

Составители: Р.Р. Саттаров, М.Б. Гумерова

УДК 621.3(07)

ББК 31.2(я7)

Электромеханические переходные процессы: Методические указания к выполнению расчетно-графических работ по дисциплине «Электромеханические переходные процессы» / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т; Сост.: Р.Р. Саттаров, М.Б. Гумерова. – Уфа, 2010. – 29 с.

Содержат цель работы, рекомендации по выполнению РГР, примеры расчета статической и динамической устойчивости, варианты заданий и список рекомендованной литературы по дисциплине «Электромеханические переходные процессы».

Методические указания предназначены для студентов заочного отделения специальности 140205 "Электроэнергетические системы и сети", может быть рекомендовано для студентов очного отделения.

Табл. 4. Ил. 14. Библ.: 6 назв.

Рецензенты: канд. тех. наук, доц. каф.ЭМ Погапчук Н.К.
канд. тех. наук, доц. каф.ТОЭ Грахов П.А.

© Уфимский государственный
авиационный технический университет, 2010

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. Цель и задачи расчетно-графических работ.....	5
2. Расчет статической устойчивости.....	5
2.1. Рекомендации к выполнению РГР №1.....	5
2.2 Типовое задание на РГР №1.....	7
2.3. Пример расчета статической устойчивости.....	8
3. Расчет динамической устойчивости	14
3.1 Рекомендации к выполнению РГР №2.....	14
3.2 Типовое задание на РГР №2	14
3.3 Пример расчета динамической устойчивости.....	15
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	26
Приложение А. Темы рефератов	27
Приложение Б. Варианты заданий.....	28

ВВЕДЕНИЕ

Предлагаемые методические указания рассматривают расчетно-графические работы по темам «Расчет статической устойчивости» и «Расчет динамической устойчивости» для самостоятельной работы студентов. Расчетно-графические работы состоят из заданий, соответствующих основным разделам учебной программы курса «Электромеханические переходные процессы в ЭЭС».

Цель методических указаний – помочь студентам освоить главные положения теории, систематизировать знания по ранее пройденным разделам курса, сформировать навыки и умения расчетов устойчивости электро-энергетических систем (ЭЭС), организовать ритмичную работу над заданиями.

Методические указания содержат рекомендации на всех этапах их выполнения. Наиболее сложные вопросы рассмотрены на однотипных с заданиями примерах.

Процесс работы над заданиями позволяет студентам повысить свой профессиональный уровень, совершенствовать умения и навыки расчетов устойчивости ЭЭС, и использовать их на практике в последующей инженерной деятельности.

1. Цель и задачи расчетно-графических работ

Цель расчетно-графических работ – сформировать у студента умения самостоятельного творческого решения технических задач и использовать эти навыки при выполнении курсовых и выпускной квалификационной работ.

Выполнение расчетно-графических работ направлено на решение следующих основных задач:

- расширить и систематизировать знания о физике явлений при электромеханических переходных процессах;
- ознакомить студентов с математическими методами анализа устойчивости установившихся и неуставившихся режимов;
- закрепить и совершенствовать навыки поиска и работы с необходимой справочной литературой и стандартами, а также средствами вычислительной техники при моделировании и расчетах электромеханических переходных процессов электроэнергетических систем.

2. Расчет статической устойчивости

2.1 Рекомендации к выполнению РГР №1

В объем работы входит выполнение *реферата* по заданной преподавателем теме (Приложение А) и *расчет* запаса статической устойчивости на основе заданной на рис. Б1 (Приложение Б) схемы электрической системы. Исходный установившийся режим станции, оценка устойчивости которого производится, является номинальным режимом эквивалентного генератора с выдачей им номинальной мощности при номинальном напряжении на его шинах. Расчет производится в относительных единицах.

Базисная мощность может иметь произвольное значение. Учитывая необходимость оценки в дальнейшем устойчивости режима генератора (станции), целесообразно за базисное значение принять номинальную мощность генератора

$$S_H = \frac{P_H}{\cos \varphi_H},$$

где P_H – номинальная активная мощность генератора;

$\cos \varphi_H$ – номинальный коэффициент мощности генератора.

Нагрузка в схеме замещения представляется комплексным сопротивлением (без ЭДС)

$$Z_{H^*(B)} = \frac{S_B}{S_H} (\cos \varphi_H + j \sin \varphi_H),$$

где S_H – номинальная мощность нагрузки;

φ_H – номинальный нагрузочный угол.

Кроме этого, для приближенного отражения влияния АРВ пропорционального действия, генератор должен быть представлен своими переходными параметрами: X'_d и E'_q .

Поддерживаемое неизменным за счет действия АРВ значение переходной ЭДС E'_q генератора рассчитывается в относительных единицах по параметрам его исходного режима

$$E'_q = \sqrt{(I_0 \cdot x'_d \cdot \cos \varphi_0)^2 + (U_0 + I_0 \cdot x'_d \cdot \sin \varphi_0)^2}.$$

Неизменное значение ЭДС U_c приемной системы, рассматриваемой как шины бесконечной мощности, необходимо уточнить по заданным параметрам режима генератора.

По полученной таким образом схеме замещения необходимо определить собственную проводимость y_{11} (по модулю) со своим дополнительным углом α_{11} для генераторного узла, в котором действует его ЭДС, а также взаимную проводимость y_{12} (по модулю) и ее дополнительный угол α_{12} для узлов с ЭДС генератора и с ЭДС системы (шин бесконечной мощности) (рис. 2.1).

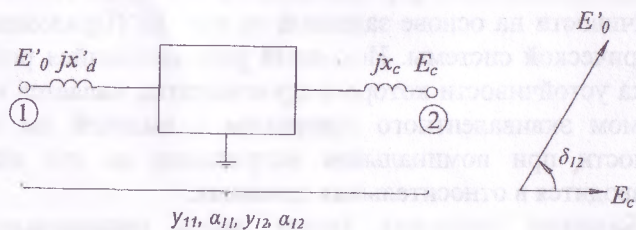


Рис. 2.1

Расчет производится в комплексной форме, т.к. сопротивление нагрузки имеет как активную, так и реактивную составляющие. Для ускорения расчетов операции с комплексными числами могут производиться на ЭВМ.

Для контроля получаемых результатов полезно учитывать характерные соотношения искомых величин для рассматриваемой схемы ЭЭС, а именно

$$\begin{cases} y_{11} > y_{12} \\ \alpha_{11} > 0, \\ \alpha_{12} < 0 \end{cases}$$

а также то, что по модулю дополнительные углы составляют небольшую величину (единицы и менее градуса).

После расчета проводимостей схемы ЭЭС построение угловой характеристики мощности генератора $P(\delta_{12})$ не представляет трудности и производится при задании аргумента (рис.1) в пределах $0^\circ \leq \delta_{12} \leq 180^\circ$ по выражению

$$P(\delta_{12}) = E_q'^2 y_{11} \sin \alpha_{11} + E_q' U_c y_{12} \sin(\delta_{12} - \alpha_{12}), \quad (2.1)$$

в котором δ_{12} – угол между векторами ЭДС генератора и системы (рис. 2.1), выраженный, как и дополнительные углы α_{11} , α_{12} в градусах, а все остальные величины записаны в о.е. и имеют вещественные значения (представляются модулями).

Как известно, для рассматриваемого типа ЭЭС ("генератор – шины бесконечной мощности") предел статической устойчивости совпадает с пределом мощности и соответствует максимуму угловой характеристики (2.1). При этом запас устойчивости определяется коэффициентом

$$K = \frac{P_m - P_0}{P_0}, \quad (2.2)$$

где P_0 – мощность генератора в исходном режиме в о.е.;

P_m – максимум угловой характеристики.

Требуется рассчитать коэффициент запаса статической устойчивости (2.2), сравнить его с нормативным значением и сделать выводы, а в случае необходимости дать рекомендации по его повышению.

2.2 Типовое задание на РГР №1

1. Составить схему замещения ЭЭС (прямой последовательности), вводя в нее генератор параметрами, соответствующими приближенному учету АРВ, а нагрузку –

постоянным сопротивлением, рассчитать собственные и взаимные проводимости схемы для узлов станции и системы.

2. Построить угловую характеристику активной мощности станции и выявить на ней предел статической устойчивости.

3. Рассчитать запас статической устойчивости для номинального режима работы станции и сравнить его с нормативным, сделать вывод.

Каждый студент выполняет тот вариант задания, который соответствует последней цифре номера его зачетной книжки. Схема электрической системы представлена на рис. Б1, а исходные данные для расчета приведены в табл. Б1, Б2 и Б3 Приложения Б.

2.3 Пример расчета статической устойчивости

Исходные данные для расчета:

Генератор:

$$P_{\text{ГГ}} = 200 \text{ МВт}; \quad \cos \varphi_{\text{ГГ}} = 0,80; \quad U_{\text{Н}} = 10,5 \text{ кВ}; \quad x''_d = 0,19; \\ x''_d = 0,28; \quad x_{2\text{Г}} = 0,23; \quad T_J = 6,3 \text{ с}.$$

Система:

$$I_C^{(3)} = 50 \text{ кА}.$$

АТ-1:

$$S_{\text{НАТ-1}} = 500 \text{ МВА}.$$

АТ-2:

$$S_{\text{НАТ-2}} = 320 \text{ МВА}.$$

Трансформатор:

$$S_{\text{НГ}} = 50 \text{ МВА}.$$

Линии:

$$l_{220} = 250 \text{ км}; \quad l_{110} = 20 \text{ км}.$$

Нагрузка:

$$P_{\text{Н}} = 30 \text{ МВт}; \quad \cos \varphi_{\text{Н}} = 0,90.$$

Составление схемы замещения

Расчет ведем в относительных единицах с приближенным приведением. В качестве базисных напряжений примем средние напряжения (10,5; 115; 230; 513 кВ). В качестве базисной мощности примем номинальную мощность генератора:

$$S_B = \frac{P_{\text{НГ}}}{\cos \varphi_{\text{НГ}}} = \frac{200}{0,8} = 250 \text{ МВА}.$$

Схема замещения при пренебрежении активными сопротивлениями и зарядной мощностью линии показана на рис. 2.2.

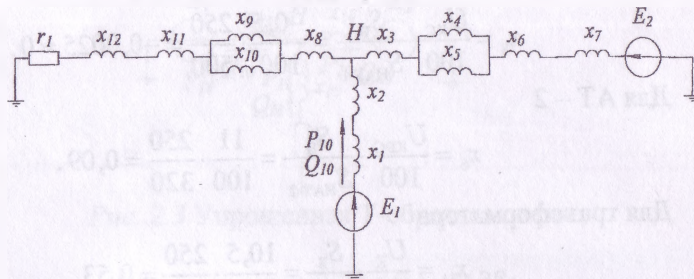


Рис. 2.2 Схема замещения нормального режима.

Расчет параметров схемы замещения

Так как генератор с АРВ ПД, то он замещается E'_q и x'_d

Тогда

$$x_1 = x'_d \cdot \frac{S_B}{S_{\text{НГ}}} = x'_d = 0,28.$$

По условиям генератор работает в номинальном режиме, поэтому

$$E'_q = \sqrt{(U_0 + I_0 \cdot \sin \varphi_0 \cdot x'_d)^2 + (I_0 \cdot \cos \varphi_0 \cdot x'_d)^2},$$

где $U_0 = 1$ и $I_0 = 1$ в номинальном режиме (в относительных единицах), т.е.

$$E_1 = \sqrt{(1 + 1 \cdot 0,6 \cdot 0,28)^2 + (1 \cdot 0,8 \cdot 0,28)^2} = 1,19.$$

Для расчета сопротивлений автотрансформатора необходимо определить

$$U_{\text{КВ}} = \frac{1}{2}(U_{\text{КВН}} + U_{\text{КВС}} - U_{\text{КСН}}) = \frac{1}{2}(32 + 11 - 20) = 6,5\%;$$

$$U_{\text{КС}} = \frac{1}{2}(U_{\text{КВС}} + U_{\text{КСН}} - U_{\text{КВН}}) = \frac{1}{2}(20 + 11 - 32) = -0,5\%;$$

$$U_{\text{КН}} = \frac{1}{2}(U_{\text{КВН}} + U_{\text{КСН}} - U_{\text{КВС}}) = \frac{1}{2}(30 + 20 - 11) = 20,5\%.$$

Тогда для АТ - 1

$$x_2 = \frac{U_{KH}}{100} \cdot \frac{S_B}{S_{HAT-1}} = \frac{20,5}{100} \cdot \frac{250}{500} = 0,10;$$

$$x_3 = \frac{U_{KB}}{100} \cdot \frac{S_B}{S_{HAT-1}} = \frac{6,5}{100} \cdot \frac{250}{500} = 0,03;$$

$$x_8 = \frac{U_{KC}}{100} \cdot \frac{S_B}{S_{HAT-1}} = \frac{-0,5}{100} \cdot \frac{250}{500} = -0,0025 \approx 0.$$

Для АТ – 2

$$x_6 = \frac{U_{KBC}}{100} \cdot \frac{S_B}{S_{HAT-2}} = \frac{11}{100} \cdot \frac{250}{320} = 0,09.$$

Для трансформатора

$$x_{11} = \frac{U_K}{100} \cdot \frac{S_B}{S_{HT}} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{250}{50} = 0,53.$$

Сопротивление линий будет определяться следующим образом.

Для линии 220 кВ

$$x_4 = x_5 = x_{уд} \cdot l_{220} \cdot \frac{S_B}{U_{CP}^2} = 0,4 \cdot 250 \cdot \frac{250}{230^2} = 0,47.$$

Для линии 110 кВ

$$x_9 = x_{10} = 0,4 \cdot 20 \cdot \frac{250}{115^2} = 0,15.$$

Сопротивление системы

$$x_7 = x_c = \frac{S_B}{\sqrt{3} \cdot I_C^{(3)} \cdot U_{CP}} = \frac{250}{\sqrt{3} \cdot 50 \cdot 515} = 0,01.$$

Напряжение системы E_2 при заданном режиме генератора определяется параметрами системы. Это напряжение E_2 целесообразно определить позднее.

Сопротивление нагрузки

$$Z_H = \frac{S_B}{S_H} (\cos \varphi_H + j \sin \varphi_H) = \frac{S_B}{P_H} (\alpha + j \operatorname{tg} \varphi_H),$$

тогда

$$r_1 = r_H = \frac{S_B}{P_H} = \frac{250}{30} = 8,3;$$

$$x_{12} = x_H = \frac{S_B}{P_H} \cdot \operatorname{tg} \varphi_H = \frac{250}{30} \cdot \frac{\sqrt{1-0,9^2}}{0,9} = 4,04.$$

Упрощение схемы замещения

Применяя правила последовательного и параллельного сложений можно получить упрощенную схему (рис. 2.3).

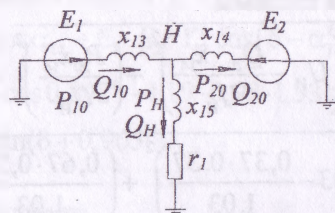


Рис. 2.3 Упрощенная Т-образная схема

$$x_{13} = x_1 + x_2 = 0,28 + 0,1 = 0,38;$$

$$x_{14} = x_3 + \frac{x_4}{2} + x_6 + x_7 = 0,03 + \frac{0,47}{2} + 0,09 + 0,01 = 0,37;$$

$$x_{15} = x_{12} + x_{11} + \frac{x_9}{2} + x_8 = 4,04 + 0,525 + \frac{0,151}{2} + 0 = 4,64.$$

Мощности генератора в относительных единицах

$$P_{10} = \frac{P_{\text{НГ}}}{S_{\text{Б}}} = \cos \varphi_{\text{НГ}} = 0,8;$$

$$Q_{10} = \frac{Q_{\text{НГ}}}{S_{\text{Б}}} = \sin \varphi_{\text{НГ}} = 0,6.$$

Тогда напряжение на нагрузке (в т.н)

$$\begin{aligned} U_{\text{Н}} &= \sqrt{\left(E_1 - \frac{Q_{10} \cdot x_{13}}{E_1}\right)^2 + \left(\frac{P_{10} \cdot x_{13}}{E_1}\right)^2} = \\ &= \sqrt{\left(1,189 - \frac{0,6 \cdot 0,38}{1,189}\right)^2 + \left(\frac{0,8 \cdot 0,38}{1,189}\right)^2} = 1,03. \end{aligned}$$

Мощность в ветви нагрузки:

$$P_{\text{Н}} = \frac{U_{\text{Н}}^2}{r_{\text{Н}}} = \frac{1,03^2}{8,3} = 0,13;$$

$$Q_{\text{Н}} = \frac{U_{\text{Н}}^2}{x_{15}} = \frac{1,03^2}{4,641} = 0,23.$$

Тогда мощности передаваемые в систему

$$P_{20} = P_{10} - P_H = 0,8 - 0,13 = 0,67;$$

$$Q'_{20} = Q_{10} - Q_H = 0,6 - 0,23 = 0,37.$$

Тогда напряжение системы

$$E_2 = \sqrt{\left(U_H - \frac{Q'_{20} \cdot x_{14}}{U_H} \right)^2 + \left(\frac{P_{20} x_{14}}{U_H} \right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(1,03 - \frac{0,37 \cdot 0,37}{1,03} \right)^2 + \left(\frac{0,67 \cdot 0,37}{1,03} \right)^2} = 0,93.$$

Характеристики мощности

Сначала необходимо рассчитать собственные и взаимные проводимости.

$$Y'_{11} = \frac{1}{jx_{13} + \frac{jx_{14}(r_1 + jx_{15})}{r_1 + jx_{15} + jx_{14}}} =$$

$$= \frac{1}{j0,38 + \frac{j0,37(8,3 + j4,64)}{8,3 + j4,64 + j0,37}} = 0,02 - j1,36;$$

$$y'_{11} = |Y'_{11}| = 1,36;$$

$$\alpha'_{11} = 90^\circ + \arg(Y'_{11}) = 0,892^\circ;$$

$$Y'_{12} = \frac{1}{jx_{13} + jx_{14} + \frac{jx_{13} \cdot jx_{14}}{r_1 + jx_{15}}} =$$

$$= \frac{1}{j0,38 + j0,37 + \frac{j0,38 \cdot j0,37}{8,3 + j4,64}} = -0,02 - j1,33;$$

$$y'_{12} = |Y'_{12}| = 1,33;$$

$$\alpha'_{12} = 90^\circ + \arg(Y'_{12}) = -0,965^\circ.$$

Характеристики мощности генераторной станции

$$\begin{aligned}
 P'_1 &= E_1^2 \cdot Y'_{11} \sin \alpha'_{11} + E_1 \cdot E_2 \cdot Y'_{12} \sin(\delta - \alpha'_{12}) = \\
 &= 1,19^2 \cdot 1,36 \cdot \sin 0,892^\circ + 1,19 \cdot 0,93 \cdot 1,33 \sin(\delta + 0,965^\circ) = \\
 &= 0,03 + 1,48 \sin(\delta + 0,965^\circ); \\
 Q'_1 &= E_1^2 \cdot Y'_{11} \cos \alpha'_{11} - E_1 \cdot E_2 \cdot Y'_{12} \cos(\delta - \alpha'_{12}) = \\
 &= 1,19^2 \cdot 1,36 \cdot \cos 0,892^\circ - 1,19 \cdot 0,93 \cdot 1,33 \cos(\delta + 0,965^\circ) = \\
 &= 1,92 - 1,48 \sin(\delta + 0,965^\circ).
 \end{aligned}$$

Максимальная мощность

$$P'_{1m} = E_1^2 \cdot Y'_{11} \sin \alpha'_{11} + E_1 \cdot E_2 \cdot Y'_{12} = 1,51.$$

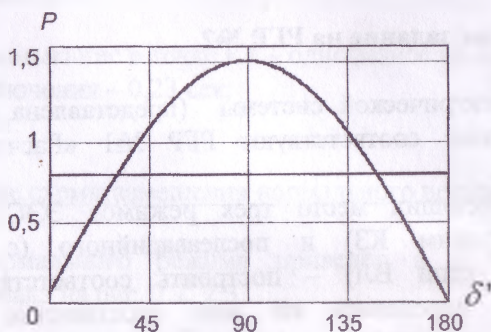


Рис. 2.4 Угловая характеристика активной мощности станции

Расчет коэффициента запаса статической устойчивости

$$K_3 = \frac{P'_{1m} - P_{10}}{P_{10}} \cdot 100\% = \frac{1,51 - 0,8}{0,8} \cdot 100\% = 88,1\%.$$

Для нормальных режимов коэффициент запаса должен быть не менее 20%, для аварийных – не менее 8%.

3. Расчет динамической устойчивости

3.1 Рекомендации к выполнению РГР №2

В объем работы входит выполнение *расчета* динамической устойчивости. Однако рекомендуется в расчете приводить основные теоретические положения используемых методов.

Исходный установившийся режим станции является номинальным режимом эквивалентного генератора с выдачей им номинальной мощности при номинальном напряжении на его шинах. Далее происходит КЗ на одной из цепей ВЛ с последующим отключением поврежденной цепи с заданным временем $t_{откл}$. Вид и место КЗ выбирают в соответствии с вариантом задания (таблица Б2).

3.2 Типовое задание на РГР №2

Схема электрической системы (представлена на рис. Б1.) и исходные данные соответствуют РГР №1 «Расчет статической устойчивости».

1. Для имеющих место трех режимов ЭЭС: нормального, аварийного (режим КЗ) и послеаварийного (с отключением поврежденной цепи ВЛ) – построить соответствующие схемы замещения и определить по ним собственные и взаимные проводимости для узлов станции и системы. Построить для рассматриваемых режимов ЭЭС угловые характеристики активной мощности станции. Генератор во всех режимах представляется приближенно – переходными параметрами с неизменной ЭДС E' .

2. По построенным угловым характеристикам графически, уравнивая площадки ускорения и торможения, определить предельный угол отключения КЗ (если он существует). Определить этот угол также аналитически.

3. Методом последовательных интервалов решить уравнение движения ротора генератора в режиме КЗ, построить график изменения во времени угла положения ротора генератора, по которому, зная предельный угол отключения, определить предельное время отключения КЗ. Сопоставить его с заданным временем отключения и сделать вывод об устойчивости системы при заданном возмущении.

Если предельного угла отклонения не существует, то объяснить физический смысл такого явления и проиллюстрировать его графиком изменения угла положения ротора генератора в режиме КЗ.

Примечания.

При возможности применения ЭВМ в пункте 3 для решения дифференциального уравнения можно использовать не метод последовательных интервалов, а стандартные функции математических пакетов (MathCAD и т.п.)

3.3 Пример расчета динамической устойчивости.

Исходные данные:

Короткое замыкание в точке К4 – однофазное на землю.

Время отключения – 0,23 сек.

Q отключен.

Составление схемы замещения нормального режима

Расчет нормального режима приведен в РГР №1, схема замещения показана на рис. 2.2, 2.3.

Составление схемы замещения послеаварийного режима с отключенной линией

При отключенной линии в схеме замещения разорвана линия ($x_5 = \infty$).

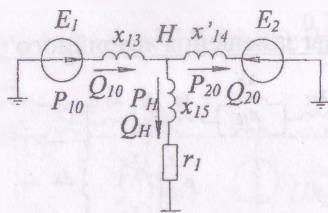


Рис. 3.1 Упрощенная Т – образная схема

Упрощения:

$$x'_{14} = x_3 + x_4 + x_6 + x_7 = 0,03 + 0,47 + 0,09 + 0,01 = 0,60.$$

Собственная проводимость:

$$Y_{11}'' = \frac{1}{jx_{13} + \frac{jx'_{14}(r_1 + jx_{15})}{r_1 + jx_{15} + jx'_{14}}} =$$

$$= \frac{1}{j0,38 + \frac{j0,6(8,3 + j4,64)}{8,3 + j4,64 + j0,6}} = 0,03 - j1,04;$$

$$y_{11}'' = |Y_{11}''| = 1,04;$$

$$\alpha_{11}'' = 90^\circ + \arg(Y_{11}'') = 1,828^\circ.$$

Взаимная проводимость:

$$Y_{12}'' = \frac{1}{jx_{13} + jx'_{14} + \frac{jx_{13} \cdot jx'_{14}}{r_1 + jx_{15}}} =$$

$$= \frac{1}{j0,38 + j0,6 + \frac{j0,38 \cdot j0,6}{8,3 + j4,64}} = -0,02 - j1,01;$$

$$y_{12}'' = |Y_{12}''| = 1,01;$$

$$\alpha_{12}'' = 90^\circ + \arg(Y_{12}'') = -1,21^\circ.$$

Характеристика активной мощности:

$$P_1'' = E_1^2 \cdot y_{11}'' \sin \alpha_{11}'' + E_1 \cdot E_2 \cdot y_{12}'' \sin(\delta - \alpha_{12}'') = 0,05 + 1,12 \cdot \sin(\delta + 1,21^\circ);$$

$$P_{1m}'' = E_2^2 \cdot y_{11}'' \sin \alpha_{11}'' + E_1 \cdot E_2 \cdot y_{12}'' \sin(\delta - \alpha_{12}'') = 0,05 + 1,12 = 1,17.$$

Составление схемы замещения аварийного режима с КЗ на линии

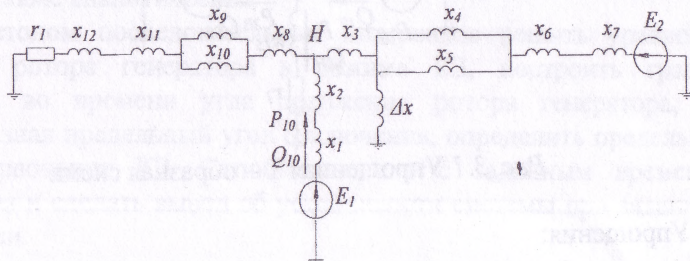


Рис. 3.2 Схема замещения при однофазном КЗ в точке К4

Дополнительное сопротивление определяется как:

$$\Delta x = \frac{x_{2\Sigma} x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}}.$$

Обратная последовательность:

Сопротивление обратной последовательности у всех элементов те же, кроме нагрузки и генератора.

Нагрузка:

$$x_{12}^2 = x_{H2} \cdot \frac{S_B}{P_H} \cos \varphi_H = 0,45 \cdot \frac{250}{30} \cdot 0,9 = 3,375.$$

Генератор:

$$x_1^2 = x_{2Г} \cdot \frac{S_B}{S_{НГ}} = x_{2Г} = 0,23.$$

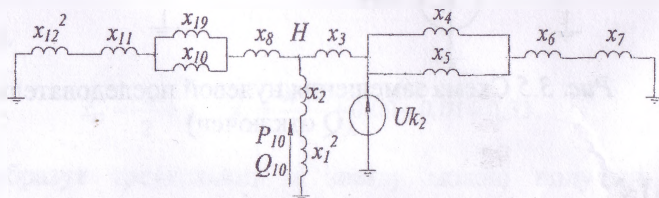


Рис. 3.3 Схема замещения обратной последовательности

Преобразуем схему:

$$x_{13}^2 = x_1^2 + x_2 = 0,23 + 0,1 = 0,33;$$

$$x_{14}^2 = x_6 + x_7 + \frac{x_4}{2} = 0,09 + 0,01 + \frac{0,47}{2} = 0,33;$$

$$x_{15}^2 = x_{12}^2 + x_{11} + \frac{x_9}{2} + x_8 = 3,375 + 0,53 + \frac{0,15}{2} = 3,98.$$

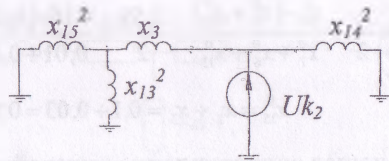


Рис. 3.4 Упрощенная схема замещения обратной последовательности

Здесь

$$x_{17}^2 = \frac{x_{15}^2 x_{13}^2}{x_{15}^2 + x_{13}^2} + x_3 = \frac{3,98 \cdot 0,33}{3,98 + 0,33} + 0,03 = 0,34;$$

$$x_{2\text{г}} = \frac{x_{17}^2 x_{14}^2}{x_{17}^2 + x_{14}^2} = \frac{0,34 \cdot 0,33}{0,34 + 0,33} = 0,17.$$

Нулевая последовательность:

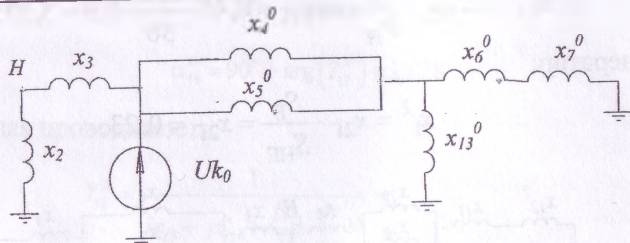


Рис. 3.5 Схема замещения нулевой последовательности (Q отключен)

АТ-2:

$$x_6^0 = \frac{0,5 \cdot (U_{\text{КВН}} + U_{\text{КВС}} - U_{\text{КСН}})}{100} \cdot \frac{S_{\text{Б}}}{S_{\text{НАТ-2}}} = \frac{6,5}{100} \cdot \frac{250}{320} = 0,05;$$

$$x_{13}^0 = \frac{0,5 \cdot (U_{\text{КВН}} + U_{\text{КСН}} - U_{\text{КВС}})}{100} \cdot \frac{S_{\text{Б}}}{S_{\text{НАТ-2}}} = \frac{20,5}{100} \cdot \frac{250}{320} = 0,16.$$

Линия:

$$x_4^0 = x_5^0 = 5,5x_4 = 5,5 \cdot 0,47 = 2,59.$$

Преобразования схемы аналогичны преобразованиям для обратной последовательности.

$$x_{14}^0 = \frac{x_4}{2} + \frac{x_{13}^0 \cdot (x_6^0 + x_7^0)}{x_7^0 + x_6^0 + x_{13}^0} = \frac{2,59}{2} + \frac{0,16 \cdot (0,05 + 0,01)}{0,01 + 0,05 + 0,16} = 1,34;$$

$$x_{15}^0 = x_2 + x_3 = 0,1 + 0,03 = 0,13.$$

Результирующее сопротивление нулевой последовательности:

$$x_{0\text{г}} = \frac{x_{15}^0 x_{14}^0}{x_{15}^0 + x_{14}^0} = \frac{0,13 \cdot 1,34}{0,13 + 1,34} = 0,12.$$

Тогда дополнительное сопротивление

$$\Delta x = \frac{x_{2E} x_{0E}}{x_{2E} + x_{0E}} = \frac{0,17 \cdot 0,12}{0,17 + 0,12} = 0,07.$$

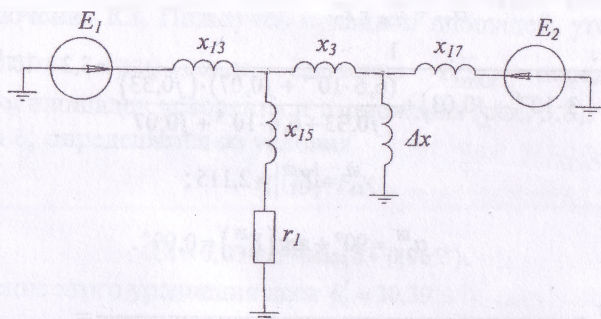


Рис. 3.6 Упрощенная схема замещения аварийного режима

Здесь

$$x_{17} = \frac{x_4}{2} + x_6 + x_7 = \frac{0,47}{2} + 0,09 + 0,01 = 0,33.$$

Преобразуя треугольник в звезду можно получить Т-образную схему.

$$Z_{18} = \frac{jx_3(r_1 + jx_{15})}{j\Delta x + (r_1 + jx_{15}) + jx_3} = \frac{j0,03 \cdot (8,3 + j4,64)}{j0,07 + (8,3 + j4,64) + j0,03} = 3 \cdot 10^{-4} + j0,03;$$

$$Z_{19} = \frac{j\Delta x \cdot jx_3}{j\Delta x + (r_1 + jx_{15}) + jx_3} = \frac{j0,07 \cdot j0,03}{j0,07 + (8,3 + j4,64) + j0,03} \approx 0;$$

$$Z_{20} = \frac{j\Delta x(r_1 + jx_{15})}{j\Delta x + (r_1 + jx_{15}) + jx_3} = \frac{j0,07 \cdot (8,3 + j4,64)}{j0,07 + (8,3 + j4,64) + j0,03} = 6,6 \cdot 10^{-4} + j0,07.$$

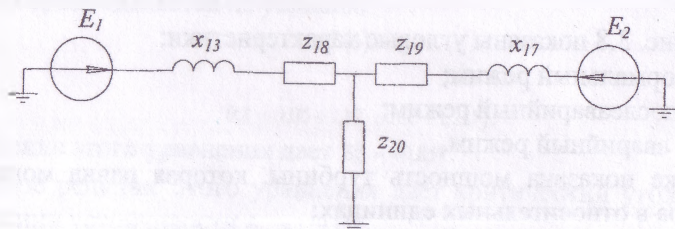


Рис. 3.7 Упрощенная Т-образная схема замещения

Собственные и взаимные проводимости:

$$Y_{11}^{III} = \frac{1}{(jx_{13} + Z_{18}) + \frac{Z_{20}(jx_{17} + Z_{19})}{jx_{17} + Z_{20} + Z_{19}}} =$$

$$\frac{1}{(j0,38 + 3 \cdot 10^{-4} + j0,03) + \frac{(6,6 \cdot 10^{-4} + j0,07) \cdot (j0,33)}{j0,33 + 6,6 \cdot 10^{-4} + j0,07}} = 3,34 \cdot 10^{-3} - j2,115;$$

$$y_{11}^{III} = |Y_{11}^{III}| = 2,115;$$

$$\alpha_{11}^{III} = 90^\circ + \arg(Y_{11}^{III}) = 0,09^\circ.$$

$$Y_{12}^{III} = \frac{1}{jx_{13} + Z_{18} + jx_{17} + Z_{19} + \frac{(jx_{13} + Z_{18}) \cdot (jx_{17} + Z_{19})}{Z_{20}}} =$$

$$\frac{1}{j0,38 + 3 \cdot 10^{-4} + j0,03 + j0,33 + \frac{(j0,38 + 3 \cdot 10^{-4} + j0,03) \cdot (j0,33)}{6,6 \cdot 10^{-4} + j0,07}} =$$

$$= 2,50 \cdot 10^{-3} - j0,373;$$

$$y_{12}^{III} = |Y_{12}^{III}| = 0,373;$$

$$\alpha_{12}^{III} = 90^\circ + \arg(Y_{12}^{III}) = -0,383^\circ.$$

Характеристика мощности в аварийном режиме

$$P_1^{III} = E_1^2 \cdot y_{11}^{III} \sin \alpha_{11}^{III} + E_1 \cdot E_2 \cdot y_{12}^{III} \sin(\delta - \alpha_{12}^{III}) = 4,72 \cdot 10^{-3} + 0,413 \cdot \sin(\delta + 0,383^\circ);$$

$$P_{1m}^{III} = E_1^2 \cdot y_{11}^{III} \sin \alpha_{11}^{III} + E_1 \cdot E_2 \cdot y_{12}^{III} = 4,72 \cdot 10^{-3} + 0,413 \approx 0,413.$$

Определение предельного угла методом площадей

На рис. 3.8 показаны угловые характеристики:

I – нормальный режим;

II – послеаварийный режим;

III – аварийный режим.

Также показана мощность турбины, которая равна мощности генератора в относительных единицах:

$$P_0 = \frac{P_{HT}}{S_B} = \cos \varphi_{HT} = 0,8.$$

Для практики эксплуатации систем представляет интерес определение наибольшего угла отклонения КЗ, при котором динамическая устойчивость будет сохраняться – предельного угла отклонения КЗ. Пользуясь правилом площадей, угол $\delta_{откл}^{пр}$ можно найти графически. Значение $\delta_{откл}^{пр}$ определяется равенством площадок ускорения и торможения (рис. 3.8).

Угол δ_0' определяется из условия

$$P_1'(\delta) = P_0.$$

Или

$$0,8 = 0,03 + 1,48 \sin(\delta + 0,965^\circ).$$

Решение этого уравнения даст $\delta_0' = 30,39^\circ$.

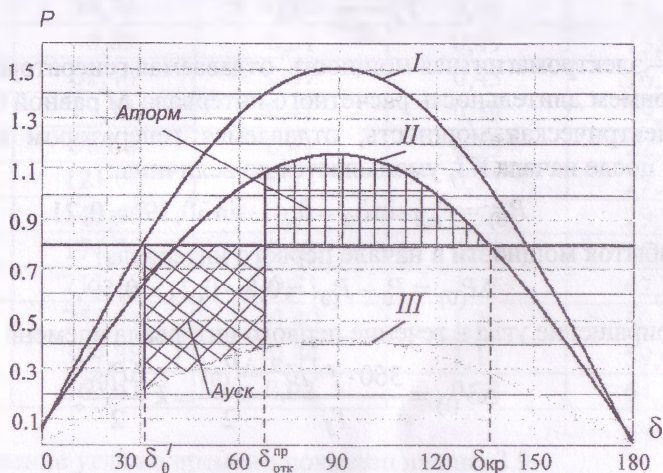


Рис. 3.8 Метод площадей

Угол δ_0'' определяется из условия:

$$P_1''(\delta) = P_0$$

или

$$0,8 = 0,05 + 1,12 \cdot \sin(\delta + 1,21^\circ).$$

Решение этого уравнения даст $\delta_0'' = 40,85^\circ$.

Второе решение этого уравнения дает критический угол при сохранении устойчивости $\delta_{кр} = 139,15^\circ$.

Далее определим предельный угол отклонения КЗ, при котором динамическая устойчивость будет сохраняться [5]

$$\cos \delta_{\text{откл}}^{\text{пр}} = \frac{\pi/180 \cdot P_0 (\delta_{\text{кр}} - \delta_0) - P_{\text{м}}^{\text{II}} \cos \delta_0 + P_{\text{м}}^{\text{III}} \cos \delta_{\text{кр}}}{P_{\text{м}}^{\text{III}} - P_{\text{м}}^{\text{II}}} \quad (3.1)$$

$$\cos \delta_{\text{откл}}^{\text{пр}} = \frac{\pi/180 \cdot 0,8(139,15 - 30,39) - 0,413 \cos 30,39 + 1,17 \cos 139,15}{1,17 - 0,413} = 0,367;$$

$$\delta_{\text{откл}}^{\text{пр}} = 68,52^\circ.$$

Определение изменения угла во времени методом последовательных интервалов

Относительное движение ротора генератора определяется дифференциальным уравнением второго порядка:

$$T_J \frac{d^2 \delta'}{dt^2} = P_0 - P, \quad (3.2)$$

где P — электромагнитная мощность, отдаваемая генератором в сеть.

Примем длительность расчетного интервала Δt равной 0,05 с.

Электрическая мощность, отдаваемая генератором в первый момент после начала КЗ, уменьшается до величины:

$$P_{(0)} = P_{\text{мII}} \sin \delta_0' = 0,41 \cdot \sin 30,39^\circ = 0,21.$$

Избыток мощности в начале первого интервала:

$$\Delta P_{(0)} = P_0 - P_{(0)} = 0,8 - 0,21 = 0,59.$$

Приращение угла в течение первого интервала времени:

$$\Delta \delta'_{(1)} = \frac{360 \cdot f \cdot \Delta t^2}{T_J} \frac{\Delta P_{(0)}}{2} = k \frac{\Delta P_{(0)}}{2},$$

где

$$k = \frac{360 \cdot 50 \cdot 0,05^2}{6,3} = 7,14^\circ;$$

тогда

$$\Delta \delta'_{(1)} = 7,14 \cdot \frac{0,59}{2} = 2,11^\circ.$$

Значение угла к концу первого или началу второго интервала:

$$\delta'_{(1)} = \delta_0' + \Delta \delta'_{(1)} = 30,39^\circ + 2,11^\circ = 32,5^\circ.$$

Электрическая мощность, отдаваемая генератором в начале второго интервала:

$$P_{(1)} = P_{\text{мII}} \sin \delta'_{(1)} = 0,41 \cdot \sin 32,5^\circ = 0,22.$$

Избыток мощности в начале второго интервала:

$$\Delta P_{(1)} = P_0 - P_{(1)} = 0,8 - 0,22 = 0,58.$$

Приращение угла в течение второго интервала:

$$\Delta \delta'_{(2)} = \Delta \delta'_{(1)} + k \Delta P_{(1)} = 2,11^\circ + 7,14 \cdot 0,58 = 6,24^\circ.$$

Значение угла к концу второго интервала:

$$\delta'_{(2)} = \delta'_{(1)} + \Delta \delta'_{(2)} = 32,5^\circ + 6,24^\circ = 38,74^\circ.$$

Далее переходим к расчету третьего и последующих интервалов.

Результаты расчетов приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1.

$t, \text{сек}$	$\delta', \text{град}$	$P, \text{отн.ед.}$	$\Delta P, \text{отн.ед.}$	$\Delta \delta', \text{град}$
0	30,39	0,21	0,59	2,11
0,05	32,50	0,22	0,58	6,24
0,1	38,74	0,26	0,54	10,11
0,15	48,85	0,31	0,49	13,60
0,2	62,46	0,37	0,43	16,70
0,25	79,16	0,41	0,39	19,52
0,3	98,68	0,41	0,39	22,32
0,35	121,00	0,35	0,45	25,50
0,4	146,50	0,23	0,57	29,59
0,45	176,09	0,03	0,77	35,09
0,5	211,18	-0,21	1,01	42,33
0,55	253,51	-0,40	1,20	50,87
0,6	304,38	-0,34	1,14	59,02
0,65	363,41	0,02	0,78	64,57

Изменение угла во времени показано на рис. 3.9.

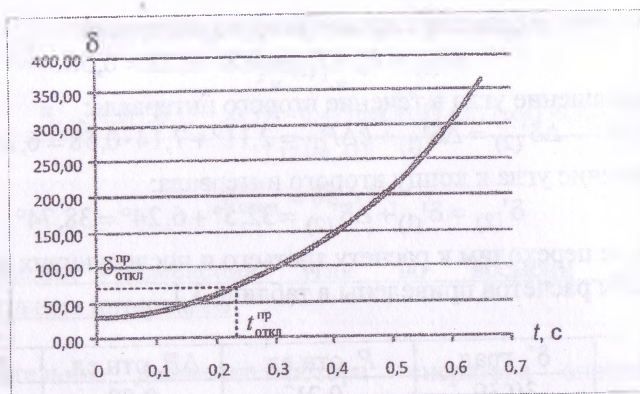


Рис. 3.9 Кривая изменения угла δ' во времени

Видно, что предельному углу отклонения $\delta_{\text{откл}}^{\text{пр}} = 68,52^\circ$ соответствует предельное время отклонения $t_{\text{откл}}^{\text{пр}} = 0,23$ с. Таким образом, при отклонении через $t_{\text{откл}}^{\text{пр}} = 0,23$ с, получаем, что с теоретической точки зрения имеет место предельный по устойчивости режим и динамическая устойчивость сохраняется, но на практике в этой ситуации устойчивость системы теряется.

Уравнения движения ротора при КЗ на линии может быть решено с помощью программы MathCad (рис. 3.10).

Given

$$\frac{6.3}{18000} \frac{d^2}{dt^2} x(t) = p_0 - p_{21}(x(t))$$

$$x(0) = del10 \quad x(0) = 0$$

$x := \text{Odesolve}(t, 15)$

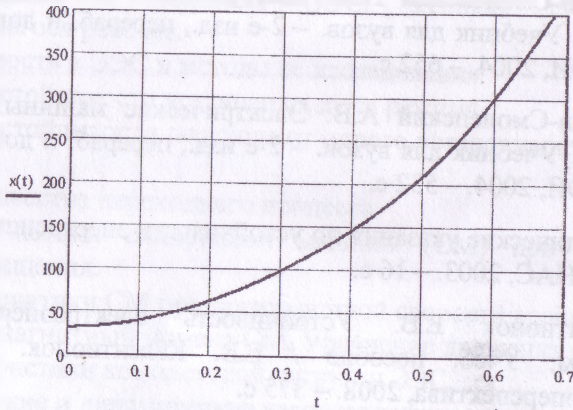


Рис. 3.10 Решение уравнения в MathCad

Полученный с помощью MathCad график полностью совпадает с полученными ранее результатами по методу последовательных интервалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куликов Ю.А. Переходные процессы в электрических системах: Учеб. пособие. – Новосибирск: НГТУ, М.: Мир: ООО «Издательство АСТ», 2003. – 283 с.
2. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. В 2-х т. Том.1. Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МЭИ, 2004. – 652 с.
3. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. В 2-х т. Том.2. Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МЭИ, 2004. – 532 с.
4. Методические указания по устойчивости энергосистем. Изд-во НЦ ЭНАС, 2003. – 16 с.
5. Калентионюк Е.В. Устойчивость электроэнергетических систем: Учеб. пособие / Е.В. Калентионюк. – Минск: Техноперспектива, 2008. – 375 с.
6. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах: Учеб. для электроэнергет. спец. вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1985. – 536 с.

Темы рефератов

1. Виды переходных процессов (ПП) в ЭЭС и основные положения при анализе электромеханических ПП.
2. Схемы замещения основных силовых элементов ЭЭС.
3. Мощности в линейной системе. Предельные и максимальные нагрузки.
4. Требования к режимам ЭЭС. Условия существования установившегося режима.
5. Устойчивость в ЭЭС и методы ее исследования.
6. Оценка устойчивости установившегося режима.
7. Оценка устойчивости перехода от одного установившегося режима к другому.
8. Оценка качества переходного процесса.
9. Характеристики синхронной машины (СМ) при синхронной скорости вращения.
10. Характеристики СМ при несинхронной скорости вращения.
11. Электромагнитный момент СМ. Уравнение движения ротора.
12. Характеристики комплексной нагрузки ЭЭС.
13. Статические и динамические характеристики элементов нагрузок.
14. Практические критерии статической устойчивости.
15. Предельные показатели режима работы станции (предельная мощность и критическое напряжение).
16. Метод малых колебаний для анализа статической устойчивости.
17. Алгебраические и частотные критерии статической устойчивости.
18. Статическая устойчивость нерегулируемой системы. Самораскачивание.
19. Статическая устойчивость нерегулируемой системы. Самовозбуждение.
20. Основные виды АРВ. Структурные схемы и передаточные функции.
21. Характеристическое уравнение регулируемой системы.
22. Статическая устойчивость регулируемой системы при АРВ пропорционального действия.
23. Статическая устойчивость регулируемой системы при АРВ сильного действия.

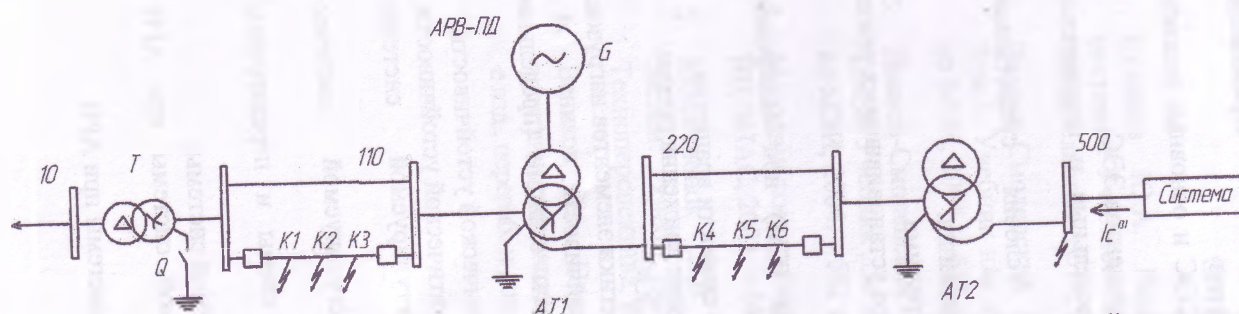


Рис. Б1. Схема исследуемой ЭЭС. Точки $K2$ и $K5$ расположены на серединах линий, остальные в непосредственной близости от соответствующих шин подстанции.

Таблица Б1

Автотрансформаторы	Трансформатор	Система	Нагрузка	Линия (на одну цепь)
$U_{KB-H} = 32\%$ $U_{KB-C} = 11\%$ $U_{KC-H} = 20\%$	$U_K = 10,5\%$	$E_C = 1,0$ о.е. Сопротивления отдельных последовательностей: $x_{C1} = x_{C2} = x_{C0}$	$E''_{HC} = 0,85$ о.е. $x''_{H*(H)} = 0,35$ Для обратной последовательности: $x_{H2*(H)} = 0,45$	Прямая последовательность: $x_1 = 0,4$ Ом/км Нулевая последовательность: $x_{0I} = 3,5 * x_1$, $x_{0I-II} = 2,0 * x_1$ (сопротивление взаимной индукции цепей)

№ варианта	Генератор						Система				Т			
	P_g МВт	$\cos \varphi_g$	U_n кВ	x_d'' о.е.	x_d' о.е.	x_T о.е.	T_j	I_{d0} кА	S_{h1} МВА	S_{h2} МВА	S_{h3} МВА	S_{h4} МВА	Режим	Q
0	200	0,80	10,5	0,19	0,28	0,23	6,3	50	500	500	320	50	отк.	
1	126	0,80	6,3	0,18	0,27	0,22	7,2	20	400	320	320	50	отк.	
2	180	0,80	6,3	0,19	0,28	0,24	7,2	25	600	320	320	32	отк.	
3	252	0,80	10,5	0,14	0,22	0,22	7,2	40	600	500	500	96	отк.	
4	300	0,80	10,5	0,19	0,28	0,23	6,3	35	750	500	500	20	отк.	
5	165	0,85	13,8	0,21	0,28	0,19	8,9	23	400	320	320	20	отк.	
6	209	0,80	10,5	0,16	0,28	0,18	6,9	41	500	500	500	32	отк.	
7	270	0,90	15,75	0,19	0,27	0,20	10,8	46	600	500	500	80	отк.	
8	180	0,98	6,3	0,39	0,76	0,4	1,1	33	400	320	320	30	отк.	
9	90	0,98	6,3	0,39	0,76	0,5	1,1	22	200	320	320	20	отк.	

Варианты заданий

Таблица Б2

№ варианта	ВЛ 220 кВ		ВЛ 110 кВ		Нагрузка		КЗ	
	длина км	длина км	длина км	длина км	P_n МВт	$\cos \varphi_n$	Точка и вид	$t_{отс}$ сек
0	250	20	30	25	0,90	0,90	$K_4^{(1)}$	0,23
1	320	30	25	0,90	0,90	0,90	$K_5^{(1)}$	0,20
2	300	50	20	0,85	0,85	0,85	$K_6^{(1)}$	0,21
3	270	60	50	0,85	0,85	0,85	$K_4^{(1)}$	0,20
4	200	45	60	0,90	0,90	0,90	$K_5^{(1)}$	0,22
5	330	55	14	0,90	0,90	0,90	$K_6^{(1)}$	0,24
6	260	15	22	0,90	0,90	0,90	$K_1^{(1)}$	0,33
7	220	32	55	0,90	0,90	0,90	$K_2^{(1)}$	0,32
8	120	65	21	0,85	0,85	0,85	$K_3^{(1)}$	0,30
9	230	25	15	0,95	0,95	0,95	$K_4^{(1)}$	0,20

Таблица Б3