



Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Электроснабжение»

УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

ПРАКТИКУМ

для студентов специальности 1-43 01 03

«Электроснабжение»

дневной и заочной форм обучения

Электронный аналог печатного издания

Гомель 2007

УДК 621.311(075.8)
ББК 31.27я73
У81

*Рекомендовано к изданию научно-методическим советом
факультета автоматизированных информационных систем
ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 4 от 22.12.2005 г.)*

Автор-составитель: *В. И. Токочаков*

Рецензент: канд. техн. наук, зав. каф. «Электроснабжение»
ГГТУ им. П. О. Сухого *А. В. Сычев*

Устойчивость электрических систем : практикум для студентов специальности
У81 1-43 01 03 «Электроснабжение» днев. и заоч. форм обучения / авт.-сост. В. И. Токочаков. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2007. – 57 с.– Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://gstu.local/lib>. – Загл. с титул. экр.
рана.

ISBN 978-985-420-542-7.

Практикум содержит порядок расчета и набор вариантов задач для выполнения заданий при изучении электромеханических переходных процессов в системах электроснабжения.

Для студентов специальности 1-43 01 03 «Электроснабжение» дневной и заочной форм обучения.

УДК 621.311(075.8)
ББК 31.27я73

ISBN 978-985-420-542-7

© Токочаков В. И., составление, 2007

© Учреждение образования

«Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», 2007

1. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ В СХЕМАХ ЗАМЕЩЕНИЯ

1.1. Синхронные генераторы

Синхронные генераторы в установившемся режиме в схемах замещения представляются синхронной ЭДС E_q за синхронным сопротивлением x_d . Аналогично замещается синхронный генератор без автоматической регулировки возбуждения (АРВ) и без демпферных обмоток на роторе машины в начальный момент переходного процесса.

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

$$x_{d*} = x_d \frac{S_{\delta}}{S_{\text{ном}}}, \text{ о. е.}, \quad (1.1)$$

где $S_{\text{ном}}$ – номинальная мощность генератора, МВА;

S_{δ} – базисная мощность, МВА.

По формуле (1.1) определяются все сопротивления генератора, приведенные к базисным условиям.

Синхронная ЭДС неявнополюсного генератора в простейшей системе определяется по формуле:

$$E_{q*} = \sqrt{\left(U_{c*} + \frac{Q_{c*} (x_{d*} + x_{\text{вн*}})}{U_{c*}} \right)^2 + \left(\frac{P_{c*} (x_{d*} + x_{\text{вн*}})}{U_{c*}} \right)^2}, \text{ о. е.}, \quad (1.2)$$

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.;

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

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

Фиктивная ЭДС неявнополюсного генератора в простейшей системе определяется по формуле:

$$E_{Q*} = \sqrt{\left(U_{c*} + \frac{Q_{c*} (x_{q*} + x_{\text{вн*}})}{U_{c*}} \right)^2 + \left(\frac{P_{c*} (x_{q*} + x_{\text{вн*}})}{U_{c*}} \right)^2}, \text{ о. е.}, \quad (1.3)$$

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

Переходная ЭДС неявнополюсного генератора в простейшей системе определяется по формуле:

$$E'_{q*} = \sqrt{\left(U_{c*} + \frac{Q_{c*} (x'_{d*} + x_{вн*})}{U_{c*}} \right)^2 + \left(\frac{P_{c*} (x'_{d*} + x_{вн*})}{U_{c*}} \right)^2}, \text{ о. е.}, \quad (1.4)$$

где x'_{d*} – переходное сопротивление генератора по продольной оси ротора, о. е.

Электродвижущая сила холостого хода неявнополюсного генератора в простейшей системе определяется по формуле:

$$E_{q*} = E_Q \frac{x_{d*} - x'_{d*}}{x_{q*} - x'_{d*}} - E'_{q*} \frac{x_{d*} - x_{q*}}{x_{q*} - x'_{d*}}, \text{ о. е.} \quad (1.5)$$

Синхронные генераторы с АРВ 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 . ЭДС E'_q определяется по формуле (1.4), а сопротивление x'_d по формуле (1.1).

Синхронные 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 определяется по формуле:

$$U_{г*} = \sqrt{\left(U_{c*} + \frac{Q_{c*} (x'_{d*} + x_{вн*})}{U_{c*}} \right)^2 + \left(\frac{P_{c*} (x'_{d*} + x_{вн*})}{U_{c*}} \right)^2}, \text{ о. е.} \quad (1.6)$$

В расчетах, учитывающих изменение свободных составляющих токов обмоток ротора или статора, синхронные генераторы в начальный момент переходного процесса в схемах замещения представляются сверхпереходной ЭДС E''_q за сверхпереходным сопротивлением генератора x''_d .

Сверхпереходная ЭДС генератора в простейшей системе определяется по формуле:

$$E_{q*}'' = \sqrt{\left(U_{c*} + \frac{Q_{c*} (x_{d*}'' + x_{вн*})}{U_{c*}} \right)^2 + \left(\frac{P_{c*} (x_{d*}'' + x_{вн*})}{U_{c*}} \right)^2}, \text{ о. е.}, \quad (1.7)$$

где x_{d*}'' – сверхпереходное сопротивление генератора по продольной оси ротора, о. е.

1.2. 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 линии в относительных единицах при приближенном приведении определяется по формуле:

$$z_{л*} = (r_0 + jx_0) l \frac{S_6}{U_{ном}^2}, \text{ о. е.}, \quad (1.8)$$

где $U_{ном}$ – номинальное или среднономинальное напряжение линии электропередачи, кВ;

r_0 – удельное активное сопротивление линии, Ом/км;

x_0 – удельное реактивное сопротивление линии, Ом/км;

l – длина линии, км.

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

1.3. Трансформаторы и автотрансформаторы

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

Сопротивление двухобмоточного трансформатора в относительных единицах при приближенном приведении определяется по формуле:

$$x_{тр*} = \frac{U_{к}}{100} \frac{S_6}{S_{ном}}, \text{ о. е.}, \quad (1.9)$$

где $S_{ном}$ – номинальная мощность трансформатора, МВА;

$U_{к}$ – напряжение короткого замыкания трансформатора, %.

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

$$x_{\text{тр}^*}^{\text{в}} = \frac{U_{\text{к(в-с)}} + U_{\text{к(в-н)}} - U_{\text{к(с-н)}}}{100} \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{ном}}}, \text{ о. е.}, \quad (1.10)$$

$$x_{\text{тр}^*}^{\text{с}} = \frac{U_{\text{к(в-с)}} + U_{\text{к(с-н)}} - U_{\text{к(в-н)}}}{100} \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{ном}}}, \text{ о. е.}, \quad (1.11)$$

$$x_{\text{тр}^*}^{\text{н}} = \frac{U_{\text{к(в-н)}} + U_{\text{к(с-н)}} - U_{\text{к(в-с)}}}{100} \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{ном}}}, \text{ о. е.}, \quad (1.12)$$

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

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

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

1.4. Токоограничивающие и шунтирующие реакторы

Токоограничивающие и шунтирующие реакторы в схемах замещения представляются индуктивным сопротивлением $x_{\text{р}}$.

Сопротивление токоограничивающего реактора в относительных единицах при приближенном приведении определяется по формуле:

$$x_{\text{р}^*} = x_{\text{р ном}} \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{ном}}^2}, \text{ о. е.}, \quad (1.13)$$

где $U_{\text{ном}}$ – номинальное или среднономинальное напряжение в месте установки реактора, кВ;

$x_{\text{р ном}}$ – номинальное сопротивление реактора, Ом.

Сопротивление шунтирующего реактора в относительных единицах при приближенном приведении определяется по формуле:

$$x_{\text{р}^*} = \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{ном}}} \frac{U_{\text{ном}}^2}{U_{\text{б}}^2}, \text{ о. е.}, \quad (1.14)$$

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

1.5. Асинхронные двигатели

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

- 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:

$$x_{д*} = \frac{1}{i_{п*}} \frac{S_{\delta}}{S_{НОМ}}, \text{ о. е.}, \quad (1.15)$$

где $S_{НОМ}$ – номинальная полная мощность двигателя определяется по формуле:

$$S_{НОМ} = \frac{P_{НОМ}}{\cos\varphi_{НОМ} \cdot \eta_{НОМ}}, \text{ МВА}, \quad (1.16)$$

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

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

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

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

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

$$P(U, s) = \frac{U^2 R_2 s}{(s x_s)^2 + R_2^2}, \text{ о. е.}, \quad (1.17)$$

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

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

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

Реактивное сопротивление двигателя x_s определяется по формуле:

$$x_s = \frac{U^2}{2 m_{кр}}, \text{ о. е.} \quad (1.18)$$

Активное сопротивление двигателя R_2 определяется путем подставления в формулу (1.17) значения номинального режима $P=1$, $U=1$, $s=s_{\text{ном}}$ и решением квадратного уравнения.

1.6. Синхронные двигатели

Синхронные двигатели в схемах замещения представляются такими же сопротивлениями, как и синхронные генераторы. Имеются различия – синхронные двигатели могут длительно работать как в режиме недовозбуждения (ток возбуждения меньше номинального), так и перевозбуждения (ток возбуждения больше номинального значения).

ЭДС недовозбужденного двигателя E_q меньше подведенного напряжения, и он потребляет реактивную мощность. ЭДС перевозбужденного двигателя E_q больше подведенного напряжения, и любое снижение напряжения приводит к увеличению реактивного тока.

ЭДС двигателя E_q рассчитывается по формуле:

$$E_q = \sqrt{(U \pm I_p x_d)^2 + (I_a x_d)^2}, \text{ о. е.}, \quad (1.19)$$

где I_a , I_p – активный и реактивный токи синхронного двигателя, о. е.

В формуле (1.19) знак «+» соответствует режиму перевозбуждения, знак «-» – недовозбуждения.

1.7. Нагрузка

Нагрузка – это потребители электрической энергии, преобразующие ее в другие виды (тепловую, механическую, световую и т. д.). 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:

$$z_{\text{н*}} = r_{\text{н*}} + jx_{\text{н*}} = \frac{U_{\text{н*}}^2}{S_{\text{н*}}} (\cos \varphi_{\text{н}} + j \sin \varphi_{\text{н}}), \text{ о. е.}, \quad (1.20)$$

где S_{H*} – полная мощность нагрузки в относительных единицах;

$\cos\varphi_H$ – 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 формулам:

$$r_{H*} = \frac{U_{H*}^2}{P_{H*}}, \text{ о. е.}, \quad (1.21)$$

$$x_{H*} = \frac{U_{H*}^2}{Q_{H*}}, \text{ о. е.} \quad (1.22)$$

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

Статические характеристики нагрузки по напряжению могут быть получены: 1) из натурального эксперимента; 2) из расчета с детальным учетом состава нагрузки; 3) на основании статистических данных. Часто при проведении расчетов переходных процессов трудно определить состав нагрузок и их достоверные параметры. В этом случае используются типовые характеристики комплексной нагрузки. При отсутствии конкретных данных рекомендуется принимать следующие характеристики комплексной нагрузки:

– для активной нагрузки в среднем

$$P_{H*} \approx U_{*}, \text{ о. е.}, \quad (1.23)$$

с диапазоном изменения

$$P'_{H*} = 0,6 + 0,4U_{*}, \text{ о. е.}, \quad (1.24)$$

$$P''_{H*} = -0,4 + 1,4U_{*}, \text{ о. е.}; \quad (1.25)$$

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

$$Q_{H*} = \frac{4,15}{\text{tg } \varphi_H} - \frac{9,5}{\text{tg } \varphi_H} U_{*} + \left(\frac{5,6}{\text{tg } \varphi_H} + 1 \right) U_{*}^2, \text{ о. е.}, \quad (1.26)$$

с диапазоном изменения

$$Q'_{H*} = \frac{5,6}{\operatorname{tg} \varphi_H} - \frac{11,2}{\operatorname{tg} \varphi_H} U_* + \left(\frac{5,6}{\operatorname{tg} \varphi_H} + 1 \right) U_*^2, \text{ о. е.}, \quad (1.27)$$

$$Q''_{H*} = \frac{3,35}{\operatorname{tg} \varphi_H} - \frac{8,9}{\operatorname{tg} \varphi_H} U_* + \left(\frac{5,6}{\operatorname{tg} \varphi_H} + 1 \right) U_*^2, \text{ о. е.} \quad (1.28)$$

Пример 1

Рассмотрим схему электропередачи, в которой генератор работает через трансформатор и двухцепную линию электропередачи на шины приемной системы бесконечной мощности (рис. 1.1). Напряжение приемной станции U можно считать неизменным по абсолютному значению и фазе при любых условиях работы электропередачи.



Рис. 1.1. Схема к примеру 1

Исходные данные:

– генератор: $P_{\text{ном}} = 100 \text{ МВт}$; $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,8$; $x'_d = 0,278$; $U_{\text{ном}} = 10,5 \text{ кВ}$; $x_d = 1,907$; $T_j = 6,7 \text{ с}$;

– трансформатор Т1: $S_{\text{ном}} = 160 \text{ МВА}$; $U_{\text{ном}} = 11/230 \text{ кВ}$; $U_K = 11 \%$;

– линия: $x_0 = 0,4 \text{ Ом/км}$; $L = 300 \text{ км}$;

– трансформатор Т2: $S_{\text{ном}} = 200 \text{ МВА}$; $U_{\text{ном}} = 230/110 \text{ кВ}$; $U_K = 11 \%$;

– передаваемая мощность $P_c = 80 \text{ МВт}$ и $Q_c = 30 \text{ Мвар}$.

Определить все сопротивления схемы замещения и ЭДС генератора в случае:

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

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

Принимаем базисные условия:

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

Напряжение системы в относительных единицах равно:

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

Передаваемая активная мощность в относительных единицах равна:

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

Передаваемая реактивная мощность в относительных единицах равна:

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

Сопротивление генератора в относительных единицах без учета АРВ:

$$x_{Г*} = x_d \cdot \frac{S_6}{P_{НОМ}/\cos\varphi} = 1,907 \cdot \frac{80}{100/0,8} = 1,220.$$

Сопротивление трансформатора Т1 в относительных единицах равно:

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

Сопротивление линии в относительных единицах равно:

$$x_{л*} = 0,5 \cdot x_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_H^2} = 0,5 \cdot 0,4 \cdot 300 \cdot \frac{80}{230^2} = 0,091.$$

Сопротивление трансформатора Т2 в относительных единицах равно:

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

Результирующее сопротивление системы без учета АРВ:

$$x_{\Sigma 1} = x_{Г*} + x_{Т1*} + x_{л*} + x_{Т2*} = 1,220 + 0,055 + 0,091 + 0,044 = 1,410.$$

Синхронная ЭДС генератора:

$$E_q = \sqrt{\left(U_{c*} + \frac{Q_{c*} \cdot x_{\Sigma 1}}{U_{c*}} \right)^2 + \left(\frac{P_{c*} \cdot x_{\Sigma 1}}{U_{c*}} \right)^2} = \sqrt{\left(1 + \frac{0,375 \cdot 1,41}{1} \right)^2 + \left(\frac{1 \cdot 1,41}{1} \right)^2} = 2,08.$$

Сопротивление генератора в относительных единицах при АРВ пропорционального типа равно:

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

Результирующее сопротивление системы при АРВ пропорционального типа:

$$x_{\Sigma 2} = x_{Г*} + x_{Т1*} + x_{Л*} + x_{Т2*} = 0,178 + 0,055 + 0,091 + 0,044 = 0,368.$$

Переходная ЭДС генератора:

$$E'_q = \sqrt{\left(1 + \frac{0,375 \cdot 0,368}{1}\right)^2 + \left(\frac{1 \cdot 0,368}{1}\right)^2} = 1,20.$$

Результирующее сопротивление системы при АРВ сильного действия:

$$x_{\Sigma 3} = x_{Т1*} + x_{Л*} + x_{Т2*} = 0,055 + 0,091 + 0,044 = 0,19.$$

Напряжение генератора:

$$U_{Г} = \sqrt{\left(1 + \frac{0,375 \cdot 0,19}{1}\right)^2 + \left(\frac{1 \cdot 0,19}{1}\right)^2} = 1,084.$$

Пример 2

Определить все сопротивления схемы замещения и ЭДС генератора в нормальном режиме и при включении нагрузки (рис. 1.2). На генераторе установлен АРВ пропорционального типа. Считаем, что переходная ЭДС генератора не изменяется во время переходного процесса. Нагрузку в схеме замещения представить в виде полного сопротивления.

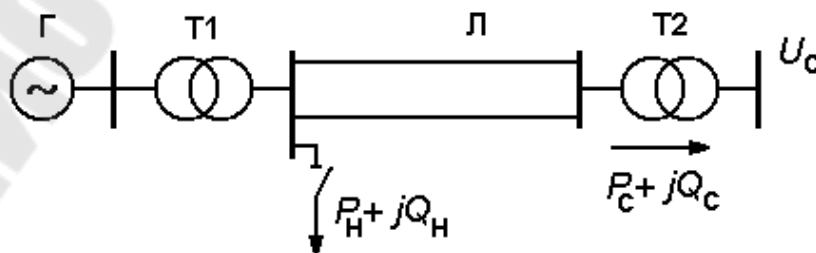


Рис. 1.2. Схема к примеру 2

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; $U_K = 11$ %;

– нагрузка: $P_H = 16$ МВт; $Q_H = 10$ Мвар;

– передаваемая мощность $P_C = 80$ МВт и $Q_C = 30$ Мвар.

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

Принимаем базисные условия:

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

Напряжение системы в относительных единицах равно:

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

Передаваемая активная мощность в относительных единицах равна:

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

Передаваемая реактивная мощность в относительных единицах равна:

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

Активная мощность нагрузки в относительных единицах равна:

$$P_{H*} = 16/80 = 0,2.$$

Реактивная мощность нагрузки в относительных единицах равна:

$$Q_{H*} = 10/80 = 0,125.$$

Сопротивление генератора в относительных единицах при АРВ пропорционального типа равно:

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

Сопروتивление трансформатора Т1 в относительных единицах равно:

$$x_{T1*} = \frac{U_k}{100} \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{S_{\text{НОМ}}} = \frac{11}{100} \cdot \frac{80}{160} = 0,055.$$

Сопротивление линии в относительных единицах равно:

$$x_{л*} = 0,5 \cdot x_0 \cdot l \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{U_{\text{НОМ}}^2} = 0,5 \cdot 0,4 \cdot 300 \cdot \frac{80}{230^2} = 0,091.$$

Сопротивление трансформатора Т2 в относительных единицах равно:

$$x_{T2*} = \frac{U_k}{100} \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{S_{\text{НОМ}}} = \frac{11}{100} \cdot \frac{80}{200} = 0,044.$$

Результирующее сопротивление системы при АРВ пропорционального типа:

$$x_{\Sigma 1*} = x_{Г*} + x_{T1*} + x_{л*} + x_{T2*} = 0,178 + 0,055 + 0,091 + 0,044 = 0,368.$$

Переходная ЭДС генератора:

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

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

$$U_{1*} = \sqrt{\left(1 + \frac{0,375(0,091 + 0,044)}{1}\right)^2 + \left(\frac{1(0,091 + 0,044)}{1}\right)^2} = 1,06.$$

Активное сопротивление нагрузки:

$$R_{Н*} = \frac{U_1^2}{P_{Н*}} = \frac{1,06^2}{0,2} = 5,62.$$

Реактивное сопротивление нагрузки:

$$X_{Н*} = \frac{U_1^2}{Q_{Н*}} = \frac{1,06^2}{0,125} = 8,99.$$

Определяем полное сопротивление нагрузки с учетом последовательного соединения активного и реактивного сопротивлений:

$$Z_{H*} = \frac{j8,99 \cdot 5,61}{j8,99 + 5,61} = 4,041 + j2,526 = 4,766 e^{j32,0^\circ}.$$

Определяем собственное сопротивление схемы замещения для режима включенной нагрузки:

$$\begin{aligned} Z_{11} &= j(0,178 + 0,055) + \frac{j(0,091 + 0,044) \cdot (4,041 + j2,526)}{j(0,091 + 0,044) + (4,041 + j2,526)} = \\ &= 0,003 + j0,366 = 0,366 e^{j89,5^\circ}. \end{aligned}$$

Определяем взаимное сопротивление схемы замещения для режима включенной нагрузки:

$$\begin{aligned} Z_{12} &= j0,368 + \frac{j(0,091 + 0,044)j(0,178 + 0,055)}{5,61} = \\ &= -0,006 + j0,368 = 0,368 e^{j90,9^\circ}. \end{aligned}$$

Характеристика мощности генератора для режима включенной нагрузки определяется уравнением:

$$\begin{aligned} P_2 &= (E'_q)^2 \frac{1}{|Z_{11}|} \cdot \sin \alpha_{11} + (E'_q) \frac{U_{c*}}{|Z_{12}|} \cdot \sin(\delta - \alpha_{12}) = 1,196^2 \frac{1}{0,368} \cdot \sin 0,5^\circ + \\ &+ 1,196 \frac{1}{0,368} \cdot \sin(\delta + 0,9^\circ) = 0,028 + 3,25 \cdot \sin(\delta + 0,9^\circ). \end{aligned}$$

Предел передаваемой мощности при включенной нагрузке:

$$P_{m2} = 0,028 + 3,25 = 3,278.$$

Коэффициент запаса статической устойчивости при отключении одной цепи линии:

$$k_{32} = \frac{3,278 - 1}{1} = 2,278.$$

По анализу характеристик мощности генератора в двух режимах P_1 и P_2 видно, что включение активных сопротивлений в схему замещения смещает характеристику мощности генератора вверх и влево.

2. СТАТИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ПРОСТЕЙШЕЙ СИСТЕМЫ

При анализе статической устойчивости простейшей системы необходимо определить предельную передаваемую мощность по линиям, коэффициенты запаса по напряжению и 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 .

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

$$P_*(\delta) = \frac{E_* U_{c*}}{x_{d\Sigma*}} \sin \delta, \text{ о. е.}, \quad (2.1)$$

где E_* – ЭДС генератора, определяемая по формулам (1.2), (1.5), (1.6) в зависимости от наличия и вида АРВ.

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

$$P_*(\delta) = \frac{E_{q*} U_{c*}}{x_{d\Sigma*}} \sin \delta + \frac{U_{c*}^2}{2} \frac{x_d - x_q}{x_d x_q} \sin 2\delta, \text{ о. е.} \quad (2.2)$$

Характеристика мощности явнополюсного генератора кроме основной синусоидальной составляющей содержит вторую составляющую – синусоиду двойной частоты, амплитуда которой пропорциональна разности индуктивных сопротивлений x_d и x_q .

Характеристика выдачи генератором реактивной мощности от угла δ определяется по формуле:

$$Q_*(\delta) = \frac{E_* U_{c*}}{x_{d\Sigma*}} \cos \delta - \frac{U_{c*}^2}{x_{d\Sigma*}}, \text{ о. е.} \quad (2.3)$$

При наличии на генераторе АРВ пропорционального типа в начальный момент переходного процесса задаются постоянством результирующего потокосцепления. Поэтому в расчетах генератор учитывается переходной ЭДС E'_q и переходным сопротивлением x'_d .

Угловая характеристика $P(\delta)$ явнополюсного генератора с АРВ пропорционального типа равна:

$$P_*(\delta) = \frac{E'_{q*} U_{c*}}{x'_{d\Sigma*}} \sin \delta + \frac{U_{c*}^2}{2} \frac{x_d - x'_d}{x_d x'_d} \sin 2\delta, \text{ о. е.} \quad (2.4)$$

При наличии на генераторе АРВ сильного действия в начальный момент переходного процесса задаются постоянством напряжения на выводах генератора. Поэтому в расчетах генератор учитывается ЭДС, равной U_r и подключенной к шинам генераторного напряжения.

Угловая характеристика $P(\delta)$ генератора с АРВ сильного действия равна:

$$P_*(\delta) = \frac{U_{r*} U_{c*}}{x_{\Sigma*}} \sin \delta, \text{ о. е.} \quad (2.5)$$

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.

Пример 3

Рассмотрим схему электропередачи, в которой генератор работает через трансформатор и двухцепную линию электропередачи на шины приемной системы бесконечной мощности (рис. 2.1). Напряжение приемной станции U можно считать неизменной по абсолютному значению и фазе при любых условиях работы электропередачи.

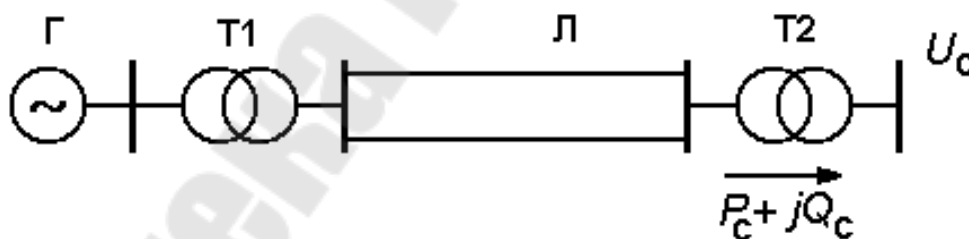


Рис. 2.1. Схема к примеру 3

Исходные данные:

- генератор: $P_{\text{ном}} = 100$ МВт; $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,8$; $x'_d = 0,278$; $U_{\text{ном}} = 10,5$ кВ; $x_d = 1,907$; $T_j = 6,7$ 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.

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.

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

Принимаем базисные условия:

$$S_6 = 80 \text{ МВТ}, \quad U_6 = 110 \text{ кВ}.$$

Напряжение системы в относительных единицах равно:

$$U_{c*} = 110/110 = 1.$$

Передаваемая активная мощность в относительных единицах равна:

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

Передаваемая реактивная мощность в относительных единицах равна:

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

Сопротивление генератора в относительных единицах без учета АРВ:

$$x_{Г*} = x_d \frac{U_{НОМ}^2}{P_{НОМ} / \cos\varphi} \cdot \frac{S_6}{U_6^2} \cdot K_{Т1} \cdot K_{Т2} = 1,907 \frac{10,5^2}{100/0,8} \cdot \frac{80}{110^2} \cdot \frac{230^2}{11^2} \cdot \frac{110^2}{230^2} = 1,112.$$

Сопротивление трансформатора Т1 в относительных единицах равно:

$$x_{Т1*} = \frac{U_k}{100} \cdot \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}} \cdot \frac{S_6}{U_6^2} K_{Т1} \cdot K_{Т2} = \frac{11}{100} \cdot \frac{11^2}{160} \cdot \frac{80}{110^2} \cdot \frac{230^2}{11^2} \cdot \frac{110^2}{230^2} = 0,055.$$

Сопротивление линии в относительных единицах равно:

$$x_{л*} = 0,5 \cdot x_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_6^2} \cdot K_{Т2} = 0,5 \cdot 0,4 \cdot 300 \cdot \frac{80}{110^2} \cdot \frac{110^2}{230^2} = 0,091.$$

Сопrotивление трансформатора T2 в относительных единицах равно:

$$x_{T2*} = \frac{U_K}{100} \cdot \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}} \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{\delta}^2} K_{T2} = \frac{11}{100} \cdot \frac{230^2}{200} \cdot \frac{80}{110^2} \cdot \frac{110^2}{230^2} = 0,044.$$

Результирующее сопротивление системы без учета АРВ:

$$x_{\Sigma 1} = x_{\Gamma*} + x_{T1*} + x_{Л*} + x_{T2*} = 1,112 + 0,055 + 0,091 + 0,044 = 1,302.$$

Синхронная ЭДС генератора:

$$E_q = \sqrt{\left(U_{c*} + \frac{Q_{c*} \cdot x_{\Sigma 1}}{U_{c*}} \right)^2 + \left(\frac{P_{c*} \cdot x_{\Sigma 1}}{U_{c*}} \right)^2} = \sqrt{\left(1 + \frac{0,375 \cdot 1,302}{1} \right)^2 + \left(\frac{1 \cdot 1,302}{1} \right)^2} = 1,391.$$

Предел передаваемой мощности без учета АРВ:

$$P_{m1} = \frac{E_q \cdot U_{c*}}{x_{\Sigma 1}} = \frac{1,391 \cdot 1}{1,302} = 1,068. \quad (2.6)$$

Коэффициент запаса статической устойчивости без учета АРВ:

$$k_{31} = \frac{P_{m1} - P_{c*}}{P_{c*}} = \frac{1,068 - 1}{1} = 0,068. \quad (2.7)$$

Сопrotивление генератора в относительных единицах при АРВ пропорционального типа равно:

$$x_{\Gamma*} = x'_d \cdot \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{P_{\text{НОМ}} / \cos \varphi} \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{\delta}^2} \cdot K_{T1} \cdot K_{T2} = 0,278 \cdot \frac{10,5^2}{100/0,8} \cdot \frac{80}{110^2} \cdot \frac{230^2}{11^2} \cdot \frac{110^2}{230^2} = 0,162.$$

Результирующее сопротивление системы при АРВ пропорционального типа:

$$x_{\Sigma 2} = x_{\Gamma*} + x_{T1*} + x_{Л*} + x_{T2*} = 0,162 + 0,055 + 0,091 + 0,044 = 0,352.$$

Переходная ЭДС генератора:

$$E'_q = \sqrt{\left(U_{c*} + \frac{Q_{c*} \cdot x_{\Sigma 2}}{U_{c*}} \right)^2 + \left(\frac{P_{c*} \cdot x_{\Sigma 2}}{U_{c*}} \right)^2} = \sqrt{\left(1 + \frac{0,375 \cdot 0,352}{1} \right)^2 + \left(\frac{1 \cdot 0,352}{1} \right)^2} = 1,185.$$

Предел передаваемой мощности при АРВ пропорционального типа:

$$P_{m2} = \frac{E_q \cdot U_{c*}}{x_{\Sigma 2}} = \frac{1,185 \cdot 1}{0,352} = 3,366.$$

Коэффициент запаса статической устойчивости при АРВ пропорционального типа:

$$k_{32} = \frac{P_{m2} - P_{c*}}{P_{c*}} = \frac{3,366 - 1}{1} = 2,366.$$

Результирующее сопротивление системы при АРВ сильного действия:

$$x_{\Sigma 3} = x_{T1*} + x_{л*} + x_{T2*} = 0,055 + 0,091 + 0,044 = 0,190.$$

Напряжение генератора:

$$U_{\Gamma} = \sqrt{\left(U_{c*} + \frac{Q_{c*} \cdot x_{\Sigma 3}}{U_{c*}} \right)^2 + \left(\frac{P_{c*} \cdot x_{\Sigma 3}}{U_{c*}} \right)^2} = \sqrt{\left(1 + \frac{0,375 \cdot 0,19}{1} \right)^2 + \left(\frac{1 \cdot 0,19}{1} \right)^2} = 1,084.$$

Предел передаваемой мощности при АРВ пропорционального типа:

$$P_{m3} = \frac{U_{\Gamma} \cdot U_{c*}}{x_{\Sigma 2}} = \frac{1,084 \cdot 1}{0,19} = 5,705.$$

Коэффициент запаса статической устойчивости при АРВ сильного действия:

$$k_{33} = \frac{P_{m3} - P_{c*}}{P_{c*}} = \frac{5,705 - 1}{1} = 4,705.$$

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, результи-

рующего 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 (рис. 2.2):

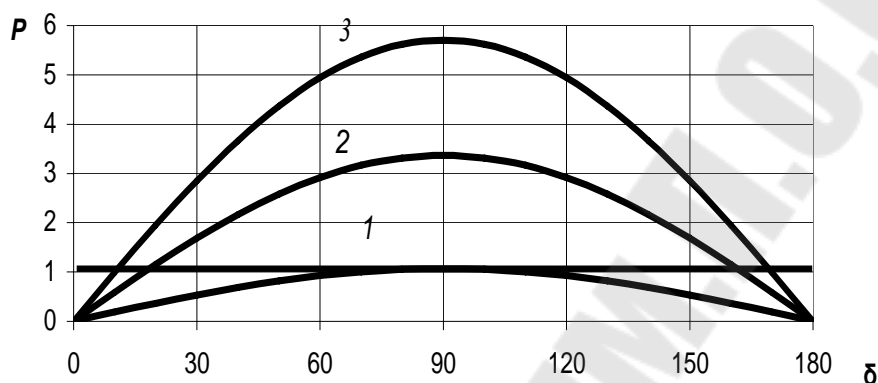


Рис. 2.2. Зависимости активной мощности от угла δ

Из рисунка видно, что генератор без АРВ будет работать на пределе передаваемой мощности (график 1). Любой возмущающий фактор выведет генератор из синхронизма. График 2 и 3 показывает, что АРВ резко повышают статическую устойчивость данной схемы электропередачи.

Пример 4

Рассмотрим влияние отключения одной цепи линии на предел передаваемой мощности и коэффициент запаса статической устойчивости при АРВ пропорционального типа (рис. 2.3). Построим угловые характеристики.

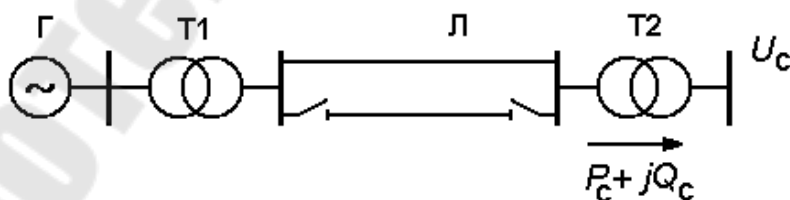


Рис. 2.3. Схема к примеру 4

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; $U_{\text{к}} = 11$ %;

- линия: $x_0 = 0,4$ Ом/км; $L = 300$ км;
- трансформатор Т2: $S_{\text{НОМ}} = 200$ МВА; $U_{\text{НОМ}} = 230/110$ кВ; $U_{\text{к}} = 11$ %;
- передаваемая мощность $P_c = 80$ МВт и $Q_c = 30$ Мвар.

Расчет будем проводить, используя приближенное приведение элементов схемы замещения в относительных единицах, используя средние номинальные напряжения (340; 230; 115; 37; 24; 20; 18; 15,75; 13,8; 10,5; 6,3; 0,69; 0,525; 0,4; 0,23 кВ).

Принимаем базисные условия:

$$S_{\text{б}} = 80 \text{ МВт}, \quad U_{\text{б}} = 115 \text{ кВ}.$$

Напряжение системы в относительных единицах равно:

$$U_{\text{с}*} = 115/115 = 1.$$

Передаваемая активная мощность в относительных единицах равна:

$$P_{\text{с}*} = 80/80 = 1.$$

Передаваемая реактивная мощность в относительных единицах равна:

$$Q_{\text{с}*} = 30/80 = 0,375.$$

Сопротивление генератора в относительных единицах при АРВ пропорционального типа равно:

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

Сопротивление трансформатора Т1 в относительных единицах равно:

$$x_{\text{Т1}*} = \frac{U_{\text{к}}}{100} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{НОМ}}} = \frac{11}{100} \cdot \frac{80}{160} = 0,055.$$

Сопротивление линии в относительных единицах равно:

$$x_{\text{Л}*} = 0,5 \cdot x_0 \cdot l \cdot \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{НОМ}}^2} = 0,5 \cdot 0,4 \cdot 300 \cdot \frac{80}{230^2} = 0,091.$$

Сопrotивление трансформатора T2 в относительных единицах равно:

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

Результирующее сопротивление системы при APB пропорционального типа:

$$x_{\Sigma 1} = x_{T*} + x_{T1*} + x_{л*} + x_{T2*} = 0,178 + 0,055 + 0,091 + 0,044 = 0,368.$$

Переходная ЭДС генератора:

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

Предел передаваемой мощности при APB пропорционального типа:

$$P_{m1} = \frac{1,196 \cdot 1}{0,368} = 3,25.$$

Коэффициент запаса статической устойчивости при APB пропорционального типа:

$$k_{z1} = \frac{3,25 - 1}{1} = 2,25.$$

Результирующее сопротивление системы при отключении одной цепи линии:

$$x_{\Sigma 2} = 0,178 + 0,055 + 2 \cdot 0,091 + 0,044 = 0,459.$$

Переходная ЭДС генератора при отключении одной цепи линии:

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

Предел передаваемой мощности при отключении одной цепи линии:

$$P_{m2} = \frac{1,259 \cdot 1}{0,459} = 2,743.$$

Коэффициент запаса статической устойчивости при отключении одной цепи линии:

$$k_{32} = \frac{2,743 - 1}{1} = 1,743.$$

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

По результатам расчета построим две угловые характеристики и мощность, отдаваемую турбиной (рис. 2.4).

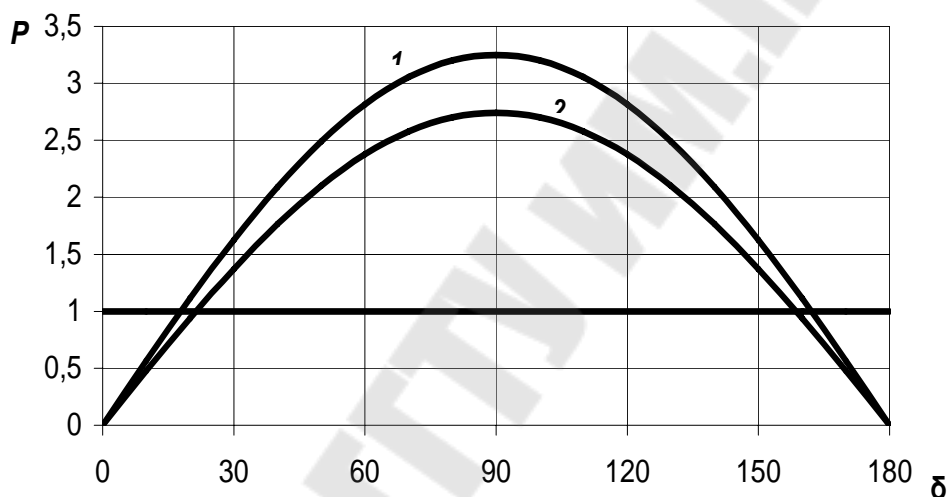


Рис. 2.4. Зависимости активной мощности от угла δ

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 5

Рассмотрим переходной процесс изменения угла δ во времени при отключении одной цепи линии (рис. 2.5). На генераторе установлен АРВ пропорционального типа. Считаем, что переходная ЭДС генератора не изменяется во время процесса, а также не учитываем влияние демпферных обмоток и пренебрегаем потерями мощности во вращательной системе.

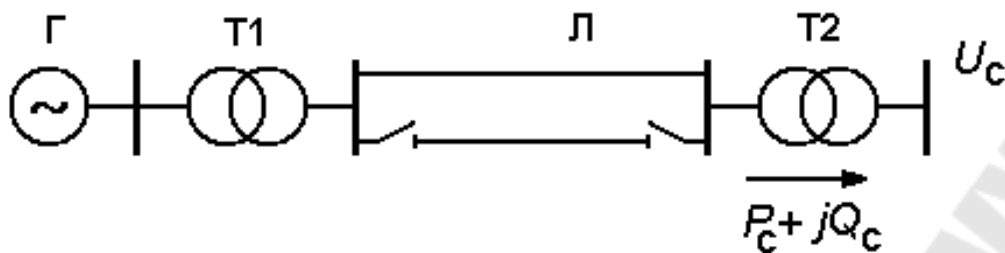


Рис. 2.5. Схема к примеру 5

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.

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

Принимаем базисные условия:

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

Напряжение системы в относительных единицах равно:

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

Передаваемая активная мощность в относительных единицах равна:

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

Передаваемая реактивная мощность в относительных единицах равна:

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

Сопротивление генератора в относительных единицах при АРВ пропорционального типа равно:

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

Сопrotивление трансформатора T1 в относительных единицах равно:

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

Сопrotивление линии в относительных единицах равно:

$$x_{л*} = 0,5 \cdot x_0 \cdot l \cdot \frac{S_{\sigma}}{U_{\text{НОМ}}^2} = 0,5 \cdot 0,4 \cdot 300 \cdot \frac{80}{230^2} = 0,091.$$

Сопrotивление трансформатора T2 в относительных единицах равно:

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

Результирующее сопротивление системы при APB пропорционального типа:

$$x_{\Sigma 1} = x_{Г*} + x_{T1*} + x_{л*} + x_{T2*} = 0,178 + 0,055 + 0,091 + 0,044 = 0,368.$$

Переходная ЭДС генератора:

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

Предел передаваемой мощности при APB пропорционального типа:

$$P_{m1} = \frac{1,196 \cdot 1}{0,368} = 3,25.$$

Коэффициент запаса статической устойчивости при APB пропорционального типа:

$$k_{31} = \frac{3,25 - 1}{1} = 2,25.$$

Результирующее сопротивление системы при отключении одной цепи линии:

$$x_{\Sigma 2} = 0,178 + 0,055 + 2 \cdot 0,091 + 0,044 = 0,459.$$

Предел передаваемой мощности при отключении одной цепи линии:

$$P_{m2} = \frac{1,196 \cdot 1}{0,459} = 2,606.$$

Коэффициент запаса статической устойчивости при отключении одной цепи линии:

$$k_{32} = \frac{2,606 - 1}{1} = 1,606.$$

Угловые характеристики двух режимов аналогичны характеристикам на рис. 2.4. Точка устойчивого равновесия на графике 1 переместится в ходе переходного процесса на график 2. Относительное движение ротора генератора определяется дифференциальным уравнением второго порядка:

$$T_{j*} \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_{c*} - P_{m*} \sin \delta. \quad (2.8)$$

Приведем электромеханическую постоянную времени к базисным условиям:

$$T_{j*} = T_j \cdot \frac{P_{\text{ном}} / \cos \varphi_{\text{ном}}}{S_{\text{б}}} = 6,7 \cdot \frac{100 / 0,8}{80} = 10,5, \text{ с.} \quad (2.9)$$

Решаем дифференциальное уравнение методом последовательных интервалов. Длительность расчетного интервала Δt принимаем равной 0,05 с.

Определяем начальный угол:

$$\delta_0 = \arcsin(1/3,25) = 17,92^\circ.$$

Определяем вспомогательный коэффициент k :

$$k = \frac{360 \cdot f \cdot \Delta t^2}{T_{j*}} = \frac{360 \cdot 50 \cdot 0,05^2}{10,5} = 4,29. \quad (2.10)$$

Электрическая мощность, отдаваемая генератором в первый момент времени после отключения одной цепи, уменьшается до величины

$$P_{(0)} = P_{m2} \cdot \sin \delta_0 = 2,606 \cdot \sin 17,92^\circ = 0,802 .$$

Избыток мощности в начале первого интервала:

$$\Delta P_{(0)} = P_{c*} - P_{(0)} = 1 - 0,802 = 0,198 .$$

Приращение угла в течение первого интервала времени:

$$\Delta \delta_{(1)} = k \cdot \frac{\Delta P_{(0)}}{2} = 4,29 \cdot \frac{0,198}{2} = 0,42^\circ .$$

Значение угла к концу первого или началу второго интервала времени:

$$\delta_{(1)} = \delta_{(0)} + \Delta \delta_{(1)} = 17,92 + 0,42 = 18,34^\circ .$$

Электрическая мощность, отдаваемая генератором в начале второго интервала времени:

$$P_{(1)} = P_{m2} \cdot \sin \delta_{(1)} = 2,606 \cdot \sin 18,34^\circ = 0,820 .$$

Избыток мощности в начале второго интервала:

$$\Delta P_{(1)} = P_{c*} - P_{(1)} = 1 - 0,820 = 0,180 .$$

Приращение угла в течение второго интервала времени:

$$\Delta \delta_{(2)} = \Delta \delta_{(1)} + k \cdot \Delta P_{(1)} = 0,42 + 4,29 \cdot 0,180 = 1,19^\circ .$$

Значение угла к концу второго интервала времени:

$$\delta_{(2)} = \delta_{(1)} + \Delta \delta_{(2)} = 18,34 + 1,19 = 19,53^\circ .$$

Далее повторяем расчет как для второго интервала до момента времени, равного 1,5 с. Результаты расчета сведем в таблицу 2.1.

Таблица 2.1

Результаты расчета угла δ от времени

t, c	$\delta, \text{град.}$	$P, \text{о. е.}$	$\Delta P, \text{о. е.}$	$\Delta\delta, \text{град.}$
0	17,92	0,802	0,198	0,42
0,05	18,34	0,820	0,180	1,19
0,1	19,53	0,871	0,129	1,74
0,15	21,27	0,945	0,055	1,98
0,2	23,25	1,029	-0,029	1,86
0,25	25,11	1,106	-0,106	1,41
0,3	26,52	1,164	-0,164	0,71
0,35	27,23	1,192	-0,192	-0,11
0,4	27,12	1,188	-0,188	-0,92
0,45	26,20	1,151	-0,151	-1,57
0,5	24,63	1,086	-0,086	-1,94
0,55	22,69	1,005	-0,005	-1,96
0,6	20,73	0,922	0,078	-1,63
0,65	19,10	0,853	0,147	-1,00
0,7	18,10	0,810	0,190	-0,18
0,75	17,92	0,802	0,198	0,67
0,8	18,59	0,831	0,169	1,40
0,85	19,99	0,891	0,109	1,87
0,9	21,86	0,970	0,030	2,00
0,95	23,86	1,054	-0,054	1,77
1	25,63	1,127	-0,127	1,23
1,05	26,86	1,177	-0,177	0,47
1,1	27,33	1,196	-0,196	-0,37
1,15	26,96	1,181	-0,181	-1,15
1,2	25,81	1,135	-0,135	-1,73
1,25	24,08	1,063	-0,063	-2,00
1,3	22,08	0,980	0,020	-1,91
1,35	20,17	0,899	0,101	-1,48
1,4	18,69	0,835	0,165	-0,77
1,45	17,92	0,802	0,198	0,08
1,5	18,00	0,805	0,195	0,92

Вследствие наличия активных потерь после нескольких колебаний с затухающей амплитудой установится новый режим, соответствующий углу:

$$\delta'_0 = \arcsin(1/2,606) = 22,56^\circ .$$

Построим график зависимости угла δ от времени (рис. 2.6).

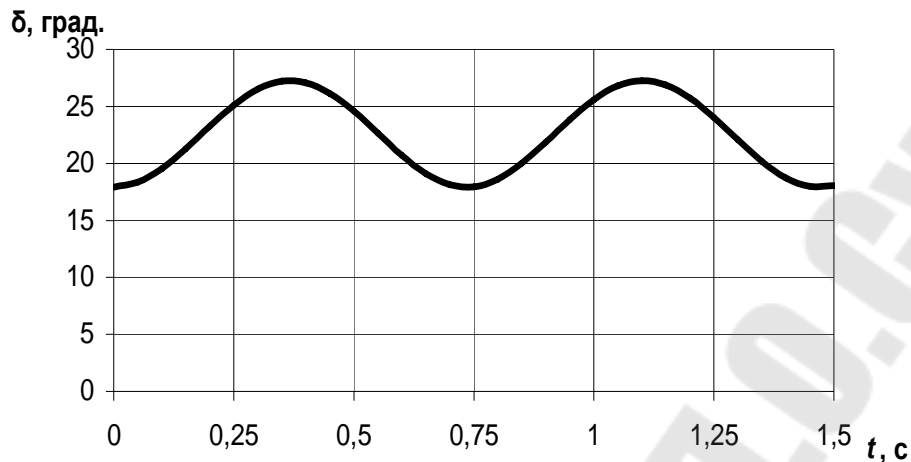


Рис. 2.6. Зависимость угла δ от времени при отключении цепи линии

Пример 6

Определим характеристики мощности в нормальном режиме и при включении активной нагрузки (рис. 2.7). На генераторе установлен АРВ пропорционального типа. Считаем, что переходная ЭДС генератора не изменяется во время переходного процесса. Нагрузку в схеме замещения представить в виде активного сопротивления.

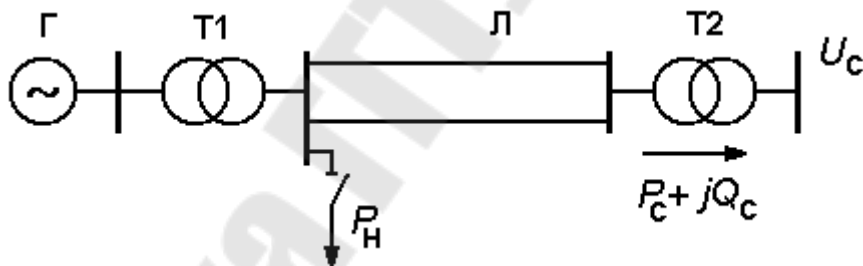


Рис. 2.7. Схема к примеру 6

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; $U_k = 11$ %;

– нагрузка: $P_{\text{н}} = 16$ МВт;

– передаваемая мощность $P_c = 80$ МВт и $Q_c = 30$ Мвар.

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

Принимаем базисные условия:

$$S_{\sigma} = 80 \text{ МВТ}, \quad U_{\sigma} = 115 \text{ кВ}.$$

Напряжение системы в относительных единицах равно:

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

Передаваемая активная мощность в относительных единицах равна:

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

Передаваемая реактивная мощность в относительных единицах равна:

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

Активная мощность нагрузки в относительных единицах равна:

$$P_{c*} = 16/80 = 0,2.$$

Сопротивление генератора в относительных единицах при АРВ пропорционального типа равно:

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

Сопротивление трансформатора Т1 в относительных единицах равно:

$$x_{Т1*} = \frac{U_{\text{к}}}{100} \cdot \frac{S_{\sigma}}{S_{\text{НОМ}}} = \frac{11}{100} \cdot \frac{80}{160} = 0,055.$$

Сопротивление линии в относительных единицах равно:

$$x_{\text{Л}*} = 0,5 \cdot x_0 \cdot L \cdot \frac{S_{\sigma}}{U_{\text{НОМ}}^2} = 0,5 \cdot 0,4 \cdot 300 \cdot \frac{80}{230^2} = 0,091.$$

Сопротивление трансформатора Т2 в относительных единицах равно:

$$x_{Т2*} = \frac{U_{\text{к}}}{100} \cdot \frac{S_{\sigma}}{S_{\text{НОМ}}} = \frac{11}{100} \cdot \frac{80}{200} = 0,044.$$

Результирующее сопротивление системы при АРВ пропорционального типа:

$$x_{\Sigma 1} = x_{\Gamma_*} + x_{\Gamma 1_*} + x_{л_*} + x_{T 2_*} = 0,178 + 0,055 + 0,091 + 0,044 = 0,368.$$

Переходная ЭДС генератора:

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

Предел передаваемой мощности при АРВ пропорционального типа:

$$P_{m1} = \frac{1,196 \cdot 1}{0,368} = 3,25.$$

Характеристика мощности генератора для нормального режима определяется уравнением:

$$P_1 = 3,25 \cdot \sin \delta.$$

Коэффициент запаса статической устойчивости при АРВ пропорционального типа для нормального режима:

$$k_{31} = \frac{3,25 - 1}{1} = 2,25.$$

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

$$U_1 = \sqrt{\left(1 + \frac{0,375(0,091 + 0,044)}{1}\right)^2 + \left(\frac{1(0,091 + 0,044)}{1}\right)^2} = 1,059.$$

Сопротивление нагрузки:

$$R_{н} = \frac{U_1^2}{P_{н*}} = \frac{1,059^2}{0,2} = 5,61.$$

Определяем собственное сопротивление схемы замещения для режима включенной нагрузки:

$$Z_{11} = j(0,178 + 0,055) + \frac{j(0,091 + 0,044)5,61}{j(0,091 + 0,044) + 5,61} =$$

$$= 0,003 + j0,368 = 0,368 e^{j89,5^\circ}.$$

Определяем взаимное сопротивление схемы замещения для режима включенной нагрузки:

$$Z_{12} = j0,368 + \frac{j(0,091 + 0,044)j(0,178 + 0,055)}{5,61} =$$

$$= -0,006 + j0,368 = 0,368e^{j90,9^\circ}.$$

Характеристика мощности генератора для режима включенной нагрузки определяется уравнением:

$$P_2 = (E'_q)^2 \frac{1}{|Z_{11}|} \cdot \sin \alpha_{11} + (E'_q) \frac{U_{c*}}{|Z_{12}|} \cdot \sin(\delta - \alpha_{12}) = 1,196^2 \frac{1}{0,368} \cdot \sin 0,5^\circ +$$

$$+ 1,196 \frac{1}{0,368} \cdot \sin(\delta + 0,9^\circ) = 0,028 + 3,25 \cdot \sin(\delta + 0,9^\circ).$$

Предел передаваемой мощности при включенной нагрузке:

$$P_{m2} = 0,028 + 3,25 = 3,278.$$

Коэффициент запаса статической устойчивости при отключении одной цепи линии:

$$k_{32} = \frac{3,278 - 1}{1} = 2,278.$$

По анализу характеристик мощности генератора в двух режимах P_1 и P_2 видно, что включение активных сопротивлений в схему замещения смещает характеристику мощности генератора вверх и влево.

Пример 7

В электропередаче, показанной на рис. 2.8, в начале линии происходит трехфазное короткое замыкание. Релейной защитой линия отключается. Требуется определить предельные угол и время отключения короткого замыкания.

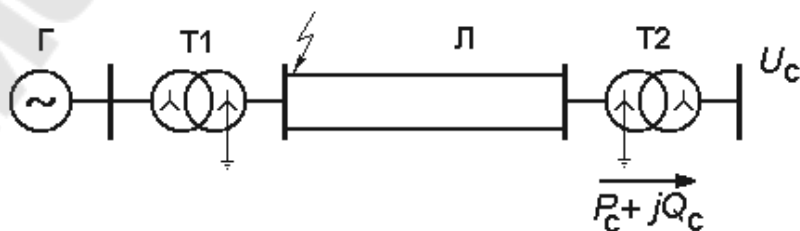


Рис. 2.8. Схема к примеру 7

Элементы схемы характеризуются следующими данными:

Трансформатор Т1: $S_{T1} = 250 \text{ МВА}$; $U_{к1} = 11 \%$.

Трансформатор Т2: $S_{T2} = 200 \text{ МВА}$; $U_{к2} = 11 \%$.

Генератор Г: $P_G = 200 \text{ МВт}$; $U_H = 10,5 \text{ кВ}$; $\cos \varphi = 0,85$; $x'_d = 0,3$;

$T_j = 5 \text{ с}$.

ЛЭП: $l = 120 \text{ км}$; $x_0 = 0,4 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$; $U_{Л} = 220 \text{ кВ}$.

Система: $P_c = 0,736 \cdot P_G$; $\cos \varphi_c = 0,98$; $U_c = 110 \text{ кВ}$.

Расчет выполним в относительных единицах в приближенном приведении. За базисную мощность примем $S_6 = 200 \text{ МВА}$, за базисное напряжение примем $U_6 = 230 \text{ кВ}$.

Постоянная инерции, приведенная к базисным условиям:

$$T_{j*} = T_j \cdot \frac{P_G}{S_6 \cdot \cos \varphi} = 5 \cdot \frac{200}{200 \cdot 0,85} = 5,88 \text{ с}.$$

Реактивное сопротивление генератора:

$$x_{Г*} = x'_d \cdot \frac{S_6 \cdot \cos \varphi}{P_G} = 0,3 \cdot \frac{200 \cdot 0,85}{200} = 0,255.$$

Реактивные сопротивления трансформаторов Т1 и Т2:

$$x_{T1*} = \frac{U_{к1}}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{T1}} = \frac{11}{100} \cdot \frac{200}{250} = 0,088;$$

$$x_{T2*} = \frac{U_{к2}}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{T2}} = \frac{11}{100} \cdot \frac{200}{200} = 0,11.$$

Реактивное сопротивление линии:

$$x_{Л*} = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{ном}^2} = 0,4 \cdot 120 \cdot \frac{200}{230^2} = 0,181.$$

Рассчитаем параметры электропередачи в нормальном режиме.

$$x_{\Sigma 1*} = x_{Г1} + x_{T1} + x_{Л} + x_{T2} = 0,255 + 0,088 + 0,181 + 0,11 = 0,634.$$

Передаваемая в систему мощность (в о. е.):

$$P_{0*} = \frac{P_c}{S_{\sigma}} = \frac{0,736 \cdot 200}{200} = 0,736.$$

$$Q_{0*} = P_{0*} \cdot \operatorname{tg} \varphi_c = 0,736 \cdot 0,202 = 0,149.$$

ЭДС генератора:

$$E_* = \sqrt{\left(U_c + Q_{0*} \frac{x_{\Sigma 1*}}{U_c} \right)^2 + \left(P_{0*} \frac{x_{\Sigma 1*}}{U_c} \right)^2} = \sqrt{\left(1 + 0,149 \frac{0,634}{1} \right)^2 + \left(0,736 \frac{0,634}{1} \right)^2} = 1,190.$$

Предел мощности, передаваемой системой в нормальном режиме:

$$P_{\max 1} = \frac{E_{c*} \cdot U_{c*}}{x_{\Sigma 1*}} = \frac{1,190 \cdot 1}{0,634} = 1,88.$$

Расчет параметров электропередачи при КЗ. Предел мощности, передаваемой системой в аварийном режиме:

$$P_{\max 2} = 0.$$

Расчет параметров электропередачи в послеаварийном режиме. Предел мощности, передаваемой системой в послеаварийном режиме:

$$P_{\max 3} = 1,88.$$

Предельный угол отключения равен:

$$\delta_{\text{откл}}^{\text{пред}} = \arccos \left(\frac{P_0 (\delta_{\text{кр}} - \delta_0) \cdot \frac{\pi}{180} + P_{\max 3} \cdot \cos \varphi_{\text{кр}} - P_{\max 2} \cdot \cos \delta_0}{P_{\max 3} - P_{\max 2}} \right) = 106^\circ,$$

заранее определяем $\delta_{\text{кр}} = 180^\circ - \arcsin \frac{P_0}{P_{\max 3}} = 180^\circ - 23^\circ = 157^\circ$ и

$$\delta_0 = \arcsin \frac{P_0}{P_{\max 1}} = 23^\circ.$$

Предельное время отключения короткого замыкания равно:

$$t_{\text{откл}}^{\text{пр}} = \sqrt{\frac{2T_j(\delta_{\text{откл}}^{\text{пр}} - \delta_0)}{P_0}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 5,88 \left(106^\circ - 23^\circ\right) \frac{\pi}{180}}{0,736}} = 4,8 \text{ с.}$$

3. САМОЗАПУСК АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

В общем случае расчет самозапуска электродвигателей выполняется по схеме замещения, составленной, как при расчете токов короткого замыкания. 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:

$$\omega_c = 2 \pi n_c / 60, \text{ с}^{-1}, \quad (3.1)$$

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

Определяют время замедления агрегата при номинальной нагрузке:

$$\tau_{j\text{ном}} = J_{\text{пр}} \cdot \omega_c^2 / P_{\text{дв. ном}} \cdot 0,001, \text{ с}, \quad (3.2)$$

где $J_{\text{пр}}$ – приведенный момент инерции механизма и двигателя, кг·м;

$P_{\text{дв. ном}}$ – номинальная мощность электродвигателя, кВт.

Определяют время замедления агрегата при фактической нагрузке равно:

$$\tau_j = \tau_{j\text{ном}} / k_3, \text{ с}, \quad (3.3)$$

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:

$$\omega_* = 1 - t_{\Pi} / \tau_j, \text{ о. е.}; \quad (3.4)$$

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

$$\omega_* = \tau_j / (t_{\Pi} + \tau_j), \text{ о. е.}, \quad (3.5)$$

где t_{Π} – время перерыва электроснабжения, с.

Скольжение при выбеге электродвигателя:

$$s = 1 - \omega_*, \text{ о. е.} \quad (3.6)$$

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

$$s_k = s_{\text{НОМ}} (m_k + \sqrt{m_k^2 - 1}), \text{ о. е.} \quad (3.7)$$

При $m_k > 1,6$ можно принять

$$s_k = 2 \cdot s_{\text{НОМ}} \cdot m_k, \text{ о. е.} \quad (3.8)$$

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

$$s_k = s_{\text{НОМ}} \sqrt{(i_n - 1) / [(1 + i_0^2)(1 + 2s_{\text{НОМ}})]}, \text{ о. е.}, \quad (3.9)$$

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

$$i_0 = \sin \varphi_{\text{НОМ}} - \cos \varphi_{\text{НОМ}} / (m_k + \sqrt{m_k^2 - 1}), \text{ о. е.} \quad (3.10)$$

Номинальное скольжение:

$$s_{\text{НОМ}} = 1 - n_{\text{НОМ}} / n_c, \text{ о. е.}, \quad (3.11)$$

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

Кратность пускового тока при скольжении s определяется по формуле:

$$i_{\text{пс}} = i_n \cdot \sqrt{\frac{1 + s_{\text{к}}^2}{1 + (s_{\text{к}} / s)^2}}, \text{ о. е.} \quad (3.12)$$

Расчетная пусковая мощность электродвигателя при номинальном напряжении равна:

$$S_{\text{пс}} = P_{\text{дв. ном}} i_{\text{пс}} / (\cos\varphi_{\text{ном}} \eta_{\text{ном}}), \text{ кВА.} \quad (3.13)$$

Индуктивное сопротивление двигателя равно:

$$x_{\text{дв}} = S_{\text{б}} U_{\text{ном}}^2 / (S_{\text{пс}} U_{\text{б}}^2), \text{ о. е.} \quad (3.14)$$

Суммарное сопротивление n двигателей:

$$x_{\text{дв}\Sigma} = x_{\text{дв}} / n, \text{ о. е.} \quad (3.15)$$

Сопротивление самозапускающихся двигателей с учетом неотключенной нагрузки определяется по формуле:

$$x'_{\text{дв}\Sigma} = x_{\text{дв}\Sigma} x_{\text{н}} / (x_{\text{дв}\Sigma} + x_{\text{н}}), \text{ о. е.} \quad (3.16)$$

Остаточное напряжение на шинах источника питания равно:

$$U_{\text{ост}} = U_{\text{с}} \cdot x_{\text{дв}\Sigma} / (x_{\text{дв}\Sigma} + x_{\text{т}}), \text{ о. е.,} \quad (3.17)$$

где $U_{\text{с}}$ – напряжение системы; принимается равным 1,05 в относительных единицах.

Кратность тока самозапуска через трансформатор:

$$k_i = U_{\text{с}} / (x_{\text{дв}\Sigma} + x_{\text{т}}), \text{ о. е.} \quad (3.18)$$

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:

$$U_{\text{дв}} \geq \sqrt{1,1 m_{\text{с}} / m_{\text{дв}}}, \text{ о. е.,} \quad (3.19)$$

где m_{cs} – момент сопротивления механизма при скольжении s ;

$m_{двс}$ – вращающийся момент двигателя при скольжении s .

При затруднении с определением значений моментов m_{cs} и $m_{двс}$ для вычислений используют следующие соотношения:

– для механизмов с постоянным моментом сопротивления:

$$U_{дв} \geq \sqrt{1,37 m_{тр} k_3 / m_{min}}, \text{ о. е.}; \quad (3.20)$$

– для механизмов с вентиляторным моментом сопротивления:

$$U_{дв} \geq \sqrt{1,22 m_{тр} k_3 / m_k}, \text{ о. е.}, \quad (3.21)$$

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

m_{min} – кратности минимального момента трогания АД.

Пример 8

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, $\eta_{ном} = 95,6$ %, $\cos \varphi_{ном} = 0,92$, $m_k = 2,1$, $i_{п} = 6$, $n_{ном} = 2980$ об./мин, $J_{пр} = 15$ кг·м, $k_3 = 0,8$, $m_{тр} = 0,2$, $m_{min} = 0,8$.

Синхронная угловая скорость определяется из выражения:

$$\omega_c = 2 \cdot \pi \cdot 3000/60 = 314 \text{ с}^{-1}.$$

Время замедления агрегата при номинальной нагрузке равно:

$$\tau_{jном} = 15 \cdot 314 \cdot 314/500 \cdot 0,001 = 2,96 \text{ с.}$$

Время замедления агрегата при фактической нагрузке равно:

$$\tau_j = 2,96/0,8 = 3,7 \text{ с.}$$

Свободный выбег электродвигателя для вентиляторной нагрузки на валу:

$$\omega_* = 3,7/(1 + 3,7) = 0,79.$$

Скольжение при выбеге электродвигателя:

$$s = 1 - 0,79 = 0,21.$$

Номинальное скольжение:

$$s_{\text{ном}} = 1 - 2980/3000 = 0,0067.$$

Критическое скольжение:

$$s_{\text{к}} = 2 \cdot 0,0067 \cdot 2,1 = 0,028.$$

Кратность пускового тока при скольжении s равна:

$$i_{\text{пс}} = 6 \cdot \sqrt{\frac{1 + 0,28^2}{1 + (0,028/0,21)^2}} = 3,61.$$

Расчетная пусковая мощность электродвигателя при номинальном напряжении равна:

$$S_{\text{пс}} = 500 \cdot 3,61 / (0,92 \cdot 0,956) = 2052 \text{ кВА}.$$

Индуктивное сопротивление двигателя равно:

$$x_{\text{дв}} = 6300 \cdot 6^2 / (2052 \cdot 6,3^2) = 2,785.$$

Суммарное сопротивление восьми двигателей:

$$x_{\text{дв}\Sigma} = 2,785/8 = 0,348.$$

Индуктивное сопротивление трансформатора равно:

$$x_{\text{т}} = 7,5/100 \cdot 6300/6300 = 0,075.$$

Остаточное напряжение на шинах источника питания равно:

$$U_{\text{ост}} = 1,05 \cdot 0,348 / (0,348 + 0,075) = 0,86.$$

Кратность тока самозапуска через трансформатор

$$k_i = 1,05 / (0,348 + 0,075) = 2,48.$$

Кратность тока самозапуска через трансформатор $2,48 \leq 4$, то имеется возможность до трех самозапусков в сутки.

Проверяем по условию обеспечения пускового момента на всем диапазоне скольжения:

$$U_{\text{дв}} = 0,86 \geq \sqrt{1,22 \cdot 0,2 \cdot 0,8 / 2,1} = 0,30.$$

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

Пример 9

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

Исходные данные двигателя: $P_{\text{ном}} = 320$ кВт, $U_{\text{ном}} = 6$ кВ, $\eta_{\text{ном}} = 92,5$ %, $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,86$, $m_{\text{к}} = 2,2$, $i_{\text{п}} = 6$, $n_{\text{ном}} = 985$ об./мин, $J_{\text{пр}} = 150$ кг·м, $k_{\text{з}} = 0,8$, $m_{\text{тр}} = 0,2$, $m_{\text{п}} = 1,2$.

Синхронная угловая скорость определяется из выражения:

$$\omega_{\text{с}} = 2 \cdot \pi \cdot 1000/60 = 105 \text{ с}^{-1}.$$

Время замедления агрегата при номинальной нагрузке равно:

$$\tau_{j\text{ном}} = 150 \cdot 105 \cdot 105/320 \cdot 0,001 = 5,17 \text{ с}.$$

Время замедления агрегата при фактической нагрузке равно:

$$\tau_j = 5,17/0,8 = 6,46 \text{ с}.$$

Свободный выбег электродвигателя для постоянной нагрузки на валу:

$$\omega_* = 1 - 1/6,46 = 0,85.$$

Скольжение при выбеге электродвигателя:

$$s = 1 - 0,85 = 0,15.$$

Номинальное скольжение:

$$s_{\text{ном}} = 1 - 985/1000 = 0,015.$$

Критическое скольжение:

$$s_{\text{к}} = 2 \cdot 0,015 \cdot 2,2 = 0,066.$$

Кратность пускового тока при скольжении s определяется по формуле

$$i_{\text{пс}} = 6 \cdot \sqrt{\frac{1 + 0,066^2}{1 + (0,066/0,15)^2}} = 5,50.$$

Расчетная пусковая мощность электродвигателя при номинальном напряжении равна:

$$S_{\text{пс}} = 500 \cdot 5,50 / (0,925 \cdot 0,86) = 3457, \text{ кВА.}$$

Индуктивное сопротивление двигателя равно:

$$x_{\text{дв}} = 6300 \cdot 6^2 / (3457 \cdot 6,3^2) = 1,653.$$

Суммарное сопротивление шести двигателей:

$$x_{\text{дв}\Sigma} = 1,653 / 6 = 0,276.$$

Индуктивное сопротивление трансформатора равно:

$$x_{\text{т}} = 7,5 / 100 \cdot 6300 / 6300 = 0,075.$$

Остаточное напряжение на шинах источника питания равно:

$$U_{\text{ост}} = 1,05 \cdot 0,276 / (0,276 + 0,075) = 0,826.$$

Кратность тока самозапуска через трансформатор

$$k_i = 1,05 / (0,276 + 0,075) = 2,99 \leq 4 \text{ (условие выполнено).}$$

Проверяем по условию обеспечения пускового момента на всем диапазоне скольжения:

$$U_{\text{дв}} = 0,826 \geq \sqrt{1,37 \cdot 0,2 \cdot 0,8 / 1,2} = 0,427.$$

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

Пример 10

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

Исходные данные двигателя: $P_{\text{ном}} = 1000$ кВт, $U_{\text{ном}} = 6$ кВ, $\eta_{\text{ном}} = 94,7$ %, $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,83$, $m_{\text{к}} = 2,6$, $i_{\text{п}} = 6$, $n_{\text{ном}} = 590$ об./мин, $J_{\text{пр}} = 320$ кг·м, $k_3 = 0,8$, $m_{\text{тр}} = 0,3$.

Синхронная угловая скорость определяется из выражения:

$$\omega_{\text{с}} = 2 \cdot \pi \cdot 600 / 60 = 62,8 \text{ с}^{-1}.$$

Время замедления агрегата при номинальной нагрузке равно:

$$\tau_{j\text{ном}} = 320 \cdot 62,8 \cdot 62,8/1000 \cdot 0,001 = 1,26 \text{ с.}$$

Время замедления агрегата при фактической нагрузке равно:

$$\tau_j = 1,26/0,8 = 1,58 \text{ с.}$$

Свободный выбег двигателя для вентиляторной нагрузки на валу:

$$\omega_* = 1,58/(1 + 1,58) = 0,61.$$

Скольжение при выбеге электродвигателя:

$$s = 1 - 0,61 = 0,39.$$

Относительный ток холостого хода асинхронного двигателя:

$$i_0 = 0,558 - 0,83/(2,6 + \sqrt{2,6^2 - 1}) = 0,392.$$

Номинальное скольжение:

$$s_{\text{ном}} = 1 - 590/600 = 0,0167.$$

Критическое скольжение:

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

Кратность пускового тока при скольжении s определяется по формуле

$$i_{\text{пс}} = 6 \cdot \sqrt{\frac{1 + 0,034^2}{1 + (0,034/0,39)^2}} = 5,98.$$

Расчетная пусковая мощность электродвигателя при номинальном напряжении равна:

$$S_{\text{пс}} = 1000 \cdot 5,98/(0,83 \cdot 0,947) = 7608 \text{ кВА.}$$

Индуктивное сопротивление двигателя равно:

$$x_{\text{дв}} = 6300 \cdot 6^2/(7608 \cdot 6,3^2) = 0,751.$$

Суммарное сопротивление четырех двигателей:

$$x_{\text{дв}\Sigma} = 0,751/4 = 0,188.$$

Индуктивное сопротивление трансформатора равно:

$$x_T = 7,5/100 \cdot 6300/6300 = 0,075.$$

Остаточное напряжение на шинах источника питания равно:

$$U_{ост} = 1,05 \cdot 0,188 / (0,188 + 0,075) = 0,751.$$

Кратность тока самозапуска через трансформатор

$$k_i = 1,05 / (0,188 + 0,075) = 3,99.$$

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

Проверяем по условию обеспечения пускового момента на всем диапазоне скольжения:

$$U_{дв} = 0,751 \geq \sqrt{1,22 \cdot 0,3 \cdot 0,8 / 2,6} = 0,34.$$

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

4. ПУСК АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Выбор способа пуска высоковольтных электродвигателей определяется следующими условиями:

– снижение напряжения в сети при пуске двигателя не должно влиять на нормальную работу присоединенных к той же сети потребителей;

– перегрузка трансформаторов пусковыми токами не должна превышать определенного значения, зависящего от числа пусков в сутки и их длительности.

Наиболее предпочтительным является прямой пуск высоковольтных электродвигателей. Однако для широкого ряда типоразмеров высоковольтных электродвигателей такой вид пуска неприемлем, т. к. в определенных условиях их пусковое напряжение ограничено. Для турбодвигателей прямой пуск от полного напряжения сети недопустим, поскольку при таком пуске имеется опасность перегрева наружного слоя бочки ротора из-за поверхностного эффекта.

Для электродвигателей напряжением 6–10 кВ пусковой ток для начального периода пуска рассчитывают без учета активного сопротивления двигателя и питающей сети. С учетом этих допущений ток

при пуске двигателя через трансформатор от шин бесконечной мощности в относительных единицах

$$I_{п*} = \frac{U_{с*}}{x_{дв*} + x_{с*}}, \text{ о. е.}, \quad (4.1)$$

где $U_{с*}$ – напряжение на шинах бесконечной мощности, принимается равным 1,05, о. е.;

$x_{дв*}$ – сопротивление двигателя, о. е.;

$x_{с*}$ – сопротивление сети от шин бесконечной мощности до места подключения двигателя, о. е.

Пусковой момент двигателя в начале пуска должен быть на 20...30 % больше момента сопротивления механизма в неподвижном состоянии и не менее чем на 10 % больше на всем промежутке разгона.

$$U_{доп \min} \geq \sqrt{1,73 m_c k_3 / m_{п}}, \text{ о. е.}, \quad (4.2)$$

где $m_{п}$ – кратность пускового момента двигателя, о. е.; m_c – момент сопротивления механизма в неподвижном состоянии, о. е.;

Если прямой пуск недопустим, последовательно с двигателем включают пусковое сопротивление. Параметры схемы электроснабжения и пуска в относительных единицах связаны следующими соотношениями:

$$U'_д \leq \frac{x_{дв} + x_{доб}}{x_{дв} + x_{доб} + x_c}, \text{ о. е.}, \quad (4.3)$$

$$U_{доп \min} \leq \frac{x_{дв}}{x_{дв} + x_{доб} + x_c} \leq U_{доп \max}, \text{ о. е.}, \quad (4.4)$$

где $U'_д$ – допустимое снижение напряжение в сети, о. е.; $U_{доп \max}$ – допустимое максимальное напряжение, задаваемое заводом-изготовителем, о. е.; $U_{доп \min}$ – допустимое минимальное напряжение, задаваемое заводом-изготовителем, достаточное для разворота электродвигателя с заданной нагрузкой, о. е.

В связи с отсутствием специальных пусковых устройств для пуска электродвигателей на пониженном напряжении применяют токоограничивающие реакторы и силовые трансформаторы.

Напряжение на выводах электродвигателя в начальный момент пуска при использовании реактора равно

$$U_{\text{дв п}} = \frac{x_{\text{дв}} / S_{\text{дв ном}}}{x_{\text{дв}} / S_{\text{дв ном}} + x_{\text{р}} / U_{\text{ном}}^2 + 1 / S_{\text{кз}}}, \text{ о. е.}, \quad (4.5)$$

где $S_{\text{кз}}$ – мощность короткого замыкания на шинах сети, МВА.

Остаточное напряжение на шинах источника питания

$$U_{\text{ост}} = 1 - \frac{S_{\text{дв ном}}}{x_{\text{дв}}} \frac{U_{\text{дв п}}}{S_{\text{кз}}}, \text{ о. е.} \quad (4.6)$$

Сопротивление пускового реактора, обеспечивающего требуемое начальное напряжение на двигателе

$$x_{\text{р}} = \left[\frac{x_{\text{дв}}}{S_{\text{дв ном}}} \left(\frac{1}{U_{\text{дв п}}} - 1 \right) - \frac{1}{S_{\text{кз}}} \right] U_{\text{ном}}^2, \text{ Ом.} \quad (4.7)$$

Номинальный ток реактора

$$I_{\text{р ном}} \geq 1,3 \frac{I_{\text{п ср}}}{C} \sqrt{\alpha t_{\text{дл п}}}, \text{ А}, \quad (4.8)$$

где C – постоянный коэффициент, принимается для меди равным 122, для алюминия – 82; $\alpha, t_{\text{дл п}}$ – допустимое число пусков и длительность одного пуска, с; $I_{\text{п ср}}$ – среднее значение пускового тока через реактор, определяется по формуле

$$I_{\text{п ср}} \approx 0,93 i_{\text{п}} U_{\text{дв п}} I_{\text{дв п}}, \text{ А.} \quad (4.9)$$

Выбранный реактор проверяется на термическую и динамическую стойкость. Находят сопротивление реактора в относительных единицах и проверяют напряжение на шинах источника при пуске от выбранного реактора в соответствии с условием (4.4).

Пример 11

Определить остаточное напряжение на шинах и выводах двигателя при его пуске. Схема представлена на рис. 4.1.

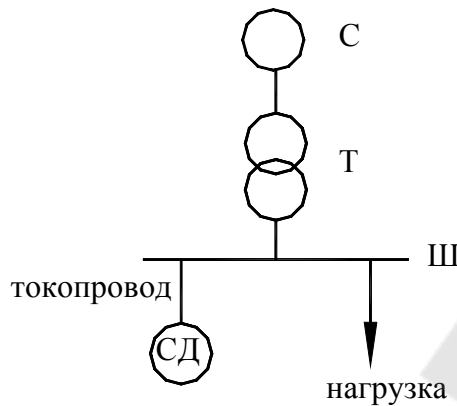


Рис. 4.1. Схема к примеру 11

Элементы схемы характеризуются следующими данными.

ЭД: $P_{\text{ном}} = 1,1 \text{ МВт}$; $U_{\text{ном}} = 6 \text{ кВ}$; $\cos \varphi = 0,9$; $\eta = 93,6 \%$;
 $i_{\text{п}} = 6,6$.

Система С: $S_{\text{кз}} = 500 \text{ МВА}$.

Трансформатор Т: $S_{\text{T}} = 25 \text{ МВА}$; $U_{\text{к}} = 10,5 \%$.

Токопровод: $l = 0,5 \text{ км}$; $x_0 = 0,15 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$.

Нагрузка: $S_{\text{наг}} = 10 \text{ МВА}$; $\cos \varphi_{\text{наг}} = 0,9$.

Расчет выполним в относительных единицах, приближенном приведении. За базисную мощность примем $S_{\text{б}} = 100 \text{ МВА}$, за базисное напряжение – $U_{\text{б}} = 6,3 \text{ кВ}$.

Реактивное сопротивление системы:

$$x_{\text{с}} = \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{кз}}} = \frac{100}{500} = 0,2.$$

Реактивное сопротивление трансформатора:

$$x_{\text{T}} = \frac{U_{\text{к}}}{100} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{T}}} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{100}{25} = 0,42.$$

Мощность нагрузки:

$$S_{\text{н}} = P_{\text{н}} + jQ_{\text{н}} = 9 + j4,36 \text{ МВА}.$$

Реактивное сопротивление нагрузки:

$$x_H = \frac{S_{\sigma}}{Q_H} = \frac{100}{4,36} = 22,94.$$

Реактивное сопротивление токопровода:

$$x_{ТП} = x_0 \cdot l \frac{S_{\sigma}}{U^2_{ТП}} = 0,15 \cdot 0,5 \cdot \frac{100}{6,3^2} = 0,189.$$

Пусковая мощность двигателя:

$$S_{пуск} = \frac{P \cdot i_{п}}{\eta \cdot \cos \varphi} = \frac{1,1 \cdot 6,6}{0,936 \cdot 0,9} = 8,618 \text{ МВА.}$$

Сопротивление двигателя:

$$Z_{дв} = \frac{S_{\sigma}}{S_{пуск}} = \frac{100}{8,618} = 11,6.$$

Напряжение на шинах определяется по формуле:

$$U_{ш} = \frac{U_{ип}}{1 + \frac{Z_{вш}}{Z_{нш}}},$$

где $Z_{вш}$ – суммарное сопротивление элементов, находящихся выше шин, о. е.; $Z_{нш}$ – суммарное сопротивление элементов, находящихся ниже шин, о. е.

$$Z_{вш} = x_C + x_T = 0,2 + 0,42 = 0,62.$$

$$Z_{нш} = \frac{(x_T + x_{дв})x_H}{x_T + x_{дв} + x_H} = \frac{(0,189 + 11,6)22,94}{0,189 + 11,6 + 22,94} = 7,79.$$

Напряжение на шинах равно:

$$U_{ш} = \frac{1,05}{1 + \frac{0,62}{7,79}} = 0,97.$$

Напряжение на выводах двигателя равно:

$$U_{дв} = \frac{0,97}{1 + \frac{0,189}{11,6}} = 0,95.$$

5. ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Задача 1. Рассмотрим схему электропередачи, в которой генератор работает через трансформатор и двухцепную линию электропередачи на шины приемной системы бесконечной мощности (рис. 5.1). Генератор имеет АРВ пропорционального типа. Определить предел передаваемой мощности и коэффициент запаса статической устойчивости в нормальном режиме и при включенном шунтирующем реакторе мощностью 55 Мвар.

Расчет провести в относительных единицах:

- при точном приведении коэффициентов трансформации;
- при приближенном приведении.

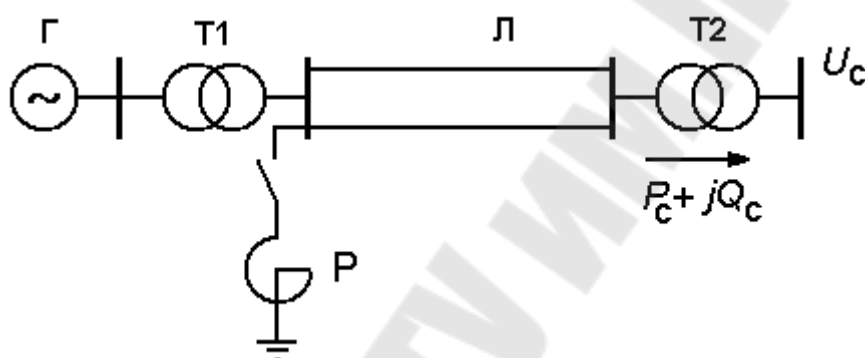


Рис. 5.1. Схема к задаче 1

Исходные данные:

- генератор: $P_{\text{ном}} = 300$ МВт; $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,85$; $x'_d = 0,352$; $U_{\text{ном}} = 20$ кВ; $x_d = 2,11$; $T_j = 7$ с;
- трансформатор Т1: $S_{\text{ном}} = 400$ МВА; $U_{\text{ном}} = 20/345$ кВ; $U_{\text{к}} = 11$ %;
- линия: $x_0 = 0,4$ Ом/км; $L = 245$ км;
- трансформатор Т2: $S_{\text{ном}} = 400$ МВА; $U_{\text{ном}} = 330/242$ кВ; $U_{\text{к}} = 11$ %;
- передаваемая мощность $P_c = 260$ МВт и $Q_c = 130$ Мвар.

Задача 2. Рассмотрим схему электропередачи, в которой генератор работает через трансформатор и двухцепную линию электропередачи на шины приемной системы бесконечной мощности (рис. 5.2). Генератор имеет АРВ сильного действия. Определить предел передаваемой мощности и коэффициент запаса статической устойчивости в нормальном режиме и при отключении нагрузки.

Расчет провести в относительных единицах:

- при точном приведении коэффициентов трансформации;
- при приближенном приведении.

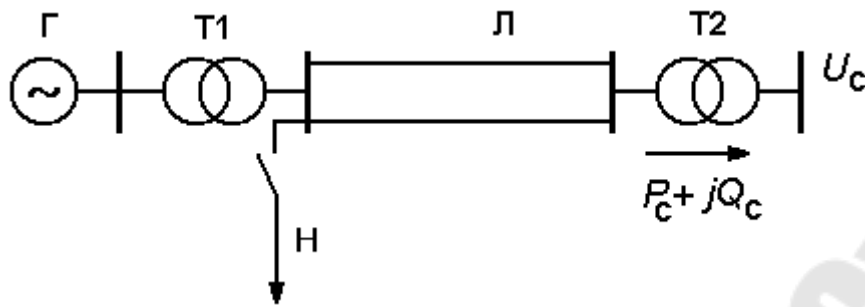


Рис. 5.2. Схема к задаче 2

Исходные данные:

- генератор: $P_{\text{ном}} = 63$ МВт; $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,8$; $x'_d = 0,224$; $U_{\text{ном}} = 10,5$ кВ; $x_d = 1,199$; $T_j = 8,85$ с;
- трансформатор Т1: $S_{\text{ном}} = 80$ МВА; $U_{\text{ном}} = 10/242$ кВ; $U_k = 11$ %;
- линия: $x_0 = 0,4$ Ом/км; $L = 90$ км;
- трансформатор Т2: $S_{\text{ном}} = 125$ МВА; $U_{\text{ном}} = 220/38,5$ кВ; $U_k = 11$ %;
- передаваемая мощность $P_c = 40$ МВт и $Q_c = 20$ Мвар;
- нагрузка $P_n = 20$ МВт и $Q_c = 10$ Мвар.

Задача 3. Рассмотрим схему электропередачи, в которой генератор работает через трансформатор и двухцепную линию электропередачи на шины приемной системы бесконечной мощности (рис. 5.3). Генератор не имеет АРВ. Определить предел передаваемой мощности и коэффициент запаса статической устойчивости в нормальном режиме при различном номинальном напряжении линии: а) 110 кВ; б) 220 кВ; в) 330 кВ.

Расчет провести в относительных единицах при приближенном приведении коэффициентов трансформации.

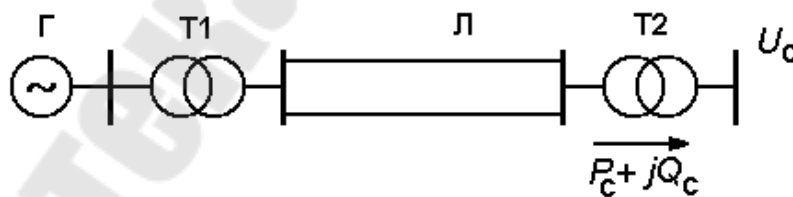


Рис. 5.3. Схема к задаче 3

Исходные данные:

- генератор: $P_{\text{ном}} = 160$ МВт; $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,85$; $x'_d = 0,304$; $U_{\text{ном}} = 18$ кВ; $x_d = 1,713$; $T_j = 5,42$ с;
- трансформатор Т1: $S_{\text{ном}} = 200$ МВА; $U_k = 10$ %;
- линия: $x_0 = 0,4$ Ом/км; $L = 300$ км;
- трансформатор Т2: $S_{\text{ном}} = 200$ МВА; $U_k = 10$ %;
- передаваемая мощность $P_c = 120$ МВт и $Q_c = 80$ Мвар.

Задача 4. Рассмотрим схему электропередачи, в которой генератор работает через трансформатор и двухцепную линию электропередачи на шины приемной системы бесконечной мощности (рис. 5.4). Генератор имеет АРВ слабого действия. В одной цепи линии происходит короткое замыкание, которое синхронно отключают выключатели цепи линии. Определить предельные угол и время отключения однофазного короткого замыкания: а) в начале линии; б) в середине линии; в) в конце линии.

Расчет провести в относительных единицах при приближенном приведении коэффициентов трансформации.

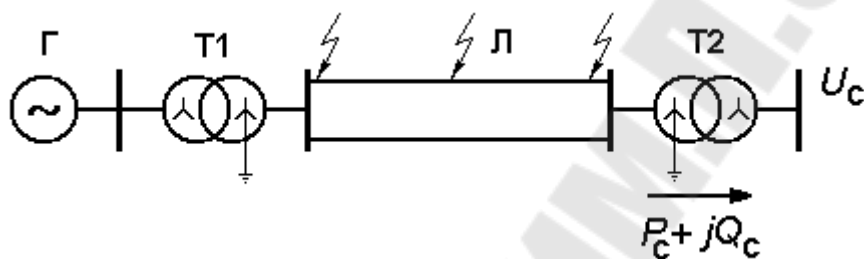


Рис. 5.4. Схема к задаче 4

Исходные данные:

– генератор: $P_{\text{ном}} = 160$ МВт; $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,85$; $x'_d = 0,304$; $U_{\text{ном}} = 18$ кВ; $x_d = 1,713$; $T_j = 5,42$ с;

– трансформатор Т1: $S_{\text{ном}} = 200$ МВА; $U_{\text{ном}} = 18/242$ кВ; $U_{\text{к}} = 11$ %;

– линия: $x_0 = 0,4$ Ом/км; $L = 300$ км;

– трансформатор Т2: $S_{\text{ном}} = 200$ МВА; $U_{\text{ном}} = 220/121$ кВ; $U_{\text{к}} = 11$ %;

– передаваемая мощность $P_c = 120$ МВт и $Q_c = 80$ Мвар.

Задача 5. Рассмотрим схему электропередачи, в которой генератор работает через трансформатор и двухцепную линию электропередачи на шины приемной системы бесконечной мощности. Генератор не имеет АРВ. В одной цепи линии происходит короткое замыкание, которое синхронно отключают выключатели цепи линии. Определить предельные угол и время отключения двухфазного короткого замыкания: а) в начале линии; б) в середине линии; в) в конце линии.

Расчет провести в относительных единицах при приближенном приведении коэффициентов трансформации.

Исходные данные:

– генератор: $P_{\text{ном}} = 63$ МВт; $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,8$; $x'_d = 0,224$; $U_{\text{ном}} = 10,5$ кВ; $x_d = 1,199$; $T_j = 8,85$ с;

– трансформатор Т1: $S_{\text{ном}} = 80$ МВА; $U_{\text{ном}} = 10/242$ кВ; $U_{\text{к}} = 11$ %;

- линия: $x_0 = 0,4$ Ом/км; $L = 90$ км;
- трансформатор Т2: $S_{\text{ном}} = 125$ МВА; $U_{\text{ном}} = 220/38,5$ кВ; $U_{\text{к}} = 11$ %;
- передаваемая мощность $P_{\text{с}} = 40$ МВт и $Q_{\text{с}} = 20$ Мвар.

Задача 6. Рассмотрим схему электропередачи, в которой генератор работает через трансформатор и двухцепную линию электропередачи на шины приемной системы бесконечной мощности. Генератор имеет АРВ сильного действия. В одной цепи линии происходит короткое замыкание, которое синхронно отключают выключатели цепи линии. Определить предельные угол и время отключения двухфазного короткого замыкания на землю: а) в начале линии; б) в середине линии; в) в конце линии.

Расчет провести в относительных единицах при приближенном приведении коэффициентов трансформации.

Исходные данные:

- генератор: $P_{\text{ном}} = 300$ МВт; $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,85$; $x'_d = 0,352$; $U_{\text{ном}} = 20$ кВ; $x_d = 2,11$; $T_j = 7$ с;
- трансформатор Т1: $S_{\text{ном}} = 400$ МВА; $U_{\text{ном}} = 20/345$ кВ; $U_{\text{к}} = 11$ %;
- линия: $x_0 = 0,4$ Ом/км; $L = 245$ км;
- трансформатор Т2: $S_{\text{ном}} = 400$ МВА; $U_{\text{ном}} = 330/242$ кВ; $U_{\text{к}} = 11$ %;
- передаваемая мощность $P_{\text{с}} = 260$ МВт и $Q_{\text{с}} = 130$ Мвар.

Задача 7. Рассмотрим схему электропередачи, в которой генератор работает через трансформатор и двухцепную линию электропередачи на шины приемной системы бесконечной мощности. Генератор имеет АРВ слабого действия. В одной цепи линии происходит короткое замыкание, которое синхронно отключают выключатели цепи линии. Определить предельные угол и время отключения трехфазного короткого замыкания: а) в начале линии; б) в середине линии; в) в конце линии.

Расчет провести в относительных единицах при приближенном приведении коэффициентов трансформации.

Исходные данные:

- генератор: $P_{\text{ном}} = 63$ МВт; $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,8$; $x'_d = 0,224$; $U_{\text{ном}} = 10,5$ кВ; $x_d = 1,199$; $T_j = 8,85$ с;
- трансформатор Т1: $S_{\text{ном}} = 80$ МВА; $U_{\text{ном}} = 10/242$ кВ; $U_{\text{к}} = 11$ %;
- линия: $x_0 = 0,4$ Ом/км; $L = 90$ км;
- трансформатор Т2: $S_{\text{ном}} = 125$ МВА; $U_{\text{ном}} = 220/38,5$ кВ; $U_{\text{к}} = 11$ %;
- передаваемая мощность $P_{\text{с}} = 50$ МВт и $Q_{\text{с}} = 25$ Мвар.

Задача 8. Решите задачу 7 с учетом установки в нейтраль трансформатора Т1 токоограничивающего реактора типа ТОРМ-220-325-12.

Задача 9. Для задачи 4 постройте зависимость угла δ от времени при синхронном отключении короткого замыкания в линии через 0,5 с. Численно решить дифференциальное уравнение: а) методом последовательных интервалов; б) методом Рунге-Кутты в пакете MSAD.

Задача 10. Для задачи 5 постройте зависимость угла δ от времени при синхронном отключении короткого замыкания в линии через 0,6 с. Численно решить дифференциальное уравнение: а) методом последовательных интервалов; б) методом Рунге-Кутты в пакете MSAD.

Задача 11. Для задачи 6 постройте зависимость угла δ от времени при синхронном отключении короткого замыкания в линии через 0,3 с. Численно решить дифференциальное уравнение: а) методом последовательных интервалов; б) методом Рунге-Кутты в пакете MSAD.

Задача 12. Для задачи 7 постройте зависимость угла δ от времени при синхронном отключении короткого замыкания в линии через 0,4 с. Численно решить дифференциальное уравнение: а) методом последовательных интервалов; б) методом Рунге-Кутты в пакете MSAD.

Задача 13. Рассчитать возможность самозапуска шести асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором после отключения короткого замыкания. Двигатели питаются от системы неограниченной мощности через линию длиной 20 км и трансформатор мощностью 25 МВА, $U_{ном} = 35/6,3$ кВ, $U_k = 7,5$ % (рис. 5.5). Нагрузка на валу двигателей вентиляционная. Время перерыва питания равно: а) 0,4 с; б) 1 с; в) 1,5 с.

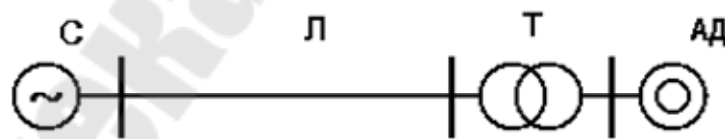


Рис. 5.5. Схема к задаче 13

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

Задача 14. Рассчитать возможность самозапуска четырех асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором после отключения короткого замыкания. Двигатели питаются от системы мощностью короткого замыкания 200 МВА через линию длиной 30 км и транс-

форматор мощностью 32 МВА, $U_{\text{ном}} = 35/6,3$ кВ, $U_{\text{к}} = 7,5$ %. Нагрузка на валу двигателей постоянная. Время перерыва питания равно: а) 0,4 с; б) 1 с; в) 1,5 с.

Исходные данные двигателя: $P_{\text{ном}} = 3150$ кВт, $U_{\text{ном}} = 6$ кВ, $\eta_{\text{ном}} = 95$ %, $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,85$, $m_{\text{к}} = 2$, $i_{\text{п}} = 6,5$, $n_{\text{ном}} = 372$ об./мин, $J_{\text{пр}} = 2000$ кг·м, $k_{\text{з}} = 0,8$, $m_{\text{тр}} = 0,7$, $m_{\text{п}} = 1$.

Задача 15. Рассчитать возможность самозапуска пяти асинхронных двигателей с фазным ротором после отключения короткого замыкания. Двигатели питаются от системы мощностью короткого замыкания 400 МВА через линию длиной 25 км и трансформатор мощностью 25 МВА, $U_{\text{ном}} = 35/6,3$ кВ, $U_{\text{к}} = 7,5$ %. Нагрузка на валу двигателей вентиляторная. Время перерыва питания равно: а) 0,4 с; б) 0,8 с; в) 1,1 с.

Исходные данные двигателя: $P_{\text{ном}} = 2000$ кВт, $U_{\text{ном}} = 6$ кВ, $\eta_{\text{ном}} = 95,5$ %, $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,87$, $m_{\text{к}} = 2,4$, $i_{\text{п}} = 5$, $n_{\text{ном}} = 595$ об./мин, $J_{\text{пр}} = 1000$ кг·м, $k_{\text{з}} = 0,7$, $m_{\text{тр}} = 0,4$, $m_{\text{п}} = 1$.

Задача 16. Рассчитать возможность самозапуска трех асинхронных двигателей с фазным ротором после отключения короткого замыкания. Двигатели питаются от системы мощностью короткого замыкания 1000 МВА через линию длиной 15 км и трансформатор мощностью 40 МВА, $U_{\text{ном}} = 35/6,3$ кВ, $U_{\text{к}} = 7,5$ %. Нагрузка на валу двигателей постоянная. Время перерыва питания равно: а) 0,4 с; б) 0,8 с; в) 1,1 с.

Исходные данные двигателя: $P_{\text{ном}} = 2000$ кВт, $U_{\text{ном}} = 6$ кВ, $\eta_{\text{ном}} = 95,5$ %, $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,87$, $m_{\text{к}} = 2,4$, $i_{\text{п}} = 5$, $n_{\text{ном}} = 595$ об./мин, $J_{\text{пр}} = 1000$ кг·м, $k_{\text{з}} = 0,7$, $m_{\text{тр}} = 0,4$, $m_{\text{п}} = 1$.

Задача 17. Для задачи 13 рассчитать пуск одного двигателя. Выбрать групповой пусковой реактор для уменьшения пускового тока в 1,5 раза и проверить все условия пуска.

Задача 18. Для задачи 14 рассчитать пуск одного двигателя. Выбрать групповой пусковой реактор для уменьшения пускового тока в 2 раза и проверить все условия пуска. Имеется неотключаемая нагрузка на шинах мощностью $(2 + j1)$ МВА.

Задача 19. Для задачи 15 рассчитать пуск одного двигателя. Выбрать групповой пусковой реактор для уменьшения пускового тока в 1,7 раза и проверить все условия пуска. Имеется неотключаемая нагрузка на шинах мощностью $(4 + j2)$ МВА, включая осветительную нагрузку.

Задача 20. Рассчитать пуск асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Двигатель питается от системы неограниченной мощности через линию длиной 20 км, трансформатор мощностью 25 МВА, $U_{\text{ном}} = 35/6,3$ кВ, $U_{\text{к}} = 7,5$ % и алюминиевую кабельную линию длиной 2 км сечением 35 мм^2 (рис. 5.6). Мощность неотключаемой нагрузки равна $(10 + j4)$ МВА.

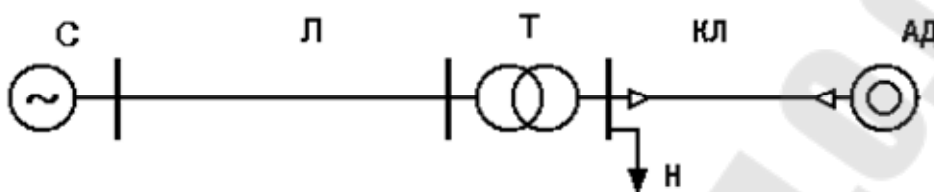


Рис. 5.6. Схема к задаче 20

Исходные данные двигателя: $P_{\text{ном}} = 400$ кВт, $U_{\text{ном}} = 6$ кВ, $\eta_{\text{ном}} = 93,5$ %, $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,89$, $m_{\text{к}} = 2,1$, $i_{\text{п}} = 5,1$, $n_{\text{ном}} = 1480$ об./мин, $J_{\text{пр}} = 120$ кг·м, $k_3 = 0,75$, $m_{\text{тр}} = 0,4$, $m_{\text{п}} = 1$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Правила устройств электроустановок. – 6 изд. – Москва : Атомиздат, 1999.
2. Веников, В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах / В. А. Веников. – Москва : Высш. шк., 1985.
3. Жданов, П. С. Вопросы устойчивости электрических систем / П. С. Жданов. – Москва : Энергия, 1979.
4. Неклепаев, Б. Н. Электрическая часть электростанций и подстанций: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования / Б. Н. Неклепаев, И. П. Крючков. – Москва : Энергоатомиздат, 1989.
5. Овчаренко, А. С. Повышение эффективности электроснабжения промышленных предприятий / А. С. Овчаренко, Д. И. Розинский. – Киев : Техника, 1989.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Представление элементов электрических систем в схемах замещения.....	3
1.1. Синхронные генераторы.....	3
1.2. Линии электропередачи.....	5
1.3. Трансформаторы и автотрансформаторы.....	5
1.4. Токоограничивающие и шунтирующие реакторы.....	6
1.5. Асинхронные двигатели.....	7
1.6. Синхронные двигатели.....	8
1.7. Нагрузка.....	8
2. Статическая устойчивость простейшей системы.....	16
3. Самозапуск асинхронных электродвигателей.....	36
4. Пуск асинхронных электродвигателей.....	44
5. Задачи для самостоятельной работы.....	49
Литература.....	56

Учебное электронное издание комбинированного распространения

Учебное издание

УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**Практикум
для студентов специальности 1-43 01 03
«Электроснабжение»
дневной и заочной форм обучения**

Автор-составитель: **Токочаков** Владимир Иванович

Редактор

Н. И. Жукова

Компьютерная верстка

Н. В. Широглазова

Подписано в печать 07.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.

Цифровая печать. Усл. печ. л. 3,49. Уч.-изд. л. 3,47.

Изд. № 16.

E-mail: ic@gstu.gomel.by

<http://www.gstu.gomel.by>

Издатель и полиграфическое исполнение:

Издательский центр

учреждения образования «Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого».

ЛИ № 02330/0131916 от 30.04.2004 г.

246746, г. Гомель, пр. Октября, 48, т. 47-71-64.