d}{n_r} \cdot \frac{x_d}{n_r} \cdot \cos \delta_0}{x_{12(ав.р.1)}}}{1 - \frac{\frac{x_d}{n_r} \cdot \frac{x_d}{n_r}}{x_{11(ав.р.1)}}} = \frac{1,329 - 1 \cdot \frac{1,6}{4} \cdot \frac{0,28}{4} \cdot \cos(0,566)}{1 - \frac{1,6}{4} \cdot \frac{0,28}{4} \cdot \frac{0,469}}{0,469}} = 3,989.$$

Активная мощность генератора в начале первого интервала

$$P_{(0)} = \frac{E_{q(0)} \cdot U_c}{x_{12(ав.р.1)}} \cdot \sin(\delta_0) = \frac{3,989 \cdot 1}{1,898} \cdot \sin(0,566) = 1,127.$$

Продольная составляющая напряжения на шинах генератора

$$U_{гq(0)} = E'_{q(0)} \cdot \frac{x_d}{x_d - x'_d} - E_{q(0)} \cdot \frac{x'_d}{x_d - x'_d} = 1,329 \cdot \frac{1,6}{1,6 - 0,28} - 3,989 \cdot \frac{0,28}{1,6 - 0,28} = 0,765.$$

$$B_{(0)} = tg(\delta_{U_{гq(0)}}) = \frac{P_{(0)} \cdot \left(\frac{x_d}{n_r}\right)}{E_{q(0)} \cdot U_{гq(0)}} = \frac{1,127 \cdot \left(\frac{1,6}{4}\right)}{3,989 \cdot 0,765} = 0,148.$$

Напряжение на шинах генератора

$$U_{г(0)} = \frac{U_{гq(0)}}{\cos(\arctg(B_{(0)}))} = \frac{0,765}{\cos(\arctg(0,148))} = 0,773 < 1,03.$$

Поскольку напряжение не превысило заданное значение, дальнейший расчет аналогичен предыдущему примеру.

Второй интервал – от 0,05 до 0,1 с.

Изменение вынужденной э.д.с. за рассчитываемый интервал ($t_{(2)} = 0,1$)

$$E_{q(1)} = \frac{E'_{q(1)} - U_c \cdot \frac{\frac{x_d}{n_r} \cdot \frac{x_d}{n_r} \cdot \cos \delta_{(1)}}{x_{12(ав.р.1)}}}{1 - \frac{\frac{x_d}{n_r} \cdot \frac{x_d}{n_r}}{x_{11(ав.р.1)}}} = \frac{1,3147 - 1 \cdot \frac{1,6}{4} \cdot \frac{0,28}{4} \cdot \cos(0,5776)}{1 - \frac{1,6}{4} \cdot \frac{0,28}{4} \cdot \frac{0,469}}{0,469}} = 3,944.$$

$$P_{(1)} = \frac{E_{q(1)} \cdot U_c}{x_{12(ав.р.1)}} \cdot \sin(\delta_{(1)}) = \frac{3,944 \cdot 1}{1,898} \cdot \sin(0,5776) = 1,135$$

Продольная составляющая напряжения на шинах генератора

$$U_{гq(1)} = E'_{q(1)} \cdot \frac{x_d}{x_d - x'_d} - E_{q(1)} \cdot \frac{x'_d}{x_d - x'_d} = 1,315 \cdot \frac{1,6}{1,6 - 0,28} - 3,944 \cdot \frac{0,28}{1,6 - 0,28} = 0,757.$$

$$B_{(1)} = tg(\delta_{U_{rq(1)}}) = \frac{P_{(1)} \cdot \left(\frac{x_d}{n_r}\right)}{E_{q(1)} \cdot U_{rq(1)}} = \frac{1,135 \cdot \left(\frac{1,6}{4}\right)}{3,944 \cdot 0,757} = 0,152.$$

Напряжение на шинах генератора

$$U_{r(1)} = \frac{U_{rq(1)}}{\cos(\arctg(B_{(1)}))} = \frac{0,757}{\cos(\arctg(0,152))} = 0,765 < 1,03.$$

Поскольку напряжение не превысило заданное значение, дальнейший расчет на втором интервале также аналогичен предыдущему примеру.

Третий интервал – от 0,1 до 0,15 с. В начале интервала – отключение *QI*, переход от первого ко второму аварийному режиму. $t_{(3)} = 0,15$.

Э.д.с. холостого хода после отключения выключателя *QI* (в начале третьего интервала):

$$E_{q(2.2)} = \frac{E'_{q(2)} - U_c \cdot \frac{\left(\frac{x_d}{n_r}\right) - \left(\frac{x_d}{n_r}\right)}{x_{12(ав.р.2)}} \cdot \cos \delta_{(2)}}{1 - \frac{\left(\frac{x_d}{n_r}\right) - \left(\frac{x_d}{n_r}\right)}{x_{11(ав.р.2)}}} =$$

$$= \frac{1,3097 - 1 \cdot \frac{\left(\frac{1,6}{4}\right) - \left(\frac{0,28}{4}\right)}{0,728} \cdot \cos(0,612)}{1 - \frac{\left(\frac{1,6}{4}\right) - \left(\frac{0,28}{4}\right)}{0,639}} = 1,941.$$

Активная мощность генератора в начале третьего интервала

$$P_{(2.2)} = \frac{E_{q(2.2)} \cdot U_c}{x_{12(ав.р.2)}} \cdot \sin(\delta_{(2)}) = \frac{1,941 \cdot 1}{0,728} \cdot \sin(0,612) = 1,533,$$

Продольная составляющая напряжения на шинах генератора

$$U_{rq(2)} = E'_{q(2)} \cdot \frac{x_d}{x_d - x'_d} - E_{q(2.2)} \cdot \frac{x'_d}{x_d - x'_d} = 1,310 \cdot \frac{1,6}{1,6 - 0,28} - 1,941 \cdot \frac{0,28}{1,6 - 0,28} = 1,176.$$

$$B_{(2)} = tg(\delta_{U_{rq(2)}}) = \frac{P_{(2.2)} \cdot \left(\frac{x_d}{n_r}\right)}{E_{q(2.2)} \cdot U_{rq(2)}} = \frac{1,533 \cdot \left(\frac{1,6}{4}\right)}{1,941 \cdot 1,176} = 0,269.$$

Напряжение на шинах генератора

$$U_{r(2)} = \frac{U_{rq(2)}}{\cos(\arctg(B_{(2)}))} = \frac{1,176}{\cos(\arctg(0,269))} = 1,217 > 1,03.$$

Так как напряжение на шинах генератора превышает заданное, форсировка прекращается и вынужденная Э.д.с. изменяется по закону

$$E_{qe(3)} = E_{qe(0)} + (E_{qe(2)} - E_{qe(0)}) \cdot e^{-\left[\frac{(t_{(3,прав)} - t_{(3,лев)})}{T_e}\right]} =$$

$$= 2,058 + (3,803 - 2,058) \cdot e^{-\left[\frac{(0,15 - 0,1)}{0,12}\right]} = 3,208.$$

$$E_{qe(3)ср.} = \frac{E_{qe(2)} + E_{qe(3)}}{2} = \frac{3,803 + 3,208}{2} = 3,505.$$

Изменение переходной Э.д.с. в течение третьего расчетного интервала:

$$\Delta E'_{q(3)} = \frac{E_{qe(3)cp} - E_{q(2.2)}}{T_{d0}} \cdot \Delta t = \frac{3,505 - 1,941}{4,9} \cdot 0,05 = 0,016.$$

Величина переходной э.д.с. в конце третьего интервала

$$E'_{q(3)} = E'_{q(2)} + \Delta E'_{q(3)} = 1,310 + 0,016 = 1,326.$$

Все остальные величины те же, что и в третьем интервале предыдущего примера.

Четвертый интервал – от 0,15 до 0,2 с.

Э.д.с. холостого хода:

$$E_{q(3)} = \frac{E'_{q(3)} - U_c \cdot \frac{\frac{x_d}{n_r} - \frac{x_d'}{n_r}}{x_{12(ав.р.2)}} \cdot \cos \delta_{(3)}}{1 - \frac{\frac{x_d}{n_r} - \frac{x_d'}{n_r}}{x_{11(ав.р.2)}}} = \frac{1,326 - 1 \cdot \frac{\frac{1,6}{4} - \frac{0,28}{4}}{0,728} \cdot \cos(0,663)}{1 - \frac{\frac{1,6}{4} - \frac{0,28}{4}}{0,639}} = 2,003.$$

Активная мощность генератора в начале четвертого интервала

$$P_{(3)} = \frac{E_{q(3)} \cdot U_c}{x_{12(ав.р.2)}} \cdot \sin(\delta_{(3)}) = \frac{2,003 \cdot 1}{0,728} \cdot \sin(0,663) = 1,692,$$

Продольная составляющая напряжения на шинах генератора

$$U_{rq(3)} = E'_{q(3)} \cdot \frac{x_d}{x_d - x_d'} - E_{q(3)} \cdot \frac{x_d'}{x_d - x_d'} = 1,326 \cdot \frac{1,6}{1,6 - 0,28} - 2,003 \cdot \frac{0,28}{1,6 - 0,28} = 1,182.$$

$$B_{(3)} = \operatorname{tg}(\delta_{Urq(3)}) = \frac{P_{(3)} \cdot \left(\frac{x_d}{n_r}\right)}{E_{q(3)} \cdot U_{rq(3)}} = \frac{1,692 \cdot \left(\frac{1,6}{4}\right)}{2,003 \cdot 1,182} = 0,286.$$

Напряжение на шинах генератора

$$U_{r(3)} = \frac{U_{rq(3)}}{\cos(\operatorname{arctg}(B_{(3)}))} = \frac{1,182}{\cos(\operatorname{arctg}(0,286))} = 1,23 > 1,03.$$

$$E_{qe(4)} = E_{qe(0)} + (E_{qe(2)} - E_{qe(0)}) \cdot e^{-\left[\frac{(t_{(4,прав)} - t_{(3,лев.)})}{T_e}\right]} =$$

$$= 2,058 + (3,803 - 2,058) \cdot e^{-\left[\frac{(0,2 - 0,1)}{0,12}\right]} = 2,816.$$

$$E_{qe(4)cp} = \frac{E_{qe(3)} + E_{qe(4)}}{2} = \frac{3,208 + 2,816}{2} = 3,012.$$

Изменение переходной э.д.с. в течение третьего расчетного интервала:

$$\Delta E'_{q(4)} = \frac{E_{qe(4)cp} - E_{q(3)}}{T_{d0}} \cdot \Delta t = \frac{3,012 - 2,003}{4,9} \cdot 0,05 = 0,01.$$

Величина переходной э.д.с. в конце третьего интервала

$$E'_{q(4)} = E'_{q(3)} + \Delta E'_{q(4)} = 1,326 + 0,01 = 1,336.$$

Далее рассчитываются приращение угла $\Delta \delta_{(4)}$ и угол $\delta_{(4)}$ к концу четвертого интервала. Величина $\Delta P_{(3)}$ по сравнению с предыдущим примером почти не изменилась (в примере 8: $\Delta P_{(3)} = 0,299 \cong 0,3$, в примере 9: $\Delta P_{(3)} = 0,308 \cong 0,31$), поэтому угол $\delta_{(4)}$

получился таким же: $\delta_{(4)} = 0,722$.

На следующих интервалах расчеты ведутся в том же порядке, что и выше. Результаты приведены в табл. 10. Заливкой выделены параметры, величины которых изменились по сравнению с примером 8.

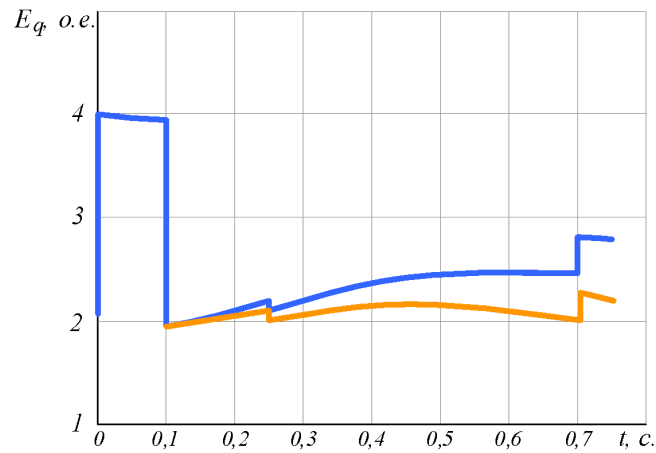


Рис. 42. Изменение во времени э.д.с. холостого хода E_q . Отключению форсировки возбуждения соответствует нижняя линия.

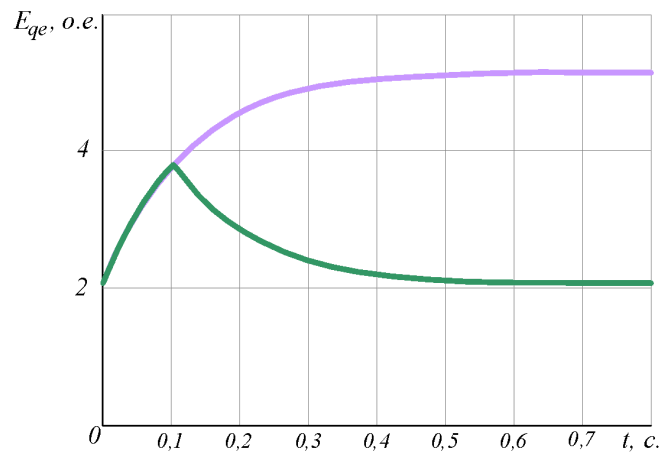


Рис. 43. Изменение во времени вынужденной э.д.с. холостого хода E_{qe} . Отключению форсировки возбуждения соответствует нижняя линия.

Таблица 8

Результаты расчетов по интервалам для примера 9.

Номер интервал а (i)	$E_{q(i)}$, о.е.	$P_{(i)}$, о.е.	$U_{r(i)}$, о.е.	$E_{qe(i)}$, о.е.	$E_{qe(i)cp}$, о.е.	$\Delta E'_{q(i)}$, о.е.	$E'_{q(i)}$, о.е.	$\Delta P_{(i)}$, о.е.	$\alpha_{(i)}$, о.е.	$\Delta \delta_{(i)}$, рад.	$\delta_{(i)}$, рад.	Примечание
0	2,058			2,058			1,329				0,566	Исходный режим
1	3,989	1,126	0,773	3,11	2,584	-0,0143	1,315	0,873	9,261	0,0116	0,578	К.з. на линии Л2, первый аварийный режим
2	3,944	1,135	0,765	3,803	3,456	-0,0050	1,310	0,865	9,176	0,0345	0,612	
3	3,938 1,941	1,193 1,533	1,217	3,208	3,505	0,016	1,326	0,807 0,467	8,561 4,954	0,0514	0,663	Отключение Q1, переход от первого ко второму аварийному режиму
4	2,003	1,692	1,230	2,816	3,012	0,010	1,336	0,308	3,267	0,0596	0,722	
5	2,059	1,870	1,237	2,558	2,687	0,0064	1,342	0,130	1,379	0,0630	0,785	
6	2,112 2,011	2,051 2,211	1,278	2,388	2,473	0,0047	1,347	-0,051 -0,211	-0,542 -2,240	0,0595	0,844	Отключение Q2, переход от второго аварийного режима к послеаварийному
7	2,067	2,404	1,281	2,275	2,331	0,0027	1,350	-0,404	-4,286	0,0488	0,893	
8	2,112	2,558	1,283	2,201	2,238	0,0013	1,351	-0,558	-5,924	0,0340	0,927	
9	2,142	2,665	1,283	2,152	2,176	0,0003	1,351	-0,665	-7,054	0,0160	0,943	
10	2,157	2,714	1,283	2,120	2,136	-0,0002	1,351	-0,714	-7,574	-0,0030	0,940	
11	2,153	2,705	1,283	2,099	2,109	-0,0004	1,350	-0,705	-7,481	-0,0217	0,918	Включение Q1, АПВ КОН успешное, холостой ход Л2, продолжается послеаварийный режим
12	2,134	2,635	1,283	2,085	2,092	-0,0004	1,350	-0,635	-6,736	-0,0438	0,874	
13	2,096	2,510	1,284	2,076	2,081	-0,0002	1,349	-0,510	-5,410	-0,0573	0,817	
14	2,051	2,326	1,284	2,070	2,073	0,0002	1,350	-0,326	-3,458	-0,0660	0,751	
15	2,002 2,278	2,123 2,825	1,254	2,066	2,068	-0,0021	1,348	-0,123 -0,825	-1,305 -8,752	-0,0785	0,672	Включение Q2, переход от послеаварийного к нормальному режиму
16	2,195	2,486	1,253	2,063	2,064	-0,0013	1,346	-0,486	-5,155	-0,0914	0,581	

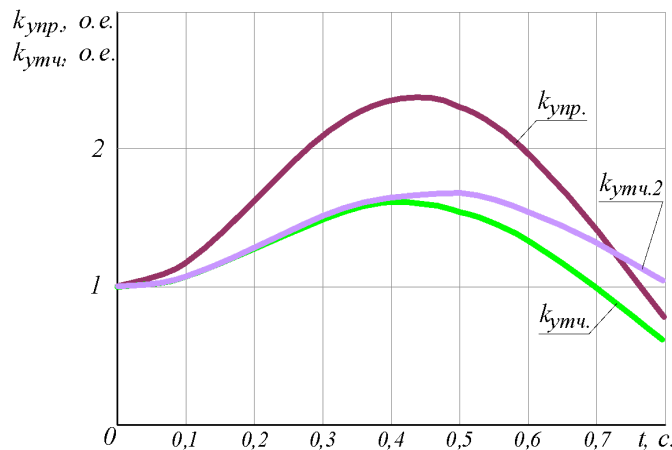


Рис. 32. Изменение угла вылета ротора при выражении угла $\delta_{(i)}$ в долях от соответствующего начального угла. Отключению форсировки возбуждения соответствует линия $k_{\text{умч.2}}$.

Форсировка возбуждения снимается после отключения к.з. на линии со стороны станции выключателем $Q1$ – рис. 33. В результате динамический переход занимает больший промежуток времени – линия $k_{\text{умч.2}}$ на рис. 44.

Если в системе имеются явнополюсные синхронные генераторы, то они, как уже отмечалось выше, при уточненном расчете вводятся в схему замещения индуктивным сопротивлением x_q . Кроме того, при определении параметров исходного режима и далее, на каждом интервале, необходимо находить фиктивную э.д.с.: E_{Q0} для нормального (исходного) режима и $E_{Q(i)}$ – в процессе оценки динамического перехода. Эти нюансы показаны ниже, в примере 10.

Пример 5 Для электрической системы, изображенной на рис. 33, выполнить уточненную оценку устойчивости динамического перехода – с учетом действия АРВ.

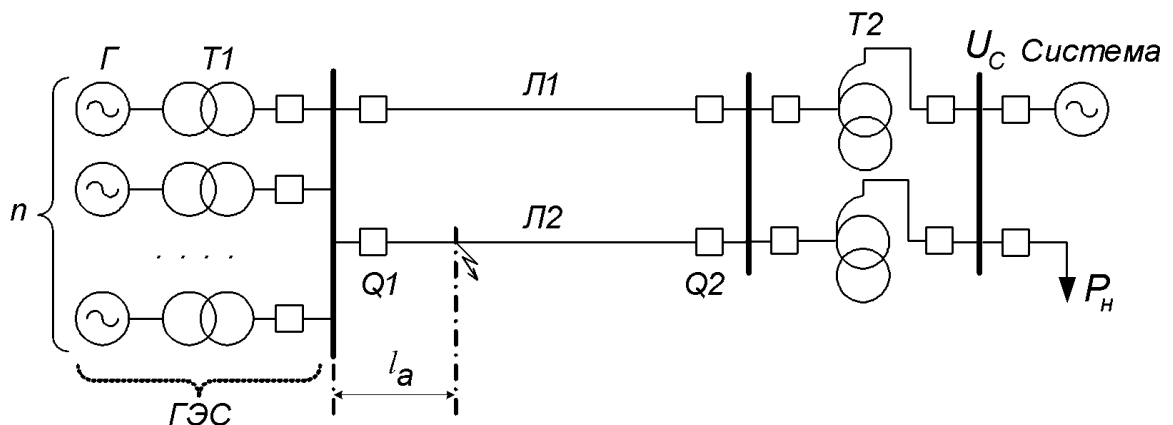


Рис. 33. Электрическая система для примера 5.

Станция – ГЭС с явнополюсными генераторами. Для уменьшения объема расчетов алгоритм развития аварии и параметры элементов системы взять из предыдущего примера, дополнив параметры генератора сопротивлением $x_q = 0,96$.

Решение. Для того, чтобы показать особенности расчетов для системы, содержащей явнополюсные машины, достаточно рассмотреть только первый интервал. Схема замещения системы в начальный момент переходного процесса:

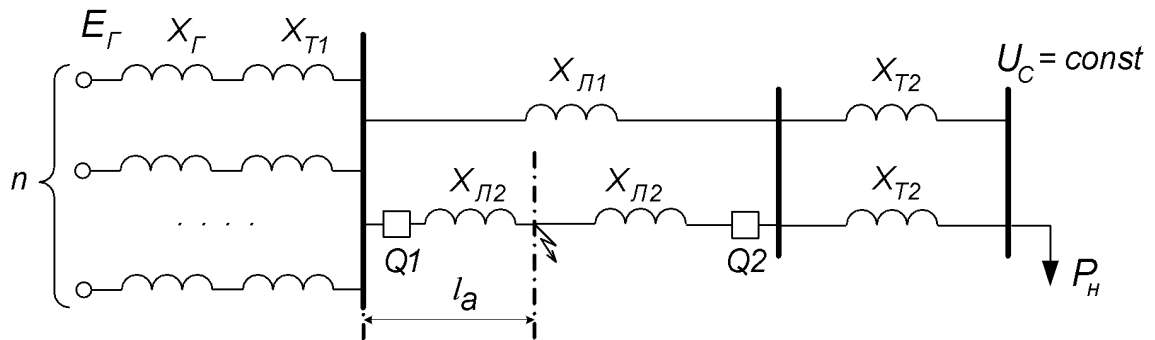


Рис. 34. Схема замещения системы в момент возникновения к.з.

Параметры элементов системы и параметры режима (из предыдущих примеров, в относительных единицах).

Генератор: $x_d = 1,6$; $x_q = 0,96$; $x_d' = 0,28$; $x_{Г.ОП} = x_2 = 0,24$; $n_Г = 4$.

Остальные элементы системы и параметры режима:

$x_{T1} = 0,098$; $x_{T2} = 0,066$; $x_{Л1} = x_{Л2} = 0,186$;

$U_c = 1$; $P_H = 2$; $Q_H = 1,344$.

Э.д.с. за сопротивлением x_q :

$$x_{ГЭВ.4} = \frac{x_q}{n_Г} = \frac{0,96}{4} = 0,24;$$

$$E_Q = \sqrt{\left(U_c + \frac{Q_H(x_{ГЭВ.4} + x_{внеш.})}{U_c}\right)^2 + \left(\frac{P_H(x_{ГЭВ.4} + x_{внеш.})}{U_c}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(1 + \frac{1,344(0,24+0,15)}{1}\right)^2 + \left(\frac{2,0(0,24+0,15)}{1}\right)^2} = 1,712;$$

$$\delta_{iQ} = \arctg \frac{P_i \left(\tilde{A}_{\tilde{y}\hat{a}.4} + \tilde{\alpha}_{\hat{a}\hat{o}.} \right)}{U_c^2 + Q_i \left(\tilde{A}_{\tilde{y}\hat{a}.4} + \tilde{\alpha}_{\hat{a}\hat{o}.} \right)} = \arctg \frac{2,0(0,24+0,15)}{1+1,344(0,24+0,15)} = 0,473$$

[рад.];

Э.д.с. за переходным сопротивлением x_d' :

$$x_{\Gamma_{\text{экв.2}}} = \frac{x_d'}{n_r} = \frac{0,28}{4} = 0,07;$$

$$E' = \sqrt{\left(U_c + \frac{Q_{\text{H}}(x_{\Gamma_{\text{экв.2}}} + x_{\text{внеш}})}{U_c}\right)^2 + \left(\frac{P_{\text{H}}(x_{\Gamma_{\text{экв.2}}} + x_{\text{внеш}})}{U_c}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(1 + \frac{1,344(0,07+0,15)}{1}\right)^2 + \left(\frac{2,0(0,07+0,15)}{1}\right)^2} = 1,368;$$

$$\delta_i' = \arctg \frac{P_i (\delta_{\tilde{A}, \dot{y} \hat{a}.2} + \delta_{\hat{a}i \hat{a} \emptyset .})}{U_c^2 + Q_i (\delta_{\tilde{A}, \dot{y} \hat{a}.2} + \delta_{\hat{a}i \hat{a} \emptyset .})} = \arctg \frac{2,0(0,07+0,15)}{1+1,344(0,07+0,15)} = 0,327 \quad [\text{рад.}];$$

$$E_{q2}' = E' \cdot \cos(\delta_{oq} - \delta_o') = 1,368 \cdot \cos(0,473 - 0,327) = 1,353$$

Э.д.с. за синхронным продольным сопротивлением x_d :

$$\dot{A}_q^{(\ddot{y})} = \dot{A}_Q \frac{x_d - x_d'}{x_q - x_d'} - \dot{A}_{q2}' \frac{x_d - x_q}{x_q - x_d'} = 1,712 \frac{1,6 - 0,28}{0,96 - 0,28} - 1,353 \frac{1,6 - 0,96}{0,96 - 0,28} = 2,05$$

Определим собственные и взаимные сопротивления схемы замещения для всех возможных режимов системы.

Исходный (нормальный) режим:

$$x_{11(\text{н.р.})} = x_{12(\text{н.р.})} = \frac{x_q}{n_r} + \frac{x_{T1}}{n_r} + \frac{x_{\text{Л1}}}{2} + \frac{x_{T2}}{2} = \frac{0,96}{4} + \frac{0,098}{4} + \frac{0,186}{2} + \frac{0,066}{2} = 0,39$$

Первый аварийный режим ($x_{\Gamma} = x_q = 0,96, x_{\text{ш1}} = 0,0316$)

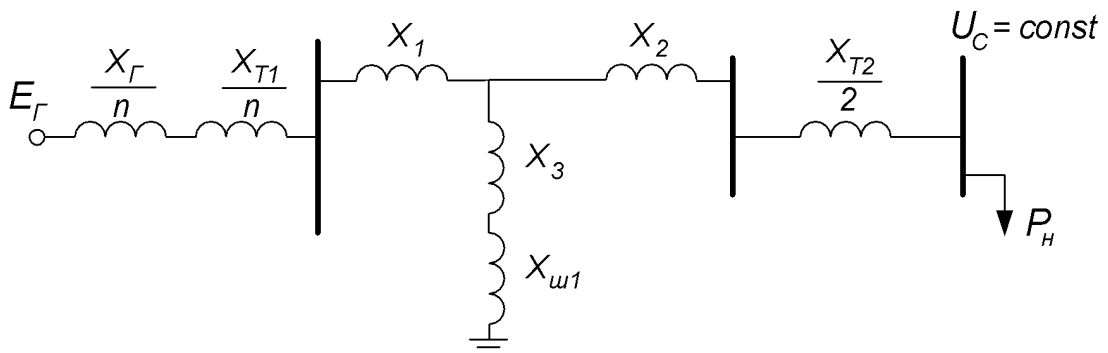


Рис. 35. Схема замещения прямой последовательности для определения собственного и взаимного сопротивления первого аварийного режима.

$$x_8 = \frac{x_\Gamma}{n_r} + \frac{x_{T1}}{n_r} + x_1 = \frac{0,96}{4} + \frac{0,098}{4} + 0,0186 = 0,2831;$$

$$x_9 = x_2 + \frac{x_{T2}}{2} = 0,0744 + \frac{0,066}{2} = 0,1074;$$

$$x_{10} = x_3 + x_{ш1} = 0,0037 + 0,0316 = 0,0353;$$

$$x_{11(ав.р.1)} = x_8 + \frac{x_9 \cdot x_{10}}{x_9 + x_{10}} = 0,2831 + \frac{0,1074 \cdot 0,0353}{0,1074 + 0,0353} = 0,3097;$$

$$x_{12(ав.р.1)} = x_8 + x_9 + \frac{x_8 \cdot x_9}{x_{10}} = 0,2831 + 0,1074 + \frac{0,2831 \cdot 0,1074}{0,0353} = 1,2518.$$

Второй аварийный режим ($x_\Gamma = x_q = 0,96$, $x_{ш2} = 0,089$)

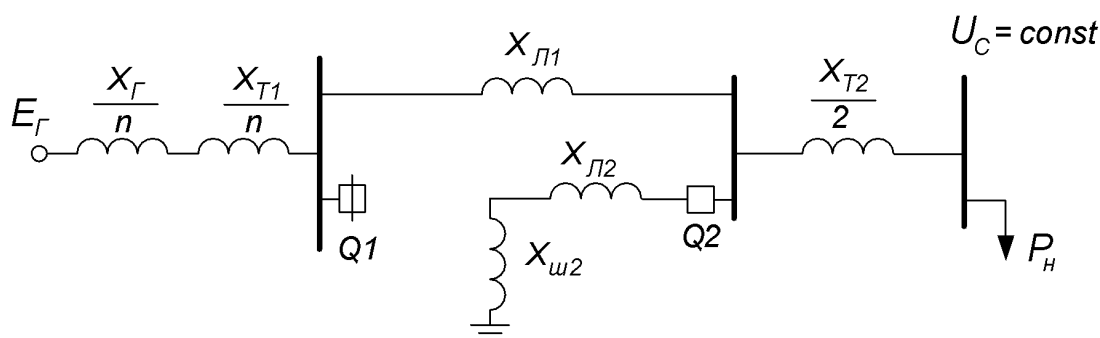


Рис. 36. Схема замещения прямой последовательности для определения собственного и взаимного сопротивления второго аварийного режима.

$$x_{15} = \frac{x_\Gamma}{n_r} + \frac{x_{T1}}{n_r} + x_{Л1} = \frac{0,96}{4} + \frac{0,098}{4} + 0,186 = 0,45;$$

$$x_{16} = \frac{x_{T2}}{2} = \frac{0,066}{2} = 0,033;$$

$$x_{17} = x_{Л2} + x_{ш2} = 0,149 + 0,089 = 0,238.$$

$$x_{11(ав.р.2)} = x_{15} + \frac{x_{16} \cdot x_{17}}{x_{16} + x_{17}} = 0,45 + \frac{0,033 \cdot 0,238}{0,033 + 0,238} = 0,479;$$

$$x_{12(ав.р.2)} = x_{15} + x_{16} + \frac{x_{15} \cdot x_{16}}{x_{17}} = 0,45 + 0,033 + \frac{0,45 \cdot 0,033}{0,238} = 0,545.$$

Третий аварийный режим ($x_\Gamma = x_q = 0,96$, $x_{ш3} = 0,057$)

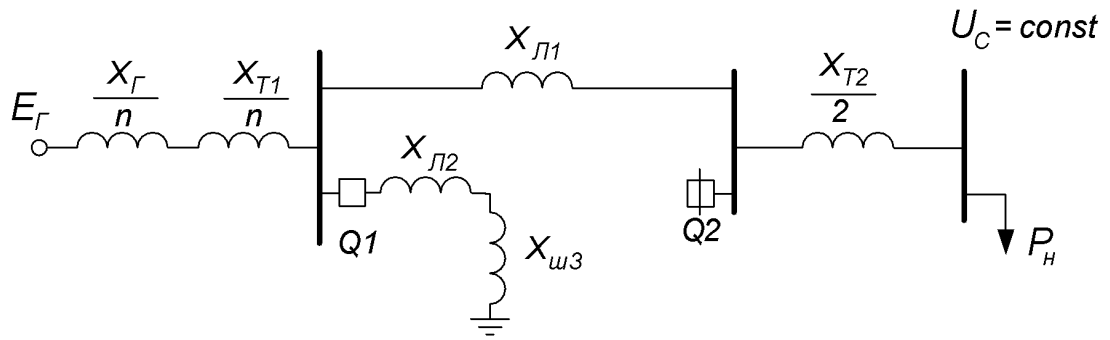


Рис. 37. Схема замещения прямой последовательности для определения собственного и взаимного сопротивления третьего аварийного режима.

$$x_{22} = \frac{x_f}{n_f} + \frac{x_{T1}}{n_f} = \frac{0,96}{4} + \frac{0,098}{4} = 0,264;$$

$$x_{23} = x_{L1} + \frac{x_{T2}}{2} = 0,186 + \frac{0,066}{2} = 0,219;$$

$$x_{24} = x'_{L2} + x_{ш2} = 0,0372 + 0,057 = 0,0942.$$

$$x_{11(ав.р.3)} = x_{22} + \frac{x_{23} \cdot x_{24}}{x_{23} + x_{24}} = 0,264 + \frac{0,219 \cdot 0,0942}{0,219 + 0,0942} = 0,329;$$

$$x_{12(ав.р.3)} = x_{22} + x_{23} + \frac{x_{22} \cdot x_{23}}{x_{24}} = 0,264 + 0,219 + \frac{0,264 \cdot 0,219}{0,0942} = 1,097.$$

Послеаварийный режим:

$$x_{11(п/а.р)} = x_{12(п/а.р)} = \frac{x_q}{n_f} + \frac{x_{T1}}{n_f} + x_{L1} + \frac{x_{T2}}{2} = \frac{0,96}{4} + \frac{0,098}{4} + 0,186 + \frac{0,066}{2} = 0,483$$

Оцениваем динамическую устойчивость рассматриваемой системы для первого варианта

Первый интервал – от 0 до 0,05 с.; в начале интервала на линии 2 произошло двухфазное к.з. на землю.

Расчетная э.д.с. фиктивной неявнополюсной машины в первый момент нарушения режима определяется по формуле (22) при подстановке в нее следующих величин:

$$x_f = x_q = 0,96; \quad x_{11(ав.р.1)} = 0,3097; \quad x_{12(ав.р.1)} = 1,2518;$$

$$E'_{q(0)} = E'_{q2} = 1,353;$$

$$\delta_{(0)} = \delta_{oQ} = 0,473.$$

$$E_{Q(0)} = \frac{E'_{q(0)} - U_c \cdot \frac{\frac{x_q}{n_f} - \frac{x_d}{n_f}}{x_{12(ав.р.1)}} \cdot \cos \delta_{(0)}}{1 - \frac{\frac{x_q}{n_f} - \frac{x_d}{n_f}}{x_{11(ав.р.1)}}} = \frac{1,353 - 1 \cdot \frac{0,96 - 0,28}{1,2518} \cdot \cos(0,473)}{1 - \frac{0,96 - 0,28}{0,3097}} = 2,731.$$

Активная мощность генератора в начале первого интервала

$$P_{(0)} = \frac{E_{Q(0)} \cdot U_c}{x_{12(\text{ав.п.1})}} \cdot \sin(\delta_{(0)}) = \frac{2,731 \cdot 1}{1,2518} \cdot \sin(0,473) = 0,995.$$

Продольная составляющая напряжения на шинах генератора

$$U_{rq(0)} = E'_{q(0)} \cdot \frac{x_q}{x_q - x'_d} - E_{Q(0)} \cdot \frac{x'_d}{x_q - x'_d} = 1,353 \cdot \frac{0,96}{0,96 - 0,28} - 2,731 \cdot \frac{0,28}{0,96 - 0,28} = 0,785$$

$$B_{(0)} = \operatorname{tg}(\delta_{Urq(0)}) = \frac{P_{(0)} \cdot \left(\frac{x_q}{n_r}\right)}{E_{Q(0)} \cdot U_{rq(0)}} = \frac{0,995 \cdot \left(\frac{0,96}{4}\right)}{2,731 \cdot 0,785} = 0,111.$$

Напряжение на шинах генератора

$$U_{r(0)} = \frac{U_{rq(0)}}{\cos(\arctg(B_{(0)}))} = \frac{0,785}{\cos(\arctg(0,111))} = 0,790 < 1,03.$$

Поскольку напряжение на шинах генератора не превышает заданного, изменение вынужденной э.д.с. за первый интервал рассчитываем по формуле (21), $t_{(1)} = 0,05$,

$$T_e = 0,12, \quad E_{qe(0)} = \frac{\ddot{A}}{q} = 2,05 :$$

$$\begin{aligned} E_{qe(1)} &= E_{qe(0)} \cdot \left(k_{\text{форс.}} - (k_{\text{форс.}} - 1) \cdot e^{-\left(\frac{t_{(1)}}{T_e}\right)} \right) = \\ &= 2,05 \cdot \left(2,5 - (2,5 - 1) \cdot e^{-\left(\frac{0,05}{0,12}\right)} \right) = 3,098. \end{aligned}$$

Среднее значение $E_{qe(1)\text{ср.}}$ за первый интервал:

$$E_{qe(1)\text{ср.}} = \frac{E_{qe(0)} + E_{qe(1)}}{2} = \frac{E_{qe0} + E_{qe(1)}}{2} = \frac{2,05 + 3,098}{2} = 2,574.$$

Зная $E_{Q(0)}$, найдем э.д.с. холостого хода $E_{q(0)}$:

$$E_{q(0)} = E_{Q(0)} \frac{x'_d - x'_d}{x_q - x'_d} - E'_{q(0)} \frac{x'_d - x_q}{x_q - x'_d} = 2,731 \cdot \frac{1,6 - 0,28}{0,96 - 0,28} - 1,353 \cdot \frac{1,6 - 0,96}{0,96 - 0,28} = 4,028.$$

Изменение переходной э.д.с. в течение первого расчетного интервала ($T_{d0} = 4,9$ [с]):

$$\Delta E'_{q(1)} = \frac{E_{qe(1)\text{ср.}} - E_{q(0)}}{T_{d0}} \cdot \Delta t = \frac{2,574 - 4,028}{4,9} \cdot 0,05 = -0,0148.$$

Величина переходной э.д.с. в конце первого интервала

$$E'_{q(1)} = E'_{q(0)} + \Delta E'_{q(1)} = 1,353 - 0,0148 = 1,338.$$

Небаланс мощности $\Delta P_{(0)} = P_o - P_{(0)} = 2,0 - 0,995 = 1,005.$

$$\alpha_{(1)} = \frac{\Delta P_{(0)}}{T_{j\Sigma}} \cdot \omega_o = \frac{1,005}{29,6} \cdot 314 = 10,661;$$

$$\Delta\delta_{(1)} = \alpha_{(1)} \cdot \frac{(\Delta t)^2}{2} = 10,661 \cdot \frac{(0,05)^2}{2} = 0,0133 \text{ [рад.]};$$

$$\delta_{(1)} = \delta_{(0)} + \Delta\delta_{(1)} = 0,473 + 0,0133 = 0,486 \text{ [рад.]}. \quad \delta_{(1)}$$

В результате расчета определены значения $E'_{q(1)}$ и $\delta_{(1)}$ в начале второго интервала, по которым находится величина э.д.с. $E_{q(1)}$ и все последующие параметры режима, т.е. расчет повторяется для второго интервала. При изменении режима в начале k -го интервала приращение угла $\Delta\delta_{(k)}$ определяют по формулам (19) – (21). Вид остальных уравнений при изменении режима остается неизменным, меняются лишь значения собственных и взаимных сопротивлений схемы замещения [4], что и было показано в примерах 3 и 4.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дать понятие статической устойчивости электрической системы.
2. Какие требования должны быть соблюдены, чтобы генератор, работающий в простейшей системе, отдавал активную мощность в приёмную систему?
3. Каковы особенности явнополюсной синхронной машины при анализе устойчивости?
4. Чем представляется в схеме замещения синхронная машина без АРВ, с АРВ ПД и АРВ СД при упрощенных расчетах устойчивости?
5. Как выражается критерий статической устойчивости?
6. Как следует изменить ток возбуждения генератора при росте и уменьшении угла δ для улучшения устойчивости и затухания колебаний?
7. Дать понятие динамической устойчивости
8. Как записывается критерий динамической устойчивости простейшей системы?
9. Как определяются предельный угол и время отключения к.з?
10. Какой характер имеют изменения угла генератора во времени при сохранении устойчивости и её потере?
11. Какое влияние оказывает постоянная инерции генератора на динамическую устойчивость?
12. Как влияет удаление точки трехфазного К.З. от начала линии на величину максимума активной мощности аварийного режима (одноцепная и двухцепная передачи)?
13. В каких случаях можно получить аналитическое решение уравнения движения ротора синхронного генератора?

14. Как меняете запас статической устойчивости асинхронного двигателя при увеличении мощности питающего его генератора?
15. Как выражаются прямой и вторичной критерии устойчивости узла нагрузки?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. – М.: Энергия, 1970. – 520 с.
2. Методика расчетов устойчивости автоматизированных электрических систем / Под ред. Веникова В.А. – М.; Высшая школа, 1966. – 248 с.
3. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. – М.: Высшая школа, 1978. – 415 с.
4. Жданов П.С. Вопросы устойчивости электрических систем. – М.: Энергия, 1979. – 456 с.
5. Пособие к курсовому и дипломному проектированию для электрических специальностей / Под ред. В.М. Блок. – М.: Высшая школа, 1981. – 304 с.
6. Электроэнергетические системы в примерах и иллюстрациях / Под ред. В.А. Веникова. – М.; Энергоатомиздат, 1983. – 504 с.
7. Электрическая часть электростанций и подстанций. Справочные материалы / Под ред. Б.Н. Неклепаева. – М.: Энергия, 1972. – 336 с.
8. Переходные процессы электрических систем в примерах и иллюстрациях: Учеб. пособие для вузов (В.В. Ежков, Н.И. Зеленохат, И.В. Литкенс и др.; Под ред. В.А. Строева). – М.: Знак, 1996 – 224 с.
9. Методические указания по устойчивости энергосистем. Утверждены приказом Минэнерго России № 277 от 30.06.2003. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004.
10. Куликов Ю.А. Переходные процессы в электрических системах: Учебное пособие. – Новосибирск: НГТУ, М: ООО «Изд-во АСТ», 2003. – 283 с.

11. Методические указания по выполнению курсовой работы по курсу «Электромеханические переходные процессы в электрических системах» / Сост. А.С. Степанов. – Благовещенск: Изд-во АмГУ, 1989. – 32 с.

Приложение 1

Схема простейшей электроэнергетической системы

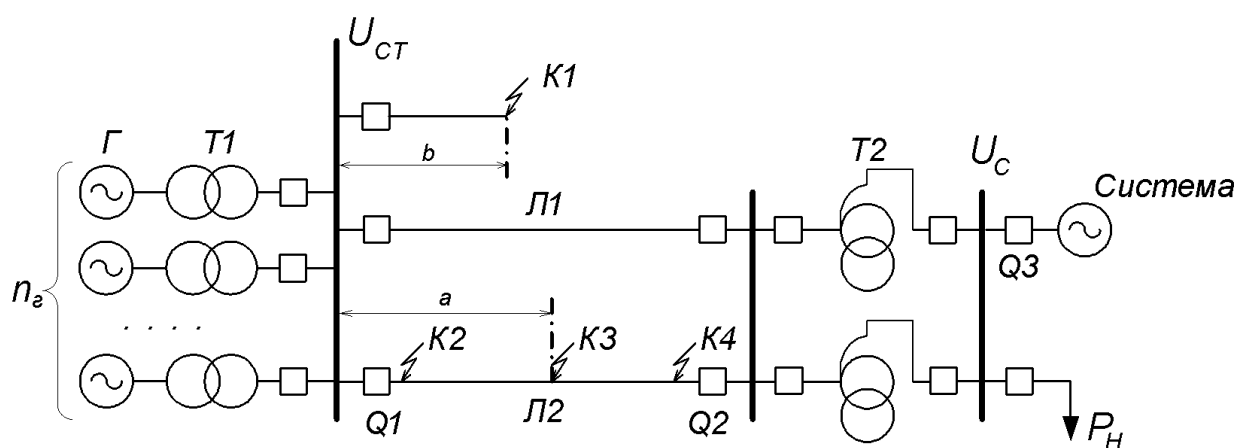


Рис.П1. Схема электропередачи и возможные точки к.з.

В каждом алгоритме возможного развития аварии (см. приложение 3) рассматривается только одна точка короткого замыкания. Точки $K2$ и $K4$ расположены в начале и в конце линии $Л2$. Положение точек $K1$ и $K3$ для разных алгоритмов задается параметрами a и b .

Приложение 2

Характеристики элементов электропередачи

Таблица П2

Вари- ант	Тип	Генератор								
		$S_{\text{ном}},$ МВА	n_{Γ}	x_d	x_q	x_d'	x_2	$T_{J'}$ с	$T_{do'}$ с	T_e' с
1	ТГ	40	4	2,45	-	0,24	0,17	6,0	10,4	0,15
2	ТГ	75	4	1,6	-	0,28	0,24	7,4	4,9	0,12
3	ТГ	117,5	3	1,78	-	0,26	0,22	7,0	6,4	0,4
4	ТГ	125	3	1,91	-	0,278	0,234	10,0	6,4	0,25
5	ТГ	188	3	1,7	-	0,3	0,26	5,0	5,4	0,1
6	ТГ	235	3	1,88	-	0,27	0,23	8,0	6,38	0,3
7	ТГ	260	2	2,32	-	0,3	0,25	6,5	5,0	0,15
8	ТГ	350	2	2,2	-	0,3	0,245	9,0	7,0	0,08
9	ТГ	353	2	2,19	-	0,3	0,24	8,5	6,5	0,12
10	ТГ	588	2	2,48	-	0,4	0,33	12,0	6,7	0,2
11	ГГ	71,5	4	0,77	0,46	0,32	0,3	4,0	9,2	0,1
12	ГГ	80,0	4	1,06	0,64	0,26	0,2	4,4	7,6	0,3
13	ГГ	85,0	4	1,23	0,74	0,34	0,26	5,0	5,2	0,22
14	ГГ	100	4	0,87	0,53	0,22	0,25	6,0	6,7	0,37
15	ГГ	130	4	1,05	0,63	0,32	0,3	7,0	8,1	0,12
16	ГГ	190	3	1,1	0,66	0,38	0,35	7,5	6,0	0,4
17	ГГ	180	3	0,73	0,44	0,29	0,3	6,0	5,0	0,2
18	ГГ	206	3	1,02	0,61	0,33	0,2	7,8	4,8	0,4
19	ГГ	306	2	1,65	1,02	0,44	0,28	10,0	5,2	0,15
20	ГГ	590	2	1,57	0,97	0,41	0,19	8,0	4,1	0,25

Продолжение таблицы П2

Трансформаторы								Линия		
Т1				Т2						
Вари- ант	$S_{\text{ном}},$ МВА	$U_{\text{к}},$ %	Группа соед.	$S_{\text{ном}},$ МВА	$U_{\text{кВН}},$ %	Группа соед.	k_{T2}	$l,$ км	$U_{\text{ном}},$ кВ	$x_0,$ Ом/км
1	40	10,5	Δ/Y	2x125	14,0	Y/Y	$\frac{110}{220}$	60	110	0,4
2	80	10,5	Δ/Y	2x125	14,0	Y/Y	$\frac{110}{220}$	75	110	0,4
3	125	11,0	Δ/Y	2x200	11,5	Y/Y	$\frac{110}{220}$	80	110	0,4
4	125	11,0	Δ/Y	2x200	11,5	Y/Y	$\frac{110}{220}$	100	110	0,4
5	200	11,0	Δ/Y	2x250	11,5	Y/Y	$\frac{220}{500}$	70	220	0,4
6	250	11,0	Δ/Y	3x250	11,5	Y/Y	$\frac{220}{500}$	60	220	0,4
7	400	13,0	Δ/Y	3x250	11,5	Y/Y	$\frac{220}{500}$	150	220	0,4
8	400	13,0	Δ/Y	3x250	11,5	Y/Y	$\frac{220}{500}$	120	220	0,4
9	400	13,0	Δ/Y	3x250	11,5	Y/Y	$\frac{330}{750}$	200	330	0,38
10	630	13,0	Δ/Y	4x250	11,5	Y/Y	$\frac{330}{750}$	225	330	0,38
11	80	10,5	Δ/Y	2x200	11,5	Y/Y	$\frac{110}{220}$	50	110	0,4
12	80	10,5	Δ/Y	2x200	11,5	Y/Y	$\frac{110}{220}$	60	110	0,4
13	125	11,0	Δ/Y	2x200	11,5	Y/Y	$\frac{110}{220}$	40	110	0,4

14	125	11,0	$\triangle/\text{Y}$	2x200	11,5	Y/Y	$\frac{110}{220}$	55	110	0,4
15	160	11,0	$\triangle/\text{Y}$	3x200	11,5	Y/Y	$\frac{220}{500}$	70	220	0,4
16	200	11,0	$\triangle/\text{Y}$	3x200	11,5	Y/Y	$\frac{220}{500}$	120	220	0,4
17	200	11,0	$\triangle/\text{Y}$	3x200	11,5	Y/Y	$\frac{220}{500}$	110	220	0,4
18	250	11,0	$\triangle/\text{Y}$	3x250	11,5	Y/Y	$\frac{220}{500}$	150	220	0,4
19	400	13,0	$\triangle/\text{Y}$	3x250	11,5	Y/Y	$\frac{330}{750}$	180	330	0,38
20	630	13,0	$\triangle/\text{Y}$	5x250	11,5	Y/Y	$\frac{330}{750}$	200	330	0,38

Продолжение таблицы П2

Мощность, передаваемая в систему					Напряжение системы
Вариант	$P_{\text{н}},$ МВт	$\cos\phi$	Скольжение s_0	$T_j,$ с	$U_c,$ кВ
1	90	0,81	0,035	2	220
2	150	0,83	0,03	6	220
3	160	0,82	0,032	4	220
4	170	0,84	0,025	8	220
5	180	0,85	0,022	7	500
6	200	0,78	0,02	9	500
7	220	0,79	0,018	10	500
8	250	0,80	0,017	6	500
9	400	0,77	0,02	5	750
10	700	0,76	0,021	8	750
11	120	0,81	0,035	2	220
12	150	0,83	0,03	6	220
13	160	0,82	0,032	4	220
14	170	0,84	0,025	8	220
15	180	0,85	0,022	7	500
16	200	0,78	0,02	9	500
17	220	0,79	0,018	10	500
18	250	0,80	0,017	6	500
19	400	0,77	0,02	5	750
20	800	0,76	0,021	8	750

Приложение 3

Алгоритмы развития аварии

Таблица ПЗ

Вари-ант	Алгоритм развития аварии
1	2
А1	В точке $K2$ – трехфазное к.з., сопровождающееся отказом основной защиты – поперечной дифференциальной – с обеих сторон линии. В результате выключатель $Q1$ (со стороны $T1$) отключен первой ступенью дистанционной защиты: $t_{\text{с.з.}} = 0$, $t_{\text{о.в.}} = 0,1\text{с}$; выключатель $Q2$ (со стороны $T2$) – второй ступенью дистанционной защиты: $t_{\text{с.з.}} = 0,05\text{с}$, $t_{\text{о.в.}} = 0,1\text{с}$. АПВ с контролем отсутствия напряжения - на $Q2$, $t_{\text{АПВ}} = 0,15\text{с}$, $t_{\text{в.в.}} = 0,05\text{с}$. АПВ с контролем наличия напряжения - на $Q1$, $t_{\text{АПВ}} = 0,1\text{с}$, $t_{\text{в.в.}} = 0,05\text{с}$. АПВ – успешное. Как и на какой стадии изменится развитие переходного процесса в случае неуспешного АПВ?
А2	В точке $K2$ – двухфазное к.з. на землю, сопровождающееся отказом основной защиты – поперечной дифференциальной – с обеих сторон линии. В результате выключатель $Q1$ (со стороны $T1$) отключен первой ступенью дистанционной защиты: $t_{\text{с.з.}} = 0$, $t_{\text{о.в.}} = 0,1\text{с}$; выключатель $Q2$ (со стороны $T2$) – второй ступенью дистанционной защиты: $t_{\text{с.з.}} = 0,05\text{с}$, $t_{\text{о.в.}} = 0,1\text{с}$. АПВ с контролем отсутствия напряжения - на $Q2$, $t_{\text{АПВ}} = 0,15\text{с}$, $t_{\text{в.в.}} = 0,05\text{с}$. АПВ с контролем наличия напряжения - на $Q1$, $t_{\text{АПВ}} = 0,1\text{с}$, $t_{\text{в.в.}} = 0,05\text{с}$. АПВ – неуспешное. Как и на какой стадии изменится развитие переходного процесса в случае успешного АПВ?
А3	В точке $K4$ – трехфазное к.з., сопровождающееся отказом основной защиты – поперечной дифференциальной – с обеих сторон линии. В результате выключатель $Q2$ (со стороны $T2$) отключен первой ступенью дистанционной защиты: $t_{\text{с.з.}} = 0$, $t_{\text{о.в.}} = 0,1\text{с}$; выключатель $Q1$ (со стороны $T1$) – второй ступенью дистанционной защиты: $t_{\text{с.з.}} = 0,05\text{с}$, $t_{\text{о.в.}} = 0,1\text{с}$. АПВ с контролем отсутствия напряжения - на $Q1$, $t_{\text{АПВ}} = 0,15\text{с}$, $t_{\text{в.в.}} = 0,05\text{с}$. АПВ с контролем наличия напряжения - на $Q2$,

	$t_{\text{АПВ}} = 0,1\text{с}, t_{\text{в.в.}} = 0,05\text{с}$. АПВ – успешное. Как и на какой стадии изменится развитие переходного процесса в случае неуспешного АПВ?
А4	В точке $K4$ – однофазное к.з., сопровождающееся отказом основной защиты – поперечной дифференциальной – с обеих сторон линии. В результате выключатель $Q2$ (со стороны $T2$) отключен первой ступенью ТЗНП: $t_{\text{с.з.}} = 0, t_{\text{о.в.}} = 0,1\text{с}$; выключатель $Q1$ (со стороны $T1$) – второй ступенью ТЗНП: $t_{\text{с.з.}} = 0,05\text{с}, t_{\text{о.в.}} = 0,1\text{с}$. АПВ с контролем отсутствия напряжения - на $Q1$, $t_{\text{АПВ}} = 0,15\text{с}, t_{\text{в.в.}} = 0,05\text{с}$. АПВ с контролем наличия напряжения - на $Q2$, $t_{\text{АПВ}} = 0,1\text{с}, t_{\text{в.в.}} = 0,05\text{с}$. АПВ – неуспешное. Как и на какой стадии изменится развитие переходного процесса в случае успешного АПВ?

Продолжение таблицы ПЗ

1	2
А5	В точке $K3$, на расстоянии $a = 0,5 \cdot l_{\text{Л2}}$ от шин станции – трехфазное к.з. Работает основная защита – поперечная дифференциальная – с обеих сторон линии. В результате выключатель $Q1$ (со стороны $T1$) отключен: $t_{\text{с.з.}} = 0, t_{\text{о.в.}} = 0,1\text{с}$; выключатель $Q2$ (со стороны $T2$): $t_{\text{с.з.}} = 0\text{с}, t_{\text{о.в.}} = 0,15\text{с}$. АПВ с контролем отсутствия напряжения - на $Q2$, $t_{\text{АПВ}} = 0,15\text{с}, t_{\text{в.в.}} = 0,05\text{с}$. АПВ с контролем наличия напряжения - на $Q1$, $t_{\text{АПВ}} = 0,1\text{с}, t_{\text{в.в.}} = 0,05\text{с}$. АПВ – успешное. Как изменится развитие переходного процесса, если спустя $0,15\text{с}$ после аварии произойдет импульсная разгрузка турбогенератора?
А6	В начале линии, находящейся под охранным напряжением, в точке $K1$ – двухфазное к.з. ($b = 0$). Выключатель линии отключен первой ступенью дистанционной защиты: $t_{\text{с.з.}} = 0, t_{\text{о.в.}} = 0,1\text{с}$; Сработало АПВ: $t_{\text{АПВ}} = 0,15\text{с}, t_{\text{в.в.}} = 0,05\text{с}$. АПВ – неуспешное, после АПВ к.з. переросло в трехфазное, работа защит - аналогичная. Как изменится развитие переходного процесса, если спустя $0,1\text{с}$ после аварии произойдет отключение части генераторов (25% от активной мощности нагрузки)?
А7	В точке $K2$ – двухфазное к.з., сопровождающееся временным отказом основной защиты – поперечной дифференциальной – на дальнем конце линии (к.з. - в зоне каскадного действия защиты). В результате выключатель $Q1$ (со стороны $T1$) отключен основной защитой: $t_{\text{с.з.}} = 0, t_{\text{о.в.}} = 0,1\text{с}$; выключатель $Q2$ (со стороны $T2$) – также основной защитой, но только после отключения $Q1$: $t_{\text{с.з.}} = 0\text{с}, t_{\text{о.в.}} = 0,1\text{с}$. АПВ с контролем отсутствия напряжения - на $Q2$, $t_{\text{АПВ}} = 0,1\text{с}, t_{\text{в.в.}} = 0,05\text{с}$. АПВ с контролем наличия напряжения - на $Q1$, $t_{\text{АПВ}} = 0,1\text{с}, t_{\text{в.в.}} = 0,05\text{с}$. АПВ – успешное. Как и на какой стадии изменится развитие переходного процесса в случае неуспешного АПВ?
А8	В точке $K4$ – двухфазное к.з., сопровождающееся временным отказом основной защиты – поперечной дифференциальной – на ближнем конце линии (к.з. - в зоне каскадного действия защиты). В результате выключатель $Q2$ (со стороны $T2$) отключен основной защитой: $t_{\text{с.з.}} = 0, t_{\text{о.в.}} = 0,1\text{с}$; выключатель $Q1$ (со стороны $T1$) – также основной защитой, но только после отключения $Q2$: $t_{\text{с.з.}} = 0\text{с}, t_{\text{о.в.}} = 0,1\text{с}$. АПВ с контролем отсутствия напряжения - на $Q1$, $t_{\text{АПВ}} = 0,1\text{с}, t_{\text{в.в.}} = 0,05\text{с}$. АПВ с контролем наличия напряжения - на $Q2$, $t_{\text{АПВ}} = 0,1\text{с}, t_{\text{в.в.}} = 0,05\text{с}$. АПВ – успешное. Как и на какой стадии изменится развитие переходного процесса в случае неуспешного АПВ?

A9	В точке $K4$ – двухфазное к.з., сопровождающееся временным отказом основной защиты – поперечной дифференциальной – на ближнем конце линии (к.з. - в зоне каскадного действия защиты). В результате выключатель $Q2$ (со стороны $T2$) отключен основной защитой: $t_{\text{с.з.}} = 0, t_{\text{о.в.}} = 0,1\text{с}$; выключатель $Q1$ (со стороны $T1$) – также основной защитой, но только после отключения $Q2$: $t_{\text{с.з.}} = 0\text{с}, t_{\text{о.в.}} = 0,1\text{с}$. АПВ с контролем отсутствия напряжения - на $Q2$, $t_{\text{АПВ}} = 0,1\text{с}, t_{\text{в.в.}} = 0,05\text{с}$. АПВ с контролем наличия напряжения - на $Q1$, $t_{\text{АПВ}} = 0,1\text{с}, t_{\text{в.в.}} = 0,05\text{с}$. АПВ – успешное. Как и на какой стадии изменится развитие переходного процесса в случае неуспешного АПВ?
----	--

Продолжение таблицы ПЗ

1	2
A10	В точке $K4$ – двухфазное к.з., сопровождающееся временным отказом основной защиты – поперечной дифференциальной – на ближнем конце линии (к.з. - в зоне каскадного действия защиты). В результате выключатель $Q2$ (со стороны $T2$) отключен основной защитой: $t_{\text{с.з.}} = 0, t_{\text{о.в.}} = 0,1\text{с}$; выключатель $Q1$ (со стороны $T1$) – также основной защитой, но только после отключения $Q2$: $t_{\text{с.з.}} = 0\text{с}, t_{\text{о.в.}} = 0,1\text{с}$. АПВ с контролем отсутствия напряжения - на $Q2$, $t_{\text{АПВ}} = 0,1\text{с}, t_{\text{в.в.}} = 0,05\text{с}$. АПВ с контролем наличия напряжения - на $Q1$, $t_{\text{АПВ}} = 0,1\text{с}, t_{\text{в.в.}} = 0,05\text{с}$. АПВ – неуспешное. Как и на какой стадии изменится развитие переходного процесса в случае успешного АПВ?
A11	В точке $K3$, на расстоянии $a = 0,3 \cdot l_{\text{Л2}}$ от шин станции – двухфазное к.з. Работает основная защита – поперечная дифференциальная – с обеих сторон линии. В результате выключатель $Q1$ (со стороны $T1$) отключен: $t_{\text{с.з.}} = 0, t_{\text{о.в.}} = 0,15\text{с}$; выключатель $Q2$ (со стороны $T2$): $t_{\text{с.з.}} = 0\text{с}, t_{\text{о.в.}} = 0,1\text{с}$. АПВ с контролем отсутствия напряжения - на $Q1$, $t_{\text{АПВ}} = 0,15\text{с}, t_{\text{в.в.}} = 0,05\text{с}$. АПВ с контролем наличия напряжения - на $Q2$, $t_{\text{АПВ}} = 0,1\text{с}, t_{\text{в.в.}} = 0,05\text{с}$. АПВ – успешное. Как и на какой стадии изменится развитие переходного процесса в случае неуспешного АПВ?
A12	В точке $K3$, на расстоянии $a = 0,7 \cdot l_{\text{Л2}}$ от шин станции – двухфазное к.з. Работает основная защита – поперечная дифференциальная – с обеих сторон линии. В результате выключатель $Q1$ (со стороны $T1$) отключен: $t_{\text{с.з.}} = 0, t_{\text{о.в.}} = 0,15\text{с}$; выключатель $Q2$ (со стороны $T2$): $t_{\text{с.з.}} = 0\text{с}, t_{\text{о.в.}} = 0,1\text{с}$. АПВ с контролем отсутствия напряжения - на $Q1$, $t_{\text{АПВ}} = 0,15\text{с}, t_{\text{в.в.}} = 0,05\text{с}$. АПВ с контролем наличия напряжения - на $Q2$, $t_{\text{АПВ}} = 0,1\text{с}, t_{\text{в.в.}} = 0,05\text{с}$. АПВ – неуспешное. Как и на какой стадии изменится развитие переходного процесса в случае успешного АПВ?
A13	В точке $K1$, на расстоянии $b = 0,2 \cdot l_{\text{Л2}}$ от шин станции – однофазное к.з. Выключатель линии отключен первой ступенью ТЗНП: $t_{\text{с.з.}} = 0, t_{\text{о.в.}} = 0,1\text{с}$; Сработало АПВ: $t_{\text{АПВ}} = 0,2\text{с}, t_{\text{в.в.}} = 0,05\text{с}$. АПВ – неуспешное, после АПВ к.з. переросло в двухфазное на землю, работа защит - аналогичная. Как изменится развитие переходного процесса, если спустя $0,1\text{с}$ после его начала произойдет импульсная разгрузка турбины?
A14	В точке $K2$ – однофазное к.з. Выключатель $Q1$ (со стороны $T1$) отключен первой ступенью ТЗНП: $t_{\text{с.з.}} = 0, t_{\text{о.в.}} = 0,1\text{с}$; выключатель $Q2$ (со стороны $T2$) – второй

	ступенью ТЗНП: $t_{\text{с.з.}} = 0,05\text{с}$, $t_{\text{о.в.}} = 0,1\text{с}$. АПВ с контролем отсутствия напряжения - на $Q2$, $t_{\text{АПВ}} = 0,15\text{с}$, $t_{\text{в.в.}} = 0,05\text{с}$. АПВ с контролем наличия напряжения - на $Q1$, $t_{\text{АПВ}} = 0,1\text{с}$, $t_{\text{в.в.}} = 0,05\text{с}$. АПВ – успешное. Как и на какой стадии изменится развитие переходного процесса в случае неуспешного АПВ?
--	--

Продолжение таблицы ПЗ

1	2
A15	В точке $K4$ – однофазное к.з., сопровождающееся отказом основной защиты – поперечной дифференциальной – с обеих сторон линии. В результате выключатель $Q2$ (со стороны $T2$) отключен первой ступенью ТЗНП: $t_{\text{с.з.}} = 0$, $t_{\text{о.в.}} = 0,1\text{с}$; выключатель $Q1$ (со стороны $T1$) – второй ступенью ТЗНП: $t_{\text{с.з.}} = 0,05\text{с}$, $t_{\text{о.в.}} = 0,1\text{с}$. АПВ с контролем отсутствия напряжения - на $Q1$, $t_{\text{АПВ}} = 0,1\text{с}$, $t_{\text{в.в.}} = 0,05\text{с}$. АПВ с контролем наличия напряжения - на $Q2$, $t_{\text{АПВ}} = 0,1\text{с}$, $t_{\text{в.в.}} = 0,05\text{с}$. АПВ – неуспешное. После АПВ работа защиты – аналогичная.
A16	В точке $K3$, на расстоянии $a = 0,6 \cdot l_{\text{Л2}}$ от шин станции – однофазное к.з. Работает основная защита – поперечная дифференциальная – с обеих сторон линии. В результате выключатель $Q1$ (со стороны $T1$) отключен: $t_{\text{с.з.}} = 0$, $t_{\text{о.в.}} = 0,1\text{с}$; выключатель $Q2$ (со стороны $T2$): $t_{\text{с.з.}} = 0\text{с}$, $t_{\text{о.в.}} = 0,15\text{с}$. АПВ с контролем отсутствия напряжения - на $Q2$, $t_{\text{АПВ}} = 0,15\text{с}$, $t_{\text{в.в.}} = 0,05\text{с}$. АПВ с контролем наличия напряжения - на $Q1$, $t_{\text{АПВ}} = 0,1\text{с}$, $t_{\text{в.в.}} = 0,05\text{с}$. АПВ – успешное. Как изменится ход переходного процесса, если спустя $0,1\text{с}$ после его начала включится электрическое торможение генераторов ($t_{\text{э.т.}} = 0,1\text{с}$, наброс мощности при торможении – 20% от первоначальной мощности нагрузки)?
A17	В точке $K1$, на расстоянии $b = 0,35 \cdot l_{\text{Л2}}$ от шин станции – однофазное к.з. Выключатель линии отключен первой ступенью ТЗНП: $t_{\text{с.з.}} = 0$, $t_{\text{о.в.}} = 0,1\text{с}$; Сработало АПВ: $t_{\text{АПВ}} = 0,2\text{с}$, $t_{\text{в.в.}} = 0,05\text{с}$. АПВ – неуспешное, после АПВ к.з. переросло в двухфазное на землю, работа защит - аналогичная. Как и на какой стадии изменится ход переходного процесса, если АПВ будет успешным?
A18	В точке $K3$, на расстоянии $a = 0,38 \cdot l_{\text{Л2}}$ от шин станции – однофазное к.з. Работает основная защита – поперечная дифференциальная – с обеих сторон линии. В результате выключатель $Q1$ (со стороны $T1$) отключен: $t_{\text{с.з.}} = 0$, $t_{\text{о.в.}} = 0,1\text{с}$; выключатель $Q2$ (со стороны $T2$): $t_{\text{с.з.}} = 0\text{с}$, $t_{\text{о.в.}} = 0,15\text{с}$. АПВ с контролем отсутствия напряжения - на $Q2$, $t_{\text{АПВ}} = 0,15\text{с}$, $t_{\text{в.в.}} = 0,05\text{с}$. АПВ с контролем наличия напряжения - на $Q1$, $t_{\text{АПВ}} = 0,1\text{с}$, $t_{\text{в.в.}} = 0,05\text{с}$. АПВ – неуспешное. Как изменится развитие переходного процесса, если спустя $0,15\text{с}$ после аварии произойдет отключение части генераторов (40% от первоначальной мощности нагрузки)?
A19	В точке $K2$ – трехфазное к.з., сопровождающееся отказом основной защиты – поперечной дифференциальной – с обеих сторон линии. В результате выключатель $Q1$ (со стороны $T1$) отключен первой ступенью дистанционной защиты: $t_{\text{с.з.}} = 0$, $t_{\text{о.в.}} = 0,1\text{с}$; выключатель $Q2$ (со стороны $T2$) – второй ступенью дистанционной

	защиты: $t_{\text{с.з.}} = 0,05\text{с}$, $t_{\text{о.в.}} = 0,1\text{с}$. АПВ с контролем отсутствия напряжения - на $Q2$, $t_{\text{АПВ}} = 0,15\text{с}$, $t_{\text{в.в.}} = 0,05\text{с}$. АПВ с контролем наличия напряжения - на $Q1$, $t_{\text{АПВ}} = 0,1\text{с}$, $t_{\text{в.в.}} = 0,05\text{с}$. АПВ – успешное. Как и на какой стадии изменится развитие переходного процесса в случае неуспешного АПВ?
--	--

Продолжение таблицы ПЗ

1	2
A20	В точке $K2$ – двухфазное к.з. на землю, сопровождающееся отказом основной защиты – поперечной дифференциальной – с обеих сторон линии. В результате выключатель $Q1$ (со стороны $T1$) отключен первой ступенью дистанционной защиты: $t_{\text{с.з.}} = 0$, $t_{\text{о.в.}} = 0,1\text{с}$; выключатель $Q2$ (со стороны $T2$) – второй ступенью дистанционной защиты: $t_{\text{с.з.}} = 0,05\text{с}$, $t_{\text{о.в.}} = 0,1\text{с}$. АПВ с контролем отсутствия напряжения - на $Q2$, $t_{\text{АПВ}} = 0,15\text{с}$, $t_{\text{в.в.}} = 0,05\text{с}$. АПВ с контролем наличия напряжения - на $Q1$, $t_{\text{АПВ}} = 0,1\text{с}$, $t_{\text{в.в.}} = 0,05\text{с}$. АПВ – неуспешное. Как и на какой стадии изменится развитие переходного процесса в случае успешного АПВ?
A21	В точке $K4$ – трехфазное к.з., сопровождающееся отказом основной защиты – поперечной дифференциальной – с обеих сторон линии. В результате выключатель $Q2$ (со стороны $T2$) отключен первой ступенью дистанционной защиты: $t_{\text{с.з.}} = 0$, $t_{\text{о.в.}} = 0,1\text{с}$; выключатель $Q1$ (со стороны $T1$) – второй ступенью дистанционной защиты: $t_{\text{с.з.}} = 0,05\text{с}$, $t_{\text{о.в.}} = 0,1\text{с}$. АПВ с контролем отсутствия напряжения - на $Q1$, $t_{\text{АПВ}} = 0,15\text{с}$, $t_{\text{в.в.}} = 0,05\text{с}$. АПВ с контролем наличия напряжения - на $Q2$, $t_{\text{АПВ}} = 0,1\text{с}$, $t_{\text{в.в.}} = 0,05\text{с}$. АПВ – успешное. Как и на какой стадии изменится развитие переходного процесса в случае неуспешного АПВ?
A22	В точке $K4$ – однофазное к.з., сопровождающееся отказом основной защиты – поперечной дифференциальной – с обеих сторон линии. В результате выключатель $Q2$ (со стороны $T2$) отключен первой ступенью ТЗНП: $t_{\text{с.з.}} = 0$, $t_{\text{о.в.}} = 0,1\text{с}$; выключатель $Q1$ (со стороны $T1$) – второй ступенью ТЗНП: $t_{\text{с.з.}} = 0,05\text{с}$, $t_{\text{о.в.}} = 0,1\text{с}$. АПВ с контролем отсутствия напряжения - на $Q1$, $t_{\text{АПВ}} = 0,15\text{с}$, $t_{\text{в.в.}} = 0,05\text{с}$. АПВ с контролем наличия напряжения - на $Q2$, $t_{\text{АПВ}} = 0,1\text{с}$, $t_{\text{в.в.}} = 0,05\text{с}$. АПВ – неуспешное. Как и на какой стадии изменится развитие переходного процесса в случае успешного АПВ?
A23	В точке $K3$, на расстоянии $a = 0,55 \cdot l_{\text{Л2}}$ от шин станции – трехфазное к.з. Работает основная защита – поперечная дифференциальная – с обеих сторон линии. В результате выключатель $Q1$ (со стороны $T1$) отключен: $t_{\text{с.з.}} = 0$, $t_{\text{о.в.}} = 0,1\text{с}$; выключатель $Q2$ (со стороны $T2$): $t_{\text{с.з.}} = 0\text{с}$, $t_{\text{о.в.}} = 0,15\text{с}$. АПВ с контролем отсутствия напряжения - на $Q2$, $t_{\text{АПВ}} = 0,15\text{с}$, $t_{\text{в.в.}} = 0,05\text{с}$. АПВ с контролем наличия напряжения - на $Q1$, $t_{\text{АПВ}} = 0,1\text{с}$, $t_{\text{в.в.}} = 0,05\text{с}$. АПВ – успешное. Как изменится развитие переходного процесса, если спустя $0,15\text{с}$ после аварии произойдет импульсная разгрузка турбогенератора?
A24	В точке $K1$, на расстоянии $b = 0,25 \cdot l_{\text{Л2}}$ от шин станции – двухфазное к.з. Выключатель линии отключен первой ступенью дистанционной защиты: $t_{\text{с.з.}} = 0$, $t_{\text{о.в.}} = 0,1\text{с}$; Сработало АПВ: $t_{\text{АПВ}} = 0,15\text{с}$, $t_{\text{в.в.}} = 0,05\text{с}$. АПВ – неуспешное, после АПВ к.з. переросло в трехфазное, работа защит - аналогичная. Как изменится развитие переходного процесса, если спустя $0,1\text{с}$ после аварии произойдет отключение части генераторов (25% от активной мощности нагрузки)?

1	2
A25	В точке $K2$ – двухфазное к.з., сопровождающееся временным отказом основной защиты – поперечной дифференциальной – на дальнем конце линии (к.з. - в зоне каскадного действия защиты). В результате выключатель $Q1$ (со стороны $T1$) отключен основной защитой: $t_{\text{с.з.}} = 0, t_{\text{о.в.}} = 0, 1\text{с}$; выключатель $Q2$ (со стороны $T2$) – также основной защитой, но только после отключения $Q1$: $t_{\text{с.з.}} = 0\text{с}, t_{\text{о.в.}} = 0, 1\text{с}$. АПВ с контролем отсутствия напряжения - на $Q2$, $t_{\text{АПВ}} = 0, 1\text{с}, t_{\text{в.в.}} = 0, 05\text{с}$. АПВ с контролем наличия напряжения - на $Q1$, $t_{\text{АПВ}} = 0, 1\text{с}, t_{\text{в.в.}} = 0, 05\text{с}$. АПВ – успешное. Как и на какой стадии изменится развитие переходного процесса в случае неуспешного АПВ?
A26	В точке $K4$ – двухфазное к.з., сопровождающееся временным отказом основной защиты – поперечной дифференциальной – на ближнем конце линии (к.з. - в зоне каскадного действия защиты). В результате выключатель $Q2$ (со стороны $T2$) отключен основной защитой: $t_{\text{с.з.}} = 0, t_{\text{о.в.}} = 0, 1\text{с}$; выключатель $Q1$ (со стороны $T1$) – также основной защитой, но только после отключения $Q2$: $t_{\text{с.з.}} = 0\text{с}, t_{\text{о.в.}} = 0, 1\text{с}$. АПВ с контролем отсутствия напряжения - на $Q1$, $t_{\text{АПВ}} = 0, 1\text{с}, t_{\text{в.в.}} = 0, 05\text{с}$. АПВ с контролем наличия напряжения - на $Q2$, $t_{\text{АПВ}} = 0, 1\text{с}, t_{\text{в.в.}} = 0, 05\text{с}$. АПВ – успешное. Как и на какой стадии изменится развитие переходного процесса в случае неуспешного АПВ?
A27	В точке $K4$ – двухфазное к.з., сопровождающееся временным отказом основной защиты – поперечной дифференциальной – на ближнем конце линии (к.з. - в зоне каскадного действия защиты). В результате выключатель $Q2$ (со стороны $T2$) отключен основной защитой: $t_{\text{с.з.}} = 0, t_{\text{о.в.}} = 0, 1\text{с}$; выключатель $Q1$ (со стороны $T1$) – также основной защитой, но только после отключения $Q2$: $t_{\text{с.з.}} = 0\text{с}, t_{\text{о.в.}} = 0, 1\text{с}$. АПВ с контролем отсутствия напряжения - на $Q2$, $t_{\text{АПВ}} = 0, 1\text{с}, t_{\text{в.в.}} = 0, 05\text{с}$. АПВ с контролем наличия напряжения - на $Q1$, $t_{\text{АПВ}} = 0, 1\text{с}, t_{\text{в.в.}} = 0, 05\text{с}$. АПВ – успешное. Как и на какой стадии изменится развитие переходного процесса в случае неуспешного АПВ?
A28	В точке $K4$ – двухфазное к.з., сопровождающееся временным отказом основной защиты – поперечной дифференциальной – на ближнем конце линии (к.з. - в зоне каскадного действия защиты). В результате выключатель $Q2$ (со стороны $T2$) отключен основной защитой: $t_{\text{с.з.}} = 0, t_{\text{о.в.}} = 0, 1\text{с}$; выключатель $Q1$ (со стороны $T1$) – также основной защитой, но только после отключения $Q2$: $t_{\text{с.з.}} = 0\text{с}, t_{\text{о.в.}} = 0, 1\text{с}$. АПВ с контролем отсутствия напряжения - на $Q1$, $t_{\text{АПВ}} = 0, 1\text{с}, t_{\text{в.в.}} = 0, 05\text{с}$. АПВ с контролем наличия напряжения - на $Q2$, $t_{\text{АПВ}} = 0, 1\text{с}, t_{\text{в.в.}} = 0, 05\text{с}$. АПВ – неуспешное. Как и на какой стадии изменится развитие переходного процесса в случае успешного АПВ?
A29	В точке $K3$, на расстоянии $a = 0,6 \cdot l_{\text{Л2}}$ от шин станции – двухфазное к.з. Работает основная защита – поперечная дифференциальная – с обеих сторон линии. В результате выключатель $Q1$ (со стороны $T1$) отключен: $t_{\text{с.з.}} = 0, t_{\text{о.в.}} = 0, 15\text{с}$; выключатель $Q2$ (со стороны $T2$): $t_{\text{с.з.}} = 0\text{с}, t_{\text{о.в.}} = 0, 1\text{с}$. АПВ с контролем отсутствия напряжения - на $Q1$, $t_{\text{АПВ}} = 0, 15\text{с}, t_{\text{в.в.}} = 0, 05\text{с}$. АПВ с контролем наличия напряжения - на $Q2$, $t_{\text{АПВ}} = 0, 1\text{с}, t_{\text{в.в.}} = 0, 05\text{с}$. АПВ – успешное. Как и на какой

	стадии изменится развитие переходного процесса в случае неуспешного АПВ?
<i>Продолжение таблицы ПЗ</i>	
1	2
A30	В точке K3, на расстоянии $a = 0,4 \cdot l_{Л2}$ от шин станции – двухфазное к.з. Работает основная защита – поперечная дифференциальная – с обеих сторон линии. В результате выключатель Q1 (со стороны T1) отключен: $t_{с.з.} = 0$, $t_{о.в.} = 0,15$ с; выключатель Q2 (со стороны T2): $t_{с.з.} = 0$ с, $t_{о.в.} = 0,1$ с. АПВ с контролем отсутствия напряжения - на Q1, $t_{АПВ} = 0,15$ с, $t_{в.в.} = 0,05$ с. АПВ с контролем наличия напряжения - на Q2, $t_{АПВ} = 0,1$ с, $t_{в.в.} = 0,05$ с. АПВ – неуспешное. Как и на какой стадии изменится развитие переходного процесса в случае успешного АПВ?
A31	В точке K1, на расстоянии $b = 0,65 \cdot l_{Л2}$ от шин станции – однофазное к.з. Выключатель линии отключен второй ступенью ТЗНП: $t_{с.з.} = 0,05$, $t_{о.в.} = 0,1$ с; Сработало АПВ: $t_{АПВ} = 0,25$ с, $t_{в.в.} = 0,05$ с. АПВ – неуспешное, после АПВ к.з. переросло в двухфазное на землю, работа защит - аналогичная. Как изменится развитие переходного процесса, если спустя 0,1с после его начала произойдет импульсная разгрузка турбины?
A32	В точке K2 – однофазное к.з. Выключатель Q1 (со стороны T1) отключен первой ступенью ТЗНП: $t_{с.з.} = 0$, $t_{о.в.} = 0,1$ с; выключатель Q2 (со стороны T2) – второй ступенью ТЗНП: $t_{с.з.} = 0,05$ с, $t_{о.в.} = 0,1$ с. АПВ с контролем отсутствия напряжения - на Q2, $t_{АПВ} = 0,15$ с, $t_{в.в.} = 0,05$ с. АПВ с контролем наличия напряжения - на Q1, $t_{АПВ} = 0,1$ с, $t_{в.в.} = 0,05$ с. АПВ – успешное. Как и на какой стадии изменится развитие переходного процесса в случае неуспешного АПВ?
A33	В точке K4 – однофазное к.з., сопровождающееся отказом основной защиты – поперечной дифференциальной – с обеих сторон линии. В результате выключатель Q2 (со стороны T2) отключен первой ступенью ТЗНП: $t_{с.з.} = 0$, $t_{о.в.} = 0,1$ с; выключатель Q1 (со стороны T1) – второй ступенью ТЗНП: $t_{с.з.} = 0,05$ с, $t_{о.в.} = 0,1$ с. АПВ с контролем отсутствия напряжения - на Q1, $t_{АПВ} = 0,1$ с, $t_{в.в.} = 0,05$ с. АПВ с контролем наличия напряжения - на Q2, $t_{АПВ} = 0,1$ с, $t_{в.в.} = 0,05$ с. АПВ – неуспешное. После АПВ развитие аварии – аналогичное. Как и на какой стадии изменится развитие переходного процесса в случае успешного АПВ?
A34	В точке K3, на расстоянии $a = 0,45 \cdot l_{Л2}$ от шин станции – однофазное к.з. Работает основная защита – поперечная дифференциальная – с обеих сторон линии. В результате выключатель Q1 (со стороны T1) отключен: $t_{с.з.} = 0$, $t_{о.в.} = 0,1$ с; выключатель Q2 (со стороны T2): $t_{с.з.} = 0$ с, $t_{о.в.} = 0,15$ с. АПВ с контролем отсутствия напряжения - на Q2, $t_{АПВ} = 0,15$ с, $t_{в.в.} = 0,05$ с. АПВ с контролем наличия напряжения - на Q1, $t_{АПВ} = 0,1$ с, $t_{в.в.} = 0,05$ с. АПВ – успешное. Как изменится ход переходного процесса, если спустя 0,1с после его начала включится электрическое торможение генераторов ($t_{э.т.} = 0,1$ с, наброс мощности при торможении – 20% от первоначальной мощности нагрузки)?

Продолжение таблицы ПЗ

1	2
A35	В точке K1, на расстоянии $b = 0,75 \cdot l_{Л2}$ от шин станции – двухфазное к.з.

	Выключатель линии отключен второй ступенью дистанционной защиты: $t_{с.з.} = 0,05$, $t_{о.в.} = 0,1$с; Сработало АПВ: $t_{АПВ} = 0,25$с, $t_{в.в.} = 0,05$с. АПВ – неуспешное, после АПВ к.з. переросло в трехфазное, работа защит - аналогичная. Как и на какой стадии изменится ход переходного процесса, если АПВ будет успешным?
A36	В точке КЗ, на расстоянии $a = 0,5 \cdot l_{л2}$ от шин станции – однофазное к.з. Работает основная защита – поперечная дифференциальная – с обеих сторон линии. В результате выключатель Q1 (со стороны T1) отключен: $t_{с.з.} = 0$, $t_{о.в.} = 0,1$с; выключатель Q2 (со стороны T2): $t_{с.з.} = 0$с, $t_{о.в.} = 0,15$с. АПВ с контролем отсутствия напряжения - на Q2, $t_{АПВ} = 0,15$с, $t_{в.в.} = 0,05$с. АПВ с контролем наличия напряжения - на Q1, $t_{АПВ} = 0,15$с, $t_{в.в.} = 0,05$с. АПВ – неуспешное. Как изменится развитие переходного процесса, если спустя 0,15с после аварии произойдет отключение части генераторов (40% от первоначальной мощности нагрузки)?

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Северо-Кавказский федеральный университет»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

по самостоятельной работе по дисциплине

**«Проблемы статической и динамической устойчивости электроэнергетических систем»
для студентов направления 13.04.02 «Электроэнергетика и
электротехника»**

**Магистерская программа "Мониторинг и управление режимами
электрических сетей на базе интеллектуальных
информационно-измерительных систем и технологий"**

Ставрополь, 2026 г.

Методические указания по самостоятельной работе составлены в соответствии с рабочей программы дисциплины «Проблемы статической и динамической устойчивости электроэнергетических систем» и Положения об учебно-методическом комплексе дисциплины к подготовке выпускника для получения квалификации: магистр.

Утверждены на заседании кафедры АЭСиЭ (протокол №_ от "___" _____ 2026г.)

Предназначены для студентов, обучающихся по направлению 13.04.02

«Электроэнергетика и электротехника», Магистерская программа "Мониторинг и управление режимами электрических сетей на базе интеллектуальных информационно-измерительных систем и технологий"

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Дисциплина «Проблемы статической и динамической устойчивости электроэнергетических систем» является основной, призванной формировать профессиональную подготовку магистрантов, обучающихся по направлению 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника», магистерская программа "Мониторинг и управление режимами электрических сетей на базе интеллектуальных информационно-измерительных систем и технологий" в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом высшего образования. Самостоятельная работа, наряду с аудиторными занятиями, составляет основу успешного освоения учебного курса, приобретения профессионализма и повышения компетентности.

В ходе изучения дисциплины студент должен:

Знать

проблемы статической и динамической устойчивости
электроэнергетических систем; -основные направления обеспечения
статической и динамической устойчивости

технические средства обеспечения статической и динамической
устойчивости

- -инструктивные материалы, регламентирующие расчет статической и
динамической устойчивости

Математические модели электромеханических переходных процессов в
электроэнергетических системах и их основных элементах

Уметь

проводить исследования устойчивости в электроэнергетических системах, в
том числе в сложных, при воздействии различных факторов

применять нормативные документы в области расчетов и регламентации
устойчивости систем

анализировать результаты расчета статической и динамической устойчивости
в электроэнергетических системах и их основных элементах

Владеть

навыками расчетов и исследования статической и динамической устойчивости электропередач

навыками расчетов пропускной способности электропередачи и планирования мероприятий по ее повышению

навыками построения математических моделей автоматических устройств для исследования статической и динамической устойчивости основных элементов электроэнергетических систем

Необходимо знать и помнить основные математические соотношения, характеризующие работу электроэнергетических систем, знать главные расчётные формулы, иметь представление о смежных технических дисциплинах.

.1 МЕТОДИКА САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1.1. Методика самостоятельной работы по подготовке к лекции

При подготовке к лекции в первую очередь необходимо прочитать конспект лекции.

Конспект лекции следует рассматривать как источник информации по конкретной дисциплине или группе дисциплин. Любой источник информации содержит лишь некоторый набор сведений, далеко не исчерпывающий существующие точки зрения, статистические данные, аналитические выкладки, касающиеся прямо или косвенно данной тематики. В силу этого обстоятельства конспекты лекций рекомендуется расширять и обогащать, активно используя дополнительную литературу.

Даже самого лучшего конспекта недостаточно, чтобы безупречно подготовиться к тесту, семинару, зачету, экзамену. Конспект лекций – один (но далеко не единственный) из основных источников информации по конкретному курсу, помимо рекомендованных учебников, учебных и учебно-методических пособий, научных работ, аналитических и статистических сборников и прочего. При этом преподаватель в процессе оценки знаний студента обычно ориентируется именно на прочитанные им лекции, поэтому конспекты следует использовать при подготовке к ответу в обязательном порядке.

Во-первых, тему целесообразно учить в соответствии с планом, отмеченным в конспекте. В учебниках различных авторов в соответствии с их подходом к преподаванию дисциплины темы могут излагаться в различном порядке.

Во-вторых, рекомендованная преподавателем литература по соответствующей теме, отмеченная в конспекте, будет нужна для более широкого обзора темы и охвата всех вопросов, предложенных преподавателем. При этом самостоятельно, без консультации преподавателя, дополнительную литературу подобрать достаточно сложно.

В-третьих, в конспекте содержится уже проработанная информация, не требующая детального подхода к изучению. Стиль изложения материала в различных литературных источниках далеко не всегда бывает доступным.

В-четвертых, содержание конспекта – минимум, который студент обязан знать в обязательном порядке в соответствии с учебным планом. При этом в авторских учебниках и пособиях отдельным разделам может уделяться большее внимание, чем остальным, а ваш лектор может иметь на этот счет собственное мнение.

В-пятых, конспект окажет вам большую услугу, если рассматривать его как маленькую энциклопедию важнейших вопросов, которые могут быть вам заданы преподавателем. Большинство вопросов при итоговой оценке знаний будет задано с учетом того, что в лекциях предлагались ответы на них.

1.2. Методика самостоятельной работы по подготовке к практическим занятиям

Практические занятия по дисциплине предполагают изучение определенной компьютерной технологии на примере конкретного программного продукта. В ходе самостоятельной подготовки к практическим занятиям студенты готовят программы расчетов, обрабатывают результаты и составляют отчеты.

Форма отчётности – наличие отчетов по решенным задачам, правильность которых проверяет преподаватель и делает соответствующие пометки в журнале.

В ходе самостоятельной работы студенту необходимо отслеживать научные статьи в специализированных изданиях.

1.3. Методика самостоятельной работы по самостоятельному изучению литературы

Большая часть самостоятельной работы студента состоит в **изучении литературы**. Одна из задач студента – научиться самостоятельно работать с

книгой, а это требует определенных затрат энергии и времени. Поэтому надо научиться делать эту работу рационально, то есть необходимо учиться читать.

Методы эффективной работы с книгой в целях развития интеллекта можно условно разделить на две группы:

1. Правильная организация процесса чтения
2. Повышение скорости чтения и восприятия.

В комплексе оба метода могут в 2-3 раза сократить время прочтения различных материалов.

При чтении текста мозг формирует «свою трактовку содержания» прочитанного. Происходит перекодирование сообщения на языке собственных мыслей читателя. Мозг выделяет «ядерное», сущностное значение из текста. Эффективность такой перекодировки зависит от осмысления и внимательности чтения.

Дифференциальный алгоритм чтения в соответствии с блоками позволяет реализовать логико-семантический анализ текста: вначале выделить ключевые слова, затем построить смысловые ряды и, наконец, выделив цепь знаний, сформулировать доминанту. Именно так и только так (по О.А. Андрееву) можно увидеть главное, действительно, проникнуть в суть вещей, явлений, излагаемых автором.

Возможны три основных способа чтения.

- Первый способ – артикуляция или проговаривание вслух (или почти вслух) того, что читаешь. Скорость такого чтения невелика.
- Второй способ – чтение про себя, при котором речевой процесс проявлен в форме внутренней речи, то есть без открытой артикуляции. Текст, при этом усваивается более эффективно. Способ в принципе допускает быстрое чтение.
- Третий, наиболее совершенный способ чтения – тоже молча, но в условиях максимального сжатия внутренней речи, при котором она проявляется в виде коротких залпов ключевых слов и смысловых рядов, адекватно отражающих смысл текста.

Итак, артикуляция замедляет процесс чтения и от нее необходимо избавиться. Однако не приведет ли сокращение артикуляции при повышении скорости чтения к снижению качества восприятия и осмысления полученной информации?

Как показали исследования психологов, иногда при чтении слова могут быть заменены наглядными представлениями, пространственными схемами. Целые группы слов – одним словом.

Быстро читающие люди обладают способностью, не проговаривая читаемый текст, сразу улавливать и фиксировать замысел автора, а затем усваивать его на уровне внутренней речи. В этом случае, несмотря на высокую скорость чтения, происходит глубокое понимание и усвоение прочитанного, так как основная идея понятна с самого начала. Задачу научиться такому чтению можно решать в два этапа. Первый предполагает сокращение артикуляции, если она ярко выражена, второй – овладение приемами чтения, при которых текст воспринимается крупными информационными блоками.

Перед углубленным чтением любого текста (статьи, книги, конспекта, лекции перед экзаменом) сначала бегло просмотрите его целиком. При этом постарайтесь выявить основные стержневые идеи, наиболее крупные части и логику их изложения. Лишь после такого просмотра переходите к более детальному чтению.

Перед чтением статьи или параграфа учебника попробуйте проделать следующее: прочитайте внимательно первый абзац, потом бегло просмотрите первые или последние фразы следующих абзацев (в них обычно содержится основная информация), обратите внимание на курсивы, разрядки, подзаголовочный текст и, наконец, внимательно прочтите один-два последних абзаца; постарайтесь выявить основное направление текста и его построение.

Прочитав в тексте интересную идею, полезно остановить свое внимание на ней, прислушаться к тем мыслям, которые она у вас вызвала,

подумать о тех последствиях, которые из нее вытекают, попытаться развивать ее дальше.

Существенно замедляют чтение регрессии – частые возвратные движения глаз, многократное повторное прочитывание материала. Возвратиться к уже прочитанному, но недостаточно хорошо понятому участку лучше всего, когда прочитан законченный смысловой фрагмент текста и сделана хотя бы попытка его осмысления, а не в процессе чтения предложения.

Любой текст не однороден по своей информационной насыщенности. В некоторых предложениях, абзацах сконцентрировано очень много информации, например, формулируются основные положения, ведущие идеи и т.д., а другие служат лишь иллюстрацией, фоном. Таким образом, текст имеет «смысловой рельеф». Чем точнее читатель умеет определить степень важности каждого отрезка текста и приспособить к «смысловому барьеру» способ своего чтения (то есть замедлить и углубить в более важных местах и ускорять в менее важных), тем продуктивнее чтение. Постарайтесь гибко варьировать способ работы с текстом в соответствии с его «смысловым барьером».

Чтобы чтение было эффективным, попробуйте по прочитанному всегда отвечать на 6 вопросов: *«Кто делает? Что делает? Когда? Почему? Где? Как?»*

Самостоятельная работа с книгой может быть успешной, если текст не только прочитан, но и законспектирован. Существует несколько **форм записей**, но любая форма записи не даст нужного результата, если не будет пробуждать мысли того, кто ее ведет, если отсутствует активная работа ума и формирование своих выводов из прочитанного.

Выбор формы записи зависит от индивидуальных особенностей человека, его образованности и опыта. При этом не меньшую роль играет назначение записей, то есть то, какие задачи ставит перед собой человек (для самообразования, для выступления на семинаре, для использования в

будущем).

Введение записей мобилизует наряду со зрительной памятью, также и моторную память. Кроме того, у человека, систематически ведущего записи изучаемой литературы, создается свой фонд материалов для быстрого повторения и мобилизации накопленных знаний.

Все записи должны быть убористыми и компактными. Интервалы между строками должны быть достаточными, чтобы вписывать дополнения. Рекомендуется вести записи ручкой, а карандашом или ручкой другого цвета пользоваться для отметок и выделений при последующей работе. Полезно также датировать записи.

Записи могут носить различный характер: план, выписки, тезисы, аннотирование, конспектирование, реферирование.

2 УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Для успешного освоения дисциплины, необходимо выполнить следующие виды самостоятельной работы, используя рекомендуемые источники информации

№ п/п	Виды самостоятельной работы	Рекомендуемые источники информации (№ источника)			
		Основная	Дополнительная	Методическая	Интернет-ресурсы
1	Подготовка к лекции	1 3 4	1	3	7 6 8 2 3 1 4 9 5 10
2	Подготовка к практическому занятию	3	1	1 3	7 6 8 2 3 1 4
3	Самостоятельное изучение литературы	3 4	1	1 2 3	7 6 8 2 3 1 4 9 5 10

Основная литература

- 1 Герасименко, А. А. Передача и распределение электрической энергии : учеб. пособие / А. А. Герасименко, В. Т. Федин. - Ростов н/Д : Феникс ; Красноярск : Издательские проекты, 2008. - 715 с. : ил. - (Высшее образование). - Библиогр.: с. 667-671. - ISBN 978-5-222-13221-0
- 2 Справочник по проектированию электрических сетей / [И. Г. Карапетян, Д. Л. Файбисович, И. М. Шапиро] ; под ред. Д. Л. Файбисовича. - 4-е изд., перераб. и доп. - М. : ЭНАС, 2012. - 376 с. : ил. - Библиогр.: с. 370-373. - ISBN 978-5-4248-0049-8
- 3 Электрические сети сверх- и ультравысокого напряжения ЕЭС России : Теоретические и практические основы : В 3 т. / под ред. А. Ф. Дьякова, Т.2, Электрические подстанции переменного тока. Средства и интеллектуальные системы управления. - М. : НТФ "Энергопрогресс" Корпорации "ЕЭЭК", 2012. - 668 с. : ил. - ISBN 978-5-905918-02-5
- 4 Электрические сети сверх- и ультравысокого напряжения ЕЭС России : Теоретические и практические основы : В 3 т. / под ред. А. Ф. Дьякова, Т.3, Электропередачи переменного тока специального исполнения. Электропередачи и вставки постоянного тока. - М. : НТФ "Энергопрогресс" Корпорации "ЕЭЭК", 2012. - 368 с. : ил. - ISBN 978-5-905918-03-2

Дополнительная литература:

- 1 Новые средства передачи электроэнергии в энергосистемах / [Александров Г. Н., Евдокунин Г. А., Лисочкина Т. В. и др.] ; под ред. Г. Н. Александрова ; МО РФ. - Л. : Изд-во Ленингр. ун-та, 1987. - 232 с. - Библиогр.: с. 227-229

1 . Методические указания к практическим занятиям по дисциплине

«Проектирование электропередач». СКФУ, 2025.

2 . Методические указания к курсовому проектированию по дисциплине «Проектирование электропередач»

3 . Методические указания к организации самостоятельной работе по дисциплине «Проектирование электропередач». СКФУ, 2025.