

### 3. ЗАДАНИЕ К КУРСОВОЙ РАБОТЕ

#### 3.1. Расчет статической устойчивости двухмашинной энергосистемы

Для заданной двухмашинной электрической системы (рис.1) построить угловые характеристики мощности, определить пределы передаваемой мощности от станции «А» и «Б», коэффициенты запаса статической устойчивости обеих станций в исходном режиме, относительный угол между ЭДС ( $\delta_{12\text{пред}}$ ), соответствующий пределу статической апериодической устойчивости. Расчеты выполнить для двух случаев:

- 1) генераторы станций «А» и «Б» снабжены регуляторами пропорционального действия;
- 2) генераторы станций «А» и «Б» снабжены регуляторами сильного действия.

#### 3.2. Расчет предельного угла и времени отключения КЗ для одномашинной системы

Для станции «А», работающей на шины неизменного напряжения и частоты ( $U_H = const, \omega = const$ ), рассчитать предельные по условию сохранения динамической устойчивости угол и время отключения двухфазного КЗ на землю, происходящего на одной из цепей ЛЭП на расстоянии от начала.

#### 3.3. Расчет устойчивости динамического перехода системы

Для станции «А», работающей на шины неизменного напряжения и частоты ( $U_H = const, \omega = const$ ), провести расчет и оценить устойчивость динамического перехода при следующих условиях: одна из цепей ЛЭП находится в ремонте, а в заданной точке рабочей цепи ЛЭП происходит однофазное КЗ на землю, которое отключается через  $\Delta t_{\text{кз}} = 0,2$  с и далее с интервалом  $\Delta t = 0,4$  с после отключения КЗ происходит успешное ОАПВ ранее поврежденной фазы.

#### 3.4. Обоснование мероприятий по повышению статической устойчивости системы (исследовательская часть)

Обосновать мероприятия, повышающие предел передаваемой мощности по условиям статической устойчивости на 20% для станции «А» (снабженной регуляторами сильного действия), работающей через одноцепную ЛЭП на шины неизменного напряжения и частоты ( $U_H = const, \omega = const$ ).

*Примечания:*

1. Активными сопротивлениями генераторов, трансформаторов и ЛЭП пренебречь.
2. Действие АРВ учесть приближенно: для АРВ пропорционального типа генераторы вводятся в схему замещения как  $E' = const$  и  $X_G = X_d'$ , для АРВ сильного действия –  $U_G = const$  и  $X_G = 0$ .

3. Нагрузку учесть приближенно, заменив ее сопротивлением  $\underline{Z}_H = R_H + jX_H$ .
4. Принять погонное индуктивное сопротивление прямой последовательности ЛЭП  $X_1 = 0,4$  (Ом/км).

В схеме нулевой последовательности принять:

- 1) для одной цепи ЛЭП  $X_0 = 3,5 X_1$ ;
- 2) взаимное индуктивное сопротивление нулевой последовательности между цепями 1 и 2 двухцепной ЛЭП  $X_{1-2} = 3 \times 0,66 X_1$  (при КЗ на двухцепной ЛЭП).
5. На шинах нагрузки в исходном режиме принять  $U_H = 110$  кВ,  $\cos \varphi_0 = 0,97$  для всех соединений.

### 3.5. Исходные данные к курсовой работе

Исходные данные для курсовой работы приведены в четырех таблицах. Вариант выбирается по первым двум буквам фамилии и инициалам студента. Так студенту Иванову Анатолию Сергеевичу следует из первой таблицы взять вариант «И», из второй – «В», из третьей – «А», из четвертой – «С». Из первой таблицы заимствуются параметры элементов системы, из второй – перетоки активной мощности по трансформаторам Т3, Т4 и мощность нагрузки, из третьей – длина ЛЭП, из четвертой – место КЗ.

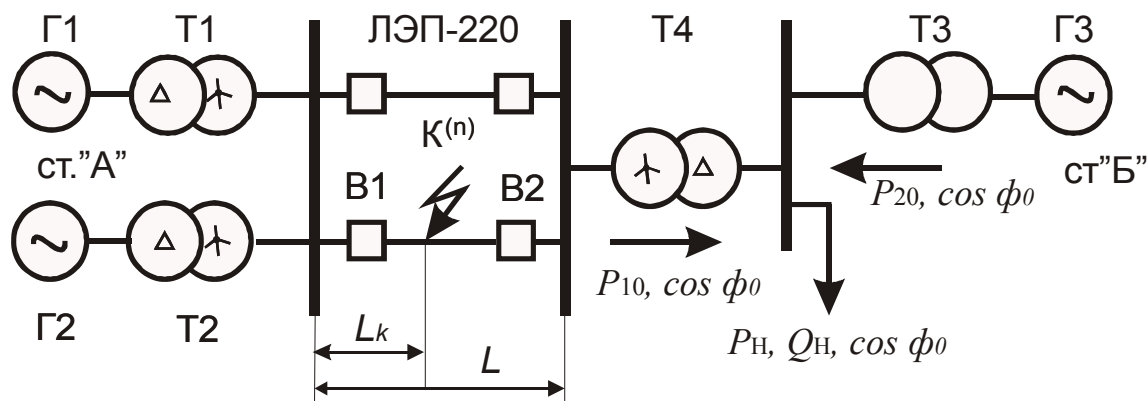


Рис.1. Однолинейная схема исследуемой системы

# **Параметры элементов системы**

**Таблица 1**

№ варианта	№ эле- мента	Г Е Н Е Р А Т О Р Ы							
		P <sub>ном</sub> МВт	cosφ от.ед.	U <sub>н</sub> кВ	X <sub>d</sub> от.ед.	X' <sub>d</sub> от.ед.	X <sub>2</sub> От.ед.	T <sub>j</sub> с	
А,Б,В, Г,Д	1,2,	300	0,85	20	1,7	0,26	0,21	7	
	3	500	0,85	20	2,2	0,4	0,33	9	
Е,Ж,З, И,К	1,2,	320	0,85	15,75	2,4	0,37	0,3	7,2	
	3	500	0,85	20	2,2	0,4	0,33	9	
Л,М,Н, О,П,Р	1,2,	250	0,85	15,75	1,97	0,29	0,24	6,5	
	3	320	0,85	15,75	2,4	0,37	0,3	7,2	
С,Т,У, Ф,Х,Ц	1,2,	350	0,8	10,5	1,7	0,27	0,27	8	
	3	500	0,85	20	2,2	0,4	0,33	9	
Ч,Ш,Щ, Э,Ю,Я	1,2,	280	0,85	15,75	2,2	0,35	0,28	7,5	
	3	320	0,85	15,75	2,4	0,37	0,3	7,2	
		Трансформаторы Т1,Т2,Т3				Трансформатор Т4			
		S <sub>н</sub> мВА	U <sub>к</sub> %	U <sub>нн</sub> кВ	U <sub>нв</sub> кВ	S <sub>н</sub> мВА	U <sub>к</sub> %	U <sub>нн</sub> кВ	U <sub>нв</sub> кВ
А,Б,В, Г,Д	1,2,	400	11	20	242	630	13	121	220
	3	630	12,5	20	121				
Е,Ж,З, И,К	1,2,	500	12	15,75	240	630	13	121	240
	3	630	12,5	20	121				
Л,М,Н, О,П,Р	1,2,	400	12	15,75	240	400	12	121	240
	3	500	12	15,75	121				
С,Т,У, Ф,Х,Ц	1,2,	400	12	10,5	231	630	12	121	230
	3	630	12,5	20	115				
Ч,Ш,Щ, Э,Ю,Я	1,2,	350	12	15,75	240	500	12	115	240
	3	400	12	15,75	121				

**Таблица 2**

№ варианта	Загрузка генераторов
А,Б,В,Г,Д,Е,Ж,З,И	<b>0,7 <math>P_{ном}</math></b>
К,Л,М,Н,О,П,Р,С,Т	<b>0,8 <math>P_{ном}</math></b>
У,Ф,Х,Ц,Ч,Ш,Щ,Э,Ю,Я	<b>0,9 <math>P_{ном}</math></b>

**Таблица 3**

№ варианта	Длина ЛЭП L (км)
А,Б,В,Г,Д,Е,Ж	<b>200</b>
З,И,Л,М,Н,О	<b>225</b>
П,Р,С,Т,У,Ф,Х	<b>250</b>
Ц,Ч,Ш,Щ,Э,Ю,Я	<b>275</b>

**Таблица 4**

№ варианта	Место КЗ ( $L_K / L$ )	№ варианта	Место КЗ ( $L_K / L$ )
А,Б,В,Г,Д,Е,Ж	<b>0,3</b>	П,Р,С,Т,У,Ф,Х	<b>0,7</b>
З,И,Л,Л,М,Н,О	<b>0,5</b>	Ц,Ч,Ш,Щ,Э,Ю,Я	<b>0,9</b>

### 3.6. Объем курсовой работы и требования к её оформлению

Курсовая работа состоит из пояснительной записки, для выполнения которой требуется примерно 20-25 часов самостоятельной работы студентов. Её объем составляет 25-30 страниц.

Записка должна содержать задание, исходные данные и расчетную схему. Решение поставленных задач должно быть разбито по разделам. В пределах каждого раздела необходимо:

1. Сформулировать задачу, решаемую в разделе;
2. Привести поясняющие схемы замещения и этапы их преобразования;
3. Пояснить последовательность решения задачи;
4. Привести расчетные формулы в общем виде с последующей подстановкой цифровых значений величин и результатов расчета;
5. Привести масштабные построения рассчитанных характеристик, дать краткий анализ полученных результатов расчета с соответствующими выводами;
6. В тексте записки дать ссылки на используемую техническую и справочную литературу;
7. В конце записки привести список использованной литературы и оглавление;
8. На последнем листе привести фактически затраченное время на работу.

### 3.7. Содержание курсового задания

Ниже, в таблице 5, приводится перечень разделов курсового задания и нарастающий объем выполнения в процентах.

**Таблица 5**

№	Наименование разделов и перечень решаемых задач	неделя
1.	Расчет статической устойчивости двухмашинной энергосистемы	
1.1.	Расчет параметров схемы замещения при АРВ пропорционального действия	10
1.2.	Расчет характеристик электромагнитной мощности генераторов	13
1.3.	Расчет коэффициентов запаса и границ статической апериодической устойчивости	14
1.4.	Расчет параметров схемы замещения при АРВ сильного действия	18

№	Наименование разделов и перечень решаемых задач	неделя
1.5.	Расчет характеристик электромагнитной мощности генераторов	21
1.6.	Расчет коэффициентов запаса и границ статической апериодической устойчивости	23
1.7.	Графическое построение характеристик электромагнитной мощности и анализ результатов расчета	30
2.	Расчет предельного угла и времени отключения КЗ для одномашинной системы	
2.1.	Расчет характеристики электромагнитной мощности нормального режима	33
2.2.	Расчет характеристики электромагнитной мощности аварийного режима	40
2.3.	Расчет характеристики электромагнитной мощности после аварийного режима	43
2.4	Расчет предельного угла и времени отключения КЗ	50
3	Расчет устойчивости динамического перехода системы	
3.1	Расчет характеристики электромагнитной мощности нормального режима	53
3.2	Расчет характеристики электромагнитной мощности аварийного режима	60
3.3	Расчет характеристики электромагнитной мощности неполнофазного режима	66
3.4	Расчет углов коммутации методом последовательных интервалов	72
3.5	Расчет площадок ускорения и торможения генераторов	77
4	Обоснование мероприятий по повышению статической устойчивости системы	87
5	Оформление курсовой работы	100

#### **4. Методические указания по выполнению курсовой работы**

##### **4.1 Расчет статической устойчивости двухмашинной энергосистемы**

Первым шагом расчета является составление электрической схемы замещения. В схему замещения входят все элементы рассматриваемой системы: генераторы, трансформаторы, линия электропередачи (ЛЭП) и нагрузка. Все перечисленные элементы (за исключением нагрузки) учитываются только реактивными сопротивлениями.

Приближенный учет автоматических регуляторов пропорционального действия на генераторах станций «А» и «Б» в исследованиях статической

устойчивости осуществляется тем, что генераторы входят в схему замещения неизменным значением переходной ЭДС ( $E' = const$ ) за переходным сопротивлением  $X_d'$ .

Регулирующие свойства нагрузки с достаточной для практических целей точностью при исследовании статической устойчивости учитываются посредством представления ее схеме замещения постоянным сопротивлением

$$\underline{Z}_H = \frac{U_H^2}{S_H} (\cos \varphi_0 + j \sin \varphi_0) = \frac{U_H^2}{S_H^2} (P_H + j Q_H) = R_H + j X_H, \quad (1)$$

где  $U_H$ ,  $S_H$ ,  $P_H$ ,  $Q_H$ ,  $\cos \varphi_0$  - соответственно, напряжение, полная, активная, реактивная мощности и коэффициент мощности нагрузки.

Решение поставленной задачи удобно вести в системе относительных единиц в такой последовательности.

1. Обозначить римскими цифрами номера ступеней трансформации:

I - ступень присоединения нагрузки;

III - ступень Г3;

II - ступень Г1 и Г2;

IV -

ступень ЛЭП.

2. Задаться на ступени I  $S_6$  и  $U_{6I} = 110$  кВ.

3. Рассчитать базисные напряжения на остальных ступенях, используя коэффициенты трансформации трансформаторов Т3, Т4, Т1:

$$U_{6II} = U_{6IV} \frac{U_{HB(T1)}}{U_{HH(T1)}}; \quad U_{6III} = U_{6I} \frac{U_{HH(T3)}}{U_{HB(T3)}}; \quad U_{6IV} = U_{6I} \frac{U_{HB(T4)}}{U_{HH(T4)}}; \quad (2)$$

4. Определить реактивные сопротивления элементов схемы замещения:

$$\text{генераторов Г1, Г2} \quad X_{Г1,2} = 0,5 X_{d1}' \frac{U_{HG1}^2 S_6}{S_{HG1} U_{6II}^2}; \quad (3)$$

$$\text{генератора Г3} \quad X_{Г3} = X_{d3}' \frac{U_{HG3}^2 S_6}{S_{HG3} U_{6III}^2}; \quad (4)$$

$$\text{трансформаторов Т1, Т2} \quad X_{Т1,2} = 0,5 \frac{U_{K(T1)}}{100} \frac{U_{H(T1)}^2 S_6}{S_{H(T1)} U_{6IV}^2}; \quad (5)$$

$$\text{трансформатора Т4} \quad X_{Т4} = \frac{U_{K(T4)}}{100} \frac{U_{HB(T4)}^2 S_6}{S_{H(T4)} U_{6I}^2}; \quad (6)$$

$$\text{трансформатора Т3} \quad X_{Т3} = \frac{U_{K(T3)}}{100} \frac{U_{HB(T3)}^2 S_6}{S_{H(T3)} U_{6I}^2}; \quad (7)$$

$$\text{ЛЭП} \quad X_{\text{л}} = 0,5 X_1 L \frac{S_6}{U_{6\text{IV}}^2}. \quad (8)$$

Здесь парные однотипные элементы заменены одним эквивалентным сопротивлением.

Комплексное сопротивление нагрузки рассчитывается по ранее приведенной формуле с подстановкой в нее величин в относительных единицах.

Схема замещения рассматриваемой системы имеет Т-образный вид, с продольными сопротивлениями:

$$X_{c1} = X_{Г1,2} + X_{Т1,2} + X_{\text{л}} + X_{Т4}; \quad X_{c2} = X_{Т3} + X_{Г3}. \quad (9)$$

По полученным параметрам рассчитываются собственные и взаимные сопротивления схемы замещения [2, с.27].

Следующим этапом является расчет исходного режима.

Определяются потоки реактивной мощности

$$Q_{10} = P_{10} \operatorname{tg} \varphi_0; \quad Q_{20} = P_{20} \operatorname{tg} \varphi_0 \quad (10)$$

и рассчитываются векторы переходных ЭДС. Для станции «А»:

$$\underline{E}'_{1(0)} = \left( U_{\text{н}} + \frac{Q_{10} X_{c1}}{U_{\text{н}}} \right) + j \frac{P_{10} X_{c1}}{U_{\text{н}}} = E'_{1(0)} \exp j \delta_{1(0)}. \quad (11)$$

Аналогичным образом находится вектор переходной ЭДС для станции «Б».

Расчет характеристик электромагнитных мощностей станций «А» и «Б» проводится по формулам :

$$P_1 = \frac{E_{1(0)}'^2}{Z_{11}} \sin \alpha_{11} + \frac{E'_{1(0)} E'_{2(0)}}{Z_{12}} \sin(\delta_{12} - \alpha_{12}); \quad (12)$$

$$P_2 = \frac{E_{2(0)}'^2}{Z_{22}} \sin \alpha_{22} - \frac{E'_{1(0)} E'_{2(0)}}{Z_{12}} \sin(\delta_{12} + \alpha_{12}), \quad (13)$$

где  $\delta_{12}$  - относительный угол между векторами переходных ЭДС.

Перед построением характеристик (рис.2) необходимо осуществить контрольную проверку по результатам исходного режима. При подстановке в последние выражения численных значений исходного относительного угла

$$\delta_{12(0)} = \delta_{1(0)} - \delta_{2(0)} \quad \text{и при правильных расчетах будут получены}$$

заданные потоки активной мощности  $P_{10}$  и  $P_{20}$  для исходного режима.

Коэффициенты запаса статической устойчивости подсчитываются для каждой станции по формулам:

$$K_{з(А)} = \frac{P_{1\text{max}} - P_{10}}{P_{10}} \cdot 100\%; \quad (14)$$

$$K_{з(Б)} = \frac{P_{2\text{max}} - P_{20}}{P_{20}} \cdot 100\%, \quad (15)$$

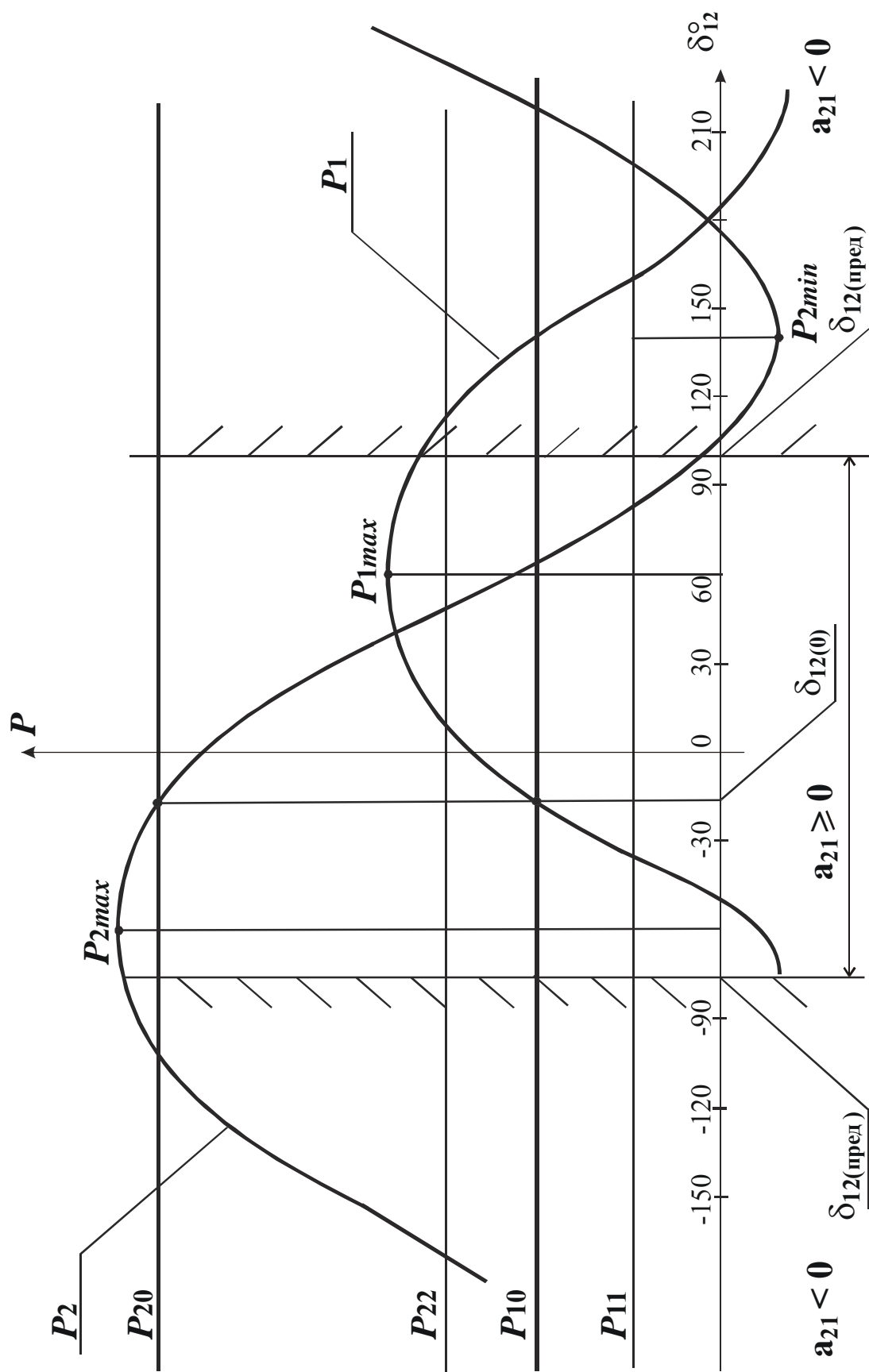


Рис.2. Угловые характеристики электромагнитной мощности двухмашинной системы



где  $P_{1\max}, P_{2\max}$  – максимальные значения электромагнитных мощностей.

Границы статической апериодической устойчивости находятся из условия равенства нулю удельного относительного ускорения роторов эквивалентных генераторов станций

$$a_{21} = \frac{1}{T_{J(A)}} \frac{dP_1}{d\delta_{12}} - \frac{1}{T_{J(B)}} \frac{dP_2}{d\delta_{12}} = 0. \quad (16)$$

Решением этого уравнения является выражение

$$\operatorname{tg} \delta_{12(\text{пред})} = \frac{K_{J(A,B)} + 1}{K_{J(A,B)} - 1} \operatorname{ctg} \alpha_{12}, \quad (17)$$

которому соответствуют два значения  $\delta_{12(\text{пред})}$ .

Здесь принято

$$K_{J(A,B)} = \frac{T_{J(A)}}{T_{J(B)}}, \quad (18)$$

$$T_{J(A)} = 2T_{J(\Gamma 1)} \frac{S_{H(\Gamma 1)}(c)}{S_{\bar{6}}}(c); \quad T_{J(B)} = T_{J(\Gamma 3)} \frac{S_{H(\Gamma 3)}(c)}{S_{\bar{6}}}(c) \quad (19)$$

– эквивалентные постоянные инерции станций, приведенные к базисным условиям.

Вторая часть первого раздела выполняется при условии, что на генераторах станций «А» и «Б» установлены регуляторы сильного действия. В приближенных расчетах действие указанных АРВ учитывается тем, что соответствующие генераторы представляются в схеме замещения параметрами  $U_{\Gamma} = \text{const}$  и  $X_{\Gamma} = 0$ . Вся ранее приведенная последовательность расчетов остается в силе, только в расчетных выражениях переходные ЭДС необходимо заменить на напряжения соответствующих генераторов, рассчитанных по выражениям, аналогичным (2).

В конце раздела необходимо сделать выводы с объяснением полученных результатов.

#### 4.2. Расчет предельного угла и времени отключения КЗ для одномашинной системы

Условием динамической устойчивости одномашинной системы является неравенство  $F_{\text{в.тор}} \geq F_{\text{уск}}$ ,

где  $F_{\text{в.тор}}$  – площадь возможного торможения;  $F_{\text{уск}}$  – площадь ускорения.

Предельному углу отключения КЗ с точки зрения сохранения динамической устойчивости соответствует условие  $F_{\text{в.тор}} = F_{\text{уск}}$ .

Указанные площади находят из характеристик электромагнитной мощности генераторов станции «А», соответствующих различным условиям работы внешней сети.

В приближенных расчетах в течение всего динамического перехода генераторы учитываются параметрами  $E' = \text{const}$  и  $X'_d$ .

В этих условиях, при неучёте активных сопротивлений элементов сети характеристики электромагнитной мощности генераторов станции «А» будут описываться выражением

$$P_{1(i)} = \frac{E_{1(0)} U_H}{X_{c(i)}} \sin \delta, \quad (20)$$

в котором  $X_{c(i)}$  для каждого  $i$ -того режима будет индивидуальным, а величины  $E'_{1(0)}$  остаются такими же, что и в нормальном режиме.

В нормальном режиме генераторы станции «А» работают на шины неизменного напряжения и частоты ( $U_H = const$ ,  $\omega = const$ ), передавая активную мощность  $P_{10}$  через Т1, Т2, двухцепную ЛЭП и Т4. Поэтому параметры для характеристики нормального режима можно позаимствовать из раздела № 1:  $E'_{1(0)}$ ,  $U_H$ ,  $X_{c(1)} = X_{c1}$ . Перед построением характеристики нормального режима необходимо осуществить контрольную проверку: при подстановке в (3)  $\delta = \delta_{1(0)}$  передаваемая мощность  $P_{1(1)}$  должна быть равна  $P_{10}$ .

Для построения характеристики электромагнитной мощности генератора  $P_{1(II)}(\delta)$  в аварийном режиме необходимо рассчитать сопротивление связи  $X_{c(II)}$  между точками приложения  $\underline{E}'_1$  и  $\underline{U}_H$ , соответствующее этому режиму.

Это сопротивление находится из схемы замещения аварийного режима (двухфазного КЗ на землю на одной из цепей ЛЭП). Указанная схема представляет собой схему нормального режима, в которой в точке КЗ подключен поперечный (между точкой КЗ и землей) шунт

$$X_{\Delta}^{(1,1)} = \frac{X_{2\Sigma} X_{0\Sigma}}{(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})}, \quad (21)$$

где  $X_{2\Sigma}$  и  $X_{0\Sigma}$  – результирующие сопротивления схем обратной и нулевой последовательностей, рассчитанные относительно клемм «КЗ» – «Земля».

Схема замещения обратной последовательности по конфигурации полностью совпадает со схемой прямой последовательности с тем отличием, что в ней генератор представлен реактансом обратной последовательности  $X_2$ , точки приложения  $\underline{E}'_1$  и  $\underline{U}_H$  имеют нулевой потенциал, в точке КЗ приложено напряжение обратной последовательности  $\underline{U}_{2к}$ . Посредством простых преобразований этой схемы определяется  $X_{2\Sigma}$ .

В схему нулевой последовательности входят сопротивления элементов Т1, Т2, ЛЭП, Т4. Вторичные по отношению к точке КЗ обмотки трансформаторов Т1, Т2 заземлены, а в точке КЗ приложено напряжение нулевой последовательности  $U_{0к}$  (рис.3).

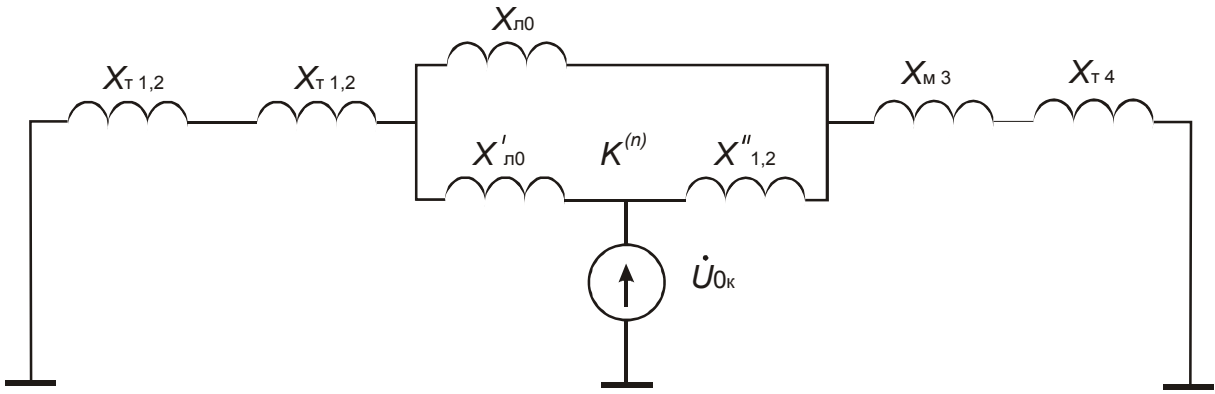


Рис. 3. Схема замещения нулевой последовательности к разделу 4.2

Особое внимание необходимо обратить на схему замещения нулевой последовательности двухцепной линии электропередачи с взаимной индуктивностью между цепями [6, с. 278-281; 7, задача 4-4].

Если через  $X_{л}$  обозначить сопротивление прямой последовательности одноцепной ЛЭП в относительных единицах, то согласно условиям задания параметры ЛЭП на схеме рис.3 определяются как

$$X_{л0} = (3,5 - 3 \cdot 0,66) X_{л}; \quad X'_{л0} = X_{л0} \cdot (L_k/L); \quad X''_{л0} = X_{л0} \cdot (1 - L_k/L); \quad (22)$$

$$X_{м1} = 3 \cdot 0,66 X_{л} (L_k/L); \quad X_{м2} = 3 \cdot 0,66 X_{л} (1 - L_k/L). \quad (23)$$

Преобразовав треугольник сопротивлений  $X_{л0}$ ,  $X'_{л0}$ ,  $X''_{л0}$  в эквивалентную звезду несложно определить  $X_{0\Sigma}$ .

Приведенные формулы позволяют рассчитать параметры схемы замещения аварийного режима. По этой схеме определяется сопротивление связи  $X_{с(II)}$  между точками приложения  $E'_{1(0)}$  и  $U_H$ .

Послеаварийному режиму соответствует отключение поврежденной цепи ЛЭП, поэтому схема замещения получается аналогичной схеме нормального режима, с тем отличием, что сопротивление ЛЭП будет в два раза больше. Из указанной схемы определяется  $X_{с(III)}$ , что позволяет построить угловую характеристику мощности генератора  $P_{1(III)}(\delta)$  для послеаварийного режима.

Предельный угол отключения КЗ определяется по выражению

$$\cos \delta_{отк} = \frac{P_{10}(\delta_{кр}^\circ - \delta_0^\circ) \frac{\pi}{180} + P_{1m(III)} \cos \delta_{кр} - P_{1m(II)} \cos \delta_0}{P_{1m(III)} - P_{1m(II)}}, \quad (24)$$

где  $P_{1m(II)}$ ,  $P_{1m(III)}$  – максимальные значения электромагнитной мощности;

$$\delta_{\text{кр}}^{\circ} = 180^{\circ} - \arcsin \frac{P_{10}}{P_{1m(\text{III})}}. \quad (25)$$

Время ( $t_{\text{отк}}$ ) отключения КЗ, соответствующее предельному углу отключения, определяется из зависимости  $\delta = f(t)$ , представляющей собой решение дифференциального уравнения движения роторов генераторов станции «А». Это решение может быть найдено одним из численных методов, например, методом последовательных интервалов.

Согласно методу последовательных интервалов весь процесс движения генераторов во времени разбивается на ряд равных промежутков  $\Delta t = (0,02 \dots 0,05)$  с и далее ведется расчет в такой последовательности.

Первый интервал времени

Определяется избыток мощности, действующий в начале интервала

$$\Delta P_{(0)} = P_{10} - P_{m(\text{II})} \sin \delta_0.$$

Рассчитывается приращение угла за интервал (в эл. градусах).

$$\Delta \delta_{(1)} = K \Delta P_{(0)} / 2, \quad (26)$$

где  $K = 18000 \Delta t^2 / T_{J(A)}$ .

Значения времени  $\Delta t$  и постоянной инерции  $T_{J(A)}$  выражены в секундах, мощность (избыток мощности) - в отн. ед.

Определяются значения угла и времени в конце интервала

$$\delta_{(1)} = \delta_{(0)} + \Delta \delta_{(1)}; \quad (27)$$

$$t_{(1)} = t_{(0)} + \Delta t.$$

Второй интервал времени

$$\Delta P_{(1)} = P_{10} - P_{m(\text{II})} \sin \delta_{(1)}; \quad (28)$$

$$\Delta \delta_{(2)} = \Delta \delta_{(1)} + K \Delta P_{(1)}; \quad (29)$$

$$\delta_{(2)} = \delta_{(1)} + \Delta \delta_{(2)}; \quad (30)$$

$$t_{(1)} = t_{(0)} + \Delta t.$$

Формулы для третьего и последующих интервалов аналогичны формулам для второго интервала.

Полученные значения угла  $\delta_{(i)}$  и времени  $t_{(i)}$  позволяют по точкам построить искомую зависимость  $\delta = f(t)$ .

### 4.3. Расчет устойчивости динамического перехода

Согласно условиям раздела 3 на оставшейся в работе цепи ВЛ происходит однофазное КЗ, которое ликвидируется отключением поврежденной фазы. С некоторой выдержкой времени происходит успешное повторное включение этой фазы и схема возвращается в исходное состояние. Необходимо ответить на вопрос: сохраняется ли в этих условиях динамическая устойчивость станции? Ответ зависит от соотношения площадей ускорения и возможного торможения, определяемых по характеристикам электромагнитной мощности.

В случае превышения площади возможного торможения над площадью ускорения угол  $\delta$ , нарастающий на начальной стадии переходного режима, с некоторого момента времени (при  $\delta = \delta_{\max}$ ) будет уменьшаться. Это является признаком сохранения синхронизма генераторов на первом цикле качаний. Для одномашинных энергосистем, как правило, синхронизм сохраняется и на последующих циклах. В сложных энергосистемах выпадение генераторов из синхронизма на последующих циклах качаний наблюдается достаточно часто.

Характеристики электромагнитной мощности для всех режимов работы внешней сети описываются уравнением (3), в котором  $E'_{1(0)}$  и  $U_n$  остаются неизменными, а  $X_{c(i)}$  для каждого режима вычисляется отдельно.

Для нормального (ремонтного) режима сопротивление  $X_{c(I)}$  подсчитывается по выражению (1), в котором  $X_L$  увеличено в два раза. Далее рассчитывается вектор переходной ЭДС по выражению (2), в котором  $X_{c(1)}$  заменяется на  $X_{c(I)}$ . Здесь часто допускается ошибка, когда значение вектора  $E'_{1(0)}$  автоматически заимствуют из разделов 1, 2.

По схеме замещения аварийного режима определяется сопротивление  $X_{c(II)}$ . При этом поперечный шунт в месте  $K^{(1)}$  определяется выражением

$$X_{\Delta}^{(1)} = X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}. \quad (31)$$

В схеме замещения нулевой последовательности для одноцепной ЛЭП следует принять  $X_{л(0)} = 3,5 X_L$  где  $X_L$  – сопротивление прямой последовательности.

В схеме замещения неполнофазного режима по месту разрыва фазы (между  $X_L$  и  $X_{T4}$ , либо между  $X_L$  и  $X_{T1,2}$  включается добавочное сопротивление

$$X_{\Delta}^{(H)} = X_{2\Sigma}^{(H)} X_{0\Sigma}^{(H)} / (X_{2\Sigma}^{(H)} + X_{0\Sigma}^{(H)}), \quad (32)$$

где  $X_{2\Sigma}^{(H)}, X_{0\Sigma}^{(H)}$  – результирующие сопротивления схем обратной и нулевой последовательностей. Отметим, что указанные сопротивления не равны аналогичным сопротивлениям при КЗ.

В частности, схема замещения обратной последовательности изображена на рис.4. Генераторы введены сопротивлением обратной последовательности, все прочие элементы – сопротивлениями прямой последовательности.

Непосредственно из схемы (рис.4) имеем

$$X_{2\Sigma}^{(H)} = X_{Г1,2} + X_{Т1,2} + X_{Л} + X_{Т4}. \quad (33)$$

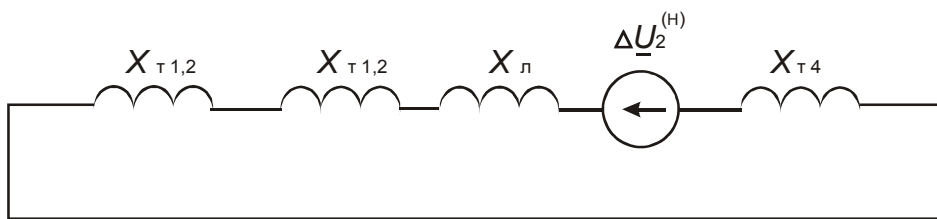


Рис.4. Схема замещения обратной последовательности к разделу 4.3.

Схема нулевой последовательности аналогична схеме, показанной на рис.4, с тем отличием, что отсутствует  $X_{Г1,2}$ , а  $X_{Л0} = 3,5 X_{Л}$ .

Из схемы замещения неполнофазного режима определяется сопротивление связи  $X_{с(III)} = X_{с(I)} + X_{\Delta}^{(H)}$ , (34)

что позволяет построить соответствующую характеристику электромагнитной мощности  $P_{1(III)}(\delta)$ . Как правило  $P_{m(III)} > P_{m(II)}$ , однако возможны случаи, когда характеристика III располагается ниже характеристики II.

Следующий этап сводится к расчету углов коммутации. Таких углов три. Первый угол  $\delta_0$ , при котором в момент КЗ ( $t=0$ ) происходит переход работы генераторов с характеристики нормального режима (I) на характеристику аварийного режима (II). Этот угол известен и заимствуется из расчета вектора переходной ЭДС для нормального режима

$$E'_{1(0)} = E'_{1(0)} \exp j \delta_0. \quad (35)$$

На протяжении времени  $\Delta t_{кз}$  происходит изменение электромагнитной мощности по характеристике аварийного режима с последующим переходом (при угле отключения  $\delta_{от.кз.}$ ) на характеристику неполнофазного режима. Этот угол находится из зависимости  $\delta = f(t)$ , рассчитываемой методом последовательных интервалов по характеристике аварийного режима.

С момента  $t = \Delta t_{\text{кз}}$  и угла  $\delta_{\text{от.кз.}}$  на интервале времени  $\Delta t_{\text{АПВ}}$  электромагнитная мощность определяется по характеристике неполнофазного режима. По истечении этого времени происходит переход на характеристику нормального режима при угле  $\delta_{\text{АПВ}}$ . Этот угол находится из продолжения зависимости  $\delta = f(t)$ , построенной для неполнофазного режима. Отметим, что при расчете приращения угла  $\Delta\delta$  на первом интервале движения в неполнофазном режиме значение избытка мощности, используемого в формуле, аналогичной (5), определяется как среднее арифметическое избытков мощности по характеристикам II и III при угле  $\delta_{\text{от.кз.}}$  [2, с.85], т.е.

$$\Delta P = \frac{\Delta P_{\text{II}} + \Delta P_{\text{III}}}{2}, \quad (36)$$

где  $\Delta P_{\text{II}} = P_{10} - P_{1m(\text{II})} \sin \delta_{\text{от.кз.}}$ ;  $\Delta P_{\text{III}} = P_{10} - P_{1m(\text{III})} \sin \delta_{\text{от.кз.}}$ .

При переходе на характеристику нормального режима избыток мощности определяется аналогично. Максимальным (критическим) с точки зрения сохранения динамической устойчивости системы при движении по характеристике I является угол  $\delta_{\text{кр}} = 180^\circ - \delta_0$ .

Построив характеристики электромагнитной мощности (I, II, III) и отложив углы коммутации  $\delta_0$ ,  $\delta_{\text{от.кз.}}$ ,  $\delta_{\text{АПВ}}$  и  $\delta_{\text{кр}}$  можно выделить и рассчитать суммарные площади ускорения, торможения и площадь возможного торможения. Поскольку в общем случае нам известны начальные и конечные углы ( $\delta_{j(\text{н})}$  и  $\delta_{j(\text{к})}$ ) участков этих площадей, то можно рекомендовать общую формулу для их вычисления

$$F_j = \int_{\delta_{j(\text{н})}}^{\delta_{j(\text{к})}} (P_0 - P_{m(i)} \sin \delta) d\delta = P_0(\delta_{j(\text{к})} - \delta_{j(\text{н})}) + P_{m(i)}(\cos \delta_{j(\text{н})} - \cos \delta_{j(\text{к})}), \quad (37)$$

где  $i$  – номер режима,  $j$  – номер участка площади.

Следует иметь в виду, что в каждом режиме возможно наличие и положительных и отрицательных участков площади, т.е. может наблюдаться и ускорение, и торможение роторов генераторов рассматриваемой станции. Вопрос об успешности динамического перехода, т.е. о сохранении или нарушении устойчивости динамического перехода решается путем выявления наличия запасной площади торможения.

### 4.3. Обоснование мероприятий по повышению статической устойчивости системы (исследовательская часть)

Основные средства повышения статической устойчивости энергосистем достаточно подробно изложены в [4, глава 18]. Не ущемляя творческой самостоятельности студентов, укажем кратко возможные способы решения поставленной задачи.

При упрощенном учете регуляторов возбуждения сильного действия предел статической устойчивости одномашинной энергосистемы определяется выражением

$$P_m = \frac{U_{\Gamma} U_{\text{H}}}{X_{\text{с}}} \quad (38)$$

и, следовательно, увеличение  $P_m$  возможно увеличением  $U_{\Gamma}$ ,  $U_{\text{H}}$  или уменьшением  $X_{\text{с}}$ .

Увеличение  $U_{\Gamma}$  практически в настоящее время ограничено электрической прочностью и габаритами (стоимостью) генераторов.

Увеличение напряжения на шинах приемной системы  $U_{\text{H}}$  возможно.

Другие средства повышения  $P_m$  связаны со снижением  $X_{\text{с}}$ . Сопротивление связи  $X_{\text{с}}$  состоит из  $X_{\text{T1,2}}$ ,  $X_{\text{Л}}$ ,  $X_{\text{T4}}$ .

Приведенные к базисным условиям сопротивления трансформаторов  $X_{\text{T}}$  не зависят от номинальных напряжений их обмоток, а для ЛЭП сопротивление

$$X_{\text{Л}*} = X_{\text{Л(Ом)}} \frac{S_{\text{б}}}{U_{(\text{ном})}^2} \quad (39)$$

обратно пропорционально квадрату номинального напряжения.

При заданных  $X_{\text{T1,2}}$ ,  $X_{\text{T4}}$  можно подсчитать требуемое увеличение номинального напряжения ЛЭП, косвенно снижающее сопротивление  $X_{\text{с}}$ .

Прямым средством снижения  $X_{\text{Л}}$  является расщепление проводов.

Снижения  $X_{\text{с}}$  можно достичь установкой устройств продольной и поперечной емкостной компенсации. Причем одно и тоже снижение  $X_{\text{с}}$  достигается при различных значениях мощности устройств продольной и поперечной компенсации, что предполагает их оценочное сравнение.

Студенту необходимо остановиться на одном из возможных средств повышения и привести необходимые числовые расчеты, проявив элемент исследования.



#### **4.5. Вопросы для самопроверки**

1. Что понимается под статической устойчивостью электрической системы?
2. Как осуществляется учет АРВ пропорционального и сильного действия в приближенных расчетах статической устойчивости?
3. По каким параметрам ведется регулирование тока возбуждения генератора при наличии АРВ пропорционального или сильного действия?
4. Объясните механизм повышения предела статической устойчивости энергосистемы при использовании АРВ пропорционального и сильного действия.
5. Назовите средства повышения статической устойчивости энергосистемы и объясните механизм их действия.
6. Какими моделями (зависимостями) учитывается нагрузка при расчетах статической устойчивости?
7. По какому практическому критерию определяется статическая устойчивость одномашинной энергосистемы?
8. По какому практическому критерию определяется статическая устойчивость двухмашинной энергосистемы?
9. Как определяются собственные и взаимные сопротивления по схемам замещения одномашинной и двухмашинной энергосистем?
10. Назовите составляющие дифференциального уравнения движения ротора генератора.
11. Поясните разницу понятий «предел мощности» и «предел статической устойчивости».
12. Влияют ли постоянные инерции генераторов на пределы статической устойчивости одномашинной и двухмашинной энергосистем?
13. Как определяются коэффициенты запаса статической устойчивости двухмашинной энергосистемы?
14. По какому выражению вычисляется синхронизирующая мощность для одномашинной энергосистемы?
15. Что понимается под динамической устойчивостью электрической системы?
16. Почему в расчетах электромеханических переходных процессов генераторы учитываются переходными ЭДС?
17. Почему расчет электромеханических переходных процессов ведется только исходя из учета действия токов прямой последовательности?
18. Сформулируйте критерий динамической устойчивости одномашинной системы.
19. Из каких условий определяется предельный угол отключения КЗ?

20. Поясните основные фрагменты метода последовательных интервалов.
21. Чему равно сопротивление шунта при однофазном, двухфазном и двухфазном КЗ на землю?
22. Чему равно дополнительное сопротивление в схеме замещения при отключении одной и двух фаз ЛЭП?
23. Как рассчитывается предельное время отключения КЗ?
24. Как влияют величины постоянных инерции генераторов на динамическую устойчивость энергосистем?
25. Каким образом, не прибегая к расчету площадей ускорения и торможения, можно выявить нарушение динамической устойчивости системы?

## **6. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **6.1 Литература обязательная**

1. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. – М: Высшая школа, 1985.
2. Жданов П.С. Вопросы устойчивости электрических систем. – М.: Энергия, 1979.

### **6.2 Литература дополнительная**

3. Электроэнергетические системы в примерах и иллюстрациях / Под ред. Веникова В.А. – М.: Энергия, 1983.
4. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. – М.: Высшая школа, 1978.
5. Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е., Окин А.А. Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах. – М.: Энергоатомиздат, 1990.

### **6.3 Учебно-методические пособия**

6. Хрущев Ю.В. Электромеханические переходные процессы в электрических системах. Лабораторный практикум. – Томск: Изд. ТПУ, 2002.



# **ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

Рабочая программа, методические указания и задания на курсовую работу

Составители: Юрий Васильевич Хрущев,  
Владимир Иванович Готман

Рецензент: Борис Владимирович Лукутин

Подписано к печати

Формат 60x84/16. Бумага ксероксная.

Тираж            экз. Заказ            Цена свободная.

ИПФ ТПУ. Лицензия ЛТ №1 от 18.07.94.

Типография ТПУ. 634034, Томск, пр. Ленина,30.