

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой»



А. С. Вершинин

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Методические указания
к практическим занятиям
для студентов специальности 7-07-0712-01
«Энергетика и электротехника»

Текстовое электронное издание

Новополоцк
Полоцкий государственный университет
имени Евфросинии Полоцкой
2026

Об издании – 1, 2

1 – дополнительный титульный экран – сведения об издании

УДК 621.311(075.8)

Одобрено и рекомендовано к изданию методической комиссией
факультета компьютерных наук и электроники
в качестве методических указаний (протокол № 10 от 25.06.2024 г.)

Кафедра энергетики и электроники

© Вершинин А. С., 2026

© Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой, 2026

2 – дополнительный титульный экран – производственно-технические сведения

Для создания текстового электронного издания «Электромеханические переходные процессы» А. С. Вершинина использованы текстовый процессор Microsoft Word и программа Adobe Acrobat XI Pro для создания и просмотра электронных публикаций в формате PDF.

Технические требования:

1 оптический диск.

Системные требования:

PC с процессором не ниже Core 2 Duo;

2 Gb RAM; свободное место на HDD 2 Mb;

Windows XP/7/8/8.1/10

привод CD-ROM/DVD-ROM;

мышь

ВЕРШИНИН Александр Сергеевич

**ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПЕРЕХОДНЫЕ
ПРОЦЕССЫ**

Методические указания
к практическим занятиям
для студентов специальности 7-07-0712-01
«Энергетика и электротехника»

Редактор *Т. А. Дарьянова*

Подписано к использованию 12.05.2026.

Объем издания 1,5 Мб. Заказ 222.

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования «Полоцкий государственный университет
имени Евфросинии Полоцкой».

Свидетельство о государственной регистрации
издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/305 от 22.04.2014.

ЛП № 02330/278 от 27.05.2004.

211440, ул. Блохина, 29,
г. Новополоцк,
Тел. 8 (0214) 59-95-41, 59-95-44
<http://www.psu.by>

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. ОСНОВНЫЕ ДОПУЩЕНИЯ, ПРИНИМАЕМЫЕ ПРИ АНАЛИЗЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ	6
2. СОСТАВЛЕНИЕ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ	6
2.1. СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ТИПОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИХ ПАРАМЕТРОВ	7
2.1.1. Синхронные генераторы	8
2.1.2. Трансформаторы и автотрансформаторы	11
2.1.3. Линии электропередачи	12
2.1.4. Токоограничивающие и шунтирующие реакторы	12
2.1.5. Асинхронные двигатели.....	13
2.1.6. Примеры расчета параметров схем замещения систем электропередачи	15
2.1.8. Задачи для самостоятельного составления схем замещения энергосистем и определения их параметров	21
2.2. Обобщенные параметры схемы замещения одномашинной энергосистемы	23
2.2.1. Пример нахождения обобщенных параметров схемы замещения энергосистемы.....	25
2.2.2. Задачи для самостоятельного решения	28
3. СТАТИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ПРОСТЕЙШИХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....	31
3.1. Примеры анализа статической устойчивости простейшей энергосистемы	32
3.2. Задачи для самостоятельного решения	49
4. ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ПРОСТЕЙШИХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....	51
4.1. Примеры анализа динамической устойчивости простейшей энергосистемы.....	58
4.2. Задачи для самостоятельного решения	68
5. УСТОЙЧИВОСТЬ НАГРУЗКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ	71
5.1. Примеры расчета возможности самозапуска асинхронных электродвигателей.....	75
5.2. Задачи для самостоятельного решения	81
ЛИТЕРАТУРА	82

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшее значение в проблеме переходных электромеханических процессов в электрических системах придается вопросам устойчивости.

Рассмотрение указанных вопросов проводится на примере простейших систем электроснабжения, т.к. при изучении дисциплины «Электромеханические переходные процессы» по специальности 7-07-0712-01 «Энергетика и электротехника» студент должен получить не столько представление о технике расчетов, сколько выработать физическое понимание задач и допущений, положенных в их основу, привыкнуть к инженерной оценке получаемых результатов.

Для формирования устойчивых навыков в физической интерпретации электромеханических процессов необходимо предварительное овладение простейшими методами и приемами анализа, такими, например, как способ площадей при оценке качаний генераторов, как практические критерии статической устойчивости, связанные с понятиями текучести режима, и многими другими элементарными, но остающимися по-прежнему важнейшими понятиями для воспитания инженерного мышления. Предлагаемый методический материал посвящен решению названных задач.

В предлагаемых методических указаниях рассматривается методика проведения аналитических расчетов статической и динамической устойчивости в простейшей системе. Методика расчетов статической и динамической устойчивости в простейшей системе соответствует общепринятой.

В первую очередь материал методических указаний ориентирован на подготовку к практическим занятиям по дисциплине: «Электромеханические переходные процессы» для специальности 7-07-0712-01 «Энергетика и электротехника».

Приведенные методики и типовые расчеты могут быть полезны при выполнении практических заданий и самостоятельных работ по курсу.

В методических указаниях приведены варианты заданий (исходные данные по простейшей системе электроснабжения), предназначенные для самостоятельного решения.

В процессе работы с методическими указаниями полезно использовать конспект лекций и рекомендуемую литературу.

1. ОСНОВНЫЕ ДОПУЩЕНИЯ, ПРИНИМАЕМЫЕ ПРИ АНАЛИЗЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Математическое моделирование элементов электрической системы выполняют или с помощью уравнений состояния, или путем составления схем замещения элементов системы с определением их параметров [1; 3].

При составлении схем замещения принимают следующие допущения:

1) трехфазную электрическую сеть считают полностью симметричной, и поэтому расчет ведется на одну фазу с применением однолинейных схем замещения и использованием фазных напряжений и сопротивлений.

2) не учитывают:

- насыщение магнитных систем генераторов, трансформаторов и электродвигателей, поэтому все параметры схем замещения считаются постоянными;
- токи намагничивания трансформаторов и автотрансформаторов;
- емкостную проводимость воздушных линий электропередачи напряжением до 220 кВ включительно;
- активные сопротивления и проводимости электрической сети.

Влияние активных сопротивлений элементов сети на периодическую составляющую аварийного тока учитывают, если их сумма превышает $1/3$ суммарного индуктивного сопротивления схемы, и при расчете постоянной времени затухания апериодической составляющей тока (T_a);

- сдвиг фаз и качание роторов генераторов (все ЭДС совпадают по фазе).

2. СОСТАВЛЕНИЕ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Схема замещения сложной электрической цепи составляется из схем замещения отдельных ее элементов. Для электроэнергетической системы типовыми элементами являются синхронные генераторы, силовые трансформаторы и автотрансформаторы, линии электропередачи, токоограничивающие и шунтирующие реакторы, конденсаторные батареи, асинхронные и синхронные двигатели, а также группы нагрузок, присоединенных к шинам подстанции.

Поэтому для составления схемы замещения всей электроэнергетической системы следует определить типовые схемы замещения и параметры перечисленных элементов.

2.1. СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ТИПОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИХ ПАРАМЕТРОВ

Схемы замещения типовых элементов систем электроснабжения удобнее показать на примере простейшей схемы электропередачи (рисунок 1).



Рисунок 1. – Простейшая схема электропередачи

В этой схеме генератор работает через повышающий трансформатор Т1 и двухцепную линию электропередачи и далее через понижающий трансформатор Т2 на шины приемной энергосистемы бесконечной мощности. Напряжение приемной станции U можно считать неизменным по абсолютному значению и фазе при любых условиях работы электропередачи.

Схему замещения этой схемы электропередачи (см. рисунок 1) можно представить в виде, приведенном на рисунке 2.

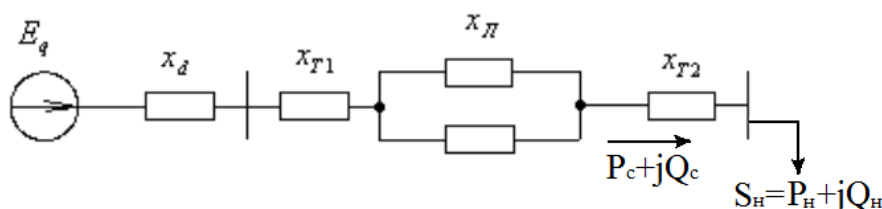


Рисунок 2. – Схема замещения системы электропередачи

Каждый элемент схемы замещения обладает своими параметрами.

Параметры элементов схем замещения электрической системы могут определяться в именованных и относительных единицах. В обоих случаях могут учитываться как действительные коэффициенты трансформаторов K_T (при точном приведении параметров), так и K_T , определенные по среднономинальным напряжениям U_{cp} (при приближенном приведении параметров). Среднономинальные напряжения (U_{cp}) нормируются для каждой ступени трансформации. Их шкала следующая:

- для генераторов: 10,5; 11; 13,8; 15,75; 18; 20; 24 кВ;
- для электрических сетей: 6,3; 10,5; 37; 115; 230; 515; 750; 1150 кВ.

Часто проводят расчеты в относительных единицах, позволяющие сразу оценить изменение полученных токов, напряжений, мощностей и других величин по отношению к номинальным значениям.

Рассмотрим расчет параметров в относительных единицах (о.е.). Возможны два пути приведения схем к базисным условиям:

а) все элементы сети приводятся к одной величине базисного напряжения (U_6);

б) для каждой ступени напряжения рассчитывается свое U_6 .

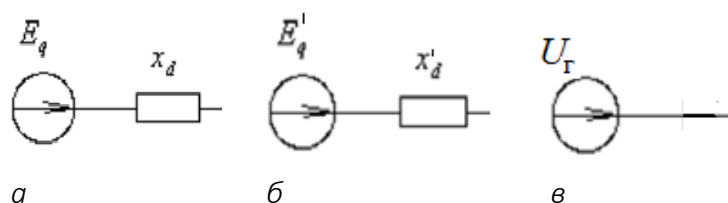
В обоих случаях базисная мощность S_6 одна.

Так, при анализе устойчивости простейших энергосистем за базисное напряжение U_6 принимается напряжение шин приемной энергосистемы, а за базисную мощность S_6 – передаваемая активная мощность P_c в энергосистему.

Далее рассмотрим схемы замещения типовых элементов энергосистемы и определение параметров этих элементов в относительных единицах (о.е.). Параметр, значение которого представлено в о.е. обозначается индексом *.

2.1.1. Синхронные генераторы

Синхронные генераторы в установившемся режиме в схемах замещения представляются синхронной ЭДС E за синхронным сопротивлением x_d . Аналогично представляется схема замещения синхронного генератора без автоматической регулировки возбуждения (АРВ) и без демпферных обмоток на роторе машины в начальный момент переходного процесса (рисунок 3, а). Схемы замещения синхронных генераторов с АРВ пропорционального действия (рисунок 3, б) и с АРВ сильного действия (рисунок 3, в).



а – без АРВ; б – с АРВ пропорционального действия;
в – с АРВ сильного действия

Рисунок 3. – Схемы замещения синхронных генераторов с АРВ различного типа

Приведенные на рисунке 3 схемы замещения синхронных генераторов соответствуют упрощенным математическим моделям генераторов:

- генератор без АРВ ($E_q = \text{const}$, $x_r = x_d$);
- генератор с АРВ пропорционального действия ($E'_q = \text{const}$, $x_r = x'_d$);
- генератор с АРВ сильного действия ($U_r = \text{const}$, $x_r = 0$).

Сопротивление генератора в относительных единицах при приближенном приведении определяется по формуле [4]:

$$x_{r*} = x_d \cdot \frac{S_6}{S_{\text{НОМ}}}, \text{ о.е.}, \quad (2.1)$$

где $S_{\text{НОМ}}$ – номинальная мощность генератора, МВ А;

S_6 – базисная мощность. МВА.

x_d – синхронное сопротивление генератора по продольной оси, Ом.

По формуле (2.1) определяются все сопротивления генератора, приведенные к базисным условиям. Так, для генератора с АРВ пропорционального действия получим формулу

$$x_{r*} = x'_d \cdot \frac{S_6}{S_{\text{НОМ}}}, \text{ о.е.}$$

Сопротивление генератора в относительных единицах при точном приведении (см. рис. 1) определяется по формуле [4]:

$$x_{r*} = x_d \cdot \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}} \cdot \frac{S_6}{U_6^2} \cdot K_{T1}^2 \cdot K_{T2}^2, \quad (2.2)$$

где $U_{\text{НОМ}}$ – номинальное напряжение генератора;

K_{T1} и K_{T2} – коэффициенты трансформации трансформаторов Т1 и Т2.

Синхронные ЭДС явнополюсного и неявнополюсного генераторов могут отличаться.

В неявнополюсных синхронных генераторах магнитные сопротивления по продольной и поперечной осям одинаковые, и тогда синхронные сопротивления генератора по продольной оси x_d и по поперечной оси x_q тоже одинаковы: $x_d = x_q$. В результате фиктивная ЭДС генератора E_Q практически совпадает с его переходной ЭДС E'_q .

Тогда синхронная ЭДС неявнополюсного генератора без АРВ в простейшей системе определяется по формуле

$$E_{q*} = \sqrt{\left(U_{C*} + \frac{Q_{C*} \cdot (x_{d*} + x_{\text{ВН}*})}{U_{C*}} \right)^2 + \left(\frac{P_{C*} \cdot (x_{d*} + x_{\text{ВН}*})}{U_{C*}} \right)^2}, \text{ о.е.}, \quad (2.3)$$

где U_{C^*} – напряжение системы, о.е.;

Q_{C^*} – реактивная мощность, передаваемая в систему, о.е.;

P_{C^*} – активная мощность, передаваемая в систему, о.е.;

x_{d^*} – синхронное сопротивление генератора по продольной оси ротора, о.е.

$x_{вн^*}$ – внешнее сопротивление сети от шин генераторного напряжения до шин системы, о.е.

Синхронные неявнополюсные генераторы с АРВ пропорционального (слабого) действия и с демпферными обмотками на роторе в начальный момент переходного процесса в схемах замещения представляются переходной ЭДС E'_q за переходным сопротивлением x'_d . В относительных единицах переходная ЭДС E'_q определяется по формуле (2.4), а сопротивление x'_d по формуле (2.1).

$$E'_{q^*} = \sqrt{\left(U_{C^*} + \frac{Q_{C^*} \cdot (x'_{d^*} + x_{вн^*})}{U_{C^*}} \right)^2 + \left(\frac{P_{C^*} \cdot (x'_{d^*} + x_{вн^*})}{U_{C^*}} \right)^2}, \text{ о.е.}, \quad (2.4)$$

Синхронные неявнополюсные генераторы с АРВ сильного действия в начальный момент переходного процесса в схемах замещения представляются ЭДС, равной напряжению на выводах генератора, за нулевым сопротивлением генератора.

Напряжение генератора в простейшей системе в относительных единицах определяется по формуле

$$U_{Г^*} = \sqrt{\left(U_{C^*} + \frac{Q_{C^*} \cdot x_{вн^*}}{U_{C^*}} \right)^2 + \left(\frac{P_{C^*} \cdot x_{вн^*}}{U_{C^*}} \right)^2}, \text{ о.е.}, \text{ т.к. } x_{Г^*} = x_d = 0. \quad (2.5)$$

Для определения E_q явнополюсного генератора необходимо рассчитать фиктивную ЭДС E_q и переходную ЭДС E'_q .

Фиктивная ЭДС явнополюсного генератора в простейшей системе определяется по формуле

$$E_{Q^*} = \sqrt{\left(U_{C^*} + \frac{Q_{C^*} \cdot (x_{q^*} + x_{вн^*})}{U_{C^*}} \right)^2 + \left(\frac{P_{C^*} \cdot (x_{q^*} + x_{вн^*})}{U_{C^*}} \right)^2}, \text{ о.е.}, \quad (2.6)$$

где x_{q^*} – синхронное сопротивление генератора по поперечной оси ротора, о.е.

Переходная ЭДС явнополюсного генератора в простейшей системе определяется по формуле (2.4).

Электродвижущая сила холостого хода неявнополюсного генератора в простейшей системе определяется как

$$E_{q^*} = E_{Q^*} \cdot \frac{X_{d^*} - X'_{d^*}}{X_{q^*} - X'_{d^*}} - E'_{q^*} \cdot \frac{X_{d^*} - X_{q^*}}{X_{q^*} - X'_{d^*}}, \text{ о.е.}, \quad (2.7)$$

2.1.2. Трансформаторы и автотрансформаторы

Двухобмоточные трансформаторы в схемах замещения представляются индуктивным сопротивлением $x_{\text{тр}}$.

Сопротивление двухобмоточного трансформатора в относительных единицах при приближенном приведении определяется по формуле [4]

$$x_{\text{тр}} = \frac{U_k \cdot S_{\text{б}}}{100 \cdot S_{\text{НОМ}}}, \text{ о.е.}, \quad (2.8)$$

где $S_{\text{НОМ}}$ – номинальная мощность трансформатора, МВ А;

U_k – напряжение короткого замыкания трансформатора, %.

Сопротивления трехобмоточного трансформатора или автотрансформатора в относительных единицах при приближенном приведении определяются по следующим формулам:

$$x_{\text{тр}^*}^B = \frac{U_{k(\text{в-с})} + U_{k(\text{в-н})} - U_{k(\text{с-н})}}{100} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{НОМ}}}, \text{ о.е.}, \quad (2.9)$$

$$x_{\text{тр}^*}^C = \frac{U_{k(\text{в-с})} + U_{k(\text{с-н})} - U_{k(\text{в-н})}}{100} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{НОМ}}}, \text{ о.е.}, \quad (2.10)$$

$$x_{\text{тр}^*}^H = \frac{U_{k(\text{в-н})} + U_{k(\text{с-н})} - U_{k(\text{в-с})}}{100} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{НОМ}}}, \text{ о.е.}, \quad (2.11)$$

где $U_{k(\text{в-с})}$ – напряжение короткого замыкания трансформатора между обмотками высшего и среднего напряжения, %;

$U_{k(\text{в-н})}$ – напряжение короткого замыкания трансформатора между обмотками высшего и низшего напряжения, %;

$U_{k(\text{с-н})}$ – напряжение короткого замыкания трансформатора между обмотками среднего и низшего напряжения, %.

При точном приведении параметров сопротивление двухобмоточного трансформатора в относительных единицах для схемы (см. рисунок 1) определяется по формуле [4]

$$x_{T1^*} = \frac{U_k}{100} \cdot \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{б}}^2} \cdot K_{T1}^2 \cdot K_{T2}^2. \quad (2.12)$$

2.1.3. Линии электропередачи

Линии электропередачи в схемах замещения представляются полным сопротивлением $z_{л}$. Как правило, в линиях длиной до 300 км и напряжением до 330 кВ емкостную проводимость П-образной или Т-образной схемы замещения не учитывают.

Сопротивление одной линии в относительных единицах при приближенном приведении параметров определяется по формуле [4]

$$z_{л*} = (r_0 + j \cdot x_0) \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{НОМ}^2}, \text{ о.е.}, \quad (2.13)$$

где $U_{НОМ}$ – номинальное или средненоминальное напряжение линии электропередачи, кВ;

r_0 – удельное активное сопротивление линии, Ом/км;

x_0 – удельное реактивное сопротивление линии, Ом/км;

l – длина линии, км.

При точном приведении параметров сопротивление одной линии в относительных единицах для схемы (см. рисунок 1) определяется по формуле [4]

$$x_{л*} = (r_0 + j \cdot x_0) \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_6^2} \cdot K_{T2}^2, \text{ о.е.} \quad (2.14)$$

Для двухлинейной линии электропередачи (см. рисунок 1) суммарное сопротивление линии будет в 2 раза меньше.

В практических расчетах активное сопротивление воздушных линий электропередачи при передаче средней и большой мощности может не учитываться.

2.1.4. Токоограничивающие и шунтирующие реакторы

Токоограничивающие и шунтирующие реакторы в схемах замещения представляются индуктивным сопротивлением x_p .

Сопротивление токоограничивающего реактора в относительных единицах при приближенном приведении определяется по формуле [4]

$$x_{p*} = x_{pНОМ} \cdot \frac{S_6}{U_{НОМ}^2}, \text{ о.е.}, \quad (2.15)$$

где $U_{НОМ}$ – номинальное или средненоминальное напряжение в месте установки реактора, кВ;

$x_{pНОМ}$ – номинальное сопротивление реактора, Ом.

Сопротивление шунтирующего реактора в относительных единицах при приближенном приведении определяется по формуле [4]

$$x_{p*} = \frac{S_6}{S_{\text{НОМ}}} \cdot \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{U_6^2}, \text{ о.е.}, \quad (2.16)$$

где $S_{\text{НОМ}}$ – номинальная мощность реактора, МВА.

2.1.5. Асинхронные двигатели

Асинхронные двигатели в схемах замещения в зависимости от вида расчета могут представляться [4]:

- полной Т-образной схемой;
- Т-образной схемой без учета активного сопротивления статора;
- Г-образной схемой без учета активного сопротивления статора;
- Г-образной схемой без учета активных сопротивлений;
- активным и реактивным сопротивлениями;
- реактивным сопротивлением.

При расчете пуска асинхронного двигателя его сопротивление определяется по формуле [4]

$$x_{д*} = \frac{1}{i_{п*}} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{НОМ}}}, \text{ о.е.}, \quad (2.17)$$

где $S_{\text{НОМ}}$ – номинальная полная мощность двигателя, определяемая как

$$S_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{\cos \varphi_{\text{НОМ}} \cdot \eta_{\text{НОМ}}}, \text{ МВА}, \quad (2.18)$$

где $P_{\text{НОМ}}$ – номинальная мощность двигателя, МВт;

$\cos \varphi_{\text{НОМ}}$ – номинальный коэффициент мощности двигателя, о.е.;

$i_{п*}$ – кратность пускового тока двигателя, о.е.;

$\eta_{\text{НОМ}}$ – номинальный КПД двигателя, о.е.

При нормальной работе асинхронного двигателя со скольжением s потребляемая активная мощность определяется по формуле

$$P(U, s) = \frac{U^2 \cdot R_2 \cdot s}{(x_s \cdot s)^2 + R_2^2}, \text{ о.е.}, \quad (2.19)$$

где x_s – реактивное сопротивление двигателя, о.е.;

R_2 – активное сопротивление ротора двигателя, о.е.;

U – напряжение на двигателе, о.е.

Реактивное сопротивление двигателя x_s определяется по формуле

$$x_s = \frac{U^2}{2 \cdot m_{кр}}, \text{ о.е.}, \quad (2.20)$$

где $m_{кр}$ – кратность максимального момента относительно номинального, о.е.

Активное сопротивление двигателя R_2 определяется путем подстановки в формулу (2.19) значения номинального режима $P = 1$, $U = 1$, $s = s_{ном}$ и решением квадратного уравнения.

2.1.6. Нагрузка

Под нагрузкой понимают набор электрооборудования потребителей электрической энергии, подключенных к энергосистеме. Обычно в расчетах рассматриваются не отдельные потребители, а ее узлы – группы нагрузок, присоединенных к шинам подстанции.

Представление нагрузки в расчетах переходных процессов в схемах электроснабжения определяется целью расчета и его точности. Нагрузку можно представить в виде постоянных активного и индуктивного сопротивлений в упрощенных расчетах статической и динамической устойчивости при условии сохранения устойчивости самой нагрузки.

Полное сопротивление нагрузки для последовательно соединенных активного и реактивного сопротивлений определяется по формуле [4]

$$z_{H*} = r_{H*} + j \cdot x_{H*} = \frac{U_{H*}^2}{S_{H*}} \cdot (\cos \varphi_H + j \cdot \sin \varphi_H), \text{ о.е.}, \quad (2.21)$$

где S_{H*} – полная мощность нагрузки, о.е.;

$\cos \varphi_H$ – коэффициент мощности нагрузки, о.е.;

U_{H*} – напряжение в точке подключения нагрузки, о.е.

При представлении нагрузки параллельно соединенными активным и реактивным сопротивлениями их значения определяется по следующим формулам [4]:

$$r_{H*} = \frac{U_{H*}^2}{P_{H*}}, \text{ о.е.}, \quad (2.22)$$

$$x_{H*} = \frac{U_{H*}^2}{Q_{H*}}, \text{ о.е.} \quad (2.23)$$

В расчетах устойчивости нагрузки или системы в послеаварийном режиме нагрузку можно представить статическими характеристиками по напряжению ($P_{H*} = f(U_*)$, $Q_{H*} = f(U_*)$) и частоте ($P_{H*} = g(f_*)$, $Q_{H*} = g(f_*)$).

При проведении расчетов переходных процессов бывает трудно определить состав нагрузок и их достоверные параметры. Тогда используются типовые характеристики комплексной нагрузки. При отсутствии конкретных данных рекомендуется принимать следующие характеристики комплексной нагрузки [4]:

– для активной нагрузки: в среднем

$$P_{H*} = U_*, \text{ о.е.}, \quad (2.24)$$

с диапазоном изменения в переходном режиме

$$P'_{H*} = 0,6 + 0,4 \cdot U_*, \text{ о.е.}, \quad (2.25)$$

и в сверхпереходном режиме (начальный момент времени)

$$P''_{H*} = -0,4 + 1,4 \cdot U_*, \text{ о.е.}; \quad (2.26)$$

– для реактивной нагрузки на стороне 110...220 кВ в среднем:

$$Q_{H*} = \frac{4,15}{\text{tg}\varphi_H} - \frac{9,5}{\text{tg}\varphi_H} \cdot U_* + \left(\frac{5,6}{\text{tg}\varphi_H} + 1 \right) \cdot U_*^2, \text{ о.е.}, \quad (2.27)$$

с диапазонами изменения

$$Q'_{H*} = \frac{5,6}{\text{tg}\varphi_H} - \frac{11,2}{\text{tg}\varphi_H} \cdot U_* + \left(\frac{5,6}{\text{tg}\varphi_H} + 1 \right) \cdot U_*^2, \text{ о.е.}, \quad (2.28)$$

$$Q''_{H*} = \frac{3,35}{\text{tg}\varphi_H} - \frac{8,9}{\text{tg}\varphi_H} \cdot U_* + \left(\frac{5,6}{\text{tg}\varphi_H} + 1 \right) \cdot U_*^2, \text{ о.е.} \quad (2.29)$$

2.1.6. Примеры расчета параметров схем замещения систем электропередачи

Пример 1

Пусть в схеме электропередачи генератор работает через трансформатор и двухцепную линию электропередачи на шины приемной системы бесконечной мощности (рисунок 4). Напряжение приемной станции U можно считать неизменным по абсолютному значению и фазе при любых условиях работы электропередачи.



Рисунок 4. – Схема электропередачи к примеру 1

Исходные данные:

- генератор: $P_{\text{НОМ}} = 160$ МВт; $\cos\varphi_{\text{НОМ}} = 0,8$; $x'_d = 0,278$; $U_{\text{НОМ}} = 10,5$ кВ; $x_d = 1,907$; $T_j = 6,8$ с;
- трансформатор Т1: $S_{\text{НОМ}} = 200$ МВА; $U_{\text{НОМ}} = 11/230$ кВ; $U_K = 11\%$;
- линия: $x_0 = 0,4$ Ом/км; $L = 360$ км;
- трансформатор Т2: $S_{\text{НОМ}} = 200$ МВА; $U_{\text{НОМ}} = 230/110$ кВ; $U_K = 11\%$;
- передаваемая мощность $P_c = 100$ МВт и $Q_c = 40$ Мвар.

Определить все сопротивления схемы замещения и ЭДС генератора в случае, если в схеме электропередачи используется генератор с АРВ пропорционального типа.

Считаем, что переходная ЭДС генератора не изменяется во время переходного процесса.

В этом случае схема замещения энергосистемы принимает вид (рисунок 5).

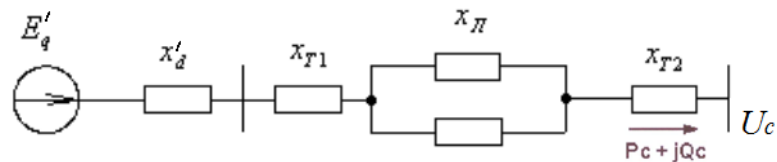


Рисунок 5. – Схема замещения энергосистемы

Расчет будем проводить, используя приближенное приведение элементов схемы замещения в относительных единицах.

Напряжение U_c принимают равным вторичному напряжению трансформатора Т2, но при приближенном приведении элементов надо брать ближайшее средненоминальное значение, тогда $U_c = 115$ кВ.

Принимаем базисные условия:

$$S_6 = P_c = 100 \text{ МВт}, \quad U_6 = U_c = 115 \text{ кВ}.$$

Напряжение системы в относительных единицах равно:

$$U_{c*} = 115/115 = 1.$$

Передаваемая активная мощность в относительных единицах равна:

$$P_{c*} = P_c / S_6 = 100/100 = 1.$$

Передаваемая реактивная мощность в относительных единицах равна:

$$Q_{c*} = Q_c / S_6 = 40 / 100 = 0,4.$$

Сопротивление генератора в относительных единицах с учетом АРВ пропорционального действия по формуле (2.1):

$$x_{Г*} = x'_d \cdot \frac{S_6}{S_{НОМ}} = x'_d \cdot \frac{S_6}{P_{НОМ} / \cos \varphi_{НОМ}} = 0,278 \cdot \frac{100}{160 / 0,8} = 0,139.$$

Сопротивление трансформатора Т1 в относительных единицах по формуле (2.8) равно:

$$x_{Т1*} = \frac{U_k \cdot S_6}{100 \cdot S_{НОМ}} = \frac{11 \cdot 100}{100 \cdot 200} = 0,055.$$

Сопротивление одной линии в относительных единицах по формуле (2.13) без учета активного сопротивления равно:

$$x_{л*} = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{НОМ}^2} = 0,4 \cdot 360 \cdot \frac{100}{230^2} = 0,272.$$

Общее сопротивление двухцепной линии будет в 2 раза меньше.

Сопротивление трансформатора Т2 в относительных единицах равно:

$$x_{Т2*} = \frac{U_k \cdot S_6}{100 \cdot S_{НОМ}} = \frac{11 \cdot 100}{100 \cdot 200} = 0,055.$$

Резльтирующее сопротивление системы с учетом АРВ пропорционального действия:

$$x_{\Sigma} = x_{Г*} + x_{Т1*} + \frac{x_{л*}}{2} + x_{Т2*} = 0,139 + 0,055 + \frac{0,272}{2} + 0,055 = 0,385.$$

Переходная ЭДС генератора по формуле (2.4):

$$E'_{g*} = \sqrt{\left(U_{C*} + \frac{Q_{C*} \cdot x_{\Sigma}}{U_{C*}} \right)^2 + \left(\frac{P_{C*} \cdot x_{\Sigma}}{U_{C*}} \right)^2} = \sqrt{\left(1 + \frac{0,4 \cdot 0,385}{1} \right)^2 + \left(\frac{1 \cdot 0,385}{1} \right)^2} = 1,216.$$

Пример 2

Составить схему замещения системы электропередачи (рисунок 6) и определить все сопротивления схемы замещения и ЭДС генератора в нормальном режиме и при включении нагрузки. На генераторе установлен АРВ сильного действия. Считаем, что ЭДС генератора не изменяется во время переходного процесса. Нагрузку в схеме замещения представить в виде полного сопротивления.

Исходные данные:

– генератор: $P_{НОМ} = 100$ МВт; $\cos \varphi_{НОМ} = 0,8$; $x'_d = 0,278$; $U_{НОМ} = 10,5$ кВ; $x_d = 1,907$; $T_j = 6,2$ с;

- трансформатор Т1: $S_{\text{ном}} = 160 \text{ МВА}$; $U_{\text{ном}} = 11/330 \text{ кВ}$; $U_K = 11\%$;
- линия: $x_0 = 0,4 \text{ Ом/км}$; $L = 360 \text{ км}$;
- трансформатор Т2: $S_{\text{ном}} = 200 \text{ МВА}$; $U_{\text{ном}} = 330/110 \text{ кВ}$; $U_K = 11\%$;
- нагрузка: $P_H = 16 \text{ МВт}$; $Q_H = 10 \text{ Мвар}$;
- передаваемая мощность $P_c = 80 \text{ МВт}$ и $Q_c = 30 \text{ Мвар}$.

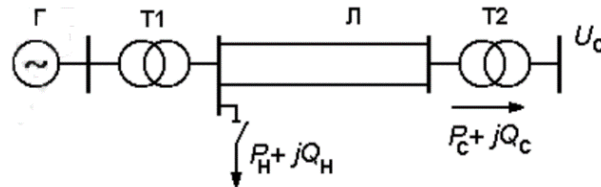


Рисунок 6. – Схема электропередачи

Расчет будем проводить, используя приближенное приведение элементов схемы замещения в относительных единицах и средние номинальные напряжения.

Поскольку в системе используется генератор с АРВ сильного действия, то схема замещения принимает вид, приведенный на рисунке 7.

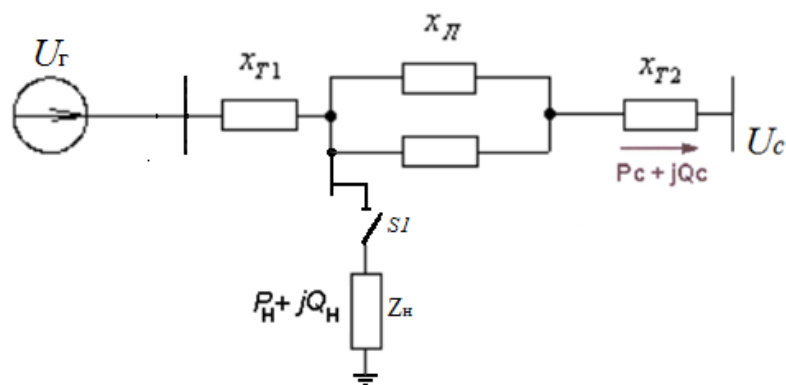


Рисунок 7. – Схема замещения электропередачи (см. рисунок 6)

Так же, как в предыдущем примере принимаем базисные условия:

$$S_6 = P_c = 80 \text{ МВт}, \quad U_6 = U_c = 115 \text{ кВ}.$$

Напряжение системы в относительных единицах равно:

$$U_{c*} = 115/115 = 1.$$

Передаваемая активная мощность в относительных единицах:

$$P_{c*} = P_c / S_6 = 80/80 = 1.$$

Передаваемая реактивная мощность в относительных единицах:

$$Q_{c*} = Q_c / S_6 = 30/80 = 0,375.$$

Сопротивление генератора в относительных единицах с учетом АРВ сильного действия $x_{Г*} = 0$.

Сопротивление трансформатора Т1 в относительных единицах по формуле (2.8) равно:

$$x_{Т1*} = \frac{U_k \cdot S_6}{100 \cdot S_{НОМ}} = \frac{11 \cdot 80}{100 \cdot 160} = 0,055.$$

Активная мощность нагрузки в относительных единицах:

$$P_{Н*} = P_H / S_6 = 16 / 80 = 0,2.$$

Реактивная мощность нагрузки в относительных единицах:

$$Q_{Н*} = Q_H / S_6 = 10 / 80 = 0,125.$$

Сопротивление одной линии в относительных единицах по формуле (2.13) без учета активного сопротивления равно:

$$x_{л*} = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{НОМ}^2} = 0,4 \cdot 360 \cdot \frac{80}{330^2} = 0,106.$$

Общее сопротивление двухцепной линии будет в 2 раза меньше.

Сопротивление трансформатора Т2 в относительных единицах равно:

$$x_{Т2*} = \frac{U_k \cdot S_6}{100 \cdot S_{НОМ}} = \frac{11 \cdot 80}{100 \cdot 200} = 0,044.$$

Резльтирующее сопротивление системы в нормальном режиме (при отключенной нагрузке) с учетом АРВ сильного действия:

$$x_{\Sigma*} = x_{Г*} + x_{Т1*} + \frac{x_{л*}}{2} + x_{Т2*} = 0 + 0,055 + \frac{0,106}{2} + 0,044 = 0,152.$$

Напряжение генератора в относительных единицах в нормальном режиме:

$$U_{Г*} = \sqrt{\left(U_{C*} + \frac{Q_{C*} \cdot x_{\Sigma*}}{U_{C*}} \right)^2 + \left(\frac{P_{C*} \cdot x_{\Sigma*}}{U_{C*}} \right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(1 + \frac{0,375 \cdot 0,152}{1} \right)^2 + \left(\frac{1 \cdot 0,152}{1} \right)^2} = 1,058.$$

Чтобы определить сопротивления нагрузки необходимо определить напряжение в начале линии в нормальном режим.

$$U_{1*} = \sqrt{\left(U_{C*} + \frac{Q_{C*} \cdot \left(\frac{x_{л*}}{2} + x_{Т2*} \right)}{U_{C*}} \right)^2 + \left(\frac{P_{C*} \cdot \left(\frac{x_{л*}}{2} + x_{Т2*} \right)}{U_{C*}} \right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(1 + \frac{0,375 \cdot (0,053 + 0,044)}{1} \right)^2 + \left(\frac{1 \cdot (0,053 + 0,044)}{1} \right)^2} = 1,041.$$

Подключаемая нагрузка потребляет и активную и реактивную мощности, поэтому нагрузка состоит из активного и реактивного сопротивлений, которые могут быть включены либо параллельно, либо последовательно. Зная мощности, проще сначала найти сопротивления при параллельном включении.

Активное сопротивление нагрузки:

$$R_{H*} = \frac{U_{1*}^2}{P_{H*}} = \frac{1,041^2}{0,2} = 5,418.$$

Реактивное сопротивление нагрузки:

$$X_{H*} = \frac{U_{1*}^2}{Q_{H*}} = \frac{1,041^2}{0,125} = 8,669.$$

Найдем полное сопротивление нагрузки при параллельном включении активного и реактивного сопротивлений и преобразуем в эквивалентное последовательное включение сопротивлений:

$$Z_{H*} = \frac{R_{H*} \cdot j \cdot X_{H*}}{R_{H*} + j \cdot X_{H*}} = \frac{5,418 \cdot j \cdot 8,669}{5,418 + j \cdot 8,669} = 3,896 + j \cdot 2,435 = 4,594 \cdot \ell^{j32,0}.$$

Вычислим собственное сопротивление схемы замещения для режима включенной нагрузки:

$$\begin{aligned} Z_{11*} &= j \cdot X_{T1*} + \frac{j \cdot \left(X_{L*} / 2 + X_{T2*} \right) \cdot Z_{H*}}{j \cdot \left(X_{L*} / 2 + X_{T2*} \right) + Z_{H*}} = \\ &= j \cdot 0,055 + \frac{j \cdot (0,053 + 0,044) \cdot (3,896 + j \cdot 2,435)}{j \cdot (0,053 + 0,044) + (3,896 + j \cdot 2,435)} = \\ &= 0,00157 + j \cdot 0,151 = 0,151 \cdot \ell^{j89,4}. \end{aligned}$$

Дальше определяем взаимное сопротивление схемы замещения для режима включенной нагрузки:

$$\begin{aligned} Z_{12*} &= j \cdot X_{T1*} + j \cdot \left(X_{L*} / 2 + X_{T2*} \right) + \frac{j \cdot X_{T1*} \cdot j \cdot \left(X_{L*} / 2 + X_{T2*} \right)}{Z_{H*}} = \\ &= j \cdot 0,055 + j \cdot (0,053 + 0,044) + \frac{j \cdot 0,055 \cdot j \cdot (0,053 + 0,044)}{(3,896 + j \cdot 2,435)} = \\ &= -0,000985 + j \cdot 0,15215 = 0,15215 \cdot \ell^{j90,36^\circ}. \end{aligned}$$

2.1.8. Задачи для самостоятельного составления схем замещения энергосистем и определения их параметров

Задача 2.1.8.1. Для заданной схемы одномашинной энергосистемы (рисунок 8) составить схему замещения и определить параметры элементов схемы в относительных единицах.

Исходные данные:

- генератор: $P_{\text{НОМ}} = 300$ МВт; $\cos\varphi_{\text{НОМ}} = 0,85$; $x'_d = 0,352$; $U_{\text{НОМ}} = 20,0$ кВ; $x_d = 2,11$; АРВ сильного действия;
- трансформатор Т1: $S_{\text{НОМ}} = 400$ МВА; $U_{\text{НОМ}} = 20/345$ кВ; $U_K = 11\%$;
- линия: $x_0 = 0,4$ Ом/км; $L = 245$ км;
- трансформатор Т2: $S_{\text{НОМ}} = 400$ МВА; $U_{\text{НОМ}} = 330/242$ кВ; $U_K = 11\%$;
- нагрузка: $P_H = 16$ МВт;
- передаваемая мощность $P_c = 240$ МВт и $Q_c = 130$ Мвар.

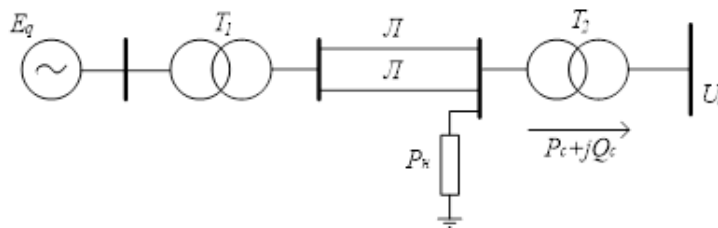


Рисунок 8. – Схема электропередачи одномашинной энергосистемы

Задача 2.1.8.2. Для заданной схемы одномашинной энергосистемы (рисунок 9) составить схему замещения и определить параметры элементов схемы в относительных единицах.

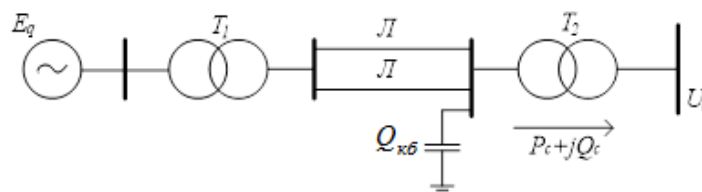


Рисунок 9. – Схема электропередачи одномашинной энергосистемы

Исходные данные:

- генератор: $P_{\text{НОМ}} = 63$ МВт; $\cos\varphi_{\text{НОМ}} = 0,8$; $x'_d = 0,224$; $U_{\text{НОМ}} = 10,5$ кВ; $x_d = 1,199$; АРВ пропорционального действия;
- трансформатор Т1: $S_{\text{НОМ}} = 100$ МВА; $U_{\text{НОМ}} = 10/242$ кВ; $U_K = 11\%$;
- линия: $x_0 = 0,38$ Ом/км; $L = 90$ км;

- трансформатор Т2: $S_{\text{НОМ}} = 125 \text{ МВА}$; $U_{\text{НОМ}} = 220/38,5 \text{ кВ}$; $U_K = 11\%$;
- мощность конденсаторной батареи: $Q_{\text{кб}} = 4 \text{ Мвар}$;
- передаваемая мощность $P_c = 40 \text{ МВт}$ и $Q_c = 20 \text{ Мвар}$.

Задача 2.1.8.3. Для заданной схемы одномашинной энергосистемы (рисунок 10) составить схему замещения и определить параметры элементов схемы в относительных единицах.

Исходные данные:

- генератор: $P_{\text{НОМ}} = 160 \text{ МВт}$; $\cos\varphi_{\text{НОМ}} = 0,83$; $x'_d = 0,304$; $U_{\text{НОМ}} = 18,0 \text{ кВ}$; $x_d = 1,713$; генератор без АРВ;
- трансформатор Т1: $S_{\text{НОМ}} = 250 \text{ МВА}$; $U_{\text{НОМ}} = 18/115 \text{ кВ}$; $U_K = 10\%$;
- линия: $x_0 = 0,41 \text{ Ом/км}$; $L = 57 \text{ км}$;
- трансформатор Т2: $S_{\text{НОМ}} = 250 \text{ МВА}$; $U_{\text{НОМ}} = 110/38,5 \text{ кВ}$; $U_K = 10\%$;
- нагрузка: $P_H = 12 \text{ МВт}$;
- мощность конденсаторной батареи: $Q_{\text{кб}} = 10 \text{ Мвар}$;
- передаваемая мощность $P_c = 120 \text{ МВт}$ и $Q_c = 80 \text{ Мвар}$.

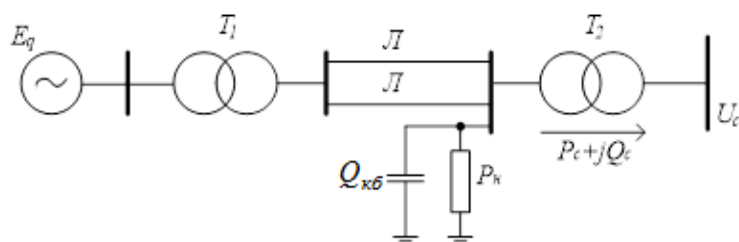


Рисунок 10. – Схема электропередачи одномашинной энергосистемы

Задача 2.1.8.4. Для заданной схемы одномашинной энергосистемы (рисунок 11) составить схему замещения и определить параметры элементов схемы в относительных единицах.

Исходные данные:

- генератор: $P_{\text{НОМ}} = 63 \text{ МВт}$; $\cos\varphi_{\text{НОМ}} = 0,81$; $x'_d = 0,222$; $U_{\text{НОМ}} = 10,5 \text{ кВ}$; $x_d = 1,194$; генератор с АРВ пропорционального действия;
- трансформатор Т1: $S_{\text{НОМ}} = 100 \text{ МВА}$; $U_{\text{НОМ}} = 10/38,5 \text{ кВ}$; $U_K = 11\%$;
- линия: $x_0 = 0,36 \text{ Ом/км}$; $L = 120 \text{ км}$;
- трансформатор Т2: $S_{\text{НОМ}} = 100 \text{ МВА}$; $U_{\text{НОМ}} = 38,5/6,3 \text{ кВ}$; $U_K = 11\%$;
- мощность реактора: $Q_p = 4 \text{ Мвар}$;
- мощность конденсаторной батареи: $Q_{\text{кб}} = 10 \text{ Мвар}$;
- передаваемая мощность $P_c = 60 \text{ МВт}$ и $Q_c = 25 \text{ Мвар}$.

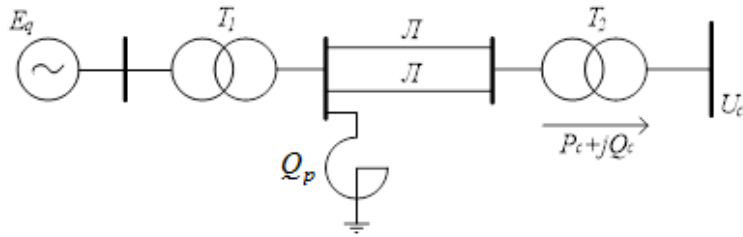


Рисунок 11. – Схема электропередачи одномашинной энергосистемы

Задача 2.1.8.5. Для заданной схемы одномашинной энергосистемы (рисунок 12) составить схему замещения и определить параметры элементов схемы в относительных единицах.

Исходные данные:

- генератор: $P_{\text{НОМ}} = 300$ МВт; $\cos\varphi_{\text{НОМ}} = 0,85$; $x'_d = 0,349$; $U_{\text{НОМ}} = 20,0$ кВ; $x_d = 2,09$; генератор с АРВ сильного действия;
- трансформатор Т1: $S_{\text{НОМ}} = 400$ МВА; $U_{\text{НОМ}} = 20/242$ кВ; $U_K = 10\%$;
- линия: $x_0 = 0,38$ Ом/км; $L = 180$ км;
- трансформатор Т2: $S_{\text{НОМ}} = 400$ МВА; $U_{\text{НОМ}} = 220/115$ кВ; $U_K = 10\%$;
- мощность реактора: $Q_p = 4$ Мвар;
- нагрузка: $P_H = 20$ МВт; $Q_H = 8$ Мвар;
- передаваемая мощность $P_c = 240$ МВт и $Q_c = 100$ Мвар.

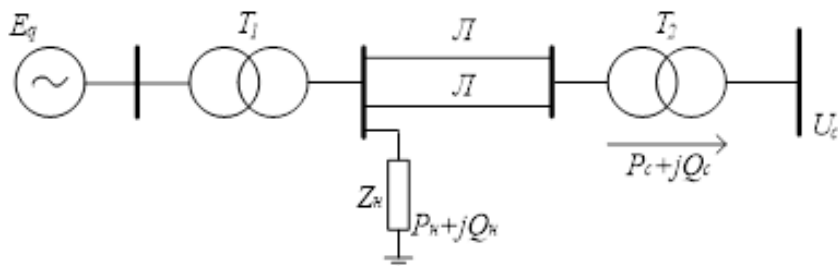


Рисунок 12. – Схема электропередачи одномашинной энергосистемы

2.2. Обобщенные параметры схемы замещения одномашинной энергосистемы

Часто удаленная электростанция связана с приемной системой более сложной электрической сетью, чем одна линия и два трансформатора. При проведении расчетов такая сеть считается **пассивной частью** схемы замещения, если сопротивления и проводимости ее элементов не зависят от параметров режима. В этом случае пассивная часть схемы замещения является линейной, и поэтому к ней применимы методы преобразования линейных электрических цепей.

В схеме замещения энергосистемы могут присутствовать нелинейные и динамические элементы, которые учитываются статическими и динамическими характеристиками, либо дифференциальными уравнениями. В этом случае с целью упрощения нелинейные участки характеристик в области рабочей точки заменяют линейным участком.

Одним из способов математического описания пассивных частей схем замещения является определение их **обобщенных параметров**, к которым относятся **собственные и взаимные сопротивления и проводимости** схемы замещения энергосистемы.

Пусть дана какая-то обобщенная схема замещения одномашинной энергосистемы с произвольной пассивной частью (рисунок 13).



Рисунок 13. – Обобщенная схема замещения одномашинной энергосистемы

Любую сложную пассивную часть схемы замещения всегда можно преобразовать к Т-образному или П-образному виду четырехполюсника. Предположим, что такое преобразование проведено и получена Т-образная эквивалентная схема с источниками ЭДС E и U , (рис. 14).

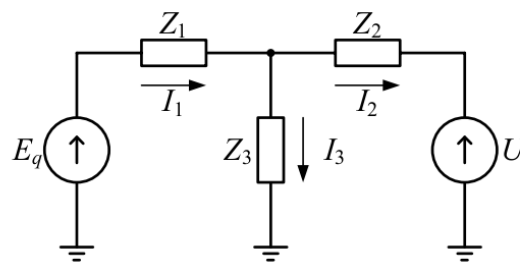


Рисунок 14. – Т-образная эквивалентная схема одномашинной энергосистемы

Собственные сопротивления вычисляются как эквивалентные сопротивления пассивной части относительно зажимов источников ЭДС по правилам параллельного и последовательного сложения.

Так, собственное сопротивление схемы замещения со стороны зажимов генератора E_q :

$$\underline{Z}_{11} = \underline{Z}_1 + \frac{\underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3}. \quad (2.30)$$

Собственное сопротивление схемы замещения со стороны зажимов приемной шины энергосистемы U :

$$\underline{Z}_{22} = \underline{Z}_2 + \frac{\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_3}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_3}. \quad (2.31)$$

Соответственно, собственные проводимости определяются как величины, обратные собственным сопротивлениям: $\underline{Y}_{11} = 1/\underline{Z}_{11}$, $\underline{Y}_{22} = 1/\underline{Z}_{22}$.

Взаимные сопротивления \underline{Z}_{12} и \underline{Z}_{21} одинаковы. Они вычисляются по формуле преобразования звезды в эквивалентный треугольник:

$$\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{21} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \frac{\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_2}{\underline{Z}_3}. \quad (2.32)$$

Взаимная проводимость вычисляется как $\underline{Y}_{12} = \underline{Y}_{21} = 1/\underline{Z}_{12}$.

2.2.1. Пример нахождения обобщенных параметров схемы замещения энергосистемы

На рисунке 15 представлена схема замещения электрической системы. Требуется преобразовать пассивную часть схемы замещения сети методом преобразования к Т-образному виду и определить собственные и взаимные сопротивления электростанций.

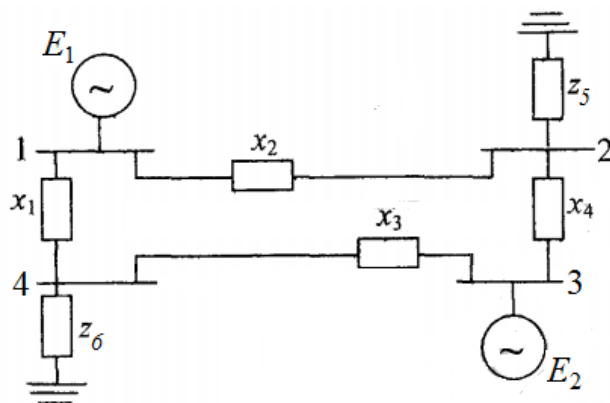


Рисунок 15. – Схема замещения электрической системы

Исходные данные:

$$x_1 = j \cdot 0,55; x_2 = j \cdot 0,38; x_3 = j \cdot 0,41; x_4 = j \cdot 0,75; z_5 = 2,00 + j \cdot 0,40; z_6 = 1,85 + j0,29.$$

Параметры элементов схемы замещения электрической системы заданы в относительных единицах.

Решение:

Решение проведем в общем виде без числовых вычислений. В итоге в преобразованной схеме должны остаться обе электростанции как источники ЭДС E_1 и E_2 , и Т-образная схема пассивной части схемы. Для этого нужно исключить из схемы узлы 2 и 4.

Исключение узлов 2 и 4. Элементы x_2 , x_4 и z_5 образуют первую трехлучевую звезду, а элементы x_1 , x_3 и z_6 образуют вторую трехлучевую звезду (см. рисунок 15). После замены этих звезд эквивалентными треугольниками получим преобразованную схему замещения электрической системы уже без узлов 2 и 4 (рисунок 16).

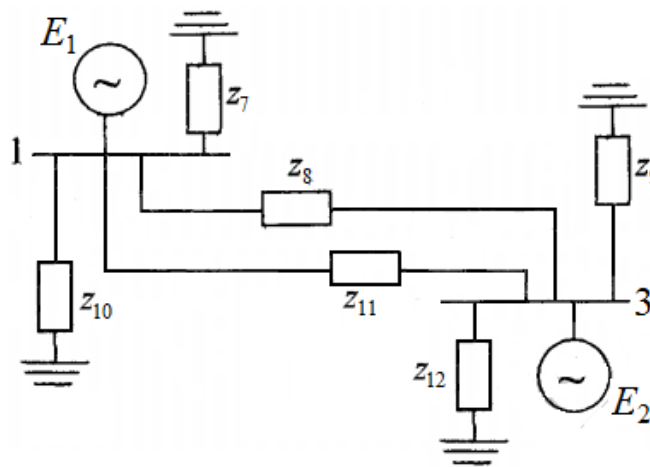


Рисунок 16. – Схема замещения электрической системы без узлов 2 и 4

Сопротивления z_7 , z_8 и z_9 первого треугольника, и z_{10} , z_{11} и z_{12} второго треугольника необходимо пересчитать по известным формулам преобразования звезды в треугольник [5]:

$$z_7 = x_2 + z_5 + \frac{x_2 \cdot z_5}{x_4}; \quad z_8 = x_2 + x_4 + \frac{x_2 \cdot x_4}{z_5}; \quad z_9 = x_4 + z_5 + \frac{x_4 \cdot z_5}{x_2}.$$

$$z_{10} = x_1 + z_6 + \frac{x_1 \cdot z_6}{x_3}; \quad z_{11} = x_1 + x_3 + \frac{x_1 \cdot x_3}{z_6}; \quad z_{12} = x_3 + z_6 + \frac{x_3 \cdot z_6}{x_1}.$$

Из преобразованной схемы замещения (см. рисунок 16) видно, что сопротивления z_7 и z_{10} включены параллельно, сопротивления z_8 и z_{11} тоже включены параллельно, как и сопротивления z_9 и z_{12} . Заменяв параллельно включенные сопротивления соответствующими эквивалентными сопротивлениями, получим схему замещения электрической системы в виде, представленном на рисунке 17.

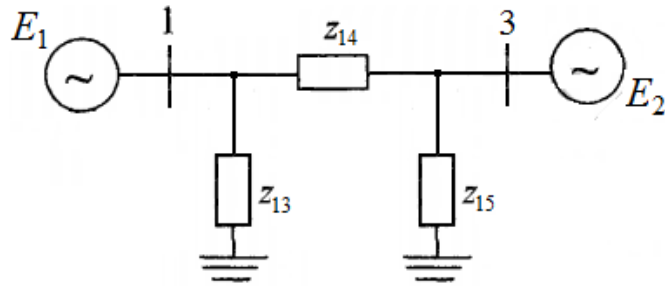


Рисунок 17. – Преобразованная схема замещения электрической системы

Величины сопротивлений z_{13} , z_{14} и z_{15} определяются по формулам параллельного сложения:

$$z_{13} = z_7 \parallel z_{10} = \frac{z_7 \cdot z_{10}}{z_7 + z_{10}}; \quad z_{14} = z_8 \parallel z_{11} = \frac{z_8 \cdot z_{11}}{z_8 + z_{11}}; \quad z_{15} = z_9 \parallel z_{12} = \frac{z_9 \cdot z_{12}}{z_9 + z_{12}}.$$

Полученную схему замещения электрической системы (см. рисунок 12) легко привести к Т-образному виду (рисунок 18), применив эквивалентное преобразование треугольника в звезду. Это позволит вычислить собственные и взаимные сопротивления и проводимости исходной электрической системы.

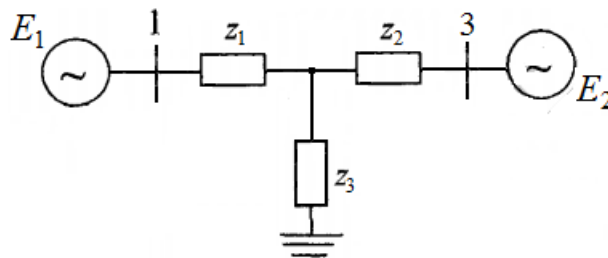


Рисунок 18. – Т-образная схема замещения электрической системы

Тогда собственное сопротивление и собственная проводимость схемы замещения со стороны зажимов генератора E_1 :

$$\underline{z}_{11} = \underline{z}_1 + \frac{\underline{z}_2 \cdot \underline{z}_3}{\underline{z}_2 + \underline{z}_3}; \quad \underline{y}_{11} = \frac{1}{\underline{z}_{11}}.$$

Собственное сопротивление и собственная проводимость схемы замещения со стороны зажимов генератора E_3 :

$$\underline{z}_{33} = \underline{z}_2 + \frac{\underline{z}_1 \cdot \underline{z}_3}{\underline{z}_1 + \underline{z}_3}; \quad \underline{y}_{33} = \frac{1}{\underline{z}_{33}}.$$

Взаимное сопротивление и взаимную проводимость схемы замещения получим в виде:

$$\underline{Z}_{13} = \underline{Z}_{31} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \frac{\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_2}{\underline{Z}_3}; \quad \underline{Y}_{13} = \underline{Y}_{31} = \frac{1}{\underline{Z}_{13}} = \frac{1}{\underline{Z}_{31}}.$$

Несложно заметить, что взаимное сопротивление $\underline{Z}_{13} = \underline{Z}_{31}$ равно сопротивлению \underline{Z}_{14} (см. рисунок 18), т.к. формула вычисления взаимного сопротивления совпадает с формулой эквивалентного преобразования звезды в треугольник.

2.2.2. Задачи для самостоятельного решения

Задача 2.2.2.1. Для данной схемы замещения энергосистемы (рисунок 19) определить обобщенные параметры:

- собственные и взаимные сопротивления $\underline{Z}_{11}, \underline{Z}_{22}$ и $\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{21}$;
- собственные и взаимные проводимости $\underline{Y}_{11}, \underline{Y}_{22}$ и $\underline{Y}_{12} = \underline{Y}_{21}$.

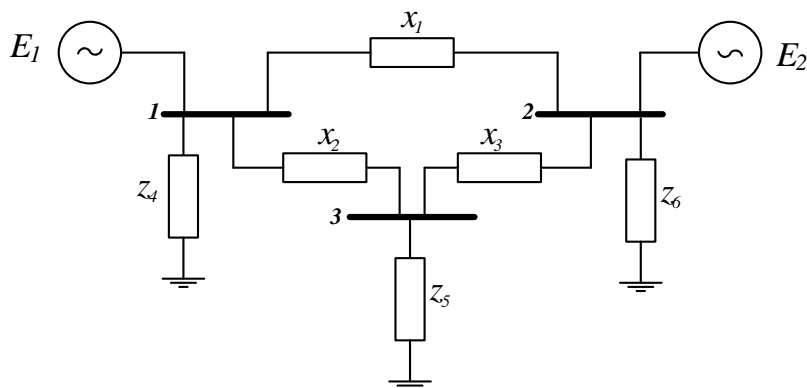


Рисунок 19. – Схема замещения энергосистемы

Исходные данные:

$$x_1 = j \cdot 0,20; \quad x_2 = j \cdot 0,25; \quad x_3 = j \cdot 0,35; \quad z_4 = 5,1 + j \cdot 3,18;$$

$$z_5 = 2,64 + j \cdot 2,47; \quad z_6 = 3,27 + j \cdot 1,74.$$

Задача 2.2.2.2. Для данной схемы замещения энергосистемы (рисунок 20) определить обобщенные параметры:

- собственные и взаимные сопротивления $\underline{Z}_{11}, \underline{Z}_{22}$ и $\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{21}$;
- собственные и взаимные проводимости $\underline{Y}_{11}, \underline{Y}_{22}$ и $\underline{Y}_{12} = \underline{Y}_{21}$.

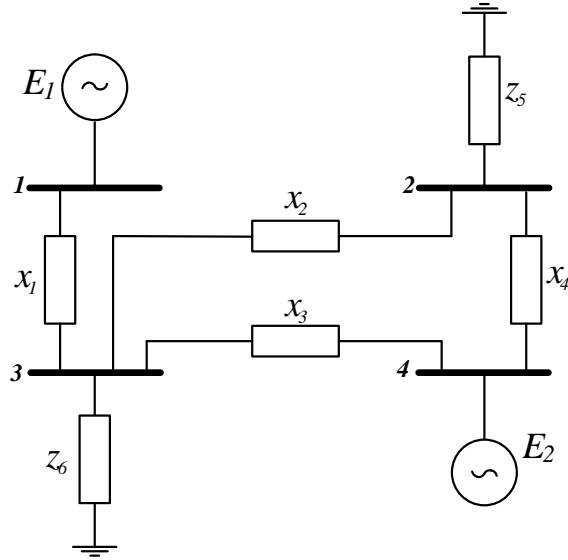


Рисунок 20. – Схема замещения энергосистемы

Исходные данные:

$$x_1 = j \cdot 0,55; \quad x_2 = j \cdot 0,38; \quad x_3 = j \cdot 0,41; \quad x_4 = j \cdot 0,75;$$

$$z_5 = 5,10 + j \cdot 2,07; \quad z_6 = 4,90 + j \cdot 3,05.$$

Задача 2.2.2.3. Для данной схемы замещения энергосистемы (рисунок 21) определить обобщенные параметры:

- собственные и взаимные сопротивления $\underline{Z}_{11}, \underline{Z}_{22}$ и $\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{21}$;
- собственные и взаимные проводимости $\underline{Y}_{11}, \underline{Y}_{22}$ и $\underline{Y}_{12} = \underline{Y}_{21}$.

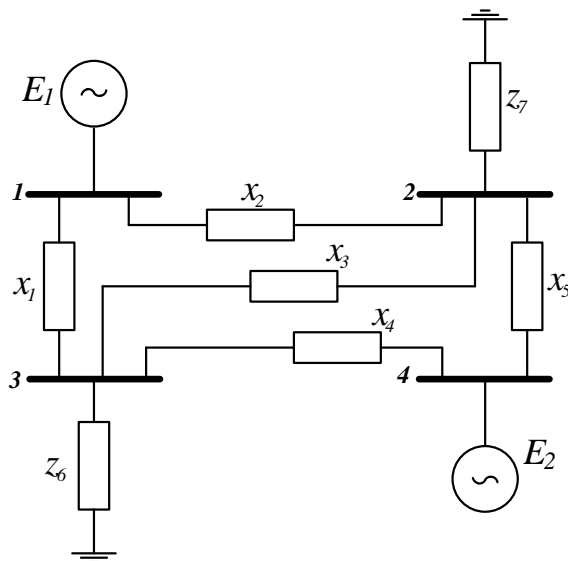


Рисунок 21. – Схема замещения энергосистемы

Исходные данные:

$$x_1 = j \cdot 0,30; \quad x_2 = j \cdot 0,80; \quad x_3 = j \cdot 0,24; \quad x_4 = j \cdot 0,50; \quad x_5 = j \cdot 0,39;$$
$$z_6 = 4,38 + j \cdot 2,73; \quad z_7 = 2,10 + j \cdot 1,90.$$

Задача 2.2.2.4. Для данной схемы замещения энергосистемы (рисунок 22) определить обобщенные параметры:

- собственные и взаимные сопротивления $\underline{z}_{11}, \underline{z}_{22}$ и $\underline{z}_{12} = \underline{z}_{21}$;
- собственные и взаимные проводимости $\underline{y}_{11}, \underline{y}_{22}$ и $\underline{y}_{12} = \underline{y}_{21}$.

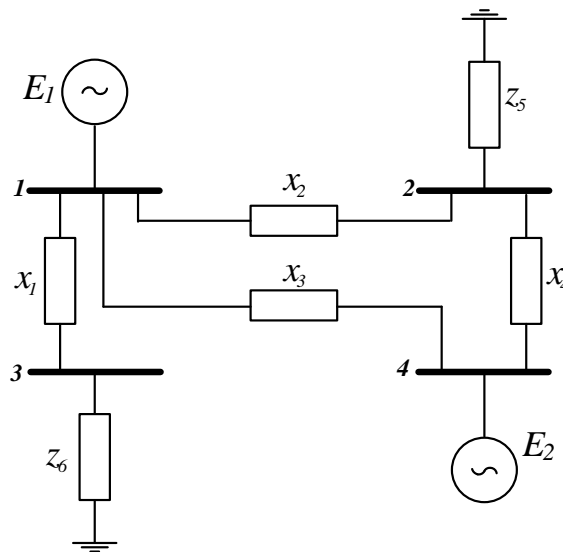


Рисунок 22. – Схема замещения энергосистемы

Исходные данные:

$$x_1 = j \cdot 0,58; \quad x_2 = j \cdot 0,25; \quad x_3 = j \cdot 0,32; \quad x_4 = j \cdot 0,19;$$
$$z_5 = 1,30 + j \cdot 0,51; \quad z_6 = 1,74 + j \cdot 0,85.$$

Задача 2.2.2.5. Для данной схемы замещения энергосистемы (рисунок 23) определить обобщенные параметры:

- собственные и взаимные сопротивления $\underline{z}_{11}, \underline{z}_{22}$ и $\underline{z}_{12} = \underline{z}_{21}$;
- собственные и взаимные проводимости $\underline{y}_{11}, \underline{y}_{22}$ и $\underline{y}_{12} = \underline{y}_{21}$.

Исходные данные:

$$x_1 = j \cdot 1,04; \quad x_2 = j \cdot 0,30; \quad x_3 = j \cdot 0,58; \quad z_5 = 3,02 + j \cdot 1,88;$$
$$z_6 = 2,49 + j \cdot 2,01. \quad z_7 = 1,80 + j \cdot 1,52.$$

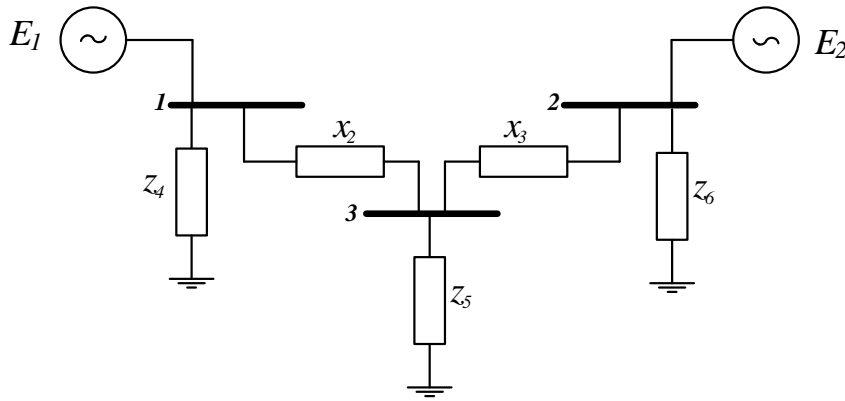


Рисунок 23. – Схема замещения энергосистемы

3. СТАТИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ПРОСТЕЙШИХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

При анализе статической устойчивости простейшей энергосистемы определяют предельную передаваемую мощность по линиям и коэффициент запаса статической устойчивости по мощности.

При отсутствии на генераторе АРВ можно считать, что в первые моменты времени переходного процесса ток возбуждения не изменяется. Поэтому в расчетах генератор учитывается синхронной ЭДС E и синхронным сопротивлением x_d .

Поскольку в энергосистеме преобладают неявнополюсные синхронные генераторы (тихоходные явнополюсные генераторы применяются только на ГЭС, которых в Республике Беларусь немного), будем рассматривать энергосистемы только с неявнополюсными генераторами.

Угловая характеристика $P(\delta)$ неявнополюсного генератора равна:

$$P_*(\delta) = \frac{E_* \cdot U_{c*}}{X_{d\Sigma*}} \cdot \sin(\delta) = P_{m*} \cdot \sin(\delta), \text{о.е.}, \quad (3.1)$$

где E_* – ЭДС генератора, определяемая по формулам (2.3), (2.4), (2.5) в зависимости от наличия и вида АРВ, о.е.;

U_{c*} – напряжение приемных шин энергосистемы, о.е.;

$X_{d\Sigma*}$ – взаимное сопротивление системы между генератором и приемными шинами, о.е.

В простейших системах предел мощности и предел по условиям статической устойчивости обычно совпадают. В настоящем разделе показаны примеры

определения предела передаваемой мощности и предела статической устойчивости при различных допущениях. Во всех задачах регуляторы возбуждения генераторов будут учитываться приближенно в виде постоянной ЭДС, приложенной за тем или иным сопротивлением, замещающим генератор.

Предел передаваемой мощности в энергосистему из (3.1) вычисляется по формуле

$$P_{m*} = \frac{E_* \cdot U_{c*}}{|X_{d\Sigma*}|}, \text{ о.е.} \quad (3.2)$$

Коэффициент запаса статической устойчивости вычисляется по формуле

$$k_3 = \frac{P_{m*} - P_{0*}}{P_{0*}} \cdot 100\%, \quad (3.3)$$

где P_{0*} – мощность приводной турбины генератора, о.е.

3.1. Примеры анализа статической устойчивости простейшей энергосистемы

Пример 3.1.1

Пусть в схеме электропередачи генератор работает через трансформатор и двухцепную линию электропередачи на шины приемной системы бесконечной мощности (рисунок 24). Напряжение приемной станции U можно считать неизменным по абсолютному значению и фазе при любых условиях работы электропередачи.



Рисунок 24. – Схема электропередачи к примеру 1

Исходные данные:

– генератор: $P_{\text{НОМ}} = 160$ МВт; $\cos\varphi_{\text{НОМ}} = 0,8$; $x'_d = 0,278$; $U_{\text{НОМ}} = 10,5$ кВ;
 $x_d = 1,907$; $T_j = 6,8$ с;

– трансформатор Т1: $S_{\text{НОМ}} = 200$ МВА; $U_{\text{НОМ}} = 11/230$ кВ; $U_K = 11\%$;

- линия: $x_0 = 0,4$ Ом/км; $L = 360$ км;
- трансформатор Т2: $S_{\text{ном}} = 200$ МВА; $U_{\text{ном}} = 230/110$ кВ; $U_K = 11\%$;
- передаваемая мощность $P_c = 100$ МВт и $Q_c = 40$ Мвар.

Определить предел передаваемой мощности и коэффициент запаса статической устойчивости в следующих случаях:

- при отсутствии автоматического регулятора возбуждения (АРВ);
- при АРВ пропорционального типа;
- при АРВ сильного действия.

Решение:

Считаем, что переходная ЭДС генератора не изменяется во время переходного процесса. Для нахождения искомых величин необходимо составить схему замещения энергосистемы, и найти параметры элементов схемы замещения в относительных единицах.

Энергосистема с генератором без АРВ

В этом случае схема замещения энергосистемы принимает вид (рисунок 25):

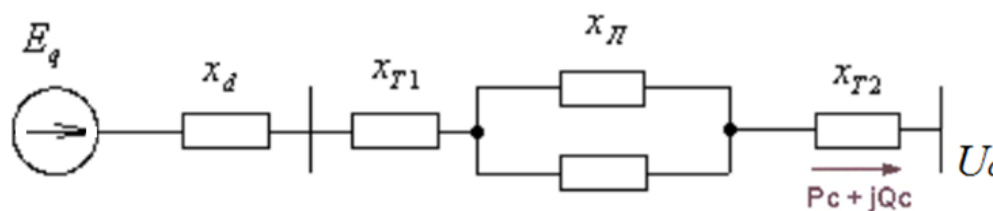


Рисунок 25. – Схема замещения энергосистемы

Расчет будем проводить, используя приближенное приведение элементов схемы замещения в относительных единицах.

Напряжение U_c принимают равным вторичному напряжению трансформатора Т2, но при приближенном приведении элементов надо брать ближайшее среднономинальное значение, тогда $U_c = 115$ кВ.

Принимаем базисные условия:

$$S_6 = P_c = 100 \text{ МВт}, \quad U_6 = U_c = 115 \text{ кВ.}$$

Напряжение системы в относительных единицах равно:

$$U_{c*} = 115/115 = 1.$$

Передаваемая активная мощность в относительных единицах:

$$P_{c*} = P_c / S_6 = 100/100 = 1.$$

Передаваемая реактивная мощность в относительных единицах:

$$Q_{c*} = Q_c / S_6 = 40/100 = 0,4.$$

Сопротивление генератора без АРВ в относительных определим по формуле (2.1):

$$x_{г*} = x_d \cdot \frac{S_6}{S_{НОМ}} = x_d \cdot \frac{S_6}{P_{НОМ} / \cos \varphi_{НОМ}} = 1,907 \cdot \frac{100}{160/0,8} = 0,9535.$$

Сопротивление трансформатора Т1 в относительных единицах по формуле (2.8):

$$x_{Т1*} = \frac{U_k \cdot S_6}{100 \cdot S_{НОМ}} = \frac{11 \cdot 100}{100 \cdot 200} = 0,055.$$

Сопротивление одной линии в относительных единицах по формуле (2.13) без учета активного сопротивления равно

$$x_{л*} = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{НОМ}^2} = 0,4 \cdot 360 \cdot \frac{100}{230^2} = 0,272.$$

Общее сопротивление двухцепной линии будет в 2 раза меньше.

Сопротивление трансформатора Т2 в относительных единицах:

$$x_{Т2*} = \frac{U_k \cdot S_6}{100 \cdot S_{НОМ}} = \frac{11 \cdot 100}{100 \cdot 200} = 0,055.$$

Резльтирующее сопротивление системы с генератором без АРВ:

$$x_{\Sigma 1*} = x_{г*} + x_{Т1*} + \frac{x_{л*}}{2} + x_{Т2*} = 0,9535 + 0,055 + \frac{0,272}{2} + 0,055 = 1,1995.$$

Переходная ЭДС генератора по формуле (2.4):

$$E_{q*} = \sqrt{\left(U_{C*} + \frac{Q_{C*} \cdot x_{\Sigma 1*}}{U_{C*}} \right)^2 + \left(\frac{P_{C*} \cdot x_{\Sigma 1*}}{U_{C*}} \right)^2} = \\ = \sqrt{\left(1 + \frac{0,4 \cdot 1,1995}{1} \right)^2 + \left(\frac{1 \cdot 1,1995}{1} \right)^2} = 1,9049.$$

Предел передаваемой мощности в энергосистему вычисляется по формуле (3.2):

$$P_{m1*} = \frac{E_{q*} \cdot U_{C*}}{x_{\Sigma 1*}} = \frac{1,9049 \cdot 1}{1,1995} = 1,588.$$

Активная мощность, выдаваемая в систему генератором (угловая характеристика) описывается функцией:

$$P_{1*}(\delta) = P_{m1*} \cdot \sin(\delta) = 1,588 \cdot \sin(\delta).$$

Коэффициент запаса статической устойчивости вычисляется по формуле (3.3):

$$k_{\Sigma 1} = \frac{P_{m1*} - P_{0*}}{P_{0*}} \cdot 100\% = \frac{1,588 - 1}{1} \cdot 100\% = 58,8\%.$$

Генератор энергосистемы с АРВ пропорционального типа

В этом случае схема замещения энергосистемы принимает вид (рисунок 26):

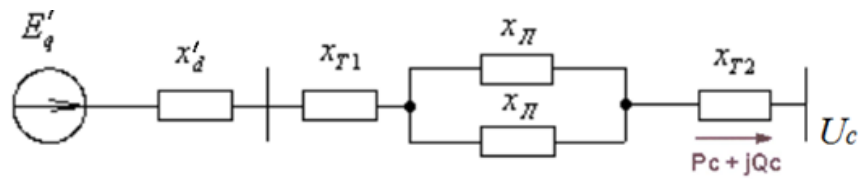


Рисунок 26. – Схема замещения энергосистемы

Расчет будем проводить аналогично, используя приближенное приведение элементов схемы замещения в относительных единицах.

Поскольку исходные данные энергосистемы не изменились, то базисные условия остаются те же:

$$S_6 = P_c = 100 \text{ МВт}, \quad U_6 = U_c = 115 \text{ кВ}.$$

Напряжение системы, передаваемая активная мощность и передаваемая реактивная мощность в относительных единицах также останутся те же:

$$U_{c*} = 115/115 = 1; \quad P_{c*} = P_c/S_6 = 100/100 = 1; \quad Q_{c*} = Q_c/S_6 = 40/100 = 0,4.$$

Параметры элементов схемы замещения x_{T1*} , $x_{л*}$ и x_{T2*} в относительных единицах также останутся те же:

$$x_{T1*} = 0,055; \quad x_{л*} = 0,272; \quad x_{T2*} = 0,055.$$

Теперь генератор с АРВ пропорционального типа, поэтому изменится сопротивление генератора $x_{г*}$, результирующее сопротивление системы с учетом АРВ $x_{\Sigma 2*}$ и величина ЭДС $E'_{г*}$.

Сопротивление генератора в относительных единицах с учетом АРВ пропорционального действия по формуле (2.1):

$$x_{г*} = x'_d \cdot \frac{S_6}{S_{\text{НОМ}}} = x'_d \cdot \frac{S_6}{P_{\text{НОМ}}/\cos\varphi_{\text{НОМ}}} = 0,278 \cdot \frac{100}{160/0,8} = 0,139.$$

Результирующее сопротивление системы с учетом АРВ пропорционального типа:

$$x_{\Sigma 2*} = x_{г*} + x_{T1*} + \frac{x_{л*}}{2} + x_{T2*} = 0,139 + 0,055 + \frac{0,272}{2} + 0,055 = 0,385.$$

Переходная ЭДС генератора по формуле (2.4):

$$\begin{aligned} E'_{г*} &= \sqrt{\left(U_{c*} + \frac{Q_{c*} \cdot x_{\Sigma}}{U_{c*}} \right)^2 + \left(\frac{P_{c*} \cdot x_{\Sigma}}{U_{c*}} \right)^2} = \\ &= \sqrt{\left(1 + \frac{0,4 \cdot 0,385}{1} \right)^2 + \left(\frac{1 \cdot 0,385}{1} \right)^2} = 1,216. \end{aligned}$$

Предел передаваемой мощности в энергосистему вычисляется по формуле (3.2):

$$P_{m2*} = \frac{E'_{g*} \cdot U_{c*}}{x_{\Sigma 2*}} = \frac{1,216 \cdot 1}{0,385} = 3,158.$$

Активная мощность, выдаваемая в систему генератором (угловая характеристика) описывается функцией:

$$P_{2*}(\delta) = P_{m2*} \cdot \sin(\delta) = 3,158 \cdot \sin(\delta).$$

Коэффициент запаса статической устойчивости вычисляется по формуле (3.3):

$$k_{\Sigma 2} = \frac{P_{m2*} - P_{0*}}{P_{0*}} \cdot 100\% = \frac{3,158 - 1}{1} \cdot 100\% = 215,8\%.$$

Генератор энергосистемы с АРВ сильного действия

В этом случае схема замещения энергосистемы принимает вид (рисунок 27):

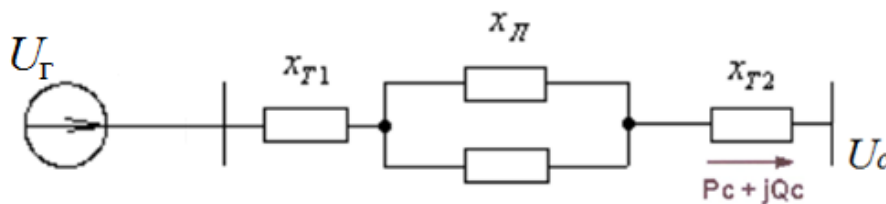


Рисунок 27. – Схема замещения энергосистемы

Расчет будем проводить аналогично, используя приближенное приведение элементов схемы замещения в относительных единицах.

Поскольку исходные данные энергосистемы не изменились, то базисные условия остаются те же:

$$S_6 = P_c = 100 \text{ МВт}, \quad U_6 = U_c = 115 \text{ кВ}.$$

Напряжение системы, передаваемая активная мощность и передаваемая реактивная мощность в относительных единицах также останутся те же:

$$U_{c*} = 115/115 = 1; \quad P_{c*} = P_c/S_6 = 100/100 = 1; \quad Q_{c*} = Q_c/S_6 = 40/100 = 0,4.$$

Параметры элементов схемы замещения x_{T1*} , x_{L*} и x_{T2*} x_{T2*} в относительных единицах также останутся те же:

$$x_{T1*} = 0,055; \quad x_{L*} = 0,272; \quad x_{T2*} = 0,055.$$

Теперь генератор с АРВ сильного действия, поэтому изменится сопротивление генератора, оно равно нулю $x_{G*} = 0$, результирующее сопротивление системы с учетом АРВ $x_{\Sigma 3*}$ и вместо ЭДС будет напряжение генератора U_{G*} .

Результирующее сопротивление системы с учетом АРВ сильного действия:

$$x_{\Sigma 3*} = x_{T1*} + \frac{x_{Л*}}{2} + x_{T2*} = 0,055 + \frac{0,272}{2} + 0,055 = 0,246.$$

Напряжение генератора по формуле (2.4):

$$U_{Г*} = \sqrt{\left(U_{C*} + \frac{Q_{C*} \cdot x_{\Sigma 3}}{U_{C*}} \right)^2 + \left(\frac{P_{C*} \cdot x_{\Sigma 3}}{U_{C*}} \right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(1 + \frac{0,4 \cdot 0,246}{1} \right)^2 + \left(\frac{1 \cdot 0,246}{1} \right)^2} = 1,0986.$$

Предел передаваемой мощности в энергосистему вычисляется по формуле (3.2):

$$P_{m3*} = \frac{U_{Г*} \cdot U_{C*}}{x_{\Sigma 3*}} = \frac{1,0986 \cdot 1}{0,246} = 4,466.$$

Активная мощность, выдаваемая в систему генератором (угловая характеристика) описывается функцией:

$$P_{3*}(\delta) = P_{m3*} \cdot \sin(\delta) = 4,466 \cdot \sin(\delta).$$

Коэффициент запаса статической устойчивости вычисляется по формуле (3.3):

$$k_{з3} = \frac{P_{m3*} - P_{0*}}{P_{0*}} \cdot 100\% = \frac{4,466 - 1}{1} \cdot 100\% = 346,6\%.$$

Сопоставляя результаты расчетов, можно сделать выводы, что установка автоматических регуляторов возбуждения генераторов приводит к увеличению как предела передаваемой мощности, так и коэффициента запаса статической устойчивости.

Активная мощность, выдаваемая в систему генератором, зависит от ЭДС генератора, напряжения приемной системы, результирующего сопротивления системы, угла δ между напряжением системы и ЭДС генератора.

При неизменности ЭДС генератора, напряжения системы и результирующего сопротивления изменение передаваемой мощности обусловлено лишь изменением угла δ .

По результатам расчета построим три угловые характеристики и мощность, отдаваемую турбиной (рисунок 28):

Из рисунка видно, что генератор без АРВ будет работать с наименьшим коэффициентом запаса статической устойчивости (см. рисунок 28, график 1). Графики 2 и 3 показывают, что АРВ резко повышают статическую устойчивость данной схемы электропередачи.

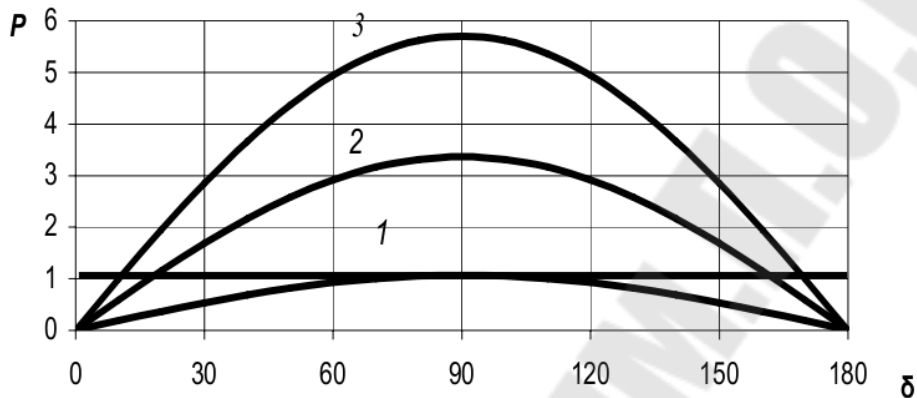


Рисунок 28. – Зависимости активной мощности от угла δ

Пример 3.1.2

Рассмотрим влияние отключения одной цепи линии на предел передаваемой мощности и коэффициент запаса статической устойчивости при АРВ пропорционального типа (рисунок 29). Построим угловые характеристики.

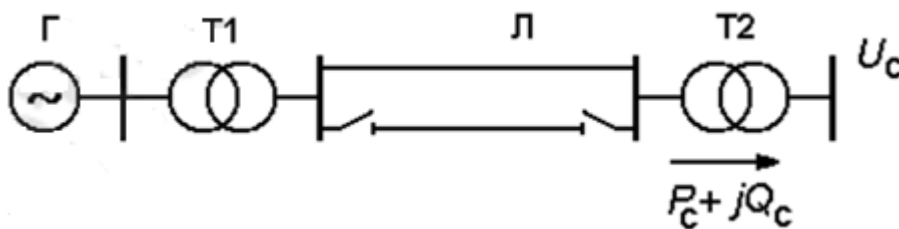


Рисунок 29. – Схема системы электропередачи к примеру 2

Исходные данные:

- генератор: $P_{\text{ном}} = 100$ МВт; $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,8$; $x'_d = 0,278$; $U_{\text{ном}} = 10,5$ кВ; $T_j = 6,7$ с;
- трансформатор Т1: $S_{\text{ном}} = 160$ МВА; $U_{\text{ном}} = 11/230$ кВ; $U_K = 11\%$;
- линия: $x_0 = 0,4$ Ом/км; $L = 300$ км;
- трансформатор Т2: $S_{\text{ном}} = 200$ МВА; $U_{\text{ном}} = 230/110$ кВ; $U_K = 11\%$;
- передаваемая мощность $P_c = 80$ МВт и $Q_c = 30$ Мвар.

Решение:

По условиям в системе электропередачи используется генератор с АРВ пропорционального типа, поэтому схема замещения системы имеет вид (рисунок 30):

Расчет будем проводить, используя приближенное приведение элементов схемы замещения в относительных единицах.

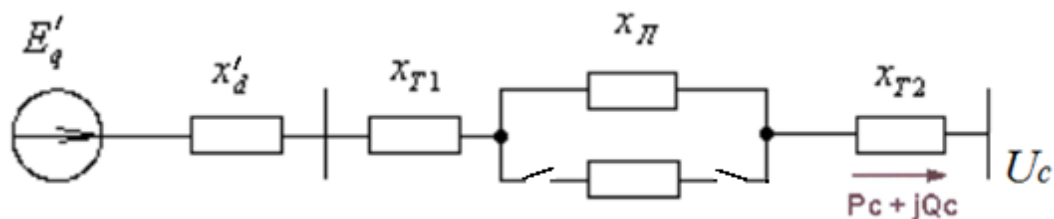


Рисунок 30. – Схема замещения энергосистемы

Напряжение U_c , принимают равным вторичному напряжению трансформатора Т2, но при приближенном приведении элементов надо брать ближайшее среднономинальное значение, тогда $U_c = 115$ кВ.

Принимаем базисные условия:

$$S_6 = P_c = 80 \text{ МВт}, \quad U_6 = U_c = 115 \text{ кВ.}$$

Напряжение системы в относительных единицах:

$$U_{c*} = 115/115 = 1.$$

Передаваемая активная мощность в относительных единицах равна

$$P_{c*} = P_c / S_6 = 80/80 = 1.$$

Передаваемая реактивная мощность в относительных единицах:

$$Q_{c*} = Q_c / S_6 = 30/80 = 0,375.$$

Сопротивление генератора в относительных единицах при АРВ пропорционального типа:

$$x_{Г*} = x'_d \cdot \frac{S_6}{S_{НОМ}} = x'_d \cdot \frac{S_6}{P_{НОМ} / \cos \varphi_{НОМ}} = 0,278 \cdot \frac{80}{100/0,8} = 0,178.$$

Сопротивление трансформатора Т1 в относительных единицах по формуле (2.8):

$$x_{T1*} = \frac{U_k \cdot S_6}{100 \cdot S_{НОМ}} = \frac{11 \cdot 80}{100 \cdot 160} = 0,055.$$

Сопротивление одной линии в относительных единицах по формуле (2.13) без учета активного сопротивления:

$$x_{Л*} = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{НОМ}^2} = 0,4 \cdot 300 \cdot \frac{80}{230^2} = 0,182.$$

Общее сопротивление двухцепной линии будет в 2 раза меньше.

Сопротивление трансформатора Т2 в относительных единицах:

$$x_{T2*} = \frac{U_k \cdot S_6}{100 \cdot S_{НОМ}} = \frac{11 \cdot 80}{100 \cdot 200} = 0,044.$$

Резльтирующее сопротивление системы с генератором без АРВ:

$$x_{\Sigma 1*} = x_{Г*} + x_{T1*} + \frac{x_{Л*}}{2} + x_{T2*} = 0,178 + 0,055 + \frac{0,182}{2} + 0,044 = 0,368.$$

Переходная ЭДС генератора по формуле (2.4):

$$E'_{q1*} = \sqrt{\left(U_{C*} + \frac{Q_{C*} \cdot X_{\Sigma 1*}}{U_{C*}} \right)^2 + \left(\frac{P_{C*} \cdot X_{\Sigma 1*}}{U_{C*}} \right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(1 + \frac{0,375 \cdot 0,368}{1} \right)^2 + \left(\frac{1 \cdot 0,368}{1} \right)^2} = 1,196.$$

Предел передаваемой мощности в энергосистему вычисляется по формуле (3.2):

$$P_{m1*} = \frac{E'_{q1*} \cdot U_{C*}}{X_{\Sigma 1*}} = \frac{1,196 \cdot 1}{0,368} = 3,25.$$

Активная мощность, выдаваемая в систему генератором (угловая характеристика) описывается функцией:

$$P_{1*}(\delta) = P_{m1*} \cdot \sin(\delta) = 3,25 \cdot \sin(\delta).$$

Коэффициент запаса статической устойчивости вычисляется по формуле (3.3):

$$k_{\Sigma 1} = \frac{P_{m1*} - P_{0*}}{P_{0*}} \cdot 100\% = \frac{3,25 - 1}{1} \cdot 100\% = 225\%.$$

Результирующее сопротивление системы при отключении одной цепи линии:

$$X_{\Sigma 2*} = X_{Г*} + X_{T1*} + X_{Л*} + X_{T2*} = 0,178 + 0,055 + 0,182 + 0,044 = 0,459.$$

Переходная ЭДС генератора при отключении одной цепи линии:

$$E'_{q2*} = \sqrt{\left(U_{C*} + \frac{Q_{C*} \cdot X_{\Sigma 2*}}{U_{C*}} \right)^2 + \left(\frac{P_{C*} \cdot X_{\Sigma 2*}}{U_{C*}} \right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(1 + \frac{0,375 \cdot 0,459}{1} \right)^2 + \left(\frac{1 \cdot 0,459}{1} \right)^2} = 1,259.$$

Предел передаваемой мощности при отключении одной цепи:

$$P_{m2*} = \frac{E'_{q2*} \cdot U_{C*}}{X_{\Sigma 2*}} = \frac{1,259 \cdot 1}{0,459} = 2,743.$$

Активная мощность, выдаваемая в систему генератором (угловая характеристика) описывается функцией:

$$P_{2*}(\delta) = P_{m2*} \cdot \sin(\delta) = 2,743 \cdot \sin(\delta).$$

Коэффициент запаса статической устойчивости при отключении одной цепи линии:

$$k_{\Sigma 2} = \frac{P_{m2*} - P_{0*}}{P_{0*}} \cdot 100\% = \frac{2,743 - 1}{1} \cdot 100\% = 174,3\%.$$

Сопоставляя результаты расчетов, можно сделать выводы, что отключение одной цепи линии приводит к увеличению как ЭДС генератора, так и результирующего сопротивления системы. В целом наблюдается уменьшение предела передаваемой мощности и коэффициента запаса статической устойчивости.

По результатам расчета построим две угловые характеристики и мощность, отдаваемую турбиной (рисунок 31).

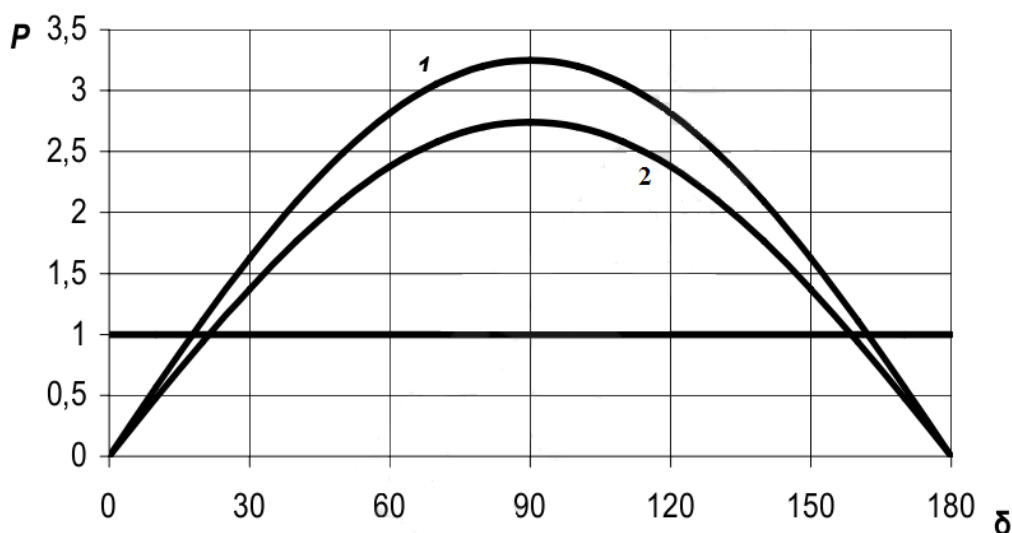


Рисунок 31. – Зависимость активной мощности от угла δ

Из рисунка видно, что при отключении одной цепи линии предел передаваемой мощности уменьшится на 15%. При таком соотношении значений сопротивления линии и результирующего сопротивления системы длительный режим работы генератора при передаче активной мощности через одну цепь линии не приведет к резкому ухудшению режима работы электропередачи.

Пример 3.1.3

Определим характеристики мощности одномашинной энергосистемы в нормальном режиме и при включении активной нагрузки (рисунок 32).

На генераторе установлен АРВ пропорционального типа. Считаем, что переходная ЭДС генератора не изменяется во время переходного процесса. Нагрузку в схеме замещения представим в виде активной мощности.

Исходные данные:

- генератор: $P_{\text{НОМ}} = 160$ МВт; $\cos\varphi_{\text{НОМ}} = 0,83$; $x'_d = 0,304$; $U_{\text{НОМ}} = 18$ кВ; $T_j = 5,42$ с;
- трансформатор Т1: $S_{\text{НОМ}} = 200$ МВА; $U_{\text{НОМ}} = 18/230$ кВ; $U_K = 11\%$;

- линия: $x_0 = 0,4 \text{ Ом/км}$; $L = 300 \text{ км}$;
- трансформатор Т2: $S_{\text{ном}} = 250 \text{ МВА}$; $U_{\text{ном}} = 230/110 \text{ кВ}$; $U_K = 10\%$;
- нагрузка $P_H = 18 \text{ кВт}$;
- передаваемая мощность $P_c = 120 \text{ МВт}$ и $Q_c = 48 \text{ Мвар}$.

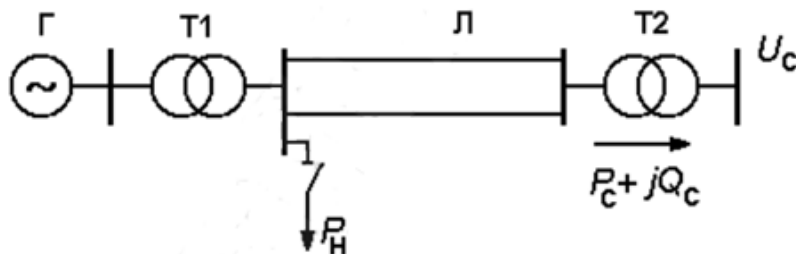


Рисунок 32. – Схема электропередачи к примеру 3

Решение:

Расчет будем проводить, используя приближенное приведение элементов схемы замещения в относительных единицах.

Схема замещения системы электропередачи при отключенной нагрузке P_H принимает вид (рисунок 33):

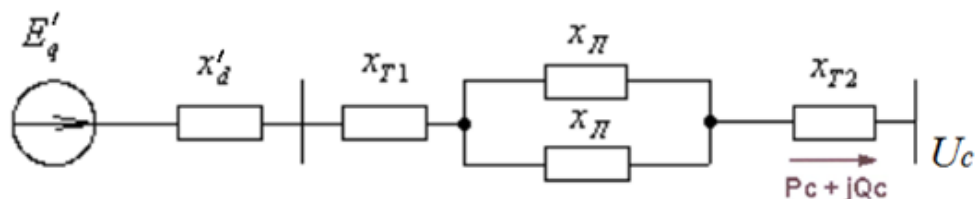


Рисунок 33. – Схема замещения системы электропередачи при отключенной нагрузке

Напряжение U_c принимают равным вторичному напряжению трансформатора Т2, но при приближенном приведении элементов надо брать ближайшее среднономинальное значение, тогда $U_c = 115 \text{ кВ}$.

Принимаем базисные условия:

$$S_6 = P_c = 120 \text{ МВт}, \quad U_6 = U_c = 115 \text{ кВ}.$$

Напряжение системы в относительных единицах равно

$$U_{c*} = 115/115 = 1.$$

Передаваемая активная мощность в относительных единицах:

$$P_{c*} = P_c / S_6 = 120/120 = 1.$$

Передаваемая реактивная мощность в относительных единицах:

$$Q_{c*} = Q_c / S_6 = 48/120 = 0,4.$$

Активная мощность нагрузки в относительных единицах равна

$$P_{H*} = P_H / S_6 = 18/120 = 0,15.$$

Сопротивление генератора в относительных единицах при APB пропорционального типа:

$$x_{Г*} = x'_d \cdot \frac{S_6}{S_{НОМ}} = x'_d \cdot \frac{S_6}{P_{НОМ} / \cos \varphi_{НОМ}} = 0,304 \cdot \frac{120}{160/0,83} = 0,189.$$

Сопротивление трансформатора Т1 в относительных единицах по формуле (2.8):

$$x_{Т1*} = \frac{U_k \cdot S_6}{100 \cdot S_{НОМ}} = \frac{11 \cdot 120}{100 \cdot 200} = 0,066.$$

Сопротивление одной линии в относительных единицах по формуле (2.13) без учета активного сопротивления определяется как

$$x_{Л*} = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{НОМ}^2} = 0,4 \cdot 300 \cdot \frac{120}{230^2} = 0,272.$$

Общее сопротивление двухцепной линии будет в 2 раза меньше.

Сопротивление трансформатора Т2 в относительных единицах равно:

$$x_{Т2*} = \frac{U_k \cdot S_6}{100 \cdot S_{НОМ}} = \frac{10 \cdot 120}{100 \cdot 250} = 0,048.$$

Результирующее сопротивление системы с APB пропорционального типа при отключенной нагрузке:

$$x_{\Sigma 1*} = x_{Г*} + x_{Т1*} + \frac{x_{Л*}}{2} + x_{Т2*} = 0,189 + 0,066 + \frac{0,272}{2} + 0,048 = 0,439.$$

Переходная ЭДС генератора при отключенной нагрузке:

$$\begin{aligned} E'_{q1*} &= \sqrt{\left(U_{C*} + \frac{Q_{C*} \cdot x_{\Sigma 1*}}{U_{C*}} \right)^2 + \left(\frac{P_{C*} \cdot x_{\Sigma 1*}}{U_{C*}} \right)^2} = \\ &= \sqrt{\left(1 + \frac{0,4 \cdot 0,439}{1} \right)^2 + \left(\frac{1 \cdot 0,439}{1} \right)^2} = 1,17. \end{aligned}$$

Предел передаваемой мощности в энергосистему при отключенной нагрузке вычисляется по формуле (3.2):

$$P_{m1*} = \frac{E'_{q1*} \cdot U_{C*}}{x_{\Sigma 1*}} = \frac{1,17 \cdot 1}{0,439} = 2,665.$$

Активная мощность, выдаваемая в систему генератором (угловая характеристика) при отключенной нагрузке описывается функцией:

$$P_{1*}(\delta) = P_{m1*} \cdot \sin(\delta) = 2,665 \cdot \sin(\delta).$$

Коэффициент запаса статической устойчивости при отключенной нагрузке:

$$k_{з1} = \frac{P_{m1*} - P_{0*}}{P_{0*}} \cdot 100\% = \frac{2,665 - 1}{1} \cdot 100\% = 166,5\%.$$

Схема замещения системы электропередачи с подключенной нагрузкой P_H принимает вид (рисунок 34):

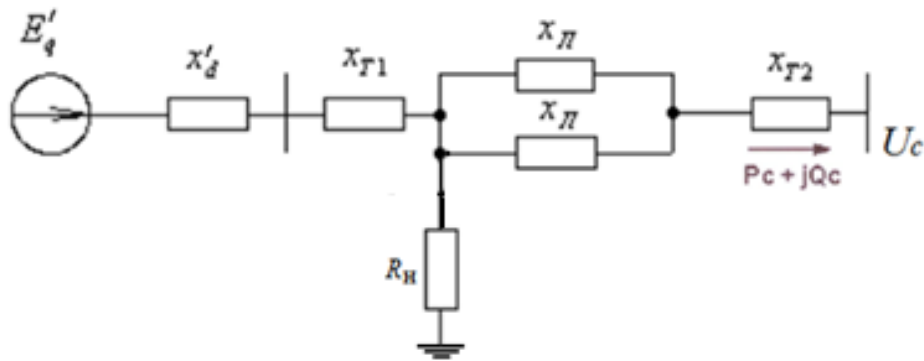


Рисунок 34. – Схема замещения системы электропередачи с подключенной нагрузкой

Для определения сопротивления нагрузки необходимо определить напряжение в начале линии в нормальном режиме.

$$U_{1*} = \sqrt{\left(U_{C*} + \frac{Q_{C*} \cdot \left(\frac{x_{л*}}{2} + x_{T2*} \right)}{U_{C*}} \right)^2 + \left(\frac{P_{C*} \cdot \left(\frac{x_{л*}}{2} + x_{T2*} \right)}{U_{C*}} \right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(1 + \frac{0,4 \cdot (0,136 + 0,048)}{1} \right)^2 + \left(\frac{1 \cdot (0,136 + 0,048)}{1} \right)^2} = 1,089.$$

Активное сопротивление нагрузки:

$$R_{H*} = \frac{U_{1*}^2}{P_{H*}} = \frac{1,089^2}{0,15} = 7,906.$$

Приводим схему замещения к Т-образному виду - рисунок 35.

В этой схеме:

$$Z_{1*} = x_{Г*} + x_{T1*} = j \cdot (0,189 + 0,066) = j \cdot 0,255;$$

$$Z_{2*} = \frac{x_{л*}}{2} + x_{T2*} = j \cdot \left(\frac{0,272}{2} + 0,048 \right) = j \cdot 0,184;$$

$$Z_{3*} = R_{H*} = 7,906.$$

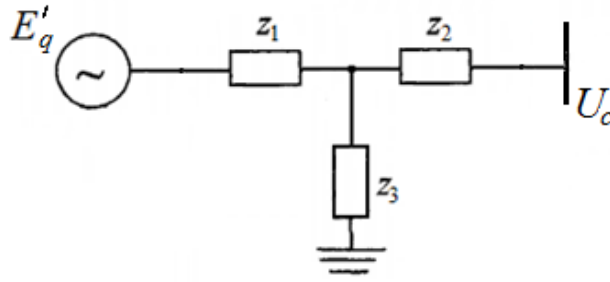


Рисунок 35. – Т-образная схема замещения системы электропередачи

Определяем собственное сопротивление схемы замещения для режима включенной нагрузки по формуле (2.30):

$$Z_{11*} = Z_{1*} + \frac{Z_{2*} \cdot Z_{3*}}{Z_{2*} + Z_{3*}} = j \cdot 0,255 + \frac{j \cdot 0,184 \cdot 7,906}{j \cdot 0,184 + 7,906} =$$

$$= 0,0043 + j \cdot 0,439 = 0,439 \cdot e^{j89,44^\circ}.$$

Определяем взаимное сопротивление схемы замещения для режима включенной нагрузки по формуле (2.32):

$$Z_{12*} = Z_{1*} + Z_{2*} + \frac{Z_{1*} \cdot Z_{2*}}{Z_{3*}} = j \cdot 0,255 + j \cdot 0,184 + \frac{j \cdot 0,255 \cdot j \cdot 0,184}{7,906} =$$

$$= -0,006 + j \cdot 0,439 = 0,439 \cdot e^{j90,78^\circ}.$$

Характеристика мощности генератора для режима включенной нагрузки определяется уравнением:

$$P_{2*}(\delta) = (E'_q)^2 \cdot \frac{1}{|Z_{11*}|} \cdot \sin \alpha_{11} + (E'_q) \cdot \frac{U_{c*}}{|Z_{12*}|} \cdot \sin(\delta - \alpha_{12}) = 1,17^2 \cdot \frac{1}{0,439} \cdot \sin 0,56^\circ +$$

$$+ 1,17 \cdot \frac{1}{0,439} \cdot \sin(\delta + 0,78^\circ) = 0,0305 + 2,665 \cdot \sin(\delta + 0,78^\circ).$$

Предел передаваемой мощности при включенной нагрузке:

$$P_{m2*} = 0,0305 + 2,665 = 2,97.$$

Коэффициент запаса статической устойчивости при отключении одной цепи линии:

$$k_{32} = \frac{2,97 - 1}{1} \cdot 100\% = 197\%.$$

По анализу характеристик мощности генератора в двух режимах $P_{1*}(\delta)$ и $P_{2*}(\delta)$ видно, что включение активных сопротивлений в схему замещения смещает характеристику мощности генератора вверх и влево.

Пример 3.1.4

Дана уже составленная схема замещения одномашинной энергосистемы передачи электроэнергии в общую энергосистему (рисунок 36), числовые параметры элементов которой определены в относительных единицах.

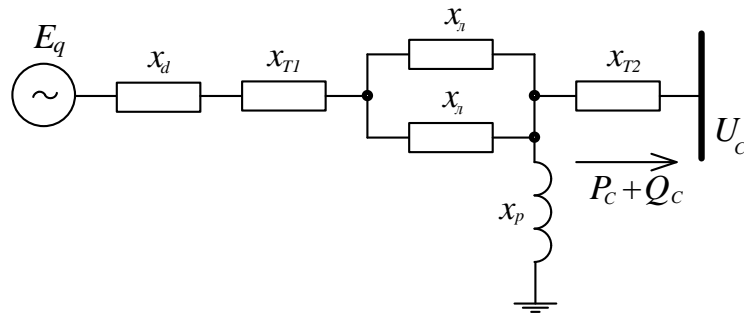


Рисунок 36. – Схема замещения одномашинной энергосистемы с шунтирующим реактором в конце линии

По виду схемы замещения требуется определить тип АРВ генератора. Вычислить предел передаваемой мощности и коэффициент запаса статической устойчивости.

Исходные данные:

$E_q = 1,391$; $x_d = 1,112$; $x_{T1} = 0,055$; $x_{T2} = 0,182$; $x_{T2} = 0,04$; $x_p = 1,64$; $U_c = 1$; $P_0 = P_c = 1$.

Решение:

Генератор на схеме замещения представлен элементами E_q и x_d , что соответствует математической модели генератора $E_q = \text{const}$, $x_r = x_d$ без АРВ.

Для нахождения предела передаваемой мощности генератором в систему необходимо найти взаимное сопротивление схемы замещения между генератором и приемными шинами общей системы. С этой целью исходную схему замещения одномашинной энергосистемы приведем к Т-образному виду (рисунок 37).

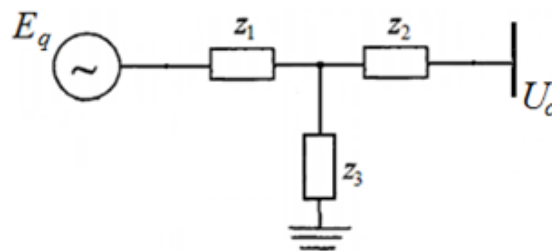


Рисунок 37. – Т-образная схема замещения энергосистемы

В этой схеме:

$$Z_{1*} = x_{r*} + x_{T1*} + \frac{x_{л*}}{2} = j \cdot \left(1,112 + 0,055 + \frac{0,182}{2} \right) = j \cdot 1,258;$$

$$Z_{2*} = x_{T2*} = j \cdot 0,04;$$

$$Z_{3*} = x_{p*} = j \cdot 1,64.$$

Определяем взаимное сопротивление схемы замещения по формуле (2.32):

$$Z_{12*} = Z_{1*} + Z_{2*} + \frac{Z_{1*} \cdot Z_{2*}}{Z_{3*}} = j \cdot 1,258 + j \cdot 0,04 + \frac{j \cdot 1,258 \cdot j \cdot 0,04}{j \cdot 1,64} = j \cdot 1,329.$$

Предел передаваемой мощности генератора определим по формуле (3.2):

$$P_{m*} = \frac{E_{q*} \cdot U_{c*}}{|Z_{12*}|} = \frac{1,391 \cdot 1}{1,329} = 1,046, \text{ o.e.}$$

Коэффициент запаса статической устойчивости определяем по формуле (3.3):

$$k_3 = \frac{P_{m*} - P_0}{P_0} \cdot 100\% = \frac{1,046 - 1}{1} \cdot 100\% = 4,6\%.$$

Система устойчива с недопустимо малым запасом устойчивости. Достаточным запасом статической устойчивости считается коэффициент запаса 20 и более процентов.

Пример 3.1.5

Дана уже составленная схема замещения одномашинной энергосистемы передачи электроэнергии в общую энергосистему (рисунок 38), числовые параметры элементов которой уже определены в относительных единицах.

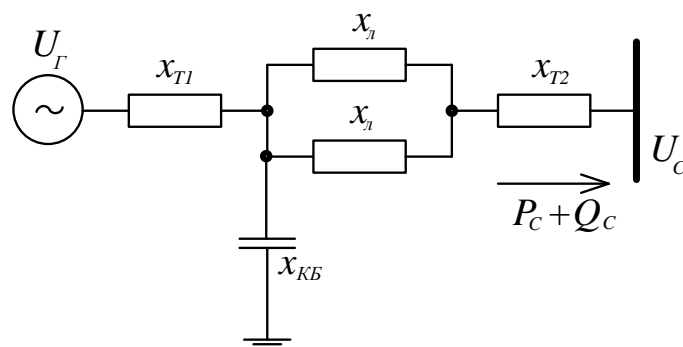


Рисунок 38. – Схема замещения одномашинной энергосистемы с конденсаторной батареей в начале линии

По виду схемы замещения требуется определить тип АРВ генератора. Вычислить предел передаваемой мощности и коэффициент запаса статической устойчивости.

Исходные данные:

$$U_G = 1,084; x_{T1} = 0,055; x_L = 0,182; x_{T2} = 0,044; U_C = 1; P_0 = P_C = 1; x_{KB} = 0,46.$$

Решение:

Генератор на схеме замещения представлен элементом U_G , что соответствует математической модели генератора $U_G = \text{const}$, $x_G = 0$ с АРВ сильного действия.

Для нахождения предела передаваемой мощности генератором в систему необходимо найти взаимное сопротивление схемы замещения между генератором и приемными шинами общей системы. С этой целью исходную схему замещения одномашинной энергосистемы приведем к Т-образному виду (рисунок 39).

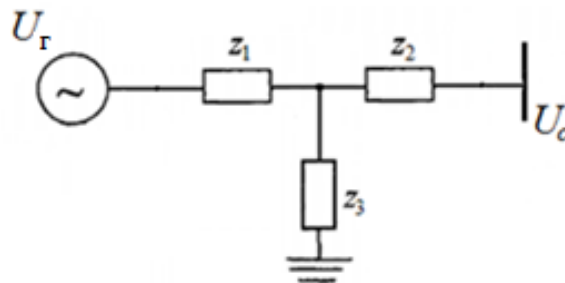


Рисунок 39. – Т-образная схема замещения энергосистемы

В этой схеме:

$$Z_{1*} = x_{T1*} = j \cdot 0,055;$$

$$Z_{2*} = \frac{x_{L*}}{2} + x_{T2*} = j \cdot \frac{0,182}{2} + j \cdot 0,044 = j \cdot 0,135;$$

$$Z_{3*} = x_{KB*} = -j \cdot 0,46.$$

Определяем взаимное сопротивление схемы замещения по формуле (2.32):

$$Z_{12*} = Z_{1*} + Z_{2*} + \frac{Z_{1*} \cdot Z_{2*}}{Z_{3*}} = j \cdot 0,055 + j \cdot 0,135 + \frac{j \cdot 0,055 \cdot j \cdot 0,135}{-j \cdot 0,46} = j \cdot 0,174.$$

Предел передаваемой мощности генератора определим по формуле (3.2):

$$P_{m*} = \frac{U_{G*} \cdot U_{C*}}{|Z_{12*}|} = \frac{1,084 \cdot 1}{0,174} = 6,23, \text{о.е.}$$

Коэффициент запаса статической устойчивости определяем по формуле (3.3):

$$k_3 = \frac{P_{m*} - P_0}{P_0} \cdot 100\% = \frac{6,23 - 1}{1} \cdot 100\% = 523\%.$$

Система устойчива с достаточно большим запасом устойчивости.

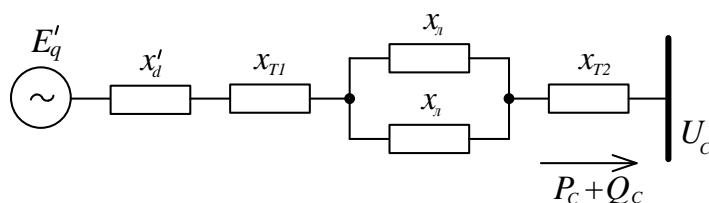
3.2. Задачи для самостоятельного решения

Задача 3.2.1

Дана схема замещения одномашинной электроэнергетической системы, параметры которой заданы в относительных единицах:

$$E'_q = 1,185; x'_d = 0,162; x_{T1} = 0,055; x_l = 0,182; x_{T2} = 0,044; U_C = 1; P_0 = P_C = 1.$$

По виду схемы замещения определить тип АРВ генератора. Вычислить предел передаваемой мощности и коэффициент запаса статической устойчивости.

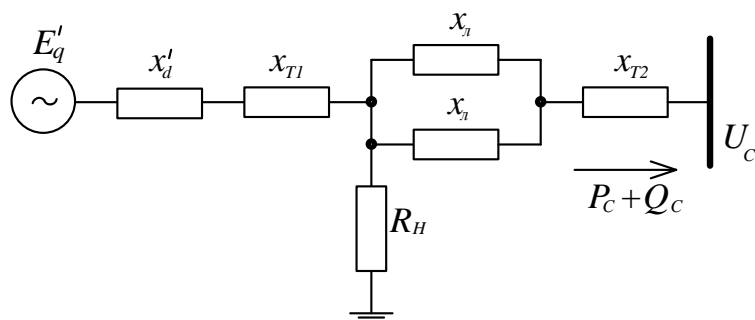


Задача 3.2.2

Дана схема замещения одномашинной электроэнергетической системы, параметры которой заданы в относительных единицах:

$$E'_q = 1,196; x'_d = 0,178; x_{T1} = 0,055; x_l = 0,182; x_{T2} = 0,044; U_C = 1; P_0 = P_C = 1; R_H = 2,61.$$

По виду схемы замещения определить тип АРВ генератора. Вычислить предел передаваемой мощности и коэффициент запаса статической устойчивости.

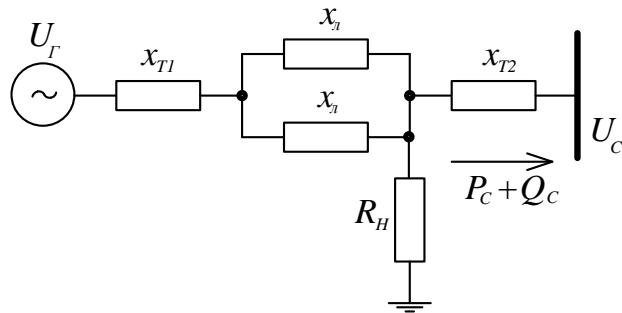


Задача 3.2.3

Дана схема замещения одномашинной электроэнергетической системы, параметры которой заданы в относительных единицах:

$$U_T = 1,084; x_{T1} = 0,055; x_l = 0,182; x_{T2} = 0,044; U_C = 1; P_0 = P_C = 1; R_H = 2,61.$$

По виду схемы замещения определить тип АРВ генератора. Вычислить предел передаваемой мощности и коэффициент запаса статической устойчивости.

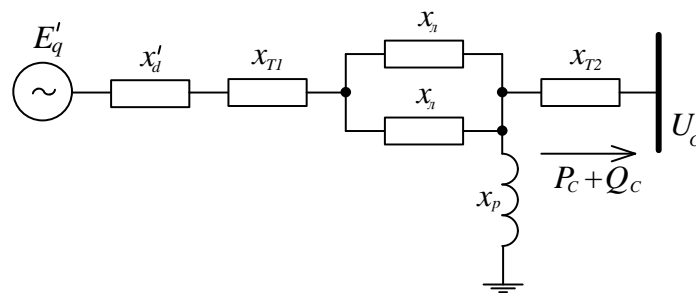


Задача 3.2.4

Дана схема замещения одномашинной электроэнергетической системы, параметры которой заданы в относительных единицах:

$E'_q = 1,196$; $x'_d = 0,178$; $x_{T1} = 0,055$; $x_l = 0,182$; $x_{T2} = 0,044$; $U_c = 1$; $P_0 = P_c = 1$; $x_p = 1,64$.

По виду схемы замещения определить тип АРВ генератора. Вычислить предел передаваемой мощности и коэффициент запаса статической устойчивости.

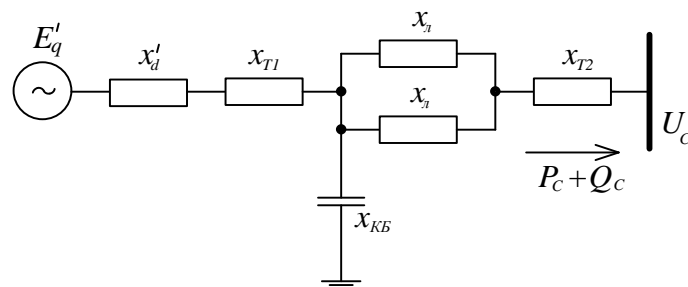


Задача 3.2.5

Дана схема замещения одномашинной электроэнергетической системы, параметры которой заданы в относительных единицах:

$E'_q = 1,196$; $x'_d = 0,178$; $x_{T1} = 0,055$; $x_l = 0,182$; $x_{T2} = 0,044$; $U_c = 1$; $P_0 = P_c = 1$; $x_{KB} = 1,16$.

По виду схемы замещения определить тип АРВ генератора. Вычислить предел передаваемой мощности и коэффициент запаса статической устойчивости.



4. ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ПРОСТЕЙШИХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Суть понятия динамической устойчивости энергосистем – это анализ поведения энергосистемы при конечных, т.е. больших, возмущениях. Наиболее часто такими возмущениями являются короткие замыкания (КЗ), которые за короткое время отключаются релейной защитой. При этом энергосистема переходит от исходного нормального режима работы до возникновения КЗ в аварийный режим при возникновении КЗ и затем в послеаварийный режим после отключения КЗ релейной защитой.

Основными задачами анализа динамической устойчивости простейших энергосистем являются:

- определение возможности обеспечения динамической устойчивости энергосистемы, для этого коэффициент запаса динамической устойчивости должен быть $k_{\Delta y} \geq 1$;
- определение предельно допустимых угла отключения КЗ ($\delta_{\text{откл}}^{\text{пр}}$) и времени отключения КЗ ($t_{\text{откл}}^{\text{пр}}$).

Для решения указанных задач требуется построить динамические угловые характеристики энергосистемы для трех режимов работы:

- исходного;
- аварийного – при КЗ;
- послеаварийного – при отключении КЗ.

Упрощенные расчеты динамической устойчивости электрических энергосистем выполняются при представлении синхронных генераторов упрощенными математическими моделями, которые были рассмотрены ранее.

Порядок расчетов будем рассматривать на примере простейшей энергосистемы, приведенной на рисунке 40.

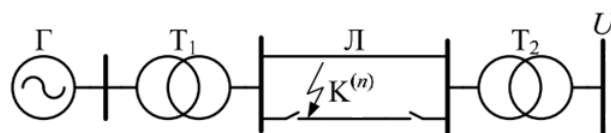


Рисунок 40. – Схема простейшей энергосистемы

Для исходного нормального режима работы, до возникновения КЗ схема замещения данной системы имеет вид, представленный на рисунке 41.



Рисунок 41. – Схема замещения энергосистемы в нормальном режиме

По схеме замещения нормального режима (см. рисунок 41) определяется взаимное сопротивление x_{Σ} между точкой приложения ЭДС E' и шинами бесконечной мощности U :

$$x_{\Sigma} = x_r + x_{T1} + x_{Л}/2 + x_{T2}. \quad (4.1)$$

Тогда выражение для электромагнитной мощности генератора записывается в виде:

$$P_I = \frac{E' \cdot U}{x_{\Sigma}} \cdot \sin(\delta) = P'_m \cdot \sin(\delta), \quad (4.2)$$

где $P'_m = E' \cdot U / x_{\Sigma}$ – амплитуда характеристики мощности исходного нормального режима.

Выражение (4.2) и является динамической угловой характеристикой нормального режима работы, она совпадает со статической угловой характеристикой этого же режима работы.

Схема замещения системы в аварийном режиме отличается от схемы в нормальном режиме тем, что в месте КЗ дополнительно подключается сопротивление аварийного шунта $x_{ш}$ в точке возникновения КЗ (рисунок 42).

Величина $x_{ш}$ в значительной степени зависит от вида КЗ (таблица 4.1).

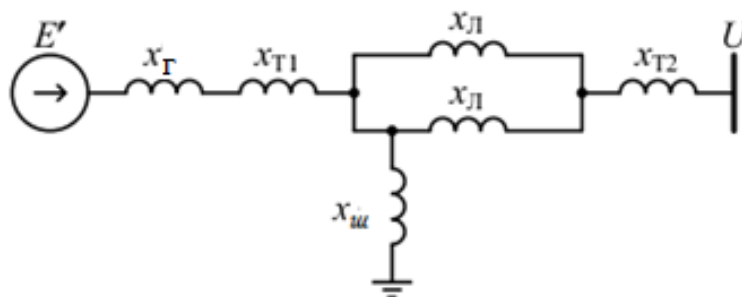
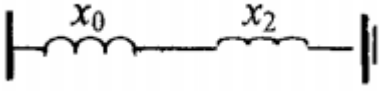
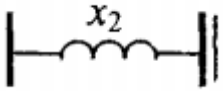
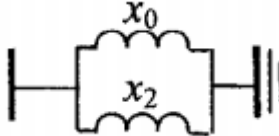

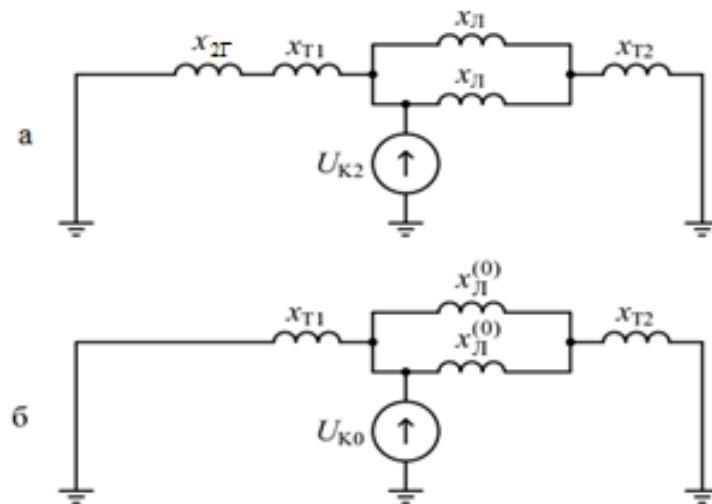


Рисунок 42. – Схема замещения энергосистемы в аварийном режиме

Таблица 4.1. – Зависимость сопротивления шунта от вида КЗ

Вид КЗ	Схема шунта	Сопротивление шунта
Однофазное		$X_w = X_0 + X_2$
Двухфазное		$X_w = X_2$
Двухфазное на землю		$X_w = \frac{X_0 \cdot X_2}{X_0 + X_2}$
Трёхфазное		$X_w = 0$

Для нахождения сопротивления нулевой последовательности x_0 и сопротивления обратной последовательности x_2 последовательно составляются соответствующие схемы замещения энергосистемы (рисунок 43).



а – обратной последовательности; б – нулевой последовательности

Рисунок 43. – Схемы замещения для расчета шунта

Сопrotивление обратной последовательности x_{2r} приводится в технических данных на генератор.

Сопrotивление обратной последовательности x_2 находят из схемы замещения (см. рисунок 43, а) как эквивалентное сопротивление схемы относительно источника U_{k2} :

$$x_2 = \frac{(x_{2r} + x_{T1}) \cdot \left(\frac{x_n}{2} + x_{T2} \right)}{x_{2r} + x_{T1} + \frac{x_n}{2} + x_{T2}}. \quad (4.3)$$

Сопrotивление нулевой последовательности x_0 находят из схемы замещения (см. рисунок 43, б) как эквивалентное сопротивление схемы относительно источника U_{k0} :

$$x_0 = \frac{x_{T1} \cdot \left(\frac{x_n^{(0)}}{2} + x_{T2} \right)}{x_{T1} + \frac{x_n^{(0)}}{2} + x_{T2}}, \quad (4.4)$$

где $x_n^{(0)}$ – сопротивление нулевой последовательности линий электропередачи. В учебных расчетах его принимают $x_n^{(0)} = 4,0 x_n$.

Результирующее сопротивление системы в аварийном режиме можно найти в соответствии с выражением

$$x_{//\Sigma} = X_{AB} = x_a + x_b + \frac{x_a \cdot x_b}{x_{\text{ш}}}, \quad (4.5)$$

где x_a – суммарное сопротивление элементов системы от ЭДС E' до точки КЗ;
 x_b – суммарное сопротивление элементов системы от точки КЗ до шин приемной системы (вектор U).

Так, для нашего случая КЗ в начале линии электропередачи:

$$x_a = x_r + x_{T1}; \quad x_b = \frac{x_n}{2} + x_{T2}.$$

Активная мощность в аварийном режиме находится по формуле

$$P_{\text{II}} = \frac{E' \cdot U}{X_{AB}} \cdot \sin(\delta) = P_{\text{M}}^{\text{II}} \cdot \sin(\delta), \quad (4.6)$$

где $P_{\text{M}}^{\text{II}} = E' \cdot U / X_{AB}$ – амплитуда характеристики мощности в аварийном режиме при КЗ.

Выражение (4.6) и является динамической угловой характеристикой аварийного режима работы энергосистемы.

Схема замещения системы в послеаварийном режиме отличается от схемы замещения нормального режима тем, что релейной защитой отключена линия Л2, на которой произошло КЗ (рисунок 44).

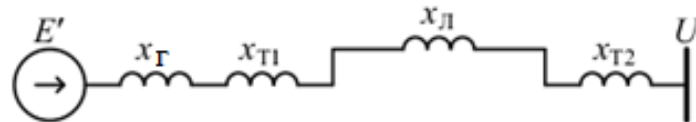


Рисунок 44. – Схема замещения энергосистемы в послеаварийном режиме

По этой схеме замещения определяется взаимное сопротивление $x_{III\Sigma}$ между точкой приложения ЭДС E' и шинами бесконечной мощности U :

$$x_{III\Sigma} = x_{Г} + x_{T1} + x_{L} + x_{T2}. \quad (4.7)$$

Тогда выражение для электромагнитной мощности генератора записывается в виде:

$$P_{III} = \frac{E' \cdot U}{x_{III\Sigma}} \cdot \sin(\delta) = P_m''' \cdot \sin(\delta), \quad (4.8)$$

где $P_m''' = E' \cdot U / x_{III\Sigma}$ – амплитуда характеристики мощности послеаварийного режима.

Выражение (4.8) и является динамической угловой характеристикой послеаварийного режима работы энергосистемы.

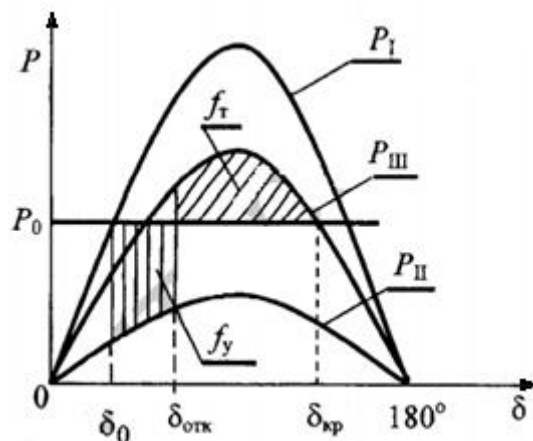
Подставляя вычисленные значения амплитуд мощности в рассмотренных режимах в формулы (4.2), (4.6), (4.8) и изменяя угол δ от 0° до 180° , можно построить динамические угловые характеристики системы (рисунок 45).

Из сравнения площади ускорения f_y и максимально возможной площади торможения f_T (см. рисунок 45) делаем вывод о возможности обеспечить динамическую устойчивость энергосистемы.

Коэффициент запаса динамической устойчивости энергосистемы вычисляется по формуле

$$k_{дв} = \frac{f_T}{f_y} \geq 1. \quad (4.9)$$

Если $k_{\text{ду}}$ больше или равен 1, то энергосистема будет динамически устойчива. Если неравенство (4.9) не выполняется, то невозможно обеспечить устойчивую работу энергосистемы.



P_I – исходный; P_{II} – аварийный; P_{III} – послеаварийный;
 P_0 – мощность приводной турбины

Рисунок 45. – Динамические характеристики системы в различных режимах

Из условия равенства площадей ускорения f_y и возможного торможения f_T (см. рисунок 45) найдем предельный угол отключения КЗ.

$$\cos(\delta_{\text{откл}}^{\text{пр}}) = \frac{(\pi/180) \cdot P_0 \cdot (\delta_{\text{кр}} - \delta_0) - P_M^{\text{II}} \cdot \cos(\delta_0) + P_M^{\text{III}} \cdot \cos(\delta_{\text{кр}})}{P_M^{\text{III}} - P_M^{\text{II}}}. \quad (4.10)$$

В этом выражении углы измеряются в градусах.

Критический угол (см. рисунок 45) рассчитывается по формуле

$$\delta_{\text{кр}} = 180 - \arcsin \frac{P_0}{P_M^{\text{III}}}. \quad (4.11)$$

Для изображения площадок ускорения и торможения следует выполнять штриховку от механической мощности P_0 до характеристик электрической мощности соответствующего режима при изменении угла δ .

Для обеспечения динамической устойчивости системы средствами автоматики и защиты в большинстве случаев необходимо знать предельное время отключения КЗ ($t_{\text{откл}}^{\text{пр}}$). Чтобы найти $t_{\text{откл}}^{\text{пр}}$, нужно построить зависимости $\delta = f(t)$. Последнюю можно вычислить из уравнения движения ротора синхронного генератора:

$$T_j \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_0 - P, \quad (4.12)$$

где P – электромагнитная мощность, которая отдается генератором в сеть.

Решим это уравнение методом последовательных интервалов (численное интегрирование). Для этого необходимо выбрать длительность расчетного интервала Δt (для ручных вычислений рекомендуется принять $\Delta t = 0,05$ с, для машинных – $\Delta t = 0,01-0,02$ с).

Первый интервал (0–0,05 с)

Электрическая мощность, которая выдается генераторами в первый момент после возникновения КЗ:

$$P_{(1)} = P_M^{\text{II}} \cdot \sin(\delta_0).$$

Избыток мощности в начале первого интервала:

$$\Delta P_{(1)} = P_0 - P_{(1)}.$$

Приращение угла за первый интервал:

$$\Delta\delta_{(1)} = 0,5 \cdot K \cdot \Delta P_{(1)},$$

$$K = \frac{360 \cdot f \cdot \Delta t^2}{T_j},$$

где K – постоянный коэффициент; f – частота.

Угол в конце первого интервала:

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

Второй интервал (0,05–0,1 с)

$$P_{(2)} = P_M^{\text{II}} \cdot \sin(\delta_{(1)});$$

$$\Delta P_{(2)} = P_0 - P_{(2)};$$

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

$$\delta_{(2)} = \delta_{(1)} + \Delta\delta_{(2)}.$$

Третий и последующие интервалы (например, n -й)

Расчет третьего и последующих интервалов (например, n -го) выполняется аналогично по формулам:

$$P_{(n)} = P_M^{\text{II}} \cdot \sin(\delta_{(n-1)});$$

$$\Delta P_{(n)} = P_0 - P_{(n)};$$

$$\Delta\delta_{(n)} = \Delta\delta_{(n-1)} + K \cdot \Delta P_{(n)};$$

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

По результатам расчетов строится кривая $\delta = f(t)$ (рисунок 46). Зная значения $\delta_{отк}^{пр}$, на данной кривой находим $t_{отк}^{пр}$ (рисунок 46). Если $t_{отк}^{пр} > t_{отк}$, то динамическая устойчивость системы обеспечивается, в противном случае необходимо принимать дополнительные меры для сохранения устойчивости при данном КЗ.

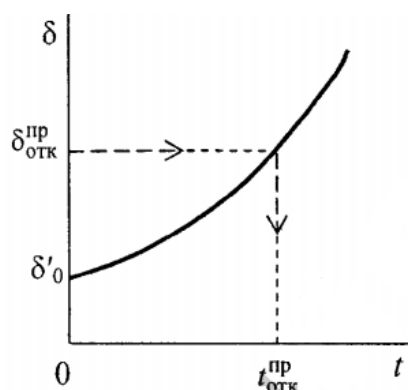


Рисунок 46. – Определение максимально допустимого времени отключения короткого замыкания

4.1. Примеры анализа динамической устойчивости простейшей энергосистемы

Пример 4.1.1

В электроэнергетической системе (см. рисунок 40) на линии Л2 вблизи электростанции возникает двухфазное КЗ на землю. Релейной защитой данная линия отключается.

Требуется:

1. Определить параметры схем замещения системы в нормальном, аварийном и послеаварийном режимах.
2. Рассчитать и построить динамические характеристики мощности системы в нормальном, аварийном и послеаварийном режимах.
3. Вычислить коэффициент запаса динамической устойчивости энергосистемы.
4. В случае возможности обеспечить динамическую устойчивость рассчитать максимально допустимые угол и время отключения КЗ.

Исходные данные:

- генератор: $P_{ном} = 160$ МВт; $\cos \varphi_{ном} = 0,83$; $x'_d = 0,304$; $U_{ном} = 18$ кВ; $x_{2г} = 0,209$; $T_j = 5,42$ с; генератор с АРВ пропорционального действия.
- трансформатор Т1: $S_{ном} = 200$ МВА; $U_{ном} = 18/230$ кВ; $U_K = 11\%$;
- линия: $x_0 = 0,4$ Ом/км; $L = 300$ км;

- трансформатор Т2: $S_{\text{НОМ}} = 250 \text{ МВА}$; $U_{\text{НОМ}} = 230/110 \text{ кВ}$; $U_K = 10\%$;
- передаваемая мощность $P_c = 120 \text{ МВт}$ и $Q_c = 48 \text{ Мвар}$.

Решение:

Расчет будем проводить, используя приближенное приведение элементов схемы замещения в относительных единицах.

Напряжение U_c , принимают равным вторичному напряжению трансформатора Т2, но при приближенном приведении элементов надо брать ближайшее средненоминальное значение, тогда $U_c = 115 \text{ кВ}$.

Принимаем базисные условия:

$$S_6 = P_c = 120 \text{ МВт}, \quad U_6 = U_c = 115 \text{ кВ}.$$

Напряжение системы в относительных единицах равно:

$$U_{c*} = 115/115 = 1.$$

Передаваемая активная мощность в относительных единицах:

$$P_{c*} = P_c / S_6 = 120/120 = 1.$$

Передаваемая реактивная мощность в относительных единицах:

$$Q_{c*} = Q_c / S_6 = 48/120 = 0,4.$$

Схема замещения энергосистемы в **нормальном режиме** соответствует рисунку 41.

Значения параметров схемы замещения получим в виде:

$$x_{Г*} = x'_d \cdot \frac{S_6}{S_{\text{НОМ}}} = x'_d \cdot \frac{S_6}{P_{\text{НОМ}} / \cos \varphi_{\text{НОМ}}} = 0,304 \cdot \frac{120}{160/0,83} = 0,189. \quad (\text{по (2.1)})$$

$$x_{T1*} = \frac{U_k \cdot S_6}{100 \cdot S_{\text{НОМ}}} = \frac{11 \cdot 120}{100 \cdot 200} = 0,066. \quad (\text{по (2.8)})$$

$$x_{T2*} = \frac{U_k \cdot S_6}{100 \cdot S_{\text{НОМ}}} = \frac{10 \cdot 120}{100 \cdot 250} = 0,048. \quad (\text{по (2.8)})$$

$$x_{л*} = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{\text{НОМ}}^2} = 0,4 \cdot 300 \cdot \frac{120}{230^2} = 0,272. \quad (\text{по (2.13)})$$

Результирующее сопротивление системы в нормальном режиме:

$$x_{\Sigma 1*} = x_{Г*} + x_{T1*} + \frac{x_{л*}}{2} + x_{T2*} = 0,189 + 0,066 + \frac{0,272}{2} + 0,048 = 0,439.$$

Переходная ЭДС генератора:

$$\begin{aligned} E'_{q1*} &= \sqrt{\left(U_{c*} + \frac{Q_{c*} \cdot x_{\Sigma 1*}}{U_{c*}} \right)^2 + \left(\frac{P_{c*} \cdot x_{\Sigma 1*}}{U_{c*}} \right)^2} = \\ &= \sqrt{\left(1 + \frac{0,4 \cdot 0,439}{1} \right)^2 + \left(\frac{1 \cdot 0,439}{1} \right)^2} = 1,17. \end{aligned}$$

Предел передаваемой мощности в энергосистему в нормальном режиме вычисляется по формуле (3.2):

$$P_{m1*} = \frac{E_{q1*} \cdot U_{c*}}{x_{\Sigma 1*}} = \frac{1,17 \cdot 1}{0,439} = 2,665.$$

Активная мощность, выдаваемая в систему генератором (угловая характеристика), в нормальном режиме описывается функцией:

$$P_{1*}(\delta) = P_{m1*} \cdot \sin(\delta) = 2,665 \cdot \sin(\delta).$$

Схема замещения энергосистемы в **аварийном режиме** соответствует рисунку 42. К определенным выше параметрам схемы замещения добавится сопротивление шунта в точке КЗ.

Для нахождения сопротивления шунта необходимо составить схемы замещения системы для токов обратной и нулевой последовательности (см. рисунок 43). В схему замещения системы для токов обратной последовательности (см. рисунок 43, а) вместо сопротивления $x_{Г*}$ нужно вставить сопротивление обратной последовательности генератора $x_{2Г*}$ в относительных единицах:

$$x_{2Г*} = x_{2Г} \cdot \frac{S_6}{S_{НОМ}} = x_{2Г} \cdot \frac{S_6}{P_{НОМ} / \cos \varphi_{НОМ}} = 0,209 \cdot \frac{120}{160/0,83} = 0,13. \quad (\text{по (2.1)})$$

Эквивалентное сопротивление схемы обратной последовательности в относительных единицах (формула 4.3):

$$x_{2*} = \frac{(x_{2Г*} + x_{Т1*}) \cdot \left(\frac{x_{Л*}}{2} + x_{Т2*} \right)}{x_{2Г*} + x_{Т1*} + \frac{x_{Л*}}{2} + x_{Т2*}} = \frac{(0,13 + 0,066) \cdot \left(\frac{0,272}{2} + 0,048 \right)}{0,13 + 0,066 + \frac{0,272}{2} + 0,048} = 0,095.$$

В схему замещения системы для токов нулевой последовательности (см. рисунок 43, б) вместо сопротивления $x_{Л*}$ нужно вставить сопротивление нулевой последовательности линии $x_{Л*}^{(0)} = 4 \cdot x_{Л*}$ в относительных единицах (по (4.4)):

$$x_{0*} = \frac{x_{Т1*} \cdot \left(\frac{x_{Л*}^{(0)}}{2} + x_{Т2*} \right)}{x_{Т1*} + \frac{x_{Л*}^{(0)}}{2} + x_{Т2*}} = \frac{0,066 \cdot \left(4 \cdot \frac{0,272}{2} + 0,048 \right)}{0,066 + 4 \cdot \frac{0,272}{2} + 0,048} = 0,0594.$$

Сопротивление шунта при двухфазном КЗ на землю:

$$x_{ш*} = \frac{x_{0*} \cdot x_{2*}}{x_{0*} + x_{2*}} = \frac{0,0594 \cdot 0,095}{0,0594 + 0,095} = 0,0365.$$

Результирующее сопротивление системы в аварийном режиме находим по формуле (4.5) как взаимное сопротивление:

$$\begin{aligned}
 x_{\Sigma 2} = X_{AB} &= (x_{Г*} + x_{Т1*}) + \left(x_{Л*} / 2 + x_{Т2*} \right) + \frac{(x_{Г*} + x_{Т1*}) \cdot \left(x_{Л*} / 2 + x_{Т2*} \right)}{x_{ш*}} = \\
 &= (0,189 + 0,066) + \left(0,272 / 2 + 0,048 \right) + \frac{(0,189 + 0,066) \cdot \left(0,272 / 2 + 0,048 \right)}{0,0365} = \\
 &= 1,724.
 \end{aligned}$$

Предел передаваемой мощности в энергосистему в аварийном режиме вычисляется по формуле (3.2):

$$P_{m2*} = \frac{E_{q1*} \cdot U_{c*}}{x_{\Sigma 2*}} = \frac{1,17 \cdot 1}{1,724} = 0,678.$$

Активная мощность, выдаваемая в систему генератором (угловая характеристика) в аварийном режиме описывается функцией:

$$P_{2*}(\delta) = P_{m2*} \cdot \sin(\delta) = 0,678 \cdot \sin(\delta).$$

Схема замещения энергосистемы в **послеаварийном режиме** соответствует рисунку 44. Она отличается от схемы нормального режима тем, что линия, на которой произошло КЗ, отключена. Все сопротивления элементов схемы уже определены.

Результирующее сопротивление системы в послеаварийном режиме:

$$x_{\Sigma 3*} = x_{Г*} + x_{Т1*} + x_{Л*} + x_{Т2*} = 0,189 + 0,066 + 0,272 + 0,048 = 0,575.$$

Предел передаваемой мощности в энергосистему в послеаварийном режиме вычисляется по формуле (3.2):

$$P_{m3*} = \frac{E_{q1*} \cdot U_{c*}}{x_{\Sigma 3*}} = \frac{1,17 \cdot 1}{0,575} = 2,035.$$

Активная мощность, выдаваемая в систему генератором (угловая характеристика) в послеаварийном режиме описывается функцией:

$$P_{3*}(\delta) = P_{m3*} \cdot \sin(\delta) = 2,035 \cdot \sin(\delta).$$

Далее по полученным выражениям для угловых характеристик, изменяя угол δ от 0 до 180°, построим в одной системе координат динамические характеристики мощности системы для трех рассматриваемых режимов (рисунок 47).

Определяем угол δ_0 из условия:

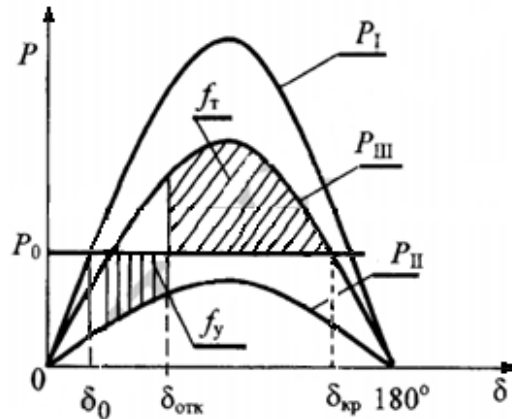
$$P_{0*} = P_{m1*} \cdot \sin(\delta_0).$$

Тогда

$$\delta_0 = \arcsin \frac{P_{0*}}{P_{m1*}} = \arcsin \frac{1}{2,665} = 22,04^\circ.$$

Критический угол $\delta_{кр}$:

$$\delta_{кр} = 180 - \arcsin \frac{P_{0*}}{P_{м3*}} = 180 - \arcsin \frac{1}{2,035} = 150,56^\circ. \quad (\text{по (4.11)})$$



P_1 – исходный; P_2 – аварийный; P_3 – послеаварийный;
 P_0 – мощность приводной турбины

Рисунок 47. – Динамические характеристики системы
 в различных режимах

Находим предельный угол отключения КЗ:

$$\begin{aligned} \delta_{откл}^{пр} &= \arccos \left\{ \frac{(\pi/180) \cdot P_{0*} \cdot (\delta_{кр} - \delta_0) - P_{м2*} \cdot \cos(\delta_0) + P_{м3*} \cdot \cos(\delta_{кр})}{P_{м3*} - P_{м2*}} \right\} = \\ &= \arccos \left\{ \frac{(3,14/180) \cdot 1 \cdot (150,56 - 22,04) - 0,678 \cdot \cos(22,04) + 2,035 \cdot \cos(150,56)}{2,035 - 0,678} \right\} = \\ &= 99,13^\circ. \end{aligned}$$

По результатам расчетов штрихуем площадки торможения и ускорения (см. рисунок 47). Поскольку геометрически $f_Y = f_T$, следовательно, расчет $\delta_{откл}^{пр}$ выполнен правильно.

Для того чтобы найти предельное время отключения КЗ $t_{откл}^{пр}$, необходимо найти решение уравнения движения ротора генератора (4.12). Уравнение движения ротора генератора решим методом последовательных интервалов. Длительность расчетного интервала примем $\Delta t = 0,05$ с.

Приведем электромеханическую постоянную времени к базисным условиям:

$$T_{j*} = T_j \cdot \frac{S_{ном.Г}}{S_б} = T_j \cdot \frac{P_{ном.Г} / \cos \varphi_{ном.Г}}{S_б} = 5,42 \cdot \frac{160/0,83}{120} = 8,7 \text{ с.}$$

Определим значение постоянного коэффициента K :

$$K = \frac{360 \cdot f \cdot \Delta t^2}{T_{j*}} = \frac{360 \cdot 50 \cdot 0,05^2}{8,7} = 5,17^\circ.$$

Первый интервал (0,00–0,05 с)

Значение электрической мощности в первый момент возникновения КЗ:

$$P_{(1)} = P_{m2*} \cdot \sin(\delta_0) = 0,678 \cdot \sin(22,04^\circ) = 0,254.$$

Избыток мощности в начале первого интервала:

$$\Delta P_{(1)} = P_0 - P_{(1)} = 1 - 0,254 = 0,746.$$

Изменение угла за первый интервал:

$$\Delta \delta_{(1)} = 0,5 \cdot K \cdot \Delta P_{(1)} = 0,5 \cdot 5,17 \cdot 0,746 = 1,928^\circ.$$

Угол к концу первого интервала:

$$\delta_{(1)} = \delta_0 + \Delta \delta_{(1)} = 22,04 + 1,928 = 23,968^\circ.$$

Второй интервал (0,05–0,1 с)

$$P_{(2)} = P_{m2*} \cdot \sin(\delta_{(1)}) = 0,678 \cdot \sin(23,968^\circ) = 0,275.$$

$$\Delta P_{(2)} = P_0 - P_{(2)} = 1 - 0,275 = 0,725.$$

$$\Delta \delta_{(2)} = \Delta \delta_{(1)} + K \cdot \Delta P_{(2)} = 1,928 + 5,17 \cdot 0,725 = 5,676^\circ.$$

$$\delta_{(2)} = \delta_{(1)} + \Delta \delta_{(2)} = 23,968 + 5,676 = 29,644^\circ.$$

Дальнейшие расчеты выполняются аналогично по шагам, и фиксируются в таблице (таблица 4.1).

Таблица 4.1

$t, \text{ с}$	$\delta, \text{ град}$	$P(i), \text{ о.е.}$	$\Delta P(i), \text{ о.е.}$	$\Delta \delta(i), \text{ град}$
0,00	22,040	0,000	0,000	0,000
0,05	23,968	0,254	0,746	1,928
0,10	29,644	0,275	0,725	5,676
0,15	38,758	0,335	0,665	9,114
0,20	50,850	0,424	0,576	12,092
0,25	65,392	0,526	0,474	14,542
0,30	81,919	0,616	0,384	16,527
0,35	100,147	0,671	0,329	18,228

По результатам выполненных расчетов (см. таблицу 4.1) строится график зависимости $\delta = f(t)$ (рисунок 48).

По графику функции $\delta = f(t)$, исходя из значения $\delta_{\text{откл}}^{\text{пр}} = 99,13^\circ$, определяем $t_{\text{откл}}^{\text{пр}} = 0,347 \text{ с}$. Таким образом, если действительное время отключения КЗ меньше 0,61 с, то динамическая устойчивость рассматриваемой системы при данном виде повреждения обеспечивается.

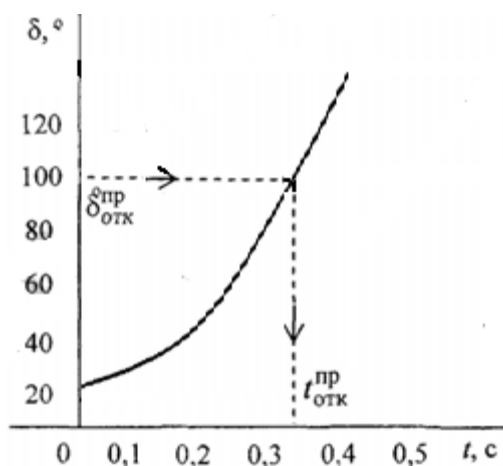


Рисунок 48. – Определение предельного времени отключения КЗ

Пример 4.1.2

В электропередаче, показанной на рисунке 49, в начале линии происходит трехфазное короткое замыкание. Релейной защитой линия отключается. Требуется определить предельные угол и время отключения короткого замыкания.

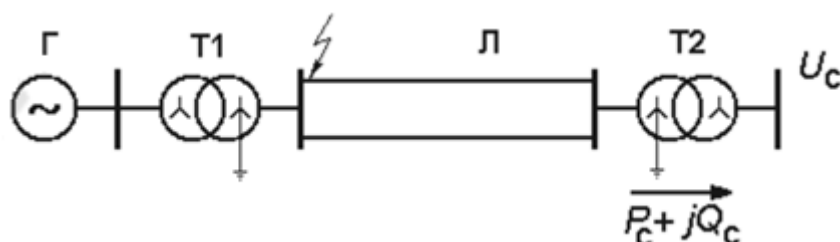


Рисунок 49. – Одномашинная энергосистема электропередачи

Исходные данные:

- генератор: $P_{\text{ном}} = 200$ МВт; $\cos(\varphi_{\text{ном.Г}}) = 0,85$; $x'_d = 0,3$; $U_{\text{ном}} = 10,5$ кВ; $T_j = 5$ с; генератор с АРВ пропорционального действия;
- трансформатор Т1: $S_{\text{ном}} = 250$ МВА; $U_{\text{ном}} = 10,5/230$ кВ; $U_K = 11\%$;
- линия: $x_0 = 0,4$ Ом/км; $L = 120$ км;
- трансформатор Т2: $S_{\text{ном}} = 200$ МВА; $U_{\text{ном}} = 230/110$ кВ; $U_K = 11\%$;
- передаваемая мощность $P_c = 148$ МВт и $Q_c = 30$ Мвар.

Решение:

Как и в предыдущем примере, требуется выполнить аналогичные действия:

1. Определить параметры схем замещения системы в нормальном, аварийном и послеаварийном режимах.

2. Рассчитать и построить динамические характеристики мощности системы в нормальном, аварийном и послеаварийном режимах.

3. Вычислить коэффициент запаса динамической устойчивости энергосистемы.

4. В случае возможности обеспечить динамическую устойчивость рассчитать максимально допустимые угол и время отключения КЗ.

Расчет будем проводить, используя приближенное приведение элементов схемы замещения в относительных единицах.

Напряжение U_c принимают равным вторичному напряжению трансформатора Т2, но при приближенном приведении элементов необходимо брать ближайшее среднономинальное значение, тогда $U_c = 115$ кВ.

Принимаем базисные условия:

$$S_6 = P_c = 148 \text{ МВт}, \quad U_6 = U_c = 115 \text{ кВ}.$$

Напряжение системы в относительных единицах равно:

$$U_{c*} = 115/115 = 1.$$

Передаваемая активная мощность в относительных единицах:

$$P_{c*} = P_c / S_6 = 148/148 = 1.$$

Передаваемая реактивная мощность в относительных единицах:

$$Q_{c*} = Q_c / S_6 = 30/148 = 0,203.$$

Постоянная инерции, приведенная к базисным условиям:

$$T_{j*} = T_j \cdot \frac{P_r}{S_6 \cdot \cos(\varphi_{\text{НОМ.Г}})} = 5 \cdot \frac{200}{148 \cdot 0,85} = 7,95 \text{ с}.$$

Схема замещения энергосистемы в **нормальном режиме** соответствует рисунку 41.

Значения параметров схемы замещения получим в виде:

$$x_{Г*} = x'_d \cdot \frac{S_6}{S_{\text{НОМ}}} = x'_d \cdot \frac{S_6}{P_{\text{НОМ}} / \cos \varphi_{\text{НОМ}}} = 0,3 \cdot \frac{148}{200/0,85} = 0,189. \quad (\text{по (2.1)})$$

$$x_{Т1*} = \frac{U_k \cdot S_6}{100 \cdot S_{\text{НОМ}}} = \frac{11 \cdot 148}{100 \cdot 250} = 0,065. \quad (\text{по (2.8)})$$

$$x_{Т2*} = \frac{U_k \cdot S_6}{100 \cdot S_{\text{НОМ}}} = \frac{10 \cdot 148}{100 \cdot 200} = 0,074. \quad (\text{по (2.8)})$$

$$x_{Л*} = x_0 \cdot I \cdot \frac{S_6}{U_{\text{НОМ}}^2} = 0,4 \cdot 120 \cdot \frac{148}{230^2} = 0,134. \quad (\text{по (2.13)})$$

Результирующее сопротивление системы в нормальном режиме:

$$x_{\Sigma 1*} = x_{Г*} + x_{Т1*} + \frac{x_{Л*}}{2} + x_{Т2*} = 0,189 + 0,065 + \frac{0,134}{2} + 0,074 = 0,395.$$

Переходная ЭДС генератора:

$$E'_{q1*} = \sqrt{\left(U_{c*} + \frac{Q_{c*} \cdot x_{\Sigma 1*}}{U_{c*}} \right)^2 + \left(\frac{P_{c*} \cdot x_{\Sigma 1*}}{U_{c*}} \right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(1 + \frac{0,203 \cdot 0,395}{1} \right)^2 + \left(\frac{1 \cdot 0,395}{1} \right)^2} = 1,15.$$

Предел передаваемой мощности в энергосистему в нормальном режиме вычисляется по формуле (3.2):

$$P_{m1*} = \frac{E_{q1*} \cdot U_{c*}}{x_{\Sigma 1*}} = \frac{1,15 \cdot 1}{0,395} = 2,912.$$

Активная мощность, выдаваемая в систему генератором (угловая характеристика), в нормальном режиме описывается функцией:

$$P_{1*}(\delta) = P_{m1*} \cdot \sin(\delta) = 2,912 \cdot \sin(\delta).$$

Схема замещения энергосистемы в **аварийном режиме** соответствует рисунку 42. К определенным выше параметрам схемы замещения добавится сопротивление шунта в точке КЗ.

По условиям примера задано трехфазное короткое замыкание, а при таком КЗ сопротивление шунта $x_{ш*}^{(3)} = 0$. Тогда предел мощности, передаваемой системой в аварийном режиме: $P_{m2*} = 0$.

Схема замещения энергосистемы в **послеаварийном режиме** соответствует рисунку 44. Она отличается от схемы нормального режима тем, что линия, на которой произошло КЗ, отключена. Все сопротивления элементов схемы уже определены.

Результирующее сопротивление системы в послеаварийном режиме:

$$x_{\Sigma 3*} = x_{Г*} + x_{Т1*} + x_{Л*} + x_{Т2*} = 0,189 + 0,065 + 0,134 + 0,074 = 0,462.$$

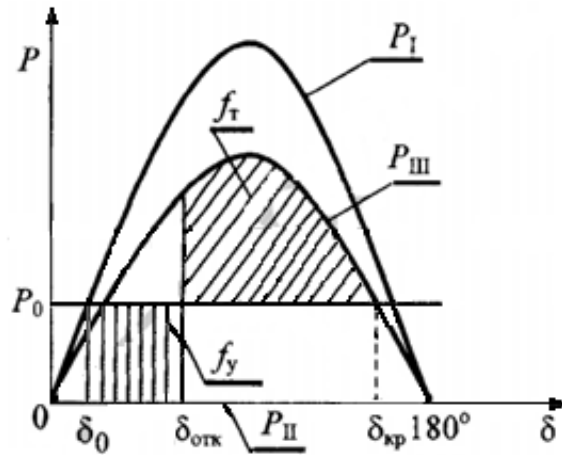
Предел передаваемой мощности в энергосистему в послеаварийном режиме вычисляется по формуле (3.2):

$$P_{m3*} = \frac{E_{q1*} \cdot U_{c*}}{x_{\Sigma 3*}} = \frac{1,15 \cdot 1}{0,462} = 2,489.$$

Активная мощность, выдаваемая в систему генератором (угловая характеристика), в послеаварийном режиме описывается функцией:

$$P_{3*}(\delta) = P_{m3*} \cdot \sin(\delta) = 2,489 \cdot \sin(\delta).$$

По полученным выражениям для угловых характеристик, изменяя угол δ от 0 до 180°, построим в одной системе координат динамические характеристики мощности системы для трех рассматриваемых режимов (рисунок 50).



P_1 – исходный; P_2 – аварийный; P_3 – послеаварийный;
 P_0 – мощность приводной турбины

Рисунок 50. – Динамические характеристики системы
в различных режимах

Определяем угол δ_0 из условия:

$$P_{0*} = P_{m1*} \cdot \sin(\delta_0).$$

Тогда

$$\delta_0 = \arcsin \frac{P_{0*}}{P_{m1*}} = \arcsin \frac{1}{2,912} = 20,08^\circ.$$

Критический угол $\delta_{кр}$:

$$\delta_{кр} = 180 - \arcsin \frac{P_{0*}}{P_{m3*}} = 180 - \arcsin \frac{1}{2,489} = 156,31^\circ. \quad (\text{по (4.11)})$$

Находим предельный угол отключения КЗ:

$$\begin{aligned} \delta_{откл}^{пр} &= \arccos \left\{ \frac{(\pi/180) \cdot P_{0*} \cdot (\delta_{кр} - \delta_0) - P_{m2*} \cdot \cos(\delta_0) + P_{m3*} \cdot \cos(\delta_{кр})}{P_{m3*} - P_{m2*}} \right\} = \\ &= \arccos \left\{ \frac{(3,14/180) \cdot 1 \cdot (156,31 - 20,08) - 0 + 2,489 \cdot \cos(156,31)}{2,489 - 0} \right\} = 87,76^\circ. \end{aligned}$$

Предельное время отключения короткого замыкания равно:

$$t_{откл}^{пр} = \sqrt{\frac{T_{j*} \cdot (\delta_{откл}^{пр} - \delta_0)}{\pi \cdot f \cdot P_{0*}}} = \sqrt{\frac{7,95 \cdot (87,76 - 20,08)}{180 \cdot 50 \cdot 1}} = 0,244 \text{ с.}$$

В этой формуле все углы представляются в градусах, а временные параметры в секундах.

Пример 4.1.3

В схеме одномашинной энергосистемы, приведенной на рисунке 49, отключаются и затем вновь включаются обе линии электропередачи. Требуется определить предельное время включения линий для сохранения динамической устойчивости и графически изобразить площадки торможения и ускорения в рассматриваемом переходном режиме.

Исходные данные, параметры схемы и исходного нормального режима взять из примера 4.1.2.

Решение:

При отключении линий передаваемая мощность в ОЭС равна нулю, т.е. $P_{m2*} = 0$.

После повторного включения обеих линий электропередачи энергосистема должна выйти на нормальный режим работы, поэтому должна рассматриваться угловая характеристика нормального режима работы. Тогда критический угол следует определять по характеристике нормального режима:

$$\delta_{кр} = 180 - \arcsin \frac{P_{0*}}{P_{m1*}} = 180 - \arcsin \frac{1}{2,912} = 159,92^\circ. \text{ (по (4.11))}$$

Предельный угол включения линий электропередачи:

$$\delta_{вкл}^{пр} = \arccos \left\{ \frac{(\pi/180) \cdot P_{0*} \cdot (\delta_{кр} - \delta_0) - P_{m2*} \cdot \cos(\delta_0) + P_{m1*} \cdot \cos(\delta_{кр})}{P_{m1*} - P_{m2*}} \right\} =$$

$$= \arccos \left\{ \frac{(3,14/180) \cdot 1 \cdot (159,92 - 20,08) - 0 + 2,912 \cdot \cos(159,92)}{2,912 - 0} \right\} = 95,83^\circ.$$

Определим предельное время включения линий:

$$t_{вкл}^{пр} = \sqrt{\frac{T_{j*} \cdot (\delta_{вкл}^{пр} - \delta_0)}{\pi \cdot f \cdot P_{0*}}} = \sqrt{\frac{7,95 \cdot (95,83 - 20,08)}{180 \cdot 50 \cdot 1}} = 0,258 \text{ с.}$$

Характер процесса при отключении и включении линий – на рисунке 51.

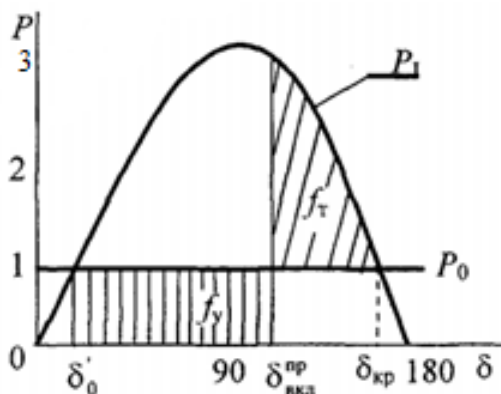


Рисунок 51. – Характеристики мощности и площадки торможения и ускорения в режиме отключения и предельно допустимого включения линий

4.2. Задачи для самостоятельного решения

Задача 4.2.1

В электрической системе, изображенной на рисунке 52, возникает двухфазное КЗ начале линии Л-2. Релейной защитой данная линия отключается.

Требуется:

1. Определить параметры схемы замещения системы в нормальном, аварийном и послеаварийном режимах.

2. Построить динамические угловые характеристики мощности системы указанных режимов в одних осях.

3. Определить предельный угол $\delta_{откл}^{пр}$ отключения КЗ для обеспечения динамической устойчивости системы электропередачи.

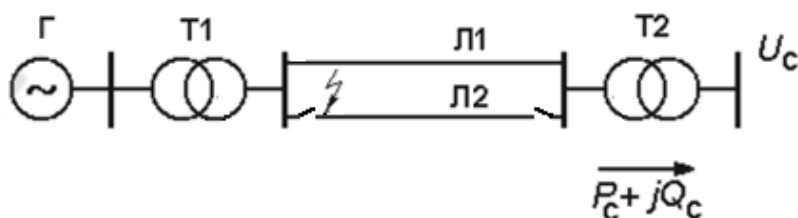


Рисунок 52. – Схема системы электропередачи

Исходные данные:

- генератор: $P_{ном} = 100$ МВт; $\cos(\varphi_{ном.Г}) = 0,85$; $x_d = 1,194$; $x_{2Г} = 0,209$; $U_{ном} = 10,5$ кВ; $T_j = 5$ с; генератор без АРВ;
- трансформатор Т1: $S_{ном} = 160$ МВА; $U_{ном} = 10,5/230$ кВ; $U_K = 11\%$;
- линия: $x_0 = 0,4$ Ом/км; $L = 420$ км;
- трансформатор Т2: $S_{ном} = 200$ МВА; $U_{ном} = 230/110$ кВ; $U_K = 11\%$;
- передаваемая мощность $P_c = 80$ МВт и $Q_c = 20$ Мвар.

Задача 4.2.2

В электрической системе, изображенной на рисунке 53, отключаются и затем вновь включаются обе линии электропередачи. Требуется определить предельное время включения линий для сохранения динамической устойчивости и графически изобразить площадки торможения и ускорения в рассматриваемом переходном режиме.

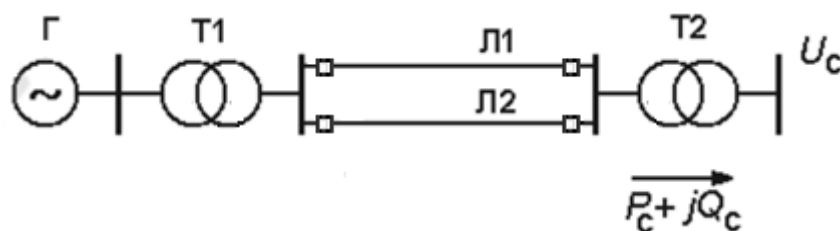


Рисунок 53. – Схема системы электропередачи

Исходные данные:

- генератор: $P_{\text{ном}} = 100$ МВт; $\cos(\varphi_{\text{ном.Г}}) = 0,85$; $x'_d = 0,304$; $T_j = 5$ с;
 $U_{\text{ном}} = 10,5$ кВ; генератор с АРВ пропорционального действия;
- трансформатор Т1: $S_{\text{ном}} = 160$ МВА; $U_{\text{ном}} = 10,5/230$ кВ; $U_K = 11\%$;
- линия: $x_0 = 0,4$ Ом/км; $L = 220$ км;
- трансформатор Т2: $S_{\text{ном}} = 200$ МВА; $U_{\text{ном}} = 230/110$ кВ; $U_K = 11\%$;
- передаваемая мощность $P_c = 80$ МВт и $Q_c = 20$ Мвар.

Задача 4.2.3

В электрической системе, изображенной на рисунке 53, отключаются обе линии электропередачи. После отключения включается только одна из линий. Требуется определить предельное время включения линии для сохранения динамической устойчивости и графически изобразить площадки ускорения и торможения в рассматриваемом переходном режиме. Сопоставить полученные результаты с результатами задачи 4.2.2. Параметры схемы и исходного режима взять из задачи 4.2.2.

Задача 4.2.4*

Дана схема замещения одномашинной электроэнергетической системы (рисунок 54), параметры которой заданы в относительных единицах:

$E'_q = 1,196$; $x'_d = 0,178$; $x_{T1} = 0,055$; $x_{Л1} = x_{Л2} = 0,282$; $x_{T2} = 0,044$; $U_c = 1$;
 $P_0 = P_c = 1$; $x_p = 1,24$; $x_{2Г} = 0,13$.

В начале линии Л2 происходит однофазное КЗ на землю, релейная защита отключает линию Л2.

Требуется по виду схемы замещения определить тип АРВ генератора.

В аварийном режиме добавить в схему замещения сопротивление шунта, получить динамические угловые характеристики нормального, аварийного и послеаварийного режимов и далее вычислить предельный угол $\delta_{\text{откл}}^{\text{пр}}$ отключения КЗ и предельное время $t_{\text{откл}}^{\text{пр}}$ отключения КЗ.

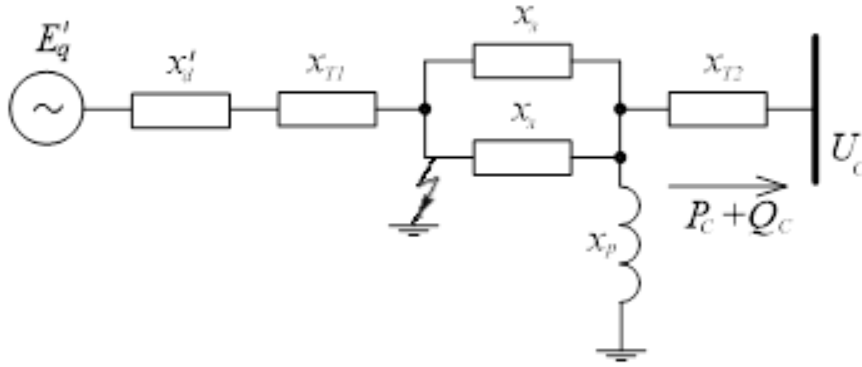


Рисунок 54. – Схема замещения системы электропередачи

Задача 4.2.5

Дана схема замещения одномашинной электроэнергетической системы (рисунок 55), параметры которой заданы в относительных единицах:

$$U_G = 1,396; x_{T1} = 0,055; x_{Л1} = 0,182; x_{Л2} = 0,044; U_C = 1; P_0 = P_C = 1; x_{KB} = 1,16.$$

В начале линии Л2 происходит трехфазное КЗ на землю, релейная защита отключает линию Л2.

Требуется по виду схемы замещения определить тип АРВ генератора.

В аварийном режиме добавить в схему замещения сопротивление шунта, получить динамические угловые характеристики нормального, аварийного и послеаварийного режимов, и далее вычислить предельный угол $\delta_{откл}^{пр}$ отключения КЗ и предельное время $t_{откл}^{пр}$ отключения КЗ.

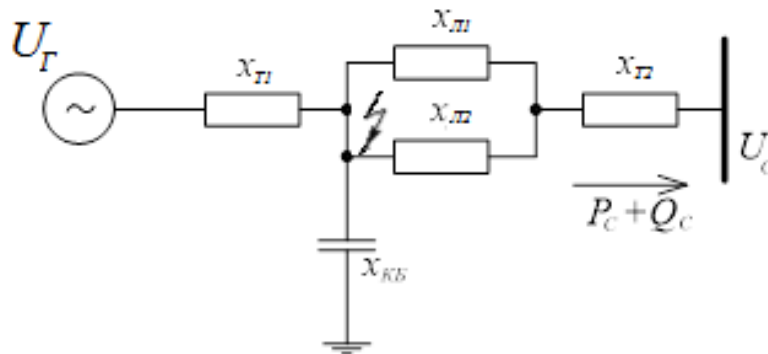


Рисунок 55. – Схема замещения системы электропередачи

5. УСТОЙЧИВОСТЬ НАГРУЗКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Узлом нагрузки называется совокупность потребителей электроэнергии, подключенных к центру питания, под которым понимаются шины источника (станции, подстанции) различного напряжения 0,4; 6; 10 кВ и т.д.

В узлах нагрузки сосредоточены различные потребители: освещение, двигатели, обогрев, преобразователи и пр. Всю нагрузку можно разделить на двигательную и статическую. У двигательной нагрузки могут возникать проблемы с устойчивостью работы, у статической нагрузки таких проблем нет. Однако статическая нагрузка оказывает влияние на переходные процессы и знание ее характеристик также необходимо.

В качестве двигательной нагрузки используются асинхронные (АД) и синхронные (СД) электродвигатели. Поскольку синхронные электродвигатели применяются гораздо реже, ограничимся рассмотрением устойчивости только асинхронных электродвигателей.

В плане устойчивости АД рассматривается возможность самозапуска одного или группы работающих АД при возникновении КЗ в сети с последующим его отключением. При этом двигатели по инерции продолжают вращаться, снижая скорость вращения, и если при отключении КЗ снова разгоняются и выходят на нормальный режим работы, то такие АД устойчивы. Если какой-то двигатель опрокинулся (остановился), то нагрузка этого узла неустойчива.

Самозапуск асинхронных электродвигателей

В общем случае расчет самозапуска электродвигателей выполняется по схеме замещения, составленной, как при расчете токов короткого замыкания [4]. Как правило, активными сопротивлениями элементов системы электроснабжения можно пренебречь, кроме кабельных линий и нагрузок. Все асинхронные двигатели как аварийной, так и неповрежденной секции, в расчете вводятся номинальными реактивными сопротивлениями.

Расчет самозапуска электродвигателей производят в следующем порядке.

Задаются базисным напряжением U_6 и мощностью S_6 . Как правило, за значение базисной мощности принимают мощность питающего трансформатора.

Определяют сопротивления элементов сети в относительных единицах, кроме сопротивлений самозапускающихся электродвигателей.

Находят синхронную угловую скорость самозапускающегося электродвигателя:

$$\omega_c = 2 \cdot \pi \cdot n_c / 60, \text{ с}^{-1}, \quad (5.1)$$

где n_c - синхронная скорость электродвигателя, об./мин.

Определяют время замедления агрегата при номинальной нагрузке:

$$\tau_{\text{ном}} = J_{\text{пр}} \cdot \omega_c^2 / P_{\text{дв.ном}} \cdot 0,001, \text{ с}, \quad (5.2)$$

где $J_{пр}$ – приведенный момент инерции механизма и двигателя, кг-м;
 $P_{дв.ном}$ – номинальная мощность электродвигателя, кВт.
 Определяют время замедления агрегата при фактической нагрузке:

$$\tau_j = \tau_{jном} / k_3, \text{ с}, \quad (5.3)$$

где k_3 – коэффициент загрузки электродвигателя, о.е.
 Определяется свободный выбег электродвигателя:
 – для механизмов с практически постоянным моментом сопротивления зависимость угловой скорости от времени выбега имеет вид:

$$\omega^* = 1 - t_{п} / \tau_j, \text{ о.е.}; \quad (5.4)$$

– для механизмов с моментом сопротивления, пропорциональным квадрату угловой скорости зависимость угловой скорости от времени выбега имеет вид:

$$\omega^* = \tau_j / (t_{п} + \tau_j), \text{ о.е.}, \quad (5.5)$$

где $t_{п}$ – время перерыва электроснабжения, с.
 Скольжение при выбеге электродвигателя:

$$s = 1 - \omega^*, \text{ о.е.} \quad (5.6)$$

Для асинхронных двигателей мощностью более 100 кВт с короткозамкнутым ротором критическое скольжение определяют по выражению

$$s_k = s_{ном} \cdot \left(m_k + \sqrt{m_k^2 - 1} \right), \text{ о.е.}, \quad (5.7)$$

где m_k – кратность критического момента.
 При $m_k > 1,6$ можно принять:

$$s_k = 2 \cdot s_{ном} \cdot m_k, \text{ о.е.} \quad (5.8)$$

Для асинхронных двигателей мощностью более 100 кВт с фазным ротором или повышенным скольжением критическое скольжение определяют по выражению

$$s_k = s_{ном} \cdot \sqrt{(i_n - 1) / \left[(1 + i_0^2) \cdot (1 + 2 \cdot s_{ном}) \right]}, \text{ о.е.}, \quad (5.9)$$

где i_0 – относительный ток холостого хода асинхронного двигателя, определяется по формуле

$$i_0 = \sin \varphi_{\text{НОМ}} - \cos \varphi_{\text{НОМ}} / \left(m_K + \sqrt{m_K^2 - 1} \right), \text{ о.е.} \quad (5.10)$$

Номинальное скольжение:

$$s_{\text{НОМ}} = 1 - n_{\text{НОМ}} / n_c, \text{ о.е.}, \quad (5.11)$$

где $n_{\text{НОМ}}$ – номинальная скорость электродвигателя, об./мин.

Кратность пускового тока при скольжении s определяется по формуле

$$i_{\text{ПС}} = i_{\text{П}} \cdot \sqrt{\frac{1 + s_K^2}{1 + (s_K/s)^2}}, \text{ о.е.} \quad (5.12)$$

Расчетная пусковая мощность электродвигателя при номинальном напряжении равна:

$$S_{\text{ПС}} = P_{\text{дв.НОМ}} \cdot i_{\text{ПС}} / (\cos \varphi_{\text{НОМ}} \cdot \eta_{\text{НОМ}}), \text{ кВА.} \quad (5.13)$$

Индуктивное сопротивление двигателя:

$$x_{\text{ДВ}} = S_{\text{б}} \cdot U_{\text{НОМ}}^2 / (S_{\text{ПС}} \cdot U_{\text{б}}^2), \text{ о.е.} \quad (5.14)$$

Суммарное сопротивление n двигателей:

$$x_{\text{ДВ}\Sigma} = x_{\text{ДВ}} / n, \text{ о.е.} \quad (5.15)$$

Сопротивление самозапускающихся двигателей с учетом неотключенной нагрузки определяется по формуле

$$x'_{\text{ДВ}\Sigma} = x_{\text{ДВ}\Sigma} \cdot x_{\text{Н}} / (x_{\text{ДВ}\Sigma} + x_{\text{Н}}), \text{ о.е.} \quad (5.16)$$

Остаточное напряжение на шинах источника питания равно:

$$U_{\text{ост}} = U_c \cdot x_{\text{ДВ}\Sigma} / (x_{\text{ДВ}\Sigma} + x_{\text{Т}}), \text{ о.е.}, \quad (5.17)$$

где U_c – напряжение системы; принимается равным 1,05 в относительных единицах.

Кратность тока самозапуска через трансформатор:

$$k_i = U_c / (x_{\text{ДВ}\Sigma} + x_{\text{Т}}), \text{ о.е.} \quad (5.18)$$

Если $k_i \leq 4$ для трансформаторов мощностью 25 МВА и ниже и $k_i \leq 2$ для трансформаторов более 25 МВА до 100 МВА, то при числе самозапусков в сутки до трех включительно самозапуск возможен.

Напряжение на двигателях для обеспечения пускового момента на всем диапазоне скольжения должно удовлетворять условию:

$$U_{\text{дв}} \geq \sqrt{1,1 \cdot m_{\text{сs}} / m_{\text{дв.с}}}, \text{ о.е.}, \quad (5.19)$$

где $m_{\text{сs}}$ – момент сопротивления механизма при скольжении s ;

$m_{\text{дв.с}}$ – вращающийся момент двигателя при скольжении s .

При затруднении с определением значений моментов $m_{\text{сs}}$ и $m_{\text{дв.с}}$ для вычислений используют следующие соотношения:

– для механизмов с постоянным моментом сопротивления:

$$U_{\text{дв}} \geq \sqrt{1,37 \cdot m_{\text{тр}} \cdot k_3 / m_{\text{мин}}}, \text{ о.е.}; \quad (5.20)$$

– для механизмов с вентиляторным моментом сопротивления:

$$U_{\text{дв}} \geq \sqrt{1,22 \cdot m_{\text{тр}} \cdot k_3 / m_{\text{к}}}, \text{ о.е.}, \quad (5.21)$$

где $m_{\text{тр}}$ – кратности момента трогания механизма;

$m_{\text{мин}}$ – кратности минимального момента трогания АД.

5.1. Примеры расчета возможности самозапуска асинхронных электродвигателей

Пример 5.1.1

Рассчитать возможность самозапуска шести асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором через 1 с после отключения короткого замыкания. Двигатели питаются от системы неограниченной мощности через линию длиной 20 км ($x_0 = 0,4$ Ом/км) и трансформатор мощностью 25 МВА, $U_{\text{ном}} = 35/6,3$ кВ, $U_{\text{к}} = 7,5\%$ (рисунок 56). Нагрузка на валу двигателей вентиляторная.

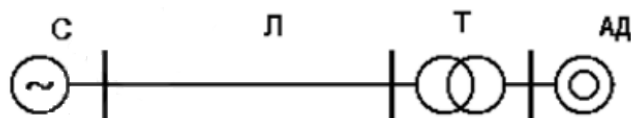


Рисунок 56. – Схема к примеру 5.1.1

Исходные данные двигателя:

$P_{\text{ном}} = 3150 \text{ кВт}$; $U_{\text{ном}} = 6 \text{ кВ}$; $\eta_{\text{ном}} = 95\%$; $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,85$; $m_k = 2$; $i_{\text{п}} = 6,5$;
 $n_{\text{ном}} = 372 \text{ об./мин}$; $J_{\text{пр}} = 2000 \text{ кг}\cdot\text{м}$; $k_3 = 0,8$; $m_{\text{тр}} = 0,5$; $m_{\text{п}} = 1$.

Решение:

Составим схему замещения подключения двигателей (рисунок 57).

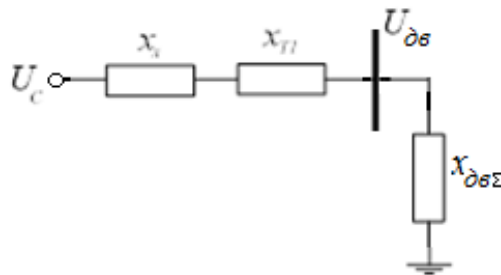


Рисунок 57. – Схема замещения подключения группы АД

Базовые величины: $S_6 = 25 \text{ 000 кВА}$; $U_6 = 6,3 \text{ кВ}$.

Индуктивное сопротивление трансформатора равно:

$$x_{\text{т}} = 7,5/100 \cdot 25 \text{ 000}/25 \text{ 000} = 0,075. \quad (\text{по (2.8)})$$

Индуктивное сопротивление линии:

$$x_{\text{л}} = x_0 \cdot l \cdot S_6 / U_{\text{ном}}^2 = 0,4 \cdot 20 \cdot 25 / 35^2 = 0,163. \quad (\text{по (2.13)})$$

Синхронная угловая скорость определяется из выражения:

$$\omega_c = 2 \cdot \pi \cdot 500 / 60 = 52,33 \text{ с}^{-1}. \quad (\text{по (5.1)})$$

Время замедления агрегата при номинальной нагрузке равно:

$$\tau_{\text{jном}} = 2000 \cdot 52,33^2 / 3150 \cdot 0,001 = 1,74 \text{ с}. \quad (\text{по (5.2)})$$

Время замедления агрегата при фактической нагрузке:

$$\tau_j = 1,74 / 0,8 = 2,175 \text{ с}. \quad (\text{по (5.3)})$$

Свободный выбег электродвигателя для вентиляторной нагрузки на валу:

$$\omega^* = 2,175 / (1 + 2,175) = 0,68. \quad (\text{по (5.5)})$$

Скольжение при выбеге электродвигателя:

$$s = 1 - 0,68 = 0,32. \quad (\text{по (5.6)})$$

Номинальное скольжение:

$$s_{\text{ном}} = 1 - 372 / 500 = 0,256. \quad (\text{по (5.11)})$$

Критическое скольжение:

$$s_k = 0,256 \cdot (2 + \sqrt{2^2 - 1}) = 0,955. \quad (\text{по (5.7)})$$

Кратность пускового тока при скольжении s равна:

$$i_{пс} = 6,5 \cdot \sqrt{\frac{1 + 0,955^2}{1 + (0,955/0,32)^2}} = 2,85. \quad (\text{по (5.12)})$$

Расчетная пусковая мощность электродвигателя при номинальном напряжении:

$$S_{пс} = 3150 \cdot 2,85 / (0,85 \cdot 0,95) = 11117,65 \text{ кВА}. \quad (\text{по (5.13)})$$

Индуктивное сопротивление двигателя:

$$x_{дв} = 25000 \cdot 6^2 / (11117,65 \cdot 6,3^2) = 2. \quad (\text{по (5.14)})$$

Суммарное сопротивление шести двигателей:

$$x_{дв\Sigma} = 2,04 / 6 = 0,34. \quad (\text{по (5.15)})$$

Остаточное напряжение на шинах источника питания равно:

$$U_{ост} = U_c \cdot x_{дв\Sigma} / (x_{дв\Sigma} + x_T + x_l) = 1,05 \cdot 0,34 / (0,34 + 0,075 + 0,163) = 0,618.$$

Кратность тока самозапуска через трансформатор:

$$k_i = U_c / (x_{дв\Sigma} + x_T + x_l) = 1,05 / (0,34 + 0,075 + 0,163) = 1,82.$$

Кратность тока самозапуска через трансформатор $1,82 < 4$, то имеется возможность до трех самозапусков в сутки.

Проверяем по условию обеспечения пускового момента на всем диапазоне скольжения:

$$U_{дв} = 0,618 \geq \sqrt{1,22 \cdot 0,5 \cdot 0,8 / 2} = 0,494. \quad (\text{по (5.21)})$$

Все условия по проверке самозапуска асинхронных электродвигателей выполнены, поэтому самозапуск возможен не более трех раз в сутки.

Пример 5.1.2

Рассчитать возможность самозапуска двенадцати асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором через 1,2 с после отключения короткого замыкания в сети. Двигатели питаются от системы неограниченной мощности через трансформатор мощностью 10 МВА, $U_{ном} = 35/6,3$ кВ, $U_K = 8,5$ % (рисунок 58). Нагрузка на валу двигателей постоянная.

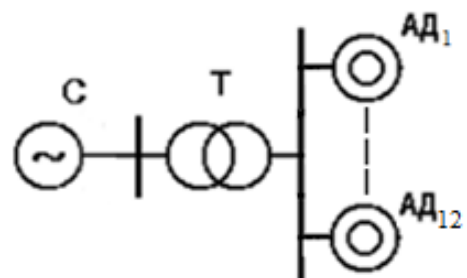


Рисунок 58. – Схема к примеру 5.1.2

Исходные данные двигателя:

$P_{\text{ном}} = 320 \text{ кВт}$; $U_{\text{ном}} = 6 \text{ кВ}$; $\eta_{\text{ном}} = 92,5\%$; $\cos(\varphi_{\text{ном}}) = 0,86$; $m_k = 2,2$; $i_p = 6$;
 $n_{\text{ном}} = 985 \text{ об./мин}$; $J_{\text{пр}} = 150 \text{ кг}\cdot\text{м}$; $k_3 = 0,8$; $m_{\text{тр}} = 0,2$; $m_{\text{мин}} = 1,2$.

Решение:

Составим схему замещения подключения двигателей (рисунок 59).

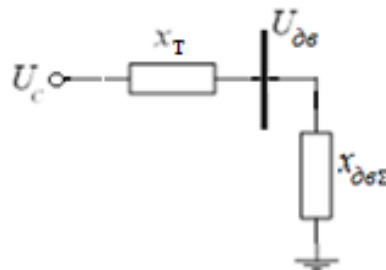


Рисунок 59. – Схема замещения подключения группы АД

Базовые величины: $S_6 = 10\,000 \text{ кВА}$; $U_6 = 6,3 \text{ кВ}$.

Индуктивное сопротивление трансформатора равно:

$$x_T = 8,5/100 \cdot 10\,000/10\,000 = 0,085. \quad (\text{по (2.8)})$$

Синхронная угловая скорость определяется из выражения:

$$\omega_c = 2 \cdot \pi \cdot 1000/60 = 105 \text{ с}^{-1}. \quad (\text{по (5.1)})$$

Время замедления агрегата при номинальной нагрузке равно:

$$\tau_{j\text{ном}} = 150 \cdot 105^2 / 320 \cdot 0,001 = 5,17 \text{ с}. \quad (\text{по (5.2)})$$

Время замедления агрегата при фактической нагрузке:

$$\tau_j = 5,17/0,8 = 6,46 \text{ с}. \quad (\text{по (5.3)})$$

Свободный выбег электродвигателя для постоянной нагрузки на валу:

$$\omega^* = 1 - 1,2/6,46 = 0,814. \quad (\text{по (5.5)})$$

Скольжение при выбеге электродвигателя:

$$s = 1 - 0,814 = 0,186. \quad (\text{по (5.6)})$$

Номинальное скольжение:

$$s_{\text{ном}} = 1 - 985/1000 = 0,015. \quad (\text{по (5.11)})$$

Критическое скольжение:

$$s_k = 2 \cdot 0,015 \cdot 2,2 = 0,066. \quad (\text{по (5.8)})$$

Кратность пускового тока при скольжении s равна:

$$i_{\text{пс}} = 6 \cdot \sqrt{\frac{1 + 0,066^2}{1 + (0,066/0,186)^2}} = 5,66. \quad (\text{по (5.12)})$$

Расчетная пусковая мощность электродвигателя при номинальном напряжении:

$$S_{\text{пс}} = 320 \cdot 5,66 / (0,86 \cdot 0,925) = 2276,8 \text{ кВА.} \quad (\text{по (5.13)})$$

Индуктивное сопротивление двигателя равно:

$$x_{\text{дв}} = 10000 \cdot 6^2 / (2276,8 \cdot 6,3^2) = 3,98. \quad (\text{по (5.14)})$$

Суммарное сопротивление восьми двигателей:

$$x_{\text{дв}\Sigma} = 3,98 / 12 = 0,332. \quad (\text{по (5.15)})$$

Остаточное напряжение на шинах источника питания равно:

$$U_{\text{ост}} = U_c \cdot x_{\text{дв}\Sigma} / (x_{\text{дв}\Sigma} + x_T) = 1,05 \cdot 0,332 / (0,332 + 0,085) = 0,836.$$

Кратность тока самозапуска через трансформатор:

$$k_i = U_c / (x_{\text{дв}\Sigma} + x_T) = 1,05 / (0,332 + 0,085) = 2,52.$$

Кратность тока самозапуска через трансформатор $2,52 < 4$, поэтому имеется возможность до трех самозапусков в сутки.

Проверяем по условию обеспечения пускового момента на всем диапазоне скольжения:

$$U_{\text{дв}} = 0,836 \geq \sqrt{1,37 \cdot 0,2 \cdot 0,8 / 1,2} = 0,427. \quad (\text{по (5.20)})$$

Все условия по проверке самозапуска асинхронных электродвигателей выполнены, поэтому самозапуск возможен не более трех раз в сутки.

Пример 5.1.3

Рассчитать возможность самозапуска шести асинхронных двигателей с фазным ротором через 0,8 с после отключения короткого замыкания. Двигатели питаются от системы неограниченной мощности через трансформатор мощностью 10 МВА, $U_{\text{ном}} = 35/6,3$ кВ, $U_K = 8,5\%$. Нагрузка на валу двигателей вентиляторная. Схемы подключения и замещения такие же, как в примере 5.1.2.

Исходные данные двигателя:

$$P_{\text{ном}} = 1000 \text{ кВт}; U_{\text{ном}} = 6 \text{ кВ}; \eta_{\text{ном}} = 94,7\%; \cos \varphi_{\text{ном}} = 0,83; m_k = 2,6; i_n = 6; n_{\text{ном}} = 590 \text{ об./мин}; J_{\text{пр}} = 320 \text{ кг}\cdot\text{м}; k_z = 0,8; m_{\text{тр}} = 0,3.$$

Решение:

Базовые величины: $S_6 = 10\,000$ кВА; $U_6 = 6,3$ кВ.

Индуктивное сопротивление трансформатора равно:

$$x_T = 8,5 / 100 \cdot 10\,000 / 10\,000 = 0,085. \quad (\text{по (2.8)})$$

Синхронная угловая скорость определяется из выражения:

$$\omega_c = 2 \cdot \pi \cdot 600 / 60 = 62,8 \text{ с}^{-1}. \quad (\text{по (5.1)})$$

Время замедления агрегата при номинальной нагрузке равно:

$$\tau_{\text{ном}} = 320 \cdot 62,5^2 / 1000 \cdot 0,001 = 1,26 \text{ с.} \quad (\text{по (5.2)})$$

Время замедления агрегата при фактической нагрузке:

$$\tau_j = 1,26 / 0,8 = 1,58 \text{ с.} \quad (\text{по (5.3)})$$

Свободный выбег электродвигателя для вентиляторной нагрузки на валу:

$$\omega^* = 1,58 / (0,8 + 1,58) = 0,66. \quad (\text{по (5.4)})$$

Скольжение при выбеге электродвигателя:

$$s = 1 - 0,61 = 0,34. \quad (\text{по (5.6)})$$

Относительный ток холостого хода асинхронного двигателя:

$$i_0 = 0,558 - 0,83 / \left(2,6 + \sqrt{2,6^2 - 1} \right) = 0,392. \quad (\text{по (5.10)})$$

Номинальное скольжение:

$$s_{\text{ном}} = 1 - 590 / 600 = 0,0167. \quad (\text{по (5.11)})$$

Критическое скольжение:

$$s_k = 0,0167 \cdot \sqrt{(6-1) / \left[(1+0,392^2) \cdot (1+2 \cdot 0,0167) \right]} = 0,034. \quad (\text{по (5.9)})$$

Кратность пускового тока при скольжении s равна:

$$i_{\text{пс}} = 6 \cdot \sqrt{\frac{1+0,034^2}{1+(0,034/0,34)^2}} = 5,947. \quad (\text{по (5.12)})$$

Расчетная пусковая мощность электродвигателя при номинальном напряжении:

$$S_{\text{пс}} = 1000 \cdot 5,947 / (0,83 \cdot 0,947) = 7566 \text{ кВА.} \quad (\text{по (5.13)})$$

Индуктивное сопротивление двигателя равно:

$$x_{\text{дв}} = 10000 \cdot 6^2 / (7566 \cdot 6,3^2) = 1,199. \quad (\text{по (5.14)})$$

Суммарное сопротивление восьми двигателей:

$$x_{\text{дв}\Sigma} = 1,199 / 6 = 0,200. \quad (\text{по (5.15)})$$

Остаточное напряжение на шинах источника питания равно:

$$U_{\text{ост}} = U_c \cdot x_{\text{дв}\Sigma} / (x_{\text{дв}\Sigma} + x_T) = 1,05 \cdot 0,2 / (0,2 + 0,085) = 0,737.$$

Кратность тока самозапуска через трансформатор:

$$k_i = U_c / (x_{\text{дв}\Sigma} + x_T) = 1,05 / (0,2 + 0,085) = 3,684.$$

Кратность тока самозапуска через трансформатор $3,684 < 4$, поэтому имеется возможность до трех самозапусков в сутки.

Проверяем по условию обеспечения пускового момента на всем диапазоне скольжения:

$$U_{\text{дв}} = 0,737 \geq \sqrt{1,22 \cdot 0,3 \cdot 0,8 / 2,6} = 0,34. \quad (\text{по (5.21)})$$

Все условия по проверке самозапуска асинхронных электродвигателей выполнены, поэтому самозапуск возможен не более трех раз в сутки.

5.2. Задачи для самостоятельного решения

Задача 5.2.1

Рассчитать возможность самозапуска восьми асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором через 1 с после отключения короткого замыкания. Двигатели питаются от системы неограниченной мощности через трансформатор мощностью 6,3 МВА; $U_{ном} = 35/6,3$ кВ; $U_K = 7,5\%$. Нагрузка на валу двигателей вентиляторная.

Исходные данные двигателя:

$P_{ном} = 500$ кВт; $U_{ном} = 6$ кВ, $\eta_{ном} = 95,6\%$; $\cos \varphi_{ном} = 0,92$; $m_K = 2,1$; $i_p = 6$;
 $n_{ном} = 2980$ об./мин; $J_{пр} = 15$ кг·м; $k_3 = 0,8$; $m_{тр} = 0,2$; $m_{мин} = 0,8$.

Задача 5.2.2

Рассчитать возможность самозапуска трех асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором через 1,5 с после отключения короткого замыкания в сети. Двигатели питаются от системы неограниченной мощности через линию длиной 15 км ($\chi_0 = 0,4$ Ом/км) и трансформатор мощностью 10 МВА; $U_{ном} = 35/6,3$ кВ; $U_K = 8,5\%$. Нагрузка на валу двигателей постоянная.

Исходные данные двигателя:

$P_{ном} = 620$ кВт, $U_{ном} = 6$ кВ, $\eta_{ном} = 92,5\%$; $\cos \varphi_{ном} = 0,84$; $m_K = 2,1$; $i_p = 6$;
 $n_{ном} = 1472$ об./мин; $J_{пр} = 180$ кг·м, $k_3 = 0,8$; $m_{тр} = 0,2$; $m_{мин} = 1,2$.

Задача 5.2.3:

Рассчитать возможность самозапуска четырех асинхронных двигателей с фазным ротором через 1,3 с после отключения короткого замыкания. Двигатели питаются от системы неограниченной мощности через линию длиной 12 км ($\chi_0 = 0,37$ Ом/км) и трансформатор мощностью 6,3 МВА; $U_{ном} = 35/6,3$ кВ; $U_K = 8,5\%$. Нагрузка на валу двигателей постоянная.

Исходные данные двигателя:

$P_{ном} = 1400$ кВт; $U_{ном} = 6$ кВ; $\eta_{ном} = 94,7\%$; $\cos \varphi_{ном} = 0,85$; $m_K = 2,4$; $i_p = 6$;
 $n_{ном} = 985$ об./мин; $J_{пр} = 420$ кг·м; $k_3 = 0,8$, $m_{тр} = 0,3$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Куликов, Ю. А. Переходные процессы в электроэнергетических системах : учеб. пособие / Ю. А. Куликов. – Л. : Омега-Л, 2013. – 384 с.
2. Переходные процессы в электроэнергетических системах : учеб. для вузов / И. П. Крючков, В. А. Старшинов, Ю. П. Гусев [и др.] ; под ред. И. П. Крючкова. – М. : МЭИ, 2009. – 416 с.
3. Калентионок, Е. В. Устойчивость электроэнергетических систем : учеб. пособие / Е. В. Калентионок. – Минск : Техноперспектива, 2008. – 376 с.
4. Токочаков, В. И. Устойчивость электрических систем : практикум для студентов специальности 1-43 01 03 «Электроснабжение» / В. И. Токочаков. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2007. – 57 с.
5. Устойчивость электроэнергетических систем. Сборник задач и примеры их решения : метод. пособие к практическим занятиям / Е. В. Калентионок, А. А. Волков, Е. В. Мышковец [и др.]. – Минск : БНТУ, 2007. – 130 с.