

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра электро- и теплоэнергетики

В.Т. Пилипенко

СТАТИЧЕСКАЯ И ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ЭНЕРГОСИСТЕМ

Методические указания

Рекомендовано к изданию редакционно - издательским советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» для обучающихся по образовательной программе высшего образования по направлению подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Оренбург

2019

УДК 621.311 (07)
ББК 31.297
П 32

Рецензент - кандидат технических наук, доцент В.М. Нелюбов

Пилипенко, В.Т.

П 32 Статическая и динамическая устойчивость энергосистем:
методические указания / В.Т. Пилипенко; Оренбургский гос. ун-т.
– Оренбург : ОГУ, 2019. – 32 с.

Приводятся необходимые теоретические сведения и алгоритмы расчёта статической и динамической устойчивости электрической системы. Рассматривается влияние на запас устойчивости различных факторов, таких как наличие АРВ различных видов, активное сопротивление элементов схемы системы, длина воздушной линии, индуктивное сопротивление генераторов и т.п., а также короткого замыкания.

Методические указания предназначены для студентов заочной формы обучения, обучающихся по программе академической магистратуры 03.04.02 Электроэнергетика и электротехника, профиль подготовки: «Автоматизированные энергетические системы и комплексы» и выполняющих курсовую работу по дисциплине «Статическая и динамическая устойчивость энергосистем».

УДК 621.311
ББК 31.297

© Пилипенко В.Т. 2019
© ОГУ, 2019

Содержание

Введение.....	4
1 Общие положения	4
1.1 Основные понятия и определения.....	4
1.2 Допущения, принимаемые при анализе устойчивости, задачи.....	5
анализа.....	5
1.3 Составление схемы замещения и определение её параметров	7
2 Расчёт параметров нормального установившегося режима работы.....	7
3 Алгоритмы расчёта устойчивости.....	10
3.1 Статическая устойчивость	11
3.2 Динамическая устойчивость	14
Список использованных источников	21
Приложение А Задание на курсовую работу	22
Приложение Б Определение полного комплексного сопротивления	
нагрузки.....	22
Приложение В Схема электроэнергетической системы	22
Приложение Г Параметры элементов расчётной схемы.....	22
Приложение Д Номера заданий.....	32

Введение

Аварии, связанные с нарушением устойчивости параллельной работы генераторов в крупных электроэнергетических системах (в дальнейшем – электрических системах), влекут за собой расстройство электроснабжения больших районов и городов. Ликвидация таких аварий и восстановление нормальных условий работы электрических систем представляют большие трудности и требуют много времени.

При сравнительно небольшом числе аварий их последствия весьма тяжелы, что заставляет уделять значительное внимание вопросам увеличения устойчивости как при проектировании электрических станций и сетей, так и при их эксплуатации.

Различают статическую и динамическую устойчивость. Математические приемы, используемые для их анализа, между собой существенно различаются. Сложность расчетов требует применения соответствующих средств вычислительной техники.

Методические указания содержат задание ([приложение А](#)) и варианты исходных данных для выполнения курсовой работы ([приложения В – Д](#)).

Целью курсовой работы является приобретение навыков расчета статической и динамической устойчивости электрических систем.

1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В установившемся режиме реальной системы электропередачи его параметры постоянно меняются, что связано с изменением нагрузки, изменением схемы коммутации, включением и отключением отдельных генераторов. Эти изменения соответствуют установившемуся режиму и поэтому называются малыми возмущениями. Таким образом, всегда имеются **малые возмущения** параметров режима, при которых она должна быть устойчива. Нарушение устойчивости в электрических системах всегда заканчивается появлением асинхронного хода, связанного с неограниченным изменением скоростей вращения синхронных машин, и приводит к отключению нагрузки, генераторов станций и т.д.

Статическая устойчивость – это способность системы самостоятельно восстанавливать исходный (или близкий к исходному) режим после малого его возмущения.

Большими возмущениями называются такие, которые происходят при КЗ, аварийных отключениях генераторов или линий и т.п. Под действием больших возмущений возникают резкие изменения режима.

Динамическая устойчивость – это способность системы самостоятельно возвращаться в исходное состояние (или близкое к нему) после боль-

шого возмущения. Когда после большого возмущения синхронный режим нарушается, а затем восстанавливается, то говорят о результирующей устойчивости.

Результирующая устойчивость – это способность системы самопроизвольно возвращаться в длительно существующий установившийся режим после кратковременного нарушения устойчивости. Если выпавшая из синхронизма система после устранения причины вновь втягивается в синхронизм, то считают, что система с подключенными к ней генераторами обладает результирующей устойчивостью. Результирующую устойчивость часто считают разновидностью динамической устойчивости.

Пропускной способностью элемента системы в установившемся режиме называется наибольшая мощность, которую можно передать через этот элемент с учетом всех ограничивающих факторов (нагрева, устойчивости, напряжения в узлах и т.д.). Иногда пропускную способность определяют по одному фактору, например, пропускная способность по нагреву.

Деление на статическую и динамическую устойчивость вызвано, прежде всего, особенностью математических приемов, которые используют для анализа устойчивости. Например, анализ статической устойчивости рассматривается при «малых» возмущениях (отклонениях) параметров режима от их установившихся значений (обычно в пределах линейных изменений), что дает возможность **линеаризовать** модель электрической системы, тогда как анализ динамической и результирующей устойчивости выполняется только с использованием **нелинейных** моделей. При этом математическая постановка задачи и ее решение значительно усложняются.

1.2 Допущения, принимаемые при анализе устойчивости, задачи анализа

Кроме допущений, принятых при анализе электромагнитных переходных процессов, принимаются еще несколько, упрощающих оценку устойчивости при удовлетворительной точности:

- предполагается, что скорость вращения роторов синхронных машин при электромеханических процессах изменяется в небольших пределах (2-3%) синхронной скорости;
- считается, что напряжение и токи статора и ротора генератора изменяются мгновенно;
- нелинейность параметров системы обычно не учитывается (параметры системы – это сопротивления, проводимости, коэффициенты трансформации, постоянные времени и т.п.). Нелинейность параметров режима, наоборот, учитывается (параметры режима – это напряжения, мощности, токи, углы сдвига векторов и т.п. Параметры режима связаны между собой параметрами системы). Когда от такой нелинейности отказываются, то это специально оговаривают и систему называют **линеаризованной**.

- переход от одного режима электрической системы к другому можно осуществить, изменив собственные и взаимные сопротивления схемы, а также ЭДС генераторов и двигателей;

- исследование динамической устойчивости при несимметричных возмущениях производится в схеме замещения прямой последовательности. Считается, что движение роторов генераторов и двигателей обусловлено моментами, создаваемыми токами прямой последовательности.

Задачами анализа статической устойчивости являются:

- расчет параметров предельных режимов (предела передаваемой мощности, предельного (критического) напряжения в узловых точках системы, питающих нагрузку и т.п.);

- определение коэффициентов запаса устойчивости по напряжению и мощности;

- выбор мероприятий по повышению статической устойчивости энергосистем или обеспечению заданной пропускной способности электропередачи;

- разработка требований, направленных на улучшение устойчивости систем. Выбирается настройка АРВ, обеспечивающая требуемую точность поддержания напряжения.

Задачами анализа динамической устойчивости являются:

- расчет параметров динамического перехода при эксплуатационном или аварийном отключениях нагруженных элементов электрической системы;

- определение параметров динамических переходов при коротких замыканиях в системе с учетом различных факторов:

- 1) возможного перехода одного несимметричного КЗ в другое (например, однофазного в двухфазное);

- 2) работы автоматического повторного включения элемента, отключившегося после КЗ.

Результатами расчета динамической устойчивости являются:

- предельное время отключения расчетного КЗ в наиболее опасных точках электрической системы;

- паузы систем АПВ, установленных на различных элементах электрической системы;

- параметры систем автоматического ввода резерва (АВР).

1.3 СОСТАВЛЕНИЕ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕЁ ПАРАМЕТРОВ

Расчет устойчивости системы начинается с составления схемы замещения и определения её параметров. Расчет параметров производится, как правило, в системе относительных единиц. При определении параметров ис-

пользуются рекомендациями и математические формулы, известные из курса электромагнитных переходных процессов [2].

Схема замещения составляется в соответствии с расчётной схемой простейшей системы электропередачи. Под **простейшей системой** (рисунок 2.1) понимается такая, в которой **одиночная** электростанция (эквивалентный генератор) связана посредством трансформаторов и ЛЭП с шинами **приемной системы**, мощность которой настолько велика по сравнению с мощностью рассматриваемой электропередачи, что **напряжение на шинах приемной системы можно считать неизменным** как по модулю, так и по фазе.

Составленная схема замещения должна быть последовательно преобразована до простейшего вида, который определяется поставленной задачей и принятыми допущениями. Расчёту устойчивости системы электропередачи должен предшествовать расчёт параметров её нормального установившегося режима работы.

2 РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ НОРМАЛЬНОГО УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА РАБОТЫ

Расчёт рассматривается на примере простейшей системы электропередачи, схема которой приведена на рисунке 2.1. Схема исследуемой системы содержит эквивалентный генератор, повышающий трансформатор, линию электропередачи, понижающий трансформатор и шины приемной системы.

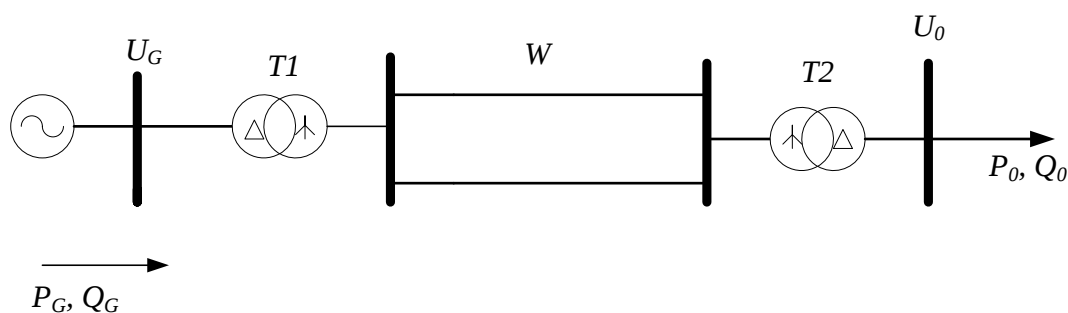


Рисунок 2.1 – Расчётная схема системы электропередачи

При мощности приемной энергосистемы, значительно превышающей мощность эквивалентного генератора, напряжение U_0 может быть принято неизменным по модулю и фазе.

Схема замещения приведена на рисунке 2.2.

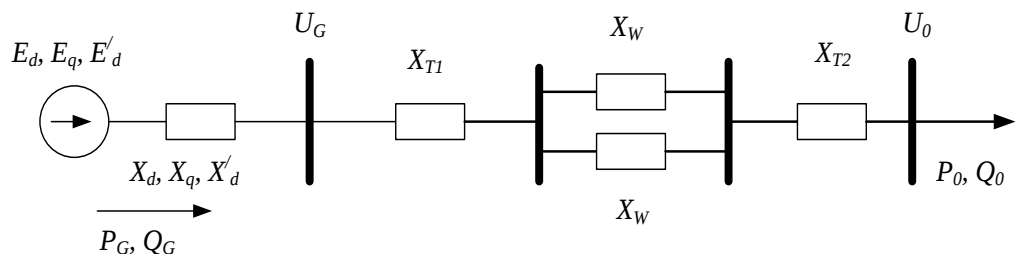


Рисунок 2.2 – Сема замещения системы электропередачи

При отсутствии на эквивалентном генераторе передающей станции автоматического регулятора возбуждения (АРВ) этот генератор представляется синхронным индуктивным сопротивлением X_d и приложенной за ним синхронной ЭДС E_q . При АРВ пропорционального действия (АРВ ПД) генератор представляют постоянной переходной ЭДС E'_q за продольной переходной реактивностью X'_d . АРВ сильного действия (АРВ СД) поддерживает постоянство напряжений на шинах генератора или в начале линии. В схеме замещения такой генератор приближенно учитывают поперечной составляющей напряжения на зажимах генератора $U_{Gq} = U_{G0}$, при этом $X_G = 0$.

В качестве параметров установившегося режима должны быть определены токи I_d, I_q, I_0 , фиктивная E_Q , синхронная E_q и переходная E'_q ЭДС генератора; угол δ_0 между вектором ЭДС генератора (поперечной осью ротора q) и вектором напряжения U_0 системы; напряжение U_{G0} на зажимах генератора; активная P_{G0} и реактивная Q_{G0} мощности, выдаваемые в систему; мощность турбины $P_{T0} = P_{G0}$.

2.1 Напряжение на зажимах генератора:

$$U_{G0} = \sqrt{\left(U_0 + \frac{Q_0 \cdot X_{\text{вн}}}{U_0} \right)^2 + \left(\frac{P_0 \cdot X_{\text{вн}}}{U_0} \right)^2}.$$

где $Q_0 = Q_{G0}$ - реактивная мощность генератора в относительных единицах;

$X_{\text{вн}} = X_{T1} + X_{w1} \| X_{w2} + X_{T2}$ - индуктивное сопротивление внешней цепи, включающее в себя для рассматриваемой системы сопротивление двухцепной линии и двух трансформаторов (рисунок 2.2). В общем случае это сум-

марное сопротивление элементов между шинами генератора и приёмной системы;

$P_0 = P_{G0} = P_{T0}$ - активная мощность, выдаваемая генератором в сеть, при пренебрежении активным сопротивлением внешней цепи $r_{вн}$, принимается равной мощности турбины в исходном режиме.

2.2 Фазовый угол внешней цепи (между векторами напряжений приёмной системы и генератора):

$$\delta_{вн} = \arctg \left(\frac{P_0 \cdot X_{вн}}{U_0^2 + Q_0 \cdot X_{вн}} \right).$$

2.3 Фиктивная ЭДС генератора:

$$E_Q = \sqrt{\left(U_0 + \frac{Q_0 \cdot X_{q\Sigma}}{U_0} \right)^2 + \left(\frac{P_0 \cdot X_{q\Sigma}}{U_0} \right)^2}. \quad (2.1)$$

где $X_{q\Sigma} = X_{вн} + X_q$, (X_q - синхронное сопротивление генератора по поперечной оси).

2.4 Внутренний угол генератора:

$$\delta_0 = \arctg \left(\frac{P_0 \cdot X_{q\Sigma}}{U_0^2 + Q_0 \cdot X_{q\Sigma}} \right). \quad (2.2)$$

2.5 Продольная I_d и поперечная I_q составляющие токов генератора:

$$I_d = \frac{E_Q - U_0 \cdot \cos \delta_0}{X_{q\Sigma}}, I_q = \frac{U_0 \cdot \cos \delta_0}{X_{q\Sigma}}.$$

2.6 Полный ток генератора:

$$I_0 = \sqrt{I_d^2 + I_q^2}.$$

2.7 Синхронная ЭДС генератора:

$$E_{q0} = E_Q + (X_{d\Sigma} - X_{q\Sigma}) \cdot I_d, \quad (2.3)$$

где $X_{d\Sigma} = X_{BH} + X_d$, (X_d - синхронное сопротивление генератора по продольной оси).

2.8 Переходная ЭДС генератора:

$$E'_{q0} = E_Q + (X'_{d\Sigma} - X_{q\Sigma}) \cdot I_d, \quad (2.4)$$

где $X'_{d\Sigma} = X_{BH} + X'_d$, (X'_d - переходное сопротивление генератора).

2.9 Мощность, выдаваемая генератором при угле $\delta = \delta_0$:

$$P_{G0} = \frac{E_{q0} \cdot U_0}{X_{d\Sigma}} \sin \delta_0 + \frac{U_0^2}{2} \cdot \frac{X_{d\Sigma} - X_{q\Sigma}}{X_{d\Sigma} \cdot X_{q\Sigma}} \sin 2\delta_0,$$

2.10 Предельная передаваемая мощность по электропередаче:

$$P_{\max} = \frac{E_{q0} U_0}{X_{d\Sigma}}.$$

2.11 Значения коэффициентов запаса статической устойчивости по активной мощности вычисляются по формуле:

$$K_p = \frac{P_{\max} - P_{T0}}{P_{T0}} \cdot 100\%, \quad (2.5)$$

где $P_{\max}$ - предел передаваемой мощности по электропередаче (максимум угловой характеристики мощности) при соответствующем законе регулирования возбуждения синхронного генератора;

P_{T0} - исходное значение мощности турбины.

Приведенный порядок расчёта параметров установившегося режимов является наиболее общим. В частном случае (для неявнополюсных машин или при пренебрежении неравенством X_d и X_q) следует принимать $X_{d\Sigma} = X_{q\Sigma}$.

3 АЛГОРИТМЫ РАСЧЁТА УСТОЙЧИВОСТИ

3.1 СТАТИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ

Ниже рассматриваются два примера расчёта устойчивости при различном характере связи между генераторами станций и шинами приёмной системы.

3.1.1 В качестве примера рассматривается схема замещения простейшей системы, составленная по упрощенной расчётной схеме при индуктивной связи генераторов станции с приёмной системой, представленная на рисунке 3.1.

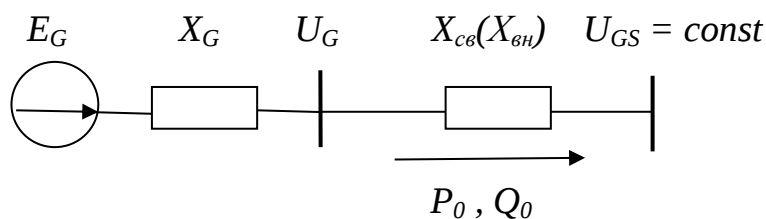


Рисунок 3.1

Целью расчёта является упрощенный анализ влияния устройства АРВ и его видов на коэффициент запаса статической устойчивости. В связи с этим рассматривается три случая, в каждом из которых генераторы учитываются различными параметрами:

- при постоянстве тока возбуждения, т.е. отсутствии АРВ

$$E_G = E_{q0}, \quad X_G = X_d, \quad \delta = \delta_0;$$

- при постоянстве результирующего потокосцепления, т.е. АРВ пропорционального действия (АРВ ПД)

$$E_G = E'_{q0}; \quad X_G = X'_d, \quad \delta = \delta_0;$$

- при постоянстве напряжения на шинах генератора, т.е. АРВ сильного действия (АРВ СД)

$$E_G = U_{G0} = const. \quad X_G = 0, \quad \delta = \delta_0;$$

В двух первых случаях ЭДС генераторов рассчитывается по формуле (2.3) и (2.4), а величина угла δ может быть найдена по выражению (2.2).

Угловая характеристика мощности строится в соответствии с выражением

$$P_G = \frac{E_G \cdot U_0}{X_{d\Sigma}} \sin \delta + \frac{U_0^2}{2} \cdot \frac{X_{d\Sigma} - X_{q\Sigma}}{X_{d\Sigma} \cdot X_{q\Sigma}} \sin 2\delta.$$

Коэффициент запаса определяется по формуле (2.5).

3.1.2 В качестве примера рассматривается схема замещения простейшей системы, составленная по расчётной схеме при сложной связи генераторов станции с приёмной системой, представленная на рисунке 3.2.

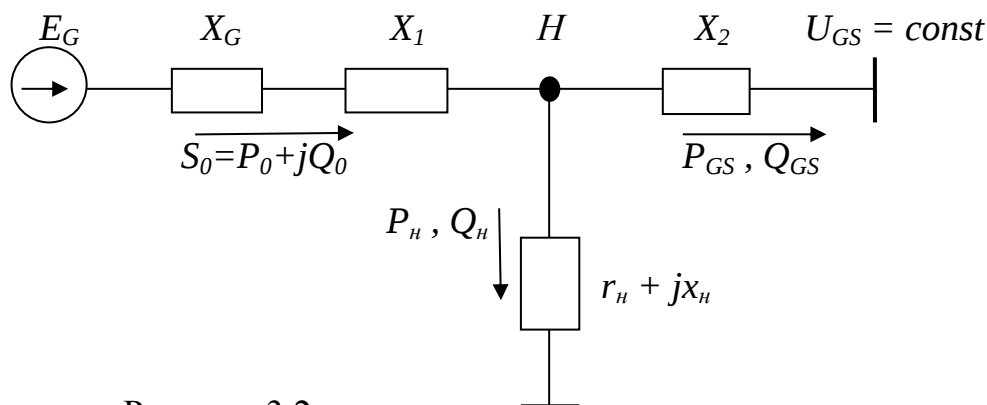


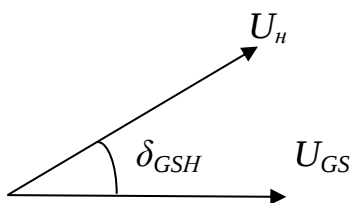
Рисунок 3.2

Целью расчёта является анализ наличия и влияния устройства АРВ и его видов, а также активного сопротивления нагрузки r_H на вид угловой характеристики мощности и величину коэффициента запаса.

Расчёт выполняется в следующей последовательности:

1 Определяется напряжение в точке включения нагрузки (ветви нагрузки) «H» (X_2 – суммарное сопротивление элементов между точкой «H» и шинами приёмной системы):

$$\dot{U}_H = U_{GS} + \frac{Q_{GS} \cdot X_2}{U_{GS}} + j \frac{P_{GS} \cdot X_2}{U_{GS}} = u_H \cdot e^{j\delta_{GSH}},$$



$$\delta_{GSH} = \arctg\left(\frac{P_{GS} \cdot X_2}{u_{GS}^2 + Q_{GS} \cdot X_2}\right)$$

2 Рассчитываются потери мощности в сопротивлении X_2 :

$$\Delta P_2 = 0$$

$$\Delta Q_2 = \frac{P_{GS}^2 + Q_{GS}^2}{U_{GS}^2} \cdot X_2$$

3 Находится мощность, потребляемая нагрузкой при напряжении U_H :

$$P_{H(0)} = \frac{U_H^2}{Z_H^2} \cdot r_H$$

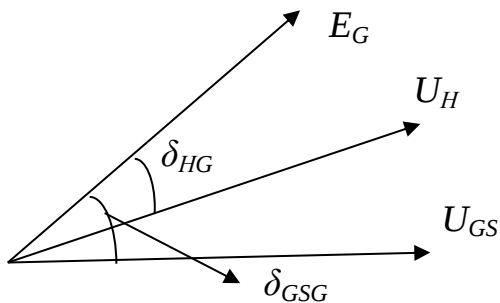
$$Q_{H(0)} = \frac{U_H^2}{Z_H^2} \cdot x_H$$

4 Вычисляется мощность, подтекающая к нагрузке по балансу мощности в точке «Н»:

$$S_0 = P_{GS} + P_{H(0)} + j(Q_{GS} + \Delta Q_2 + Q_{H(0)}) = P_0 + jQ_0$$

5 Определяется ЭДС генераторов в рассматриваемом режиме (X_1 – суммарное сопротивление элементов между точкой «H» и шинами генератора):

$$\dot{E}_{G(0)} = U_H + \frac{Q_0(X_1 + X_G)}{U_H} + j \frac{P_0(X_1 + X_G)}{U_H} = e_{G(0)} \cdot e^{j\delta_{HG}}.$$



$$\delta_{HG} = \arctg \left[\frac{P_0 \cdot (X_1 + X_G)}{U_H^2 + Q_{GS} \cdot (X_1 + X_G)} \right]$$

$$\delta_{GSG} = \delta_{12(0)} = \delta_{GSH} + \delta_{HG}$$

6 Находятся собственная и взаимная проводимости [Z_H – сопротивление нагрузки (ветви нагрузки)]:

$$Y_{11} = \frac{1}{j(X_G + X_1) + \frac{jX_2 \cdot Z_H}{jX_2 + Z_H}} = y_{11} \cdot e^{-j\psi_{11}}$$

$$Y_{12} = \frac{1}{j(X_G + X_1) + jX_2 + \frac{jX_2 \cdot j(X_G + X_1)}{Z_H}} = y_{12} \cdot e^{-j\psi_{12}}$$

7 Определяются дополняющие углы:

$$\alpha_{11} = 90^\circ - \psi_{11}$$

$$\alpha_{12} = 90^\circ - \psi_{12}$$

8 Составляется выражение угловой характеристики мощности:

$$P = e_{G(0)}^2 \cdot y_{11} \cdot \sin \alpha_{11} + e_{G(0)} \cdot u_{GS} \cdot y_{12} \cdot \sin(\delta_{12(0)} - \alpha_{12})$$

9 Строится характеристика мощности и выполняется её анализ.

Примечания:

1 Если сопротивление нагрузки не задано, но известна потребляемая ею полная комплексная мощность, то пункт 3 расчёта не выполняется. Комплексное сопротивление нагрузки при необходимости определяется по методике, приведенной в [приложении Б](#).

2 При выполнении расчётов, связанных с учётом и влиянием различных видов устройств АРВ, в необходимые выражения следует подставлять соответствующие значения сопротивления генератора X_G ([см. пункт 3.1.1](#)).

3.2 ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ

В качестве примера рассматривается расчётная схема простейшей системы электропередачи при сложной связи генераторов станции с приёмной системой, представленная на рисунке 3.3.

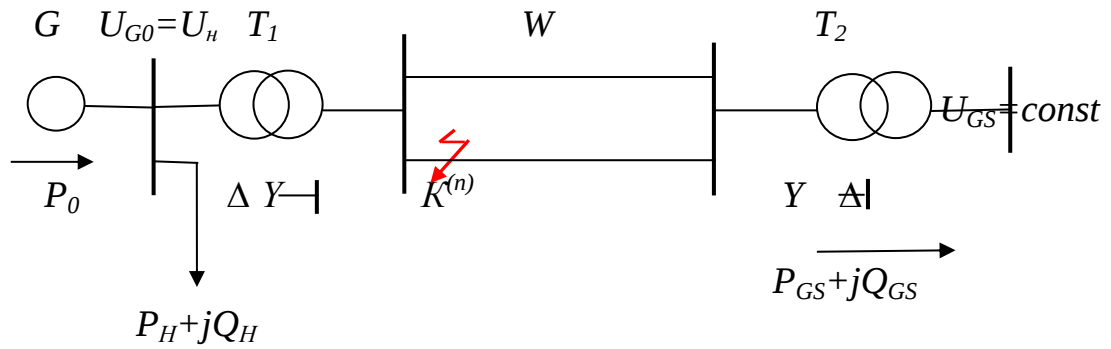


Рисунок 3.3

Целью расчёта является анализ динамической устойчивости при каком-либо виде короткого замыкания в начале одной цепи двухцепной воздушной линии электропередачи.

Расчёт выполняется в следующей последовательности:

1 Величины следующих параметров режима, заданных в именованных единицах, выражаются в единицах относительных:

$$U_{*GS}; P_{*GS}; Q_{*GS}; P_{*H}; Q_{*H}$$

2 Составляется схема замещения системы электропередачи в нормальном режиме работы;

3 Определяются параметры элементов схемы замещения (в о.е.), приведенные к базисным условиям с использованием одного из способов приведения к основной ступени напряжения [2]. Приведенное значение механической постоянной инерции генераторов вычисляется по формуле (при наличии нескольких генераторов их постоянные инерции суммируются):

$$T_{j(\sigma)} = T_j \cdot \frac{S_{HG}}{S_{\sigma}} [c]$$

4 Определяется ЭДС за переходным сопротивлением генератора E'_0 , для чего предварительно рассчитываются:

4.1 сопротивление связи (сопротивление внешней цепи между шиной генератора и приёмной системы). Для рассматриваемой схемы:

$$X_{cs} = X_{T1} + X_W + X_{T2}$$

4.2 модуль напряжения на шинах генератора U_{G0} ;

4.3 угол сдвига δ_{GSG} между векторами напряжений системы U_{GS} и генератора U_{G0} ;

4.4 сопротивление нагрузки:

$$Z_H = \frac{U_H^2}{S_H^2} \cdot (P_H + jQ_H) = r_H + jx_H$$

4.5 потери реактивной мощности в сети до шин генератора:

$$\Delta Q_{*GS} = \frac{P_{*GS} + Q_{*GS}}{U_{*GS}^2} \cdot X_{св}$$

4.6 мощность, отдаваемая генераторной станцией:

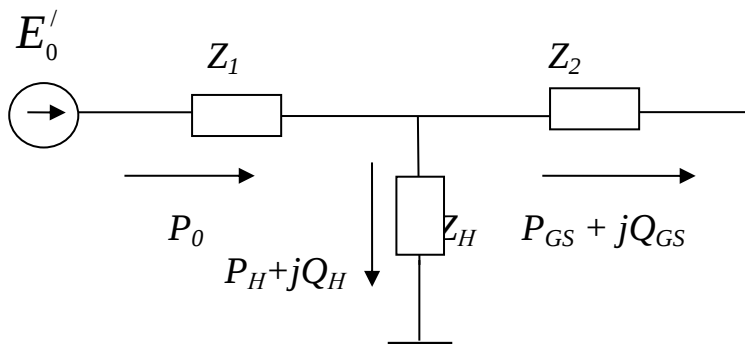
$$\dot{S}_0 = P_{*GS} + P_{*H} + j(Q_{*GS} + Q_{*H} + \Delta Q_{*GS}) = P_{*0} + jQ_{*0}$$

5 Определяется угол сдвига δ_G между векторами напряжения генератора U_{G0} и ЭДС генератора E'_0 ;

6 Определяется начальный угол сдвига между векторами напряжения системы U_{GS} и ЭДС генератора E'_0 :

$$\delta'_0 = \delta_{GSG} + \delta_G$$

7 Схема замещения упрощается до Т-образного вида:



В рассматриваемой схеме: $Z_1 = jX_G$ и $Z_2 = jX_{ce}$.

8 Находятся собственные и взаимные сопротивления и проводимости схемы, их фазовые углы и углы α , дополняющие их до 90° :

$$Z_{11} = Z_1 + \frac{Z_2 \cdot Z_H}{Z_2 + Z_H} = z_{11} \cdot e^{j\psi_{11}};$$

$$Y_{11} = \frac{1}{Z_{11}} = y_{11} \cdot e^{-j\psi_{11}}$$

$$Z_{12} = Z_1 + Z_2 + \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_H} = z_{12} \cdot e^{j\psi_{12}}$$

$$Y_{12} = \frac{1}{Z_{12}} = y_{12} \cdot e^{-j\psi_{12}}$$

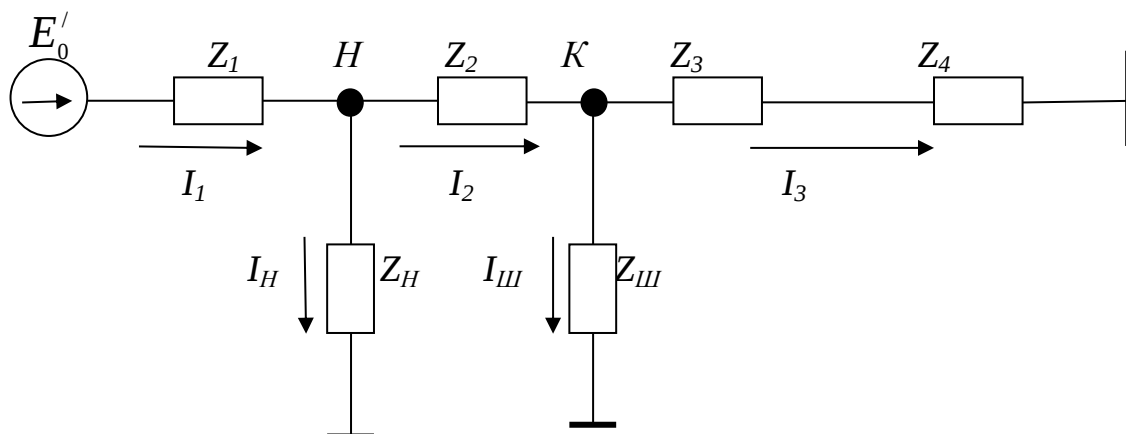
$$\alpha_{11} = 90^\circ - \psi_{11} \quad \alpha_{12} = 90^\circ - \psi_{12}$$

9 Составляется схема замещения обратной последовательности и определяется её результирующее сопротивление $Z_{2\Sigma}$;

При этом $Z_{H2} = 0,35Z_{H1}$

10 Составляется схема замещения нулевой последовательности и определяется её результирующее сопротивление $Z_{0\Sigma}$;

11 Составляется схема замещения для аварийного режима работы и определяются её собственные и взаимные сопротивления и проводимости методом единичных токов:



11.1 задаётся единичный ток:

$$\dot{I}_3 = 1 + j0$$

11.2 определяется напряжение в точке «К»:

$$\dot{U}_K = \dot{I}_3 \cdot (Z_3 + Z_4)$$

11.3 находится ток аварийного шунта:

$$\dot{I}_{ш} = \frac{\dot{U}_K}{Z_{ш}}$$

11.4 вычисляется ток в ветви 2:

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_3 + \dot{I}_{ш}$$

11.5 рассчитывается падение напряжения на сопротивлении Z_2 :

$$\Delta \dot{U}_2 = \dot{I}_2 \cdot Z_2$$

11.6 определяется напряжение в точке «Н»:

$$\dot{U}_H = \dot{U}_K + \Delta \dot{U}_2$$

11.7 находится ток в ветви нагрузки:

$$\dot{I}_H = \frac{\dot{U}_H}{Z_H}$$

11.8 находится ток в генераторной ветви 1:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 + \dot{I}_H$$

11.9 рассчитывается падение напряжения на сопротивлении Z_1 :

$$\Delta \dot{U}_1 = \dot{I}_1 \cdot Z_1$$

11.10 вычисляется ЭДС в точке подключения передающей станции:

$$\dot{E} = \dot{U}_H + \Delta \dot{U}_1$$

11.11 находятся собственные сопротивление и проводимость:

$$Z_{11} = \frac{\dot{E}}{\dot{I}_1} = z_{11} \cdot e^{j\psi_{11}} \quad Y_{11} = \frac{1}{Z_{11}} = y_{11} \cdot e^{-j\psi_{11}}$$

11.12 находятся взаимные сопротивление и проводимость:

$$Z_{12} = \frac{\dot{E}}{\dot{I}_3} = z_{12} \cdot e^{j\psi_{12}} \quad Y_{12} = \frac{1}{Z_{12}} = y_{12} \cdot e^{-j\psi_{12}}$$

11.13 определяются дополняющие углы α .

12 Выполняется построение угловых характеристик мощности в нормальном и аварийном режимах работы и делается заключение об устойчивости системы.

В случае нарушения устойчивости расчёт продолжается в следующей последовательности:

12.1 Составляется схема замещения для послеаварийного режима работы, в которой будут отсутствовать отключенный повреждённый участок и сопротивление аварийного шунта и определяются её собственные и взаимные сопротивления и проводимости и дополняющие углы;

12.2 Строится угловая характеристика мощности в послеаварийном режиме;

12.3 Определяется предельный угла отключения короткого замыкания [\[1\]](#);

12.4 Методом последовательных интервалов [\[1\]](#) рассчитывается и строится зависимость

$$\delta = f(t);$$

12.5 По построенному графику зависимости при известной величине предельного угла отключения КЗ определяется предельное время отключения короткого замыкания.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Шабад В.К. Электромеханические переходные процессы в электро-энергетических системах: учеб. пособие для студ. учреждений высш. проф. образования / В.К.Шабад. – М. : Издательский дом «Академия», 2013. – 192 с. - Режим доступа: <http://nashol.com/2015072985930/elektromehanicheskie-perehodnie-processi-v-elektroenergeticheskikh-sistemah-uchebnoe-posobie-dlya-studencheskikh-uchrejdений-visshego-professionalnogo-obrazovaniya-shabad-v-k-2013.html>
- 2 Куликов, Ю.А. Переходные процессы в электрических системах: учеб. пособие / Ю.А. Куликов. – Изд. 2-е, испр. и доп. – Новосибирск.: Изд-во НГТУ, 2006. – 284 с.
- 3 Калентионюк, Е.В. Устойчивость электроэнергетических систем: учебное пособие/ Е.В. Калентионюк. – Минск: Техноперспектива, 2008. – 376 с. - Режим доступа: <http://wave9.ru/books/learning/189138-Ustoychivost-elektroenergeticheskikh-sistem.html>
- 4 Мелешкин, Г.А. Устойчивость энергосистем. Монография. Книга 1 /Г.А.Мелешкин, Г.В.Меркурьев. - СПб.: НОУ «Центр подготовки кадров энергетики», 2006. – 369 с.- Режим доступа: <http://www.twirpx.com/file/69588/>
- 5 Жданов, П.С. Вопросы устойчивости электрических систем/Под ред. Л.А.Жукова.- М.: Энергия, 1979. – 456 с.
- 6 СО 153-34.20.576-2003: Методические указания по устойчивости энергосистем. – Москва: «Издательство НЦ ЭНАС», 2004. Режим доступа: <http://aquagroup.ru/normdocs/4713>
- 7 Калентионюк Е.В., Филипчик Ю.Д. Методическое пособие к курсовой работе по дисциплине «Устойчивость электроэнергетических систем»/Е.В.Калентионюк, Ю.Д.Филипчик; под редакцией Е.В.Калентионюка. – Минск: БНТУ, 2010 – 60 с. – Режим доступа: http://www.studmed.ru/kalentionok-ev-filipchik-yud-metodicheskoe-posobie-po-kurovoy-rabote-ustoychivost-elektroenergeticheskikh-sistem_f6afb41dbf4.html

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(ОБЯЗАТЕЛЬНОЕ)

ЗАДАНИЕ НА КУРСОВУЮ РАБОТУ

1 Для электрической системы, схема которой приведена в приложении В, определить пределы передаваемой мощности генераторов станции и коэффициенты запаса статической устойчивости при передаче мощности от станции к шинам приёмной системы, приняв напряжение $U_0 = U_{GS}$ на них неизменным, для следующих случаев:

1.1 АРВ отключено;

1.2 включено АРВ ПД;

1.3 включено АРВ СД;

Расчет пунктов 1.1 ... 1.3 выполнить без учёта активного сопротивления нагрузки.

По результатам расчета построить угловые характеристики активной мощности генераторов станции и сделать выводы;

2 Выполнить расчет динамической устойчивости системы при однофазном, двухфазном и трехфазном на землю коротких замыканиях в указанной точке (при необходимости определить предельное время отключения коротких замыканий) при постоянстве переходной ЭДС генераторов станции за их переходными сопротивлениям, с учетом полного комплексного сопротивления нагрузки.

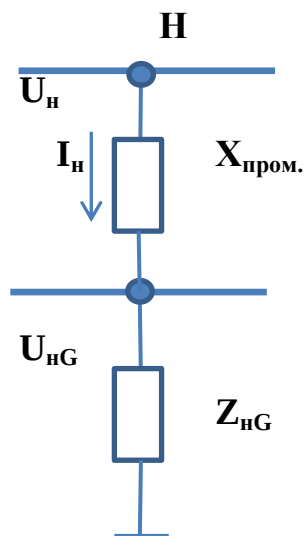
По результатам расчета построить угловые характеристики мощности в нормальном, аварийном и послеаварийном режимах и график зависимости угла δ от времени. На графиках указать δ_0 , $\delta_{откл. пред.}$, $\delta_{кр}$, δ_{max} , площадки ускорения и торможения, $t_{откл. пред.}$.

Сделать выводы о влиянии рассмотренных видов короткого замыкания на динамическую устойчивость.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(ОБЯЗАТЕЛЬНОЕ)

Определение полного комплексного сопротивления нагрузки



1 Определяется модуль напряжения U_H в точке присоединения ветви нагрузки H ([см. рисунок 3.2](#)) по выражению:

$$\dot{U}_H = U_{GS} + \frac{Q_{GS} \cdot X_2}{U_{GS}} + j \frac{P_{GS} \cdot X_2}{U_{GS}} = u_H \cdot e^{j\delta_{GSH}},$$

где X_2 – суммарное сопротивление элементов между шинами приёмной системы и точкой присоединения ветви нагрузки.

2 Находится ток ветви I_H :

$$I_H = \frac{S_{HG}}{\sqrt{3} \cdot u_H};$$

3 Вычисляется падение напряжения в промежуточном сопротивлении ветви нагрузки:

$$\Delta U_{пром} = I_H \cdot X_{пром};$$

При отсутствии промежуточного сопротивления – $\Delta U_{пром} = 0$.

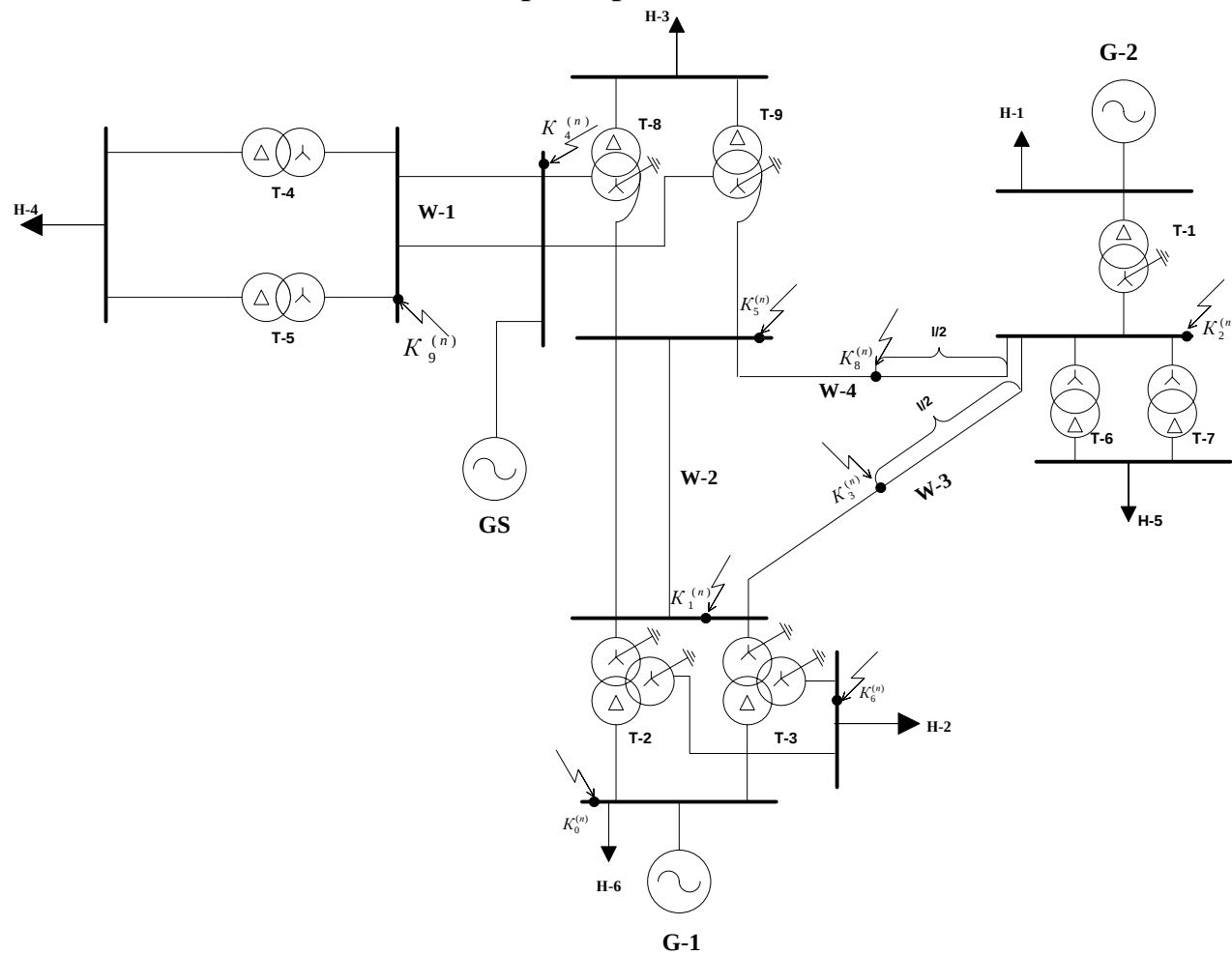
4 Определяется напряжение в месте подключения нагрузки:

$$U_{нГ} = u_n - \Delta U_{пром} ;$$

5 Рассчитывается величина полного комплексного сопротивления нагрузки:

$$Z_{нГ} = (U_{нГ}^2 / S_{нГ}^2) * (P_{нГ} + jQ_{нГ}) = r_{нГ} + jx_{нГ}$$

Приложение В (ОБЯЗАТЕЛЬНОЕ) Схема электроэнергетической системы



Приложение Г

(СПРАВОЧНОЕ)

Параметры элементов расчётной схемы

Таблица Г.1 - Генераторы

Номер варианта	Номер генератора	Марка генератора	S_H , МВА	U_H , кВ	x_d'' , о.е.	x_2 , о.е.	x_d' , о.е.	x_d , о.е.	x_q , о.е.	T_j , с	$\cos\varphi$
1	G ₁	ТВФ-100-2	117,58	10,5	0,183	0,223	0,283	1,79	1,79	7,85	0,85
	G ₂	$CB \frac{630}{165} - 32$	67,1	10,5	0,2	0,201	0,29	1,04	0,689	0,205	9,2
2	G ₁	TBC-30	37,5	10,5	0,143	0,16	0,238	2,458	2,458	8,5	0,8
	G ₂	$CB \frac{566}{125} - 32$	30,0	10,5	0,197	0,205	0,27	1,07	0,646	8,8	0,214
3	G ₁	ТВФ-60-2	75	6,3	0,146	0,18	0,217	1,66	1,66	8,25	0,8
	G ₂	$CB \frac{850}{120} - 50$	40	10,5	0,225	0,232	0,309	0,815	0,578	7,6	0,238
4	G ₁	$CB \frac{850}{190} - 40$	111	13,8	0,26	0,262	0,37	0,97	0,687	0,265	14,2
	G ₂	ТГВ-200	235	15,75	0,19	0,232	0,273	1,845	1,845	7,5	0,85

Номер варианта	Номер генератора	Марка генератора	S_H , МВА	U_H , кВ	x_d'' , о.е.	x_2 , о.е.	x_d' , о.е.	x_d , о.е.	x_q , о.е.	T_j , с	$\cos\varphi$
5	G ₁	TBC-30	37,5	10,5	0,143	0,16	0,238	2,458	2,458	8,25	0,8
	G ₂	$CB \frac{1100}{145} - 88$	50	15,75	0,232	0,236	0,31	0,637	0,5	0,239	9,8
6	G ₁	$CB \frac{850}{120} - 50$	40	10,5	0,225	0,232	0,309	0,815	0,578	7,6	0,238
	G ₂	ТВФ-100-2	117,58	10,5	0,183	0,223	0,283	1,79	1,79	7,85	0,85
7	G ₁	ТВФ-60-2	75	10,5	0,146	0,18	0,217	1,66	1,66	8,25	0,8
	G ₂	ТГВ-200	235	15,75	0,19	0,232	0,273	1,845	1,845	7,5	0,85
8	G ₁	ТВФ-100-2	117,58	10,5	0,183	0,223	0,283	1,79	1,79	7,85	0,85
	G ₂	$CB \frac{630}{165} - 32$	67,1	10,5	0,2	0,201	0,29	1,04	0,689	0,205	9,2
9	G ₁	TBC-30	37,5	10,5	0,143	0,16	0,238	2,458	2,458	8,5	0,8
	G ₂	$CB \frac{566}{125} - 32$	30,0	10,5	0,197	0,205	0,27	1,07	0,646	8,8	0,214

Таблица Г.2 - Трансформаторы

Номер варианта	Обозначение на схеме	S _н МВА	Напряжение обмотки, кВ			U _к , %		
			В	С	Н	В-С	В-Н	С-Н
1	T-1	63	230	-	10,5	-	12	-
	T-2.3	80	230	38,5	11	12,5	20	6,5
	T-4.5	40	115	-	38,5	-	10,5	-
	T-6.7	40	230	-	38,5	-	12	-
	T-8.9	250	230	115	11	11	32	20
2	T-1	40	242	-	10,5	-	11	-
	T-2.3	40	230	38,5	10,5	12,5	12	9,5
	T-4.5	25	115	-	11	-	10,5	-
	T-6.7	66	230	-	10,5	-	12,5	-
	T-8.9	200	230	115	38,5	10,5	22	9,5
3	T-1	40	230	-	10,5	-	12,5	-
	T-2.3	63	230	121	6,3	10,5	24	13
	T-4.5	16	115	-	10,5	-	10	-
	T-6.7	25	230	-	38,5	-	11	-
	T-8.9	125	242	121	38,5	10,5	24	13
4	T-1	200	242	-	15,75	-	11	-
	T-2.3	63	230	38,5	13,8	12,5	24	10,5
	T-4.5	25	115	-	38,5	-	10,5	-
	T-6.7	63	230	-	38,5	-	12	-
	T-8.9	160	230	121	6,6	11	32	20
5	T-1	63	242	-	15,75	-	11	-
	T-2.3	40	230	38,5	10,5	20,5	12,5	7,5
	T-4.5	10	115	-	11	-	10,5	-
	T-6.7	80	230	-	10,5	-	12	-
	T-8.9	63	230	121	38,5	11	35	22
6	T-1	100	230	-	10,5	-	12	-
	T-2.3	63	230	38,5	11	24	12,5	10,5
	T-4.5	16	121	-	11	-	10,5	-
	T-6.7	32	230	-	6,6	-	11	-
	T-8.9	100	230	115	11	11	31	19
7	T-1	250	242	-	15,75	-	11	-
	T-2.3	40	230	38,5	10,5	12,5	20,5	7,5
	T-4.5	63	115	-	10,5	-	10	-
	T-6.7	40	230	-	11	-	12	-
	T-8.9	250	230	121	38,5	11	32	20

Продолжение таблицы Г.2

Номер варианта	Обозначение на схеме	S _н МВА	Напряжение обмотки, кВ			U _к , %		
			В	С	Н	В-С	В-Н	С-Н
8	T-1	250	242	-	11	-	12	-
	T-2.3	63	230	38,5	11	12,5	24	10,5
	T-4.5	10	115	-	10,5	-	10,5	-
	T-6.7	63	230	-	6,3	-	12	-
	T-8.9	125	230	115	38,5	11	31	19
9	T-1	40	242	-	11	-	11	-
	T-2.3	40	230	38,5	10,5	22	12,5	9,5
	T-4.5	63	115	-	6,6	-	10,5	-
	T-6.7	25	230	-	10,5	-	10,5	-
	T-8.9	63	230	115	6,6	11	32	20

Таблица Г.3 – Линии электропередачи и нагрузки

Номер варианта	Линии электропередачи (длина в км)					Нагрузки		
	W1	W2	W3	W4	W5	Номер на схеме	Номинальная мощность S _н , МВА	cosφ _н
1	40	70	150	110	10	Н-1	5	0,5
2	60	80	120	90	25	Н-2	10	0,6
3	50	110	30	100	15	Н-4	4	0,7
4	40	140	70	120	40	Н-4	6	0,8
5	65	95	90	50	35	Н-2	8	0,9
6	35	60	85	70	55	Н-3	6	0,5
7	50	100	110	80	50	Н-3	3	0,6
8	45	120	100	95	45	Н-5	7	0,7
9	35	85	75	90	60	Н-6	2	0,8

Примечания: 1 U_n нагрузок принять равным напряжению в месте их подключения;
2 Погонное сопротивление линий принять равным 0,4 Ом/км.

Таблица Г.4 – Приёмная система

Номер варианта	Номер генератора	Передаваемая мощность S_{GS} , МВА	$\cos\varphi_{GS}$
1	G_1	100	0,9
	G_2	60	
2	G_1	20	0,8
	G_2	18	
3	G_1	70	0,7
	G_2	35	
4	G_1	100	0,6
	G_2	220	
5	G_1	30	0,5
	G_2	41	
6	G_1	32	0,6
	G_2	108	
7	G_1	70	0,7
	G_2	231	
8	G_1	100	0,8
	G_2	60	
9	G_1	34	0,9
	G_2	27	

Приложение Д

(ОБЯЗАТЕЛЬНОЕ)

Номера заданий на курсовую работу

Таблица Д.1 – Соответствие вариантов исходных данных номерам заданий

Номер задания	Номер варианта исходных данных	Номер генератора в расчётной схеме	Номер точки КЗ
1	1	1	0
2	2	2	1
3	3	1	2
4	4	2	3
5	5	1	4
6	6	2	5
7	7	1	6
8	8	2	8
9	9	1	9
10	1	2	9
11	2	1	8
12	3	2	6
13	4	1	5
14	5	2	4
15	6	1	3
16	7	2	2
17	8	1	1
18	9	2	0
19	1	2	5
20	2	1	6
21	3	1	8
22	4	2	9
23	5	2	0
24	6	1	1
25	7	1	2
26	8	2	3
27	9	2	4
28	1	1	2
29	2	1	5
Примечание – номер задания соответствует порядковому номеру студента в списке группы.			