

Министерство образования Республики Беларусь

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

Кафедра «Электроснабжение»

В. И. Токочаков, Ю. А. Рудченко, В. В. Кротенок

УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

ПРАКТИКУМ

**по одноименному курсу
для студентов специальности 1-43 01 02
«Электроэнергетические системы и сети»
дневной формы обучения**

Гомель 2009

УДК 621.311(075.8)
ББК 31.27я73
Т51

*Рекомендовано научно-методическим советом
энергетического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 4 от 30.03.2009 г.)*

Рецензент: канд. техн. наук, доц. каф. «Электроснабжение» ГГТУ им. П. О. Сухого
Ю. Н. Колесник

Токочаков, В. И.
Т51 Устойчивость электроэнергетических систем : практикум по одноим. курсу для студентов специальности 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети» днев. формы обучения / В. И. Токочаков, Ю. А. Рудченко, В. В. Кротенок. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2009. – 54 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://lib.gstu.local>. – Загл. с титул. экрана.

Содержит порядок расчета и набор вариантов задач для выполнения заданий при изучении электромеханических переходных процессов в электроэнергетических системах.

Для студентов специальности 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети» дневной формы обучения.

УДК 621.311(075.8)
ББК 31.27я73

© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2009

1. СТАТИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ СИСТЕМЫ

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

При отсутствии на генераторе автоматического регулятора возбуждения (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:

$$P_*(\delta) = \frac{E_* U_{c*}}{x_{c*}} \sin \delta, \text{ о.е.}, \quad (1.1)$$

где E_* – ЭДС генератора, о.е.;

U_{c*} – напряжение системы, о.е.;

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

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

$$P_*(\delta) = \frac{E_{q*} U_{c*}}{x_{c*}} \sin \delta + \frac{U_{c*}^2}{2} \frac{x_d - x_q}{x_d x_q} \sin 2\delta, \text{ о.е.} \quad (1.2)$$

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:

$$Q_*(\delta) = \frac{E_* U_{c*}}{x_{c*}} \cos \delta - \frac{U_{c*}^2}{x_{c*}}, \text{ о.е.} \quad (1.3)$$

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:

$$P_*(\delta) = \frac{E'_{q*} U_{c*}}{x'_{c*}} \sin \delta + \frac{U_{c*}^2}{2} \frac{x_d - x'_d}{x_d x'_d} \sin 2\delta, \text{ о.е. (1.4)}$$

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_G и подключенной к шинам генераторного напряжения.

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

$$P_*(\delta) = \frac{U_{G*} U_{c*}}{x_{c*}} \sin \delta, \text{ о.е. (1.5)}$$

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.

Характеристика активной мощности генератора имеет максимум, который называется идеальным пределом мощности и вычисляется по формуле:

$$P_{m*} = \frac{E_* U_*}{x_{c*}}, \text{ о.е. (1.6)}$$

Критерий статической устойчивости простейшей системы:

$$\frac{dP}{d\delta} > 0.$$

Коэффициент запаса статической устойчивости по активной мощности для простейшей системы вычисляется по формуле:

$$K_P = \frac{P_{m*} - P_{c*}}{P_{c*}}, \text{ о.е., (1.7)}$$

где P_{c*} – активная мощность перетока (в расчетах без учета потерь активных мощностей в элементах простейшей системы принимается равной мощности турбины), о.е.

Минимальные значения коэффициента запаса статической устойчивости по активной мощности в нормальном и утяжеленном режимах должен быть не ниже 0,2, при вынужденном режиме – не ниже 0,08 [6].

При сложной связи генератора с приемной системы и наличии нагрузок коэффициент запаса статической устойчивости по активной мощности вычисляется по формуле [6]:

$$K_P = \frac{P_{m*} - (P_{c*} + \Delta P_{нк*})}{P_{c*}}, \text{ о.е.}, (1.8)$$

где $\Delta P_{нк*}$ – амплитуда нерегулярных колебаний активной мощности, которая при отсутствие результатов измерений определяется по формуле [6]:

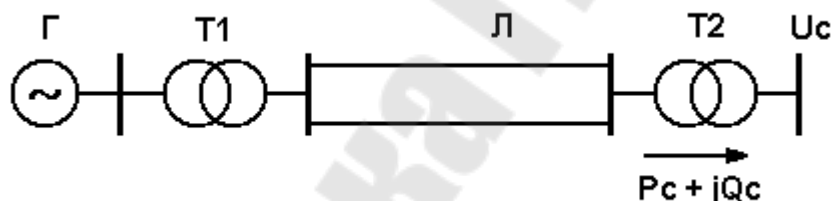
$$\Delta P_{нк*} = K \sqrt{\frac{P_{н1} P_{н2}}{P_{н1} + P_{н2}}}, \text{ о.е.}, (1.9)$$

где $P_{н1}, P_{н2}$ – мощности нагрузок с каждой стороны перетока, о.е.;

K – коэффициент, равный 1,5 при ручном регулировании и 0,75 при автоматическом регулировании перетока мощности, о.е.

Увеличение мощности турбины приводит к возрастанию угла δ и уменьшению коэффициента запаса статической устойчивости по активной мощности.

Пример 1. Рассмотрим схему электропередачи, в которой генератор работает через трансформатор и двухцепную линию электропередачи на шины приемной системы бесконечной мощности. Напряжение приемной станции U_c можно считать неизменной по абсолютному значению и фазе при любых условиях работы электропередачи.



Исходные данные:

- генератор: $P_{ном} = 100$ МВт; $\cos \varphi_{ном} = 0,8$; $x'_d = 0,278$; $U_{ном} = 10,5$ кВ; $x_d = 1,907$; $T_j = 6,7$ с;
- трансформатор Т1: $S_{ном} = 160$ МВА; $U_{ном} = 11/230$ кВ; $U_k = 11$ %;
- линия: $x_0 = 0,4$ Ом/км; $L = 300$ км;
- трансформатор Т2: $S_{ном} = 200$ МВА; $U_{ном} = 230/110$ 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 АРВ;

- при АРВ пропорционального типа;
- при АРВ сильного действия типа.

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

Принимаем базисные условия:

$$S_B = 80 \text{ МВт}, U_B = 110 \text{ кВ}.$$

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:

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

Сопrotивление генератора в относительных единицах без учета АРВ:

$$x_{G*} = x_d \cdot \frac{U_{ном}^2}{P_{ном} / \cos \varphi} \cdot \frac{S_B}{U_B^2} \cdot K_{T1} \cdot K_{T2} =$$

$$= 1,907 \cdot \frac{10,5^2}{100/0,8} \cdot \frac{80}{110^2} \cdot \frac{230^2}{11^2} \cdot \frac{110^2}{230^2} = 1,112.$$

Сопrotивление трансформатора Т1 в относительных единицах равно:

$$x_{T1*} = \frac{U_k}{100} \cdot \frac{U_{ном}^2}{S_{ном}} \cdot \frac{S_B}{U_B^2} \cdot K_{T1} \cdot K_{T2} = \frac{11}{100} \cdot \frac{11^2}{160} \cdot \frac{80}{110^2} \cdot \frac{230^2}{11^2} \cdot \frac{110^2}{230^2} = 0,055.$$

Сопrotивление линии в относительных единицах равно:

$$x_{L*} = 0,5 \cdot x_0 \cdot L \cdot \frac{S_B}{U_B^2} \cdot K_{T2} = 0,5 \cdot 0,4 \cdot 300 \cdot \frac{80}{110^2} \cdot \frac{110^2}{230^2} = 0,091.$$

Сопrotивление трансформатора Т2 в относительных единицах равно:

$$x_{T2*} = \frac{U_k}{100} \cdot \frac{U_{ном}^2}{S_{ном}} \cdot \frac{S_B}{U_B^2} \cdot K_{T2} = \frac{11}{100} \cdot \frac{230^2}{200} \cdot \frac{80}{110^2} \cdot \frac{110^2}{230^2} = 0,044.$$

Результирующее сопротивление системы без учета АРВ:

$$x_{c1*} = x_{G*} + x_{T1*} + x_{L*} + x_{T2*} = 1,112 + 0,055 + 0,091 + 0,044 = 1,302.$$

Синхронная ЭДС генератора:

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

Предел передаваемой мощности без учета АРВ:

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

Коэффициент запаса статической устойчивости без учета АРВ:

$$K_{P1} = \frac{P_{m1*} - P_{c*}}{P_{c*}} = \frac{1,068 - 1}{1} = 0,068.$$

Сопротивление генератора в относительных единицах при АРВ пропорционального типа равно:

$$x_{Г*} = x'_d \cdot \frac{U_{ном}^2}{P_{ном} / \cos \varphi} \cdot \frac{S_B}{U_B^2} \cdot K_{T1} \cdot K_{T2} = \frac{0,278 \cdot 10,5^2}{100 / 0,8} \cdot \frac{80}{110^2} \cdot \frac{230^2}{11^2} \cdot \frac{110^2}{230^2} = 0,162.$$

Результирующее сопротивление системы при АРВ пропорционального типа:

$$x_{c2*} = x_{Г*} + x_{T1*} + x_{Л*} + x_{T2*} = 0,162 + 0,055 + 0,091 + 0,044 = 0,352.$$

Переходная ЭДС генератора:

$$E'_q = \sqrt{\left(1 + \frac{0,375 \cdot 0,352}{1} \right)^2 + \left(\frac{1 \cdot 0,352}{1} \right)^2} = 1,185.$$

Предел передаваемой мощности при АРВ пропорционального типа:

$$P_{m2*} = \frac{E_q \cdot U_{c*}}{x_{c2*}} = \frac{1,185 \cdot 1}{0,352} = 3,366.$$

Коэффициент запаса статической устойчивости при АРВ пропорционального типа:

$$K_{P2} = \frac{P_{m2*} - P_{c*}}{P_{c*}} = \frac{3,366 - 1}{1} = 2,366.$$

Результирующее сопротивление системы при АРВ сильного действия:

$$x_{c3*} = x_{T1*} + x_{Л*} + x_{T2*} = 0,055 + 0,091 + 0,044 = 0,190.$$

Напряжение генератора:

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

Предел передаваемой мощности при АРВ пропорционального типа:

$$P_{m3*} = \frac{U_{Г*} \cdot U_{c*}}{x_{c2*}} = \frac{1,084 \cdot 1}{0,19} = 5,705.$$

Коэффициент запаса статической устойчивости при АРВ сильного действия:

$$K_{P3} = \frac{P_{m3*} - P_{c*}}{P_{c*}} = \frac{5,705 - 1}{1} = 4,705.$$

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, 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, отдаваемой турбиной, см. рис.1.

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

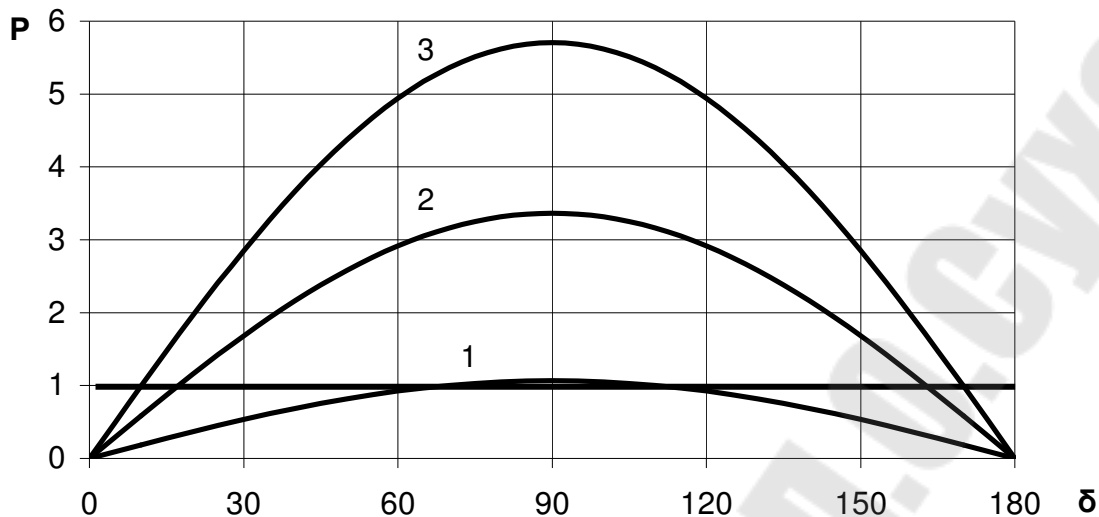
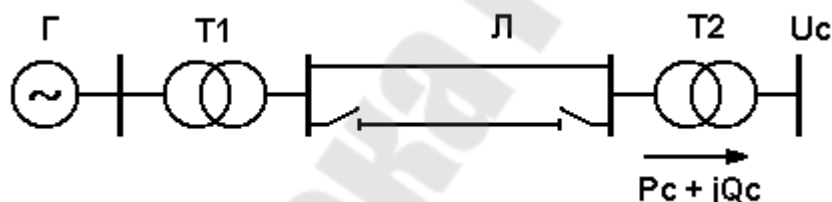


Рис. 1. Зависимости активной мощности генератора от угла δ : кривая 1 – генератор без АРВ, кривая 2 – генератор с АРВ слабого действия, кривая 3 – генератор с АРВ сильного действия

Пример 2. Рассмотрим влияние отключения одной цепи линии на предел передаваемой мощности и коэффициент запаса статической устойчивости при АРВ пропорционального типа. Построим угловые характеристики.



Исходные данные:

- генератор: $P_{ном} = 100$ МВт; $\cos \varphi_{ном} = 0,8$; $x'_d = 0,278$; $U_{ном} = 10,5$ кВ; $T_j = 6,7$ с;
- трансформатор Т1: $S_{ном} = 160$ МВА; $U_{ном} = 11/230$ кВ; $U_k = 11$ %;
- линия: $x_0 = 0,4$ Ом/км; $L = 300$ км;
- трансформатор Т2: $S_{ном} = 200$ МВА; $U_{ном} = 230/110$ 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 (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:

$$S_B = 80 \text{ МВт}, \quad U_B = 115 \text{ кВ}.$$

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:

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

Сопротивление трансформатора Т1 в относительных единицах равно:

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

Сопротивление линии в относительных единицах равно:

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

Сопротивление трансформатора Т2 в относительных единицах равно:

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

Резльтирующее сопротивление системы при АРВ пропорционального типа:

$$x_{c1*} = x_{Г*} + x_{Т1*} + x_{Л*} + x_{Т2*} = 0,178 + 0,055 + 0,091 + 0,044 = 0,368$$

Переходная ЭДС генератора:

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

Предел передаваемой мощности при АРВ пропорционального типа:

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

Коэффициент запаса статической устойчивости при АРВ пропорционального типа:

$$K_{P1} = \frac{3,25 - 1}{1} = 2,25.$$

Результирующее сопротивление системы при отключении одной цепи линии:

$$x_{c2*} = 0,178 + 0,055 + 2 \cdot 0,091 + 0,044 = 0,459$$

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:

$$K_{P2} = \frac{2,606 - 1}{1} = 1,606.$$

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

По результатам расчета построим две угловые характеристики и мощность, отдаваемой турбиной, см. рис.2.

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.

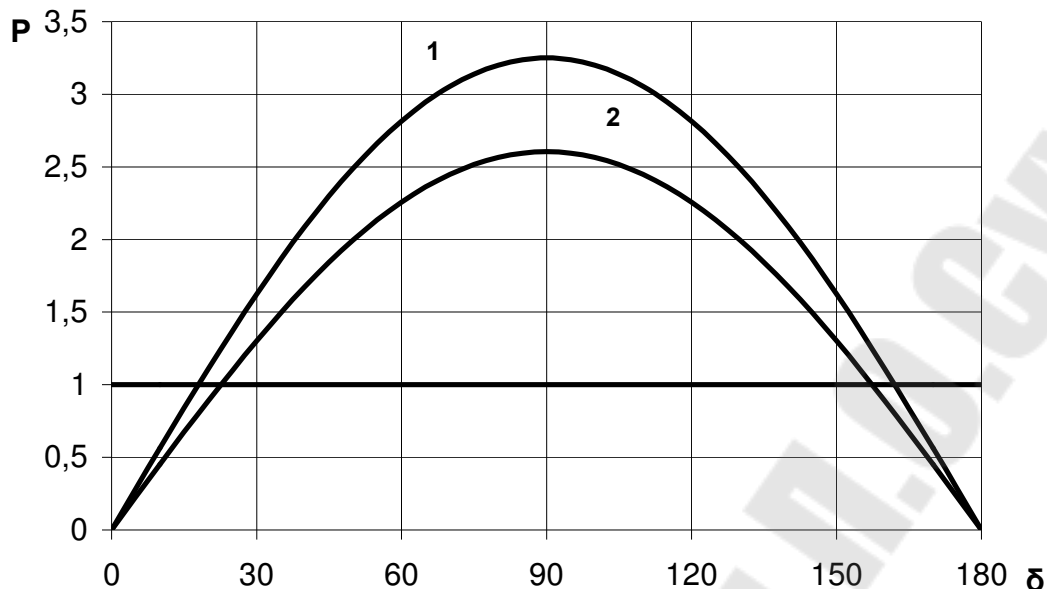
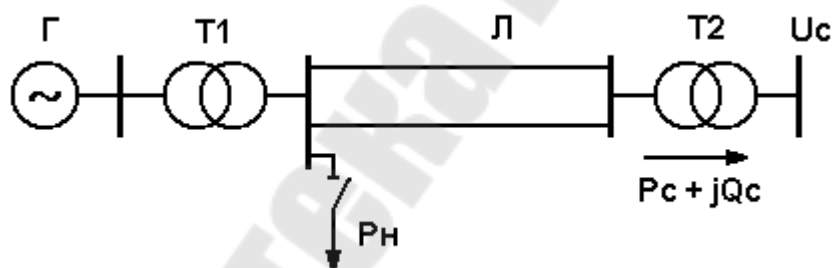


Рис. 2. Зависимости активной мощности генератора от угла δ в нормальном и послеаварийном режимах

Пример 3. Определим характеристики мощности в нормальном режиме и при включении активной нагрузки. 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.



Исходные данные:

- генератор: $P_{ном} = 100$ МВт; $\cos \varphi_{ном} = 0,8$; $x'_d = 0,278$; $U_{ном} = 10,5$ кВ; $T_j = 6,7$ с;
- трансформатор Т1: $S_{ном} = 160$ МВА; $U_{ном} = 11/230$ кВ; $U_k = 11$ %;
- линия: $x_0 = 0,4$ Ом/км; $L = 300$ км;
- трансформатор Т2: $S_{ном} = 200$ МВА; $U_{ном} = 230/110$ кВ; $U_k = 11$ %;
- нагрузка: $P_n = 16$ 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:

$$S_B = 80 \text{ МВТ}, U_B = 115 \text{ кВ}.$$

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:

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

Сопротивление генератора в относительных единицах при АРВ пропорционального типа равно:

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

Сопротивление трансформатора Т1 в относительных единицах равно:

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

Сопротивление линии в относительных единицах равно:

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

Сопротивление трансформатора Т2 в относительных единицах равно:

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

Резльтирующее сопротивление системы при АРВ пропорционального типа:

$$x_{c1*} = x_{Г*} + x_{Т1*} + x_{Л*} + x_{Т2*} = 0,178 + 0,055 + 0,091 + 0,044 = 0,368$$

Переходная ЭДС генератора:

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

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:

$$K_{P1} = \frac{3,25 - 1}{1} = 2,25.$$

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

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

Сопротивление нагрузки в относительных единицах:

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

Определяем собственное сопротивление схемы замещения для режима включенной нагрузки:

$$\begin{aligned} Z_{11} &= j(0,178 + 0,055) + \frac{j(0,091 + 0,044) \cdot 5,61}{j(0,091 + 0,044) + 5,61} = \\ &= 0,003 + j0,368 = 0,368 e^{j89,5^\circ}. \end{aligned}$$

Определяем взаимное сопротивление схемы замещения для режима включенной нагрузки:

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

Характеристика мощности генератора для режима включенной нагрузки определяется уравнением:

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

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

Предел передаваемой мощности при включении нагрузки:

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

Коэффициент запаса статической устойчивости при включении нагрузки:

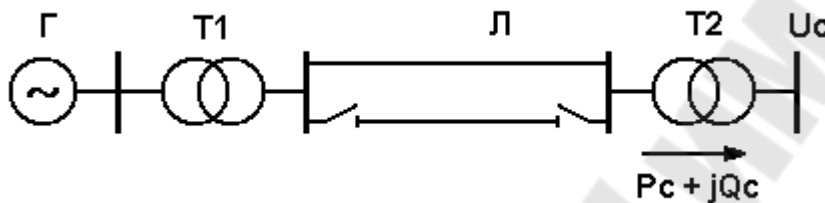
$$K_{P2} = \frac{3,278 - 1}{1} = 2,278.$$

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

2. ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ СИСТЕМЫ

При анализе динамической устойчивости системы необходимо определить возможность системы сохранять синхронный режим при больших ее возмущениях. К большим возмущениям относят: короткие замыкания (КЗ), отключение нагруженных линий электропередач, генераторов, трансформаторов, быстрое изменение мощности крупной нагрузки, пуск и самозапуск крупных электродвигателей и т.д.

Рассмотрим простейший случай, когда генератор работает через двухцепную линию на шины бесконечной мощности. Предположим, что аварийно отключается одна цепь линии. Изучим переходной процесс от нормального до послеаварийного режима.



Отключение одной цепи линии приводит к увеличению суммарного сопротивления системы и уменьшению характеристики мощности, см. рис. 3.

В первый момент времени происходит переход с характеристики мощности 1 на характеристику 2. Из-за инерции ротора угол δ не может измениться мгновенно из точки a в точку c . На валу генератора возникает избыточный момент, определяемый разностью мощности турбины и новой мощностью генератора (точка b). Под влиянием избыточного момента ротор генератора начинает ускоряться с увеличением угла δ . В результате ускорения рабочая точка начинает движение по характеристике 2 в сторону точки c . В точке c избыточный момент равен нулю и скорость вращения ротора максимальна. После прохождения точки c на ротор воздействует тормозящий момент, который достигает максимума в точке d . Далее тормозящий момент заставляет рабочую точку перемещаться в точку c с уменьшением угла δ . Проходя точку c ротор начинает заново ускоряться до точки b за счет избыточного момента. Далее начинается новый цикл относительного движения ротора генератора. Кривая $\delta(t)$ имеет затухающий характер за счет механических и электрических потерь мощности на валу.

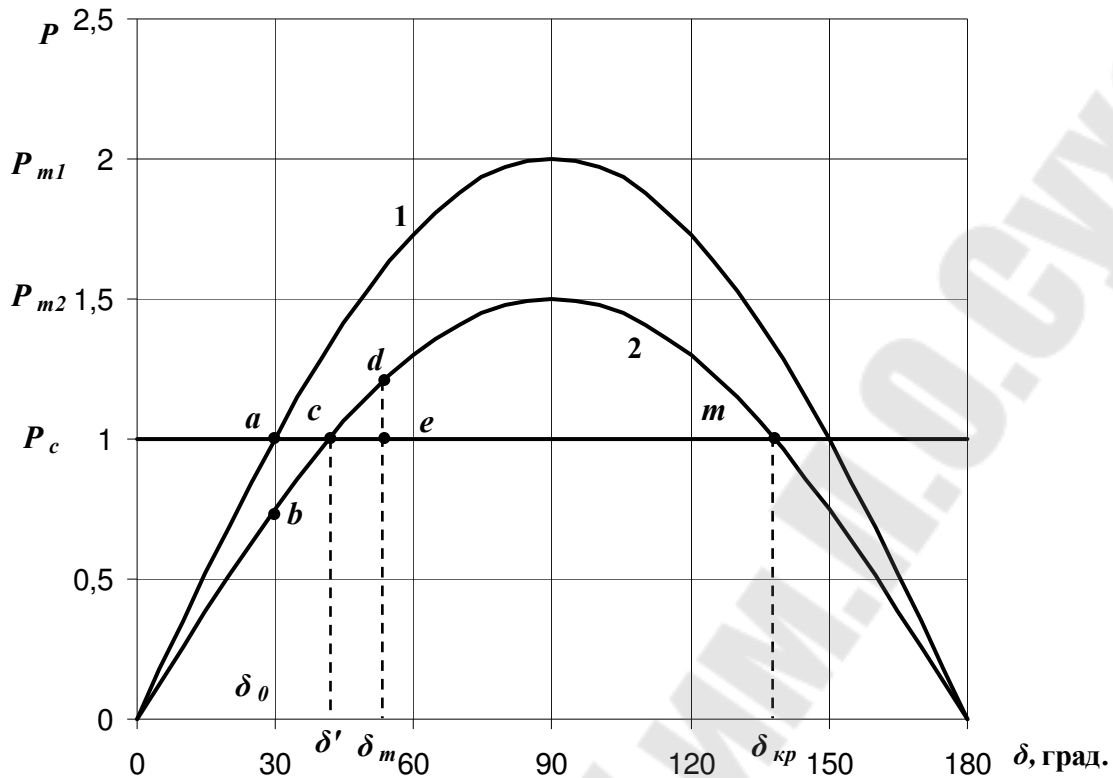


Рис. 3. Характеристика мощности при отключении цепи линии: кривая 1 – нормальный режим, кривая 2 – послеаварийный режим

Принимая во внимание, что фактическая скорость вращения ротора в переходном процессе близка к синхронной, можно записать равенство избыточного момента и мощности в относительных единицах $\Delta M = \Delta P$ при $\omega_{c*} = 1$.

Кинетическая энергия, запасенная ротором в период его ускорения определяется по формуле:

$$F_{\text{уск}} = \int_{\delta_0}^{\delta'} \Delta P d\delta = f_{abc} \cdot (2.1)$$

Изменение кинетической энергии в период торможения вычисляется по формуле:

$$F_{\text{торм}} = \int_{\delta'}^{\delta_m} \Delta P d\delta = f_{cde} \cdot (2.2)$$

Площадки f_{abc} и f_{cde} называются площадками ускорения и торможения. Для определения максимального угла отклонения ротора δ_m достаточно выполнить условие $F_{\text{уск}} = F_{\text{торм}}$. Если максимальный

угол превысит значение $\delta_{кр}$, то генератор выйдет из синхронизма. При этом возможная площадка торможения будет равна f_{cdm} .

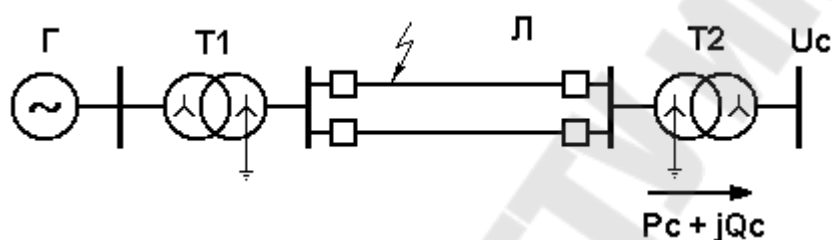
Критерий динамической устойчивости можно записать в виде неравенства:

$$F_{уск} \leq F_{торм}^{возм}. \quad (2.3)$$

Коэффициент запаса динамической устойчивости вычисляется по формуле:

$$K_3 = \frac{F_{торм}^{возм} - F_{уск}}{F_{уск}}. \quad (2.4)$$

Одним из распространенных видов больших возмущений, приводящим к необходимости анализа динамической устойчивости, являются короткие замыкания. Рассмотрим случай несимметричного короткого замыкания в одной цепи линии в простейшей системе, см. рисунок.



В схеме замещения аварийного режима к точке короткого замыкания включено шунтирующее сопротивление, значение которого зависит от вида КЗ (нулевое значение при трехфазном КЗ и максимальное – при однофазном КЗ). Схема замещения простейшей системы в режиме короткого замыкания приводится к Т-образной схеме.

При отсутствии активных сопротивлений в схеме замещения характеристики мощности всех режимов показаны на рис. 4.

В момент КЗ происходит переход с характеристики 1 на характеристику 2. На валу генератора возникает избыточный момент, определяемый разностью мощности турбины и новой мощностью генератора (точка *b*). Под влиянием избыточного момента ротор генератора начинает ускоряться с увеличением угла δ . В результате ускорения рабочая точка начинает движение по характеристике 2 в сторону точки *c*. В точке *c* происходит отключение КЗ при угле $\delta_{откл}$. Рабочая точка переходит на кривую 3 послеаварийного режима. В точке *e* на ротор воздействует тормозящий момент, равный отрезку *ed*. Запаса кинетической энергии хватает до точки *f*. Далее тормозящий момент заставляет рабочую точку перемещаться в точку *h* с уменьшением уг-

ла δ . Проходя точку h ротор начинает заново ускоряться за счет избыточного момента. Далее рабочая точка колеблется вокруг точки h по характеристике 3. За счет механических и электрических потерь мощности на валу угол δ установится в точке h .

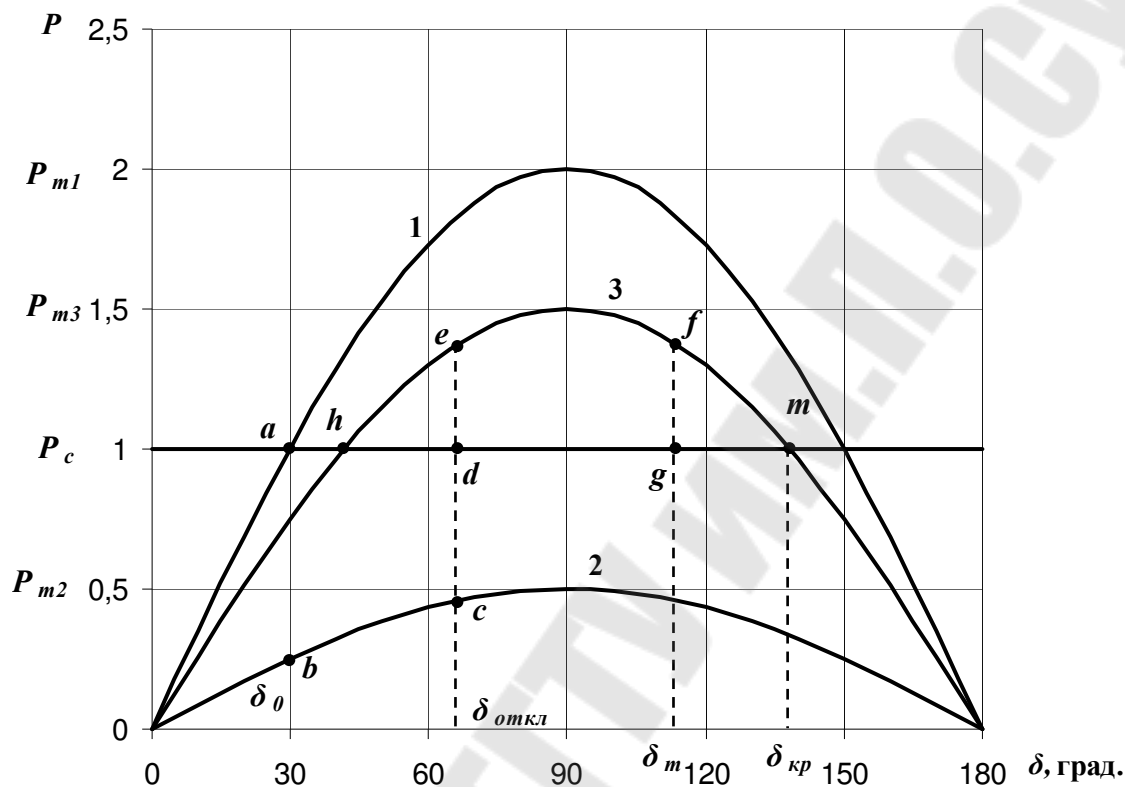


Рис. 4. Характеристика мощности при КЗ в линии: кривая 1 – нормальный режим, кривая 2 – аварийный режим, кривая 3 – послеаварийный режим

Согласно критерию динамической устойчивости генератор не выйдет из синхронизма пока точка f не превысит угла $\delta_{кр}$. Медленно перемещая угол $\delta_{откл}$ в сторону увеличения можно найти предельный угол отключения заданного КЗ $\delta_{откл}^{пред}$ при равенстве площадок $abcd$ и dem . Решая интегральное уравнение предельный угол отключения КЗ равен:

$$\delta_{откл}^{пред} = \arccos \left(\frac{P_c \cdot (\delta_{кр} - \delta_0) \cdot \frac{\pi}{180} + P_{m3} \cdot \cos \varphi_{кр} - P_{m2} \cdot \cos \delta_0}{P_{m3} - P_{m2}} \right). \quad (2.5)$$

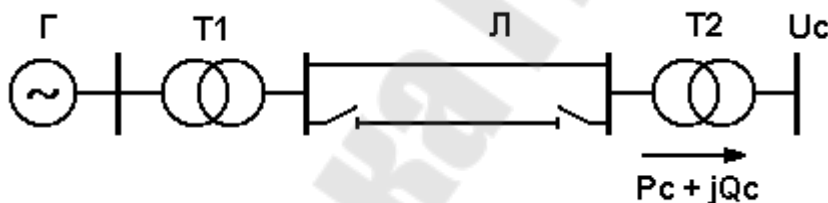
Углы в уравнении (2.5) выражены в градусах.

В реальных расчетах при выборе коммутационной аппаратуры и релейной защиты необходимо знание не предельного угла поворота ротора, а предельное время отключения КЗ. Это время может быть определено решением уравнения движения ротора методом последовательных интервалов или другими методами решения дифференциальных уравнений.

Согласно [6] предельное время отключения основной защиты в зависимости от номинального напряжения сети равно:

$U_{ном}, \text{кВ}$	110	220	330	500	750
$t_{откл}, \text{с}$	0,18	0,16	0,14	0,12	0,10

Пример 4. Рассмотрим переходной процесс изменения угла δ во времени при отключения одной цепи линии. 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.



Исходные данные:

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

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

Принимаем базисные условия:

$$S_B = 80 \text{ МВт}, U_B = 115 \text{ кВ}.$$

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:

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

Сопротивление трансформатора Т1 в относительных единицах равно:

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

Сопротивление линии в относительных единицах равно:

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

Сопротивление трансформатора Т2 в относительных единицах равно:

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

Результирующее сопротивление системы при АРВ пропорционального типа:

$$x_{c1*} = x_{Г*} + x_{Т1*} + x_{Л*} + x_{Т2*} = 0,178 + 0,055 + 0,091 + 0,044 = 0,368.$$

Переходная ЭДС генератора:

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

Предел передаваемой мощности при АРВ пропорционального типа:

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

Коэффициент запаса статической устойчивости при АРВ пропорционального типа:

$$K_{P1} = \frac{3,25 - 1}{1} = 2,25.$$

Результирующее сопротивление системы при отключении одной цепи линии:

$$x_{c2*} = 0,178 + 0,055 + 2 \cdot 0,091 + 0,044 = 0,459.$$

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:

$$K_{P2} = \frac{2,606 - 1}{1} = 1,606.$$

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

$$T_{j*} \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_{c*} - P_{m*} \sin \delta. \quad (2.6)$$

Приведем электромеханическую постоянную времени к базисным условиям:

$$T_{j*} = T_j \cdot \frac{P_{ном} / \cos \varphi_{ном}}{S_B} = 6,7 \cdot \frac{100 / 0,8}{80} = 10,5, \text{ с.} \quad (2.7)$$

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 :

$$k = \frac{360 \cdot f \cdot \Delta t^2}{T_{j*}} = \frac{360 \cdot 50 \cdot 0,05^2}{10,5} = 4,29. \quad (2.8)$$

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

чины:

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

Избыток мощности в начале первого интервала:

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

Приращение угла в течении 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 течении 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 табл. 2.1.

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

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

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

Построим график зависимости угла δ от времени, см. рис. 5.

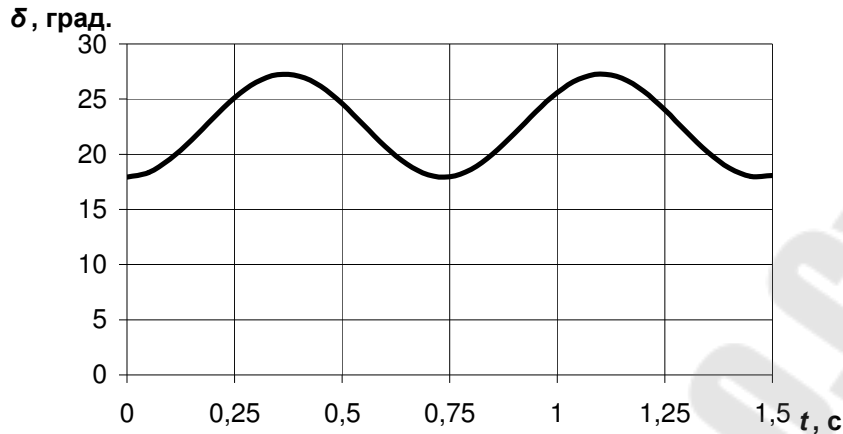
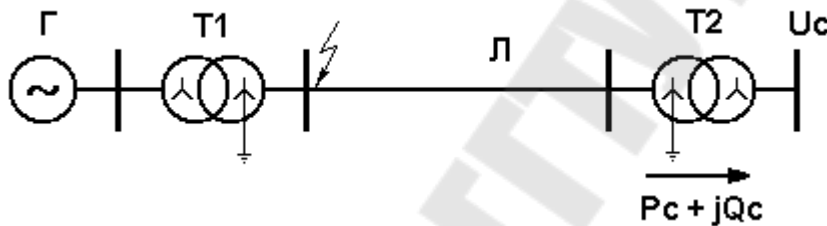


Рис. 5. Зависимость угла δ от времени при отключении цепи линии

Пример 5. В электропередаче, показанной на рисунке, в начале линии происходит трехфазное короткое замыкание. Релейной защитой линия отключается. Требуется определить предельные угол и время отключения короткого замыкания после успешного АПВ.



Исходные данные:

- генератор: $P_{ном} = 200$ МВт; $\cos \varphi_{ном} = 0,85$; $x'_d = 0,3$; $U_{ном} = 10,5$ кВ; $T_j = 5$ с;
- трансформатор Т1: $S_{ном} = 250$ МВА; $U_{ном} = 11/230$ кВ; $U_k = 11$ %;
- линия: $x_0 = 0,4$ Ом/км; $L = 120$ км;
- трансформатор Т2: $S_{ном} = 200$ МВА; $U_{ном} = 230/110$ кВ; $U_k = 11$ %;
- передаваемая мощность $P_c = 147$ МВт и $Q_c = 30$ Мвар.

Расчет выполним в относительных единицах в приближенном приведении. За базисную мощность примем $S_B = 200$ МВА, за базисное напряжение примем $U_B = 115$ кВ.

Напряжение системы в относительных единицах равно:

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

Постоянная инерции, приведенная к базисным условиям:

$$T_{j*} = T_j \cdot \frac{P_{ном} / \cos \varphi_{ном}}{S_B} = 5 \cdot \frac{200 / 0,85}{200} = 5,88 \text{ с.}$$

Передаваемая активная мощность в относительных единицах равна:

$$P_{c*} = 147/200 = 0,735.$$

Передаваемая реактивная мощность в относительных единицах равна:

$$Q_{c*} = 30/200 = 0,15.$$

Сопротивление генератора в относительных единицах при АРВ пропорционального типа равно:

$$x_{Г*} = x'_d \cdot \frac{S_B}{P_{ном} / \cos \varphi} = 0,3 \cdot \frac{200}{200 / 0,85} = 0,255.$$

Сопротивление трансформатора Т1 в относительных единицах равно:

$$x_{Т1*} = \frac{U_k}{100} \cdot \frac{S_B}{S_{ном}} = \frac{11}{100} \cdot \frac{200}{250} = 0,088.$$

Сопротивление линии в относительных единицах равно:

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

Сопротивление трансформатора Т2 в относительных единицах равно:

$$x_{Т2*} = \frac{U_k}{100} \cdot \frac{S_B}{S_{ном}} = \frac{11}{100} \cdot \frac{200}{200} = 0,110.$$

Результирующее сопротивление системы при АРВ пропорционального типа:

$$x_{c1*} = x_{Г*} + x_{Т1*} + x_{Л*} + x_{Т2*} = 0,255 + 0,088 + 0,181 + 0,110 = 0,634.$$

Переходная ЭДС генератора:

$$E'_q = \sqrt{\left(1 + \frac{0,15 \cdot 0,634}{1}\right)^2 + \left(\frac{0,735 \cdot 0,634}{1}\right)^2} = 1,190.$$

Предел передаваемой мощности при АРВ пропорционального типа в нормальном режиме:

$$P_{m1*} = \frac{1,190 \cdot 1}{0,634} = 1,88.$$

Предел мощности, передаваемой системой в аварийном режиме:

$$P_{m2*} = 0.$$

Предел мощности, передаваемой системой в послеаварийном режиме:

$$P_{m3*} = 1,88.$$

Предельный угол отключения при $\delta_0 = \arcsin(0,735/1,88) = 23,01^\circ$ и $\delta_{кр} = 180 - 23,01 = 156,99^\circ$ равен:

$$\delta_{откл}^{пред} = \arccos\left(\frac{0,735(156,99 - 23,01)\pi/180 + 1,88 \cdot \cos 156,99}{1,88}\right) = 90,35^\circ.$$

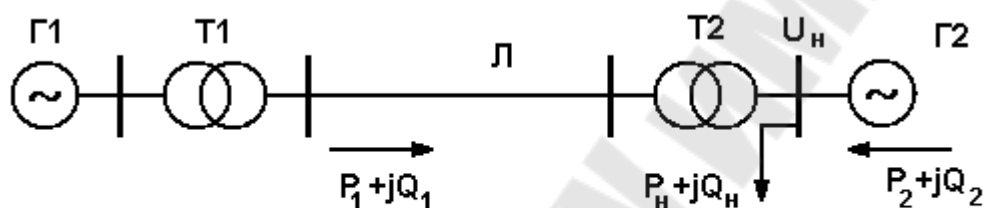
Предельное время отключения короткого замыкания равно:

$$t_{откл}^{пред} = \sqrt{\frac{2T_{j*}(\delta_{откл}^{пред} - \delta_0)}{P_0}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 5,88(90,35 - 23,01)\pi/180}{0,735}} = 4,34, \text{ с. (2.9)}$$

3. УСТОЙЧИВОСТЬ НАГРУЗКИ

Нагрузка электрической системы оказывает влияние на статическую и динамическую устойчивость генераторов энергосистемы. Если мощность приемной системы соизмерима с передаваемой мощностью, то напряжение на шинах нагрузки не остается постоянным при изменении режима электропередачи. Из-за снижения напряжения с ростом передаваемой мощности действительный предел передаваемой мощности будет намного меньше идеального предела при постоянстве напряжения приемной системы. Колебания напряжения и частоты, в свою очередь, могут вызвать неустойчивую работу электродвигательной нагрузки.

Рассмотрим электропередачу, в которой два генератора соизмеримой мощности работают на нагрузку.



При увеличении передаваемой активной мощности от первого генератора напряжение на шинах нагрузки будет уменьшаться. Построив семейство характеристик мощности для различных значений напряжения U_H можно получить действительную характеристику мощности. Для этого необходимо при увеличении угла δ перемещать рабочую точку с одной характеристики на другую с корректировкой по напряжению. Максимум действительной характеристики мощности, который называют действительным пределом мощности, достигается при угле меньше 90° (рис. 6).

Величина максимума мощности при снижении напряжения на нагрузке ниже идеального предела при постоянном напряжении. Следовательно, снижение напряжения на нагрузке ухудшает статическую устойчивость системы.

Влияние нагрузки на напряжение U_H определяется регулирующим эффектом нагрузки, т.е. степенью снижения активной и реактивной мощности нагрузки с уменьшением напряжения на ее шинах.

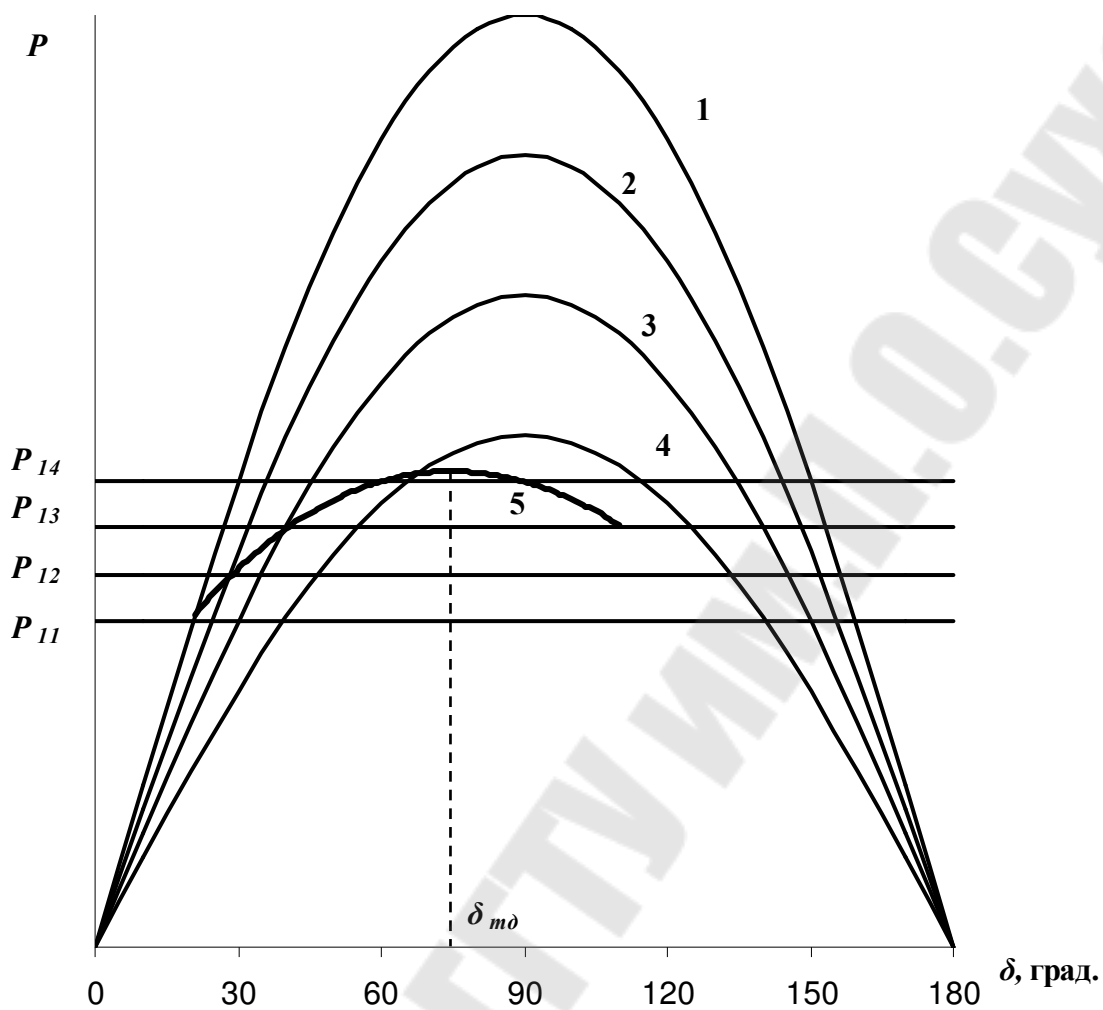
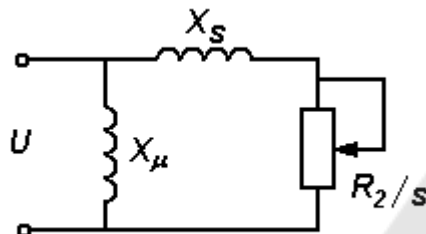


Рис. 6. Определение действительного предела мощности: кривые 1-4 – характеристики мощности при $U_{n*} = 1,0, 0,9, 0,8, 0,7$, кривая 5 – действительная характеристика мощности

Предполагая постоянство напряжения на шинах первого генератора, увеличение активной мощности первого генератора сопровождается снижением напряжения на шинах нагрузки. Но с уменьшением напряжения U_n уменьшается и мощность, потребляемая нагрузкой P_n и Q_n . Уменьшение мощности, передаваемой по линии, уменьшает падение напряжения в элементах электропередачи, что в свою очередь уменьшает степень снижения напряжения. Регулирующий эффект нагрузки оценивается производными dP/dU и dQ/dU в рабочей точке статических характеристик. Регулирующий эффект нагрузки оказыва-

ет значительное влияние на действительный предел мощности, поэтому он должен учитываться в практических расчетах.

Так как нагрузка в основном состоит из асинхронных двигателей, рассмотрим анализ их устойчивости при снижении напряжения. На рисунке приведена схема замещения асинхронного двигателя, в которой не учитываются потери активной мощности в стали и меди.



Активная мощность, потребляемая двигателем из сети, определяется как произведение вращающего момента на угловую скорость вращения магнитного потока двигателя. В относительных единицах вращающий момент двигателя принимается равным потребляемой им активной мощности.

Зависимость активной мощности от скольжения определяется по формуле:

$$P = \frac{U^2 R_2 s}{x_s^2 s^2 + R_2^2}, \text{ о.е. (3.1)}$$

Эта зависимость дает механическую характеристику мощности двигателя, показанную на рис. 7. Максимум характеристики $P_m = U^2 / 2x_s$ достигается при скольжении $s_{кр} = R_2 / x_s$. Предположим, что характеристика тормозного момента постоянная величина. В точке *a* с увеличением скольжения двигателя на Δs вращающий момент двигателя возрастает на ΔP и на валу двигателя возникает ускоряющий избыточный момент. Под влиянием которого скорость вращения начинает возрастать, а скольжение уменьшаться. Постепенно новым установившемся режимом становится точка *a*.

Если двигатель работает в точке *b*, которая тоже является точкой равновесия, то с увеличением скольжения на валу двигателя возникает тормозной избыточный момент, вызывающий дальнейший рост скольжения и опрокидывание двигателя.

Критерием статической устойчивости асинхронного двигателя является положительный знак производной

$$dP/ds > 0. \text{ (3.2)}$$

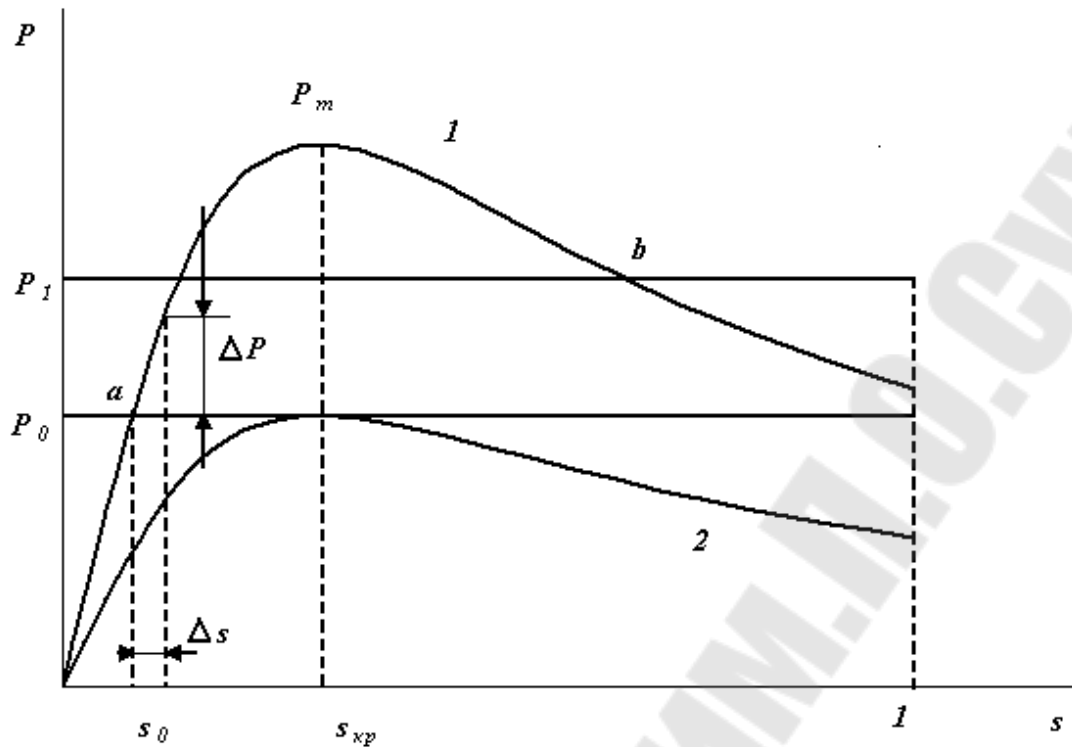


Рис. 7. Механическая характеристика асинхронного двигателя: кривая 1 при $U_{H*} = 1$, кривая 2 при $U_{H*} = 0,7$

Предельным по статической устойчивости режим двигателя достигается при скольжении $s_{кр}$. При работе асинхронного двигателя с номинальной нагрузкой на валу он опрокинется при напряжении $U_* \approx 0,7$. Если двигатель подключен к трансформатору через внешнее сопротивление (воздушную или кабельную линию), то без учета сопротивления x_μ схемы замещения значение опрокидывающего момента равно

$$P_m = U^2 / 2(x_s + x_{вн}), \text{ о.е. (3.3)}$$

При этом уменьшается критическое скольжение $s_{кр}$.

Реактивная мощность асинхронного двигателя состоит из мощности рассеяния Q_s и мощности намагничивания Q_μ . Она определяется по формуле

$$Q = Q_s + Q_\mu = \frac{U^2 x_s s^2}{x_s^2 s^2 + R_2^2} + \frac{U^2}{x_\mu}, \text{ о.е. (3.4)}$$

Статическая устойчивость синхронного двигателя оценивается критерием $dP/d\delta > 0$.

При отсутствии АРВ максимальная мощность в относительных единицах определяется по формуле

$$P_m = E_q U / (x_d + x_{вн}), \text{ о.е.}, (3.5)$$

а критическое напряжение – по формуле

$$U_{кр} = P_0 (x_d + x_{вн}) / E_q, \text{ о.е.} (3.6)$$

При работе синхронного двигателя с АРВ пропорционального типа он замещается переходной ЭДС E'_q и переходным сопротивлением x'_d . Критическое напряжение равно

$$U'_{кр} = P_0 (x'_d + x_{вн}) / E'_q, \text{ о.е.} (3.7)$$

Реактивная мощность синхронного двигателя при отсутствии АРВ определяется по формуле

$$Q = \sqrt{\left(\frac{E_q U}{x_d}\right)^2 - P^2} - \frac{U^2}{x_d}, \text{ о.е.} (3.8)$$

Реактивная мощность синхронного двигателя при АРВ пропорционального типа определяется по формуле

$$Q = \sqrt{\left(\frac{E'_q U}{x'_d}\right)^2 - P^2} - \frac{U^2}{x'_d}, \text{ о.е.} (3.9)$$

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

Статические характеристики нагрузки по напряжению могут быть получены: 1) из натурного 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. Согласно методики [7] при отсутствии конкретных данных рекомендуется принимать следующие характеристики комплексной нагрузки:

– для активной нагрузки в среднем

$$P_{н*} \approx U_*, \text{ о.е.} (3.10)$$

с диапазоном изменения

$$P'_{н*} = 0,6 + 0,4U_*, \text{ о.е.}, (3.11)$$

$$P''_{н*} = -0,4 + 1,4U_*, \text{ о.е.}; (3.12)$$

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

$$Q_{H*} = \frac{4,15}{\operatorname{tg} \varphi_H} - \frac{9,5}{\operatorname{tg} \varphi_H} U_* + \left(\frac{5,6}{\operatorname{tg} \varphi_H} + 1 \right) U_*^2, \text{ о.е. (3.13)}$$

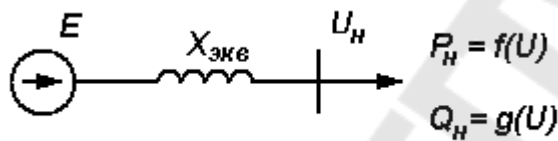
с диапазоном изменения

$$Q'_{H*} = \frac{5,6}{\operatorname{tg} \varphi_H} - \frac{11,2}{\operatorname{tg} \varphi_H} U_* + \left(\frac{5,6}{\operatorname{tg} \varphi_H} + 1 \right) U_*^2, \text{ о.е., (3.14)}$$

$$Q''_{H*} = \frac{3,35}{\operatorname{tg} \varphi_H} - \frac{8,9}{\operatorname{tg} \varphi_H} U_* + \left(\frac{5,6}{\operatorname{tg} \varphi_H} + 1 \right) U_*^2, \text{ о.е. (3.15)}$$

В практических задачах определения статической устойчивости узлов нагрузки применение критерия $dP/ds > 0$ затруднительно из-за трудности определения характеристик эквивалентного двигателя. Рассмотрим критерии устойчивости нагрузки, основанные на статических характеристиках.

Применим следующий критерий $dE/dU > 0$ – знак производной ЭДС генератора, питающего нагрузку, определяет зону устойчивости. Для проверки устойчивости узла нагрузки, представим схему замещения в виде:



Пусть в исходном режиме эквивалентная ЭДС генератора равна E_0 и напряжение на шинах нагрузки U_0 . Снижая напряжение на шинах нагрузки, можно по статическим характеристикам определить новые значения активной и реактивной мощностей. Рассчитав новый режим, определяем новое значение ЭДС. Проведя ряд расчетов в сторону снижения и увеличения напряжения, можно построить зависимость $E = f(U)$, см. рис. 8. Для ЭДС E_0 возможны два режима работы генератора на характеристике $E = f(U)$ – в точках a и b . В точке a производная $dE/dU > 0$, в точке b – $dE/dU < 0$. Каждой точке зависимости $E = f(U)$ соответствует свое скольжение, возрастающее при снижении напряжения. При этом точка a на рис. 8 соответствует точке a на механической характеристике рис. 7. Предельный режим определяется значением ЭДС E_{\min} в точке, где $dE/dU = 0$.

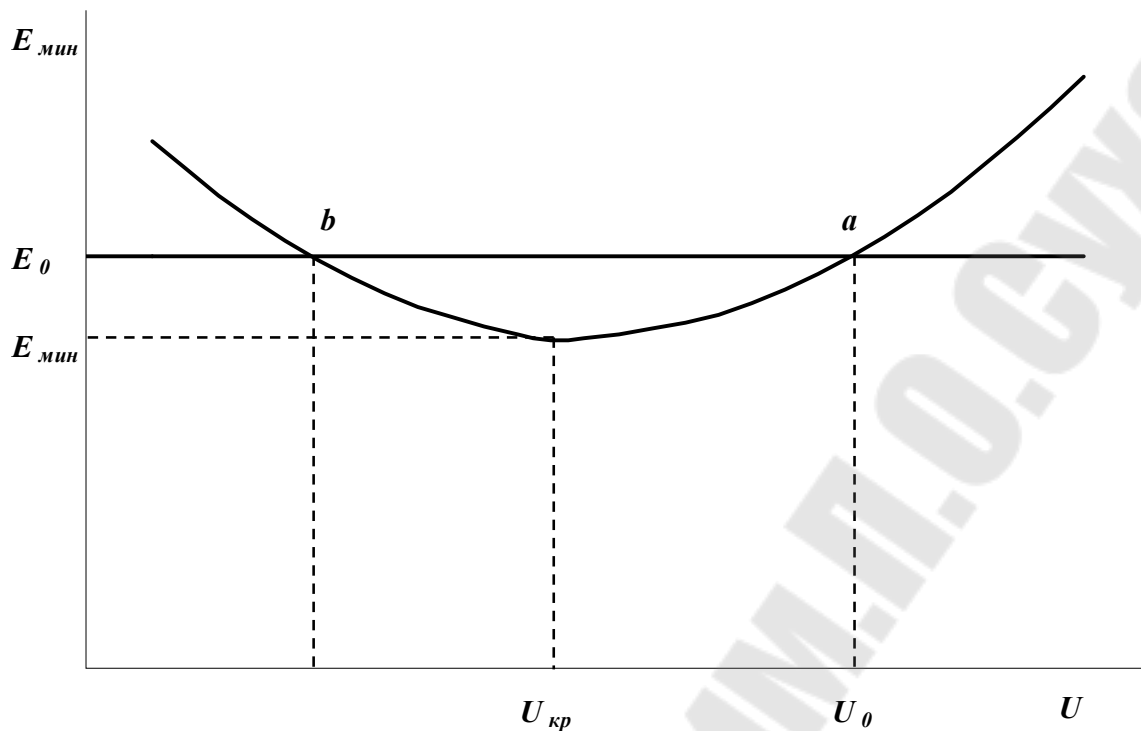


Рис. 8. Определение критерия dE/dU для нагрузки

Запас статической устойчивости нагрузки по напряжению определяется по формуле

$$K_u = \frac{U_0 - U_{кр}}{U_0}, \text{ о.е. (3.16)}$$

При расчетах устойчивости нагрузки в системе, состоящей из группы электростанций и выдающих мощность в крупный узел нагрузки, удобно использовать критерий

$$\frac{d(\sum Q_G - \sum Q_H)}{dU} = \frac{d\Delta Q}{dU} < 0. \text{ (3.17)}$$

На рис. 9 показаны характеристики реактивной мощности эквивалентного генератора и нагрузки. Характеристика реактивной мощности генератора вычисляется при неизменной ЭДС генератора, текущем напряжении и равенства активных мощностей нагрузки и генератора. Мощность нагрузки определяется по статической характеристике для текущего напряжения. Кривые реактивной мощности генератора и нагрузки имеют две точки пересечения. Точки a и b на рис. 9. соответствуют точкам a и b на рис. 8. Если исходный режим работы устойчив, то при подключении к нагрузке дополнительной реактивной мощности ΔQ напряжение на шинах уменьшится на ΔU .

При этом положительному ΔQ соответствует отрицательное ΔU , что подтверждает критерий (3.17).

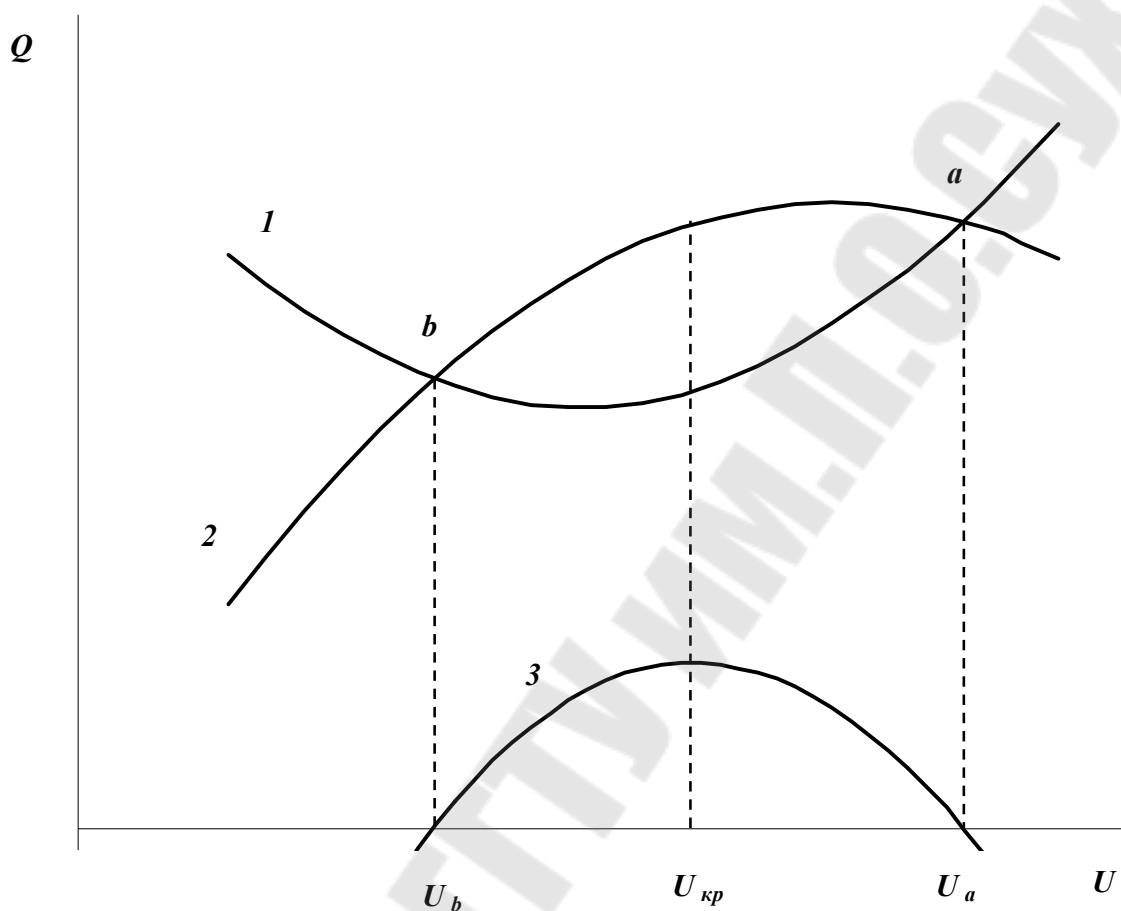
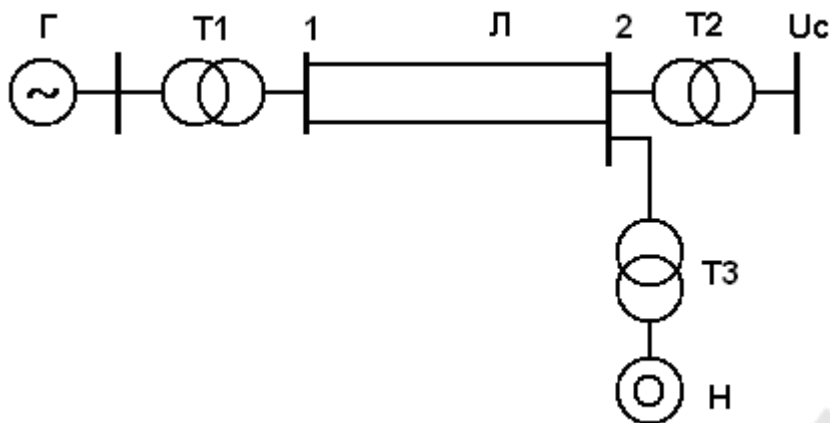


Рис. 9. Определение критерия $d\Delta Q/dU$ для нагрузки: кривая 1 – $\sum Q_n$, кривая 2 – $\sum Q_r$, кривая 3 – ΔQ

Пример 6. Электростанция питает по двухцепной линии потребителей на подстанции ТЗ. Нагрузка представлена в виде эквивалентного асинхронного двигателя, присоединенного к шинам низкого напряжения трансформатора ТЗ. Мощности нагрузки и генератора равны, поэтому значение перетока мощности в систему равно нулю. Отсюда напряжение U_2 и U_c равны и не зависят от режимов работы передачи и двигателя.

Требуется: найти критическое напряжение на шинах 2 при котором произойдет опрокидывание эквивалентного двигателя, найти нормальное и критическое скольжение, найти максимальный момент двигателя и запас устойчивости по мощности и по напряжению.



Исходные данные:

- генератор: $P_{ном} = 100$ МВт; $\cos \varphi_{ном} = 0,8$; $x'_d = 0,278$; $U_{ном} = 10,5$ кВ;
- трансформаторы Т1, Т3: $S_{ном} = 160$ МВА; $U_{ном} = 11/230$ кВ; $U_k = 11$ %;
- линия: $x_0 = 0,4$ Ом/км; $L = 300$ км;
- трансформатор Т2: $S_{ном} = 200$ МВА; $U_{ном} = 230/110$ кВ; $U_k = 11$ %;
- нагрузка (эквивалентный двигатель): $P_n = 100$ МВт; $\cos \varphi_n = 0,8$; $x_s = 0,22$; $R_2 = 0,017$.

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

Полная мощность генератора и нагрузки равны:

$$S_G = S_H = \frac{P_n}{\cos \varphi_n} = \frac{100}{0,8} = 125, \text{ МВА.}$$

Принимаем базисные условия:

$$S_B = 125 \text{ МВт, } U_B = 115 \text{ кВ.}$$

Напряжение системы в относительных единицах равно:

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

Передаваемая и потребляемая активная мощность в относительных единицах равна:

$$P_0 = 100/125 = 0,8.$$

Сопротивление трансформаторов Т1 и Т3 в относительных единицах равно:

$$x_{T1*} = x_{T3*} = \frac{U_k}{100} \cdot \frac{S_B}{S_{ном}} = \frac{11}{100} \cdot \frac{125}{160} = 0,086.$$

Внешнее сопротивление двигателя к точке постоянного напря-

жения равно:

$$x_{\text{вн}} = x_{T3*} = 0,086.$$

Критическое напряжение:

$$U_{\text{кр}} = \sqrt{2 P_0 (x_{\text{вн}} + x_s)} = \sqrt{2 \cdot 0,8 \cdot (0,086 + 0,22)} = 0,70.$$

Определяем скольжение двигателя при напряжении $U_2 = 1$, решая уравнение (3.1)

$$P_0 = \frac{U_2^2 R_2 s}{(x_{\text{вн}} + x_s)^2 s^2 + R_2^2} \text{ или } P_0 (x_{\text{вн}} + x_s)^2 s^2 - U_2^2 R_2 s + P_0 R_2^2 = 0.$$

Получим квадратное уравнение $s^2 - 0,227s + 0,0031 = 0$, решая его получим скольжение $s_0 = 0,015$.

Критическое скольжение эквивалентного двигателя

$$s_{\text{кр}} = R_2 / (x_s + x_{\text{вн}}) = 0,017 / (0,22 + 0,086) = 0,056.$$

Максимальный момент двигателя при $U_2 = 1$ равен

$$P_m = \frac{U_2^2}{2(x_s + x_{\text{вн}})} = \frac{1^2}{2(0,22 + 0,086)} = 1,63.$$

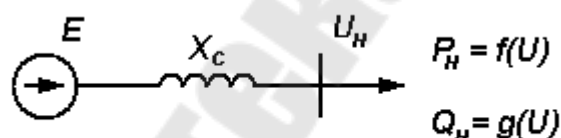
Коэффициент запаса устойчивости двигателя по мощности:

$$K_P = \frac{P_m - P_0}{P_0} = \frac{1,63 - 0,8}{0,8} = 1,04.$$

Коэффициент запаса устойчивости двигателя по напряжению:

$$K_U = \frac{U_2 - U_{\text{кр}}}{U_2} = \frac{1 - 0,7}{1} = 0,3.$$

Пример 7. На рисунке представлена схема замещения питания нагрузки от системы.



Требуется: определить критическое напряжение на шинах нагрузки и коэффициент запаса устойчивости по напряжению, используя критерий $dE/dU > 0$.

Статические характеристики нагрузки имеют вид:

$$P(U_*) = P_{\text{н}*} (0,2 + 0,8U),$$

$$Q(U_*) = Q_{\text{н}*} (5 - 9U + 5U^2).$$

Исходные данные: при напряжении $U_{\text{н}*} = 1$ активная мощность на-

грузки $P_{H*} = 1$, реактивная мощность нагрузки $Q_{H*} = 0,6$, сопротивление системы $x_{c*} = 0,402$.

Определяем эквивалентную ЭДС генератора

$$E = \sqrt{\left(1 + \frac{0,6 \cdot 0,402}{1}\right)^2 + \left(\frac{1 \cdot 0,402}{1}\right)^2} = 1,30.$$

При снижении напряжения до $U_{H*} = 0,95$ мощность нагрузки равна

$$P(0,95) = 1(0,2 + 0,8 \cdot 0,95) = 0,96,$$

$$Q(0,95) = 0,6(5 - 9 \cdot 0,95 + 5 \cdot 0,95^2) = 0,58$$

и эквивалентную ЭДС генератора

$$E = \sqrt{\left(1 + \frac{0,58 \cdot 0,402}{1}\right)^2 + \left(\frac{0,96 \cdot 0,402}{1}\right)^2} = 1,26.$$

Результаты расчета при снижении напряжения сведем в таблицу

U	1,00	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75	0,70	0,65	0,60	0,55
P_H	1,00	0,96	0,92	0,88	0,84	0,80	0,76	0,72	0,68	0,64
Q_H	0,60	0,58	0,57	0,58	0,60	0,64	0,69	0,76	0,84	0,94
E	1,30	1,26	1,23	1,20	1,18	1,17	1,18	1,20	1,25	1,32

Точка перегиба кривой $E(U)$ соответствует критическому напряжению $U_{кр} = 0,75$.

Коэффициент запаса устойчивости нагрузки по напряжению:

$$K_U = \frac{1 - 0,75}{1} = 0,25.$$

4. САМОЗАПУСК И ПУСК 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_B и мощностью S_B . 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:

$$\omega_c = 2\pi n_c / 60, \text{ с}^{-1}, \quad (4.1)$$

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

Определяют время замедления агрегата при номинальной нагрузке равно:

$$\tau_{\text{ном}} = J_{\text{пр}} \cdot \omega_c^2 / P_{\text{ном}} \cdot 0,001, \text{ с}, \quad (4.2)$$

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

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

Определяют время замедления агрегата при фактической нагрузке равно:

$$\tau_j = \tau_{\text{ном}} / k_3, \text{ с}, \quad (4.3)$$

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:

$$\omega_* = 1 - t_{\text{п}} / \tau_j, \text{ о.е.}; \quad (4.4)$$

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

$$\omega_* = \tau_j / (t_{\text{п}} + \tau_j), \text{ о.е.}, \quad (4.5)$$

где $t_{\text{п}}$ – время перерыва электроснабжения, с.

Скольжение при выбеге электродвигателя:

$$s = 1 - \omega_*, \text{ о.е.} \quad (4.6)$$

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

$$s_{\text{кр}} = s_{\text{ном}} \left(m_{\text{кр}} + \sqrt{m_{\text{кр}}^2 - 1} \right), \text{ о.е.} \quad (4.7)$$

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

$$s_{\text{кр}} = s_{\text{ном}} \sqrt{\frac{i_{\text{п}} - 1}{(1 + i_0^2)(1 + 2s_{\text{ном}})}}, \text{ о.е.} \quad (4.8)$$

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

$$i_0 = \sin \varphi_{\text{ном}} - \frac{\cos \varphi_{\text{ном}}}{m_{\text{кр}} + \sqrt{m_{\text{кр}}^2 - 1}}, \text{ о.е.} \quad (4.9)$$

Номинальное скольжение:

$$s_{\text{ном}} = 1 - n_{\text{ном}} / n_{\text{с}}, \text{ о.е.}, \quad (4.10)$$

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

Кратность пускового тока при скольжении s определяется по формуле

$$i_{\text{пс}} = i_{\text{п}} \sqrt{\frac{1 + s_{\text{кр}}^2}{1 + (s_{\text{кр}}/s)^2}}, \text{ о.е.} \quad (4.11)$$

Расчетная пусковая мощность электродвигателя при номинальном напряжении равна:

$$S_{\text{пс}} = \frac{P_{\text{ном}} \cdot i_{\text{пс}}}{\cos \varphi_{\text{ном}} \cdot \eta_{\text{ном}}}, \text{ кВА.} \quad (4.12)$$

Индуктивное сопротивление двигателя равно:

$$x_{\text{дв}*} = \frac{S_{\text{Б}} U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{пс}} U_{\text{Б}}^2}, \text{ о.е.} \quad (4.13)$$

Суммарное сопротивление n двигателей:

$$x_{\text{дв}* \Sigma} = x_{\text{дв}*} / n, \text{ о.е.} \quad (4.14)$$

Сопротивление самозапускающихся двигателей с учетом неотключенной нагрузки определяется по формуле:

$$x'_{дв*\Sigma} = \frac{x_{дв*\Sigma} x_{н*}}{x_{дв*\Sigma} + x_{н*}}, \text{ о.е. (4.15)}$$

Остаточное напряжение на выводах двигателя равно:

$$U_{ост*} = \frac{U_{с*} x_{дв*\Sigma}}{x_{дв*\Sigma} + x_{тр*}}, \text{ о.е., (4.16)}$$

где $U_{с*}$ – напряжение системы, принимается равным 1,05 в относительных единицах при расчете пуска и самопуска двигателей.

Кратность тока самопуска через трансформатор

$$k_i = \frac{U_{с*}}{x_{дв*\Sigma} + x_{тр*}}, \text{ о.е., (4.17)}$$

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

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

$$U_{дв*} \geq \sqrt{1,1 m_{сs} / m_{двs}}, \text{ о.е., (4.18)}$$

где $m_{сs}$ – момент сопротивления механизма при скольжении s ; $m_{двs}$ – вращающийся момент двигателя при скольжении s .

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

- для механизмов с постоянным моментом сопротивления:

$$U_{дв} \geq \sqrt{1,37 m_{тр} k_z / m_{мин}}, \text{ о.е.; (4.19)}$$

- для механизмов с вентиляторным моментом сопротивления:

$$U_{дв} \geq \sqrt{1,22 m_{тр} k_z / m_{кр}}, \text{ о.е., (4.20)}$$

где $m_{тр}$ – кратность момента трогания механизма; $m_{мин}$ – кратность минимального момента АД.

Выбор способа пуска (самопуска) высоковольтных электродвигателей определяется следующими условиями:

- снижение напряжения в сети при пуске двигателя не должно влиять на нормальную работу присоединенных к той же сети потребителей: при частых пусках и совместном питании двигателей и

освещения $\Delta U \leq 10\%$, при редких пусках и совместном питании двигателей и освещения $\Delta U \leq 20\%$, при раздельном питании двигателей и освещения $\Delta U \leq 25\%$, при люминесцентном освещении $\Delta U \leq 10\%$;

- 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, так как 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. Ток при пуске двигателя через трансформатор от шин бесконечной мощности в относительных единицах равен

$$I_{п*} = \frac{U_{с*}}{x_{дв*} + x_{с*}}, \text{ о.е.}, (4.21)$$

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.

Расчет пуска двигателя аналогичен расчету самозапуска электродвигателей с учетом скольжения $s = 1$.

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 вентиляционная.

Исходные данные двигателя: $P_{ном} = 500$ кВт, $U_{ном} = 6$ кВ, $\eta_{ном} = 95,6\%$, $\cos \varphi_{ном} = 0,92$, $m_{кр} = 2,1$, $i_{п} = 6$, $n_{ном} = 2980$ об./мин., $J_{пр} = 15$ кг·м, $k_3 = 0,8$, $m_{тр} = 0,2$, $m_{мин} = 0,8$.

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:

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

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:

$$s_{\text{кр}} = 0,0067 \left(2,1 + \sqrt{2,1^2 - 1} \right) = 0,026$$

Кратность пускового тока при скольжении s равна:

$$i_{\text{пс}} = 6 \cdot \sqrt{\frac{1 + 0,026^2}{1 + (0,026/0,21)^2}} = 6,05.$$

Расчетная пусковая мощность электродвигателя при номинальном напряжении равна:

$$S_{\text{пс}} = 500 \cdot 6,05 / (0,92 \cdot 0,956) = 3439 \text{ кВА.}$$

Индуктивное сопротивление двигателя равно:

$$x_{\text{дв}*} = \frac{6300 \cdot 6^2}{3439 \cdot 6,3^2} = 1,662.$$

Суммарное сопротивление восьми двигателей:

$$x_{\text{дв}* \Sigma} = 1,662/8 = 0,208.$$

Индуктивное сопротивление трансформатора равно:

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

Остаточное напряжение на выводах двигателя равно:

$$U_{\text{ост}*} = \frac{1,05 \cdot 0,208}{0,208 + 0,075} = 0,77.$$

Кратность тока самозапуска через трансформатор

$$k_i = \frac{1,05}{0,208 + 0,075} = 3,71.$$

Кратность тока самозапуска через трансформатор $3,71 \leq 4$, то имеется возможность до трех самозапусков в сутки.

Проверяем по условию обеспечения пускового момента на всем диапазоне скольжения:

$$U_{дв*} = 0,77 \geq \sqrt{1,22 \cdot 0,2 \cdot 0,8/2,1} = 0,30.$$

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, $U_{ном} = 35/6,3$ кВ, $U_k = 7,5$ %. Нагрузка на валу двигателей постоянная.

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

Синхронная угловая скорость определяется из выражения:

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

Время замедления агрегата при номинальной нагрузке равно:

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

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:

$$s_{ном} = 1 - 985/1000 = 0,015.$$

Критическое скольжение:

$$s_{кр} = 0,015 \left(2,2 + \sqrt{2,2^2 - 1} \right) = 0,062.$$

Кратность пускового тока при скольжении s определяется по формуле

$$i_{пс} = 6 \cdot \sqrt{\frac{1 + 0,062^2}{1 + (0,062/0,15)^2}} = 6,60.$$

Расчетная пусковая мощность электродвигателя при номинальном напряжении равна:

$$S_{пс} = 500 \cdot 6,60 / (0,925 \cdot 0,86) = 4148, \text{ кВА}.$$

Индуктивное сопротивление двигателя равно:

$$x_{дв*} = \frac{6300 \cdot 6^2}{4148 \cdot 6,3^2} = 1,378.$$

Суммарное сопротивление шести двигателей:

$$x_{дв*\Sigma} = 1,378/6 = 0,230.$$

Индуктивное сопротивление трансформатора равно:

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

Остаточное напряжение на выводах двигателя равно:

$$U_{ост*} = \frac{1,05 \cdot 0,230}{0,230 + 0,075} = 0,79.$$

Кратность тока самозапуска через трансформатор

$$k_i = \frac{1,05}{0,230 + 0,075} = 3,44 \leq 4 \text{ (условие выполнено).}$$

Проверяем по условию обеспечения пускового момента на всем диапазоне скольжения:

$$U_{об} = 0,79 \geq \sqrt{1,37 \cdot 0,2 \cdot 0,8 / 1,2} = 0,427.$$

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, $U_{ном} = 35/6,3$ кВ, $U_k = 7,5$ %. Нагрузка на валу двигателей вентиляторная.

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

Синхронная угловая скорость определяется из выражения:

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

Время замедления агрегата при номинальной нагрузке равно:

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

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:

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

Кратность пускового тока при скольжении s определяется по формуле

$$i_{\text{пс}} = 6 \cdot \sqrt{\frac{1+0,034^2}{1+(0,034/0,39)^2}} = 6,03.$$

Расчетная пусковая мощность электродвигателя при номинальном напряжении равна:

$$S_{\text{пс}} = 1000 \cdot 6,03 / (0,83 \cdot 0,947) = 7672 \text{ кВА}.$$

Индуктивное сопротивление двигателя равно:

$$x_{\text{дв*}} = \frac{6300 \cdot 6^2}{7672 \cdot 6,3^2} = 0,775.$$

Суммарное сопротивление четырех двигателей:

$$x_{\text{дв*}\Sigma} = 0,775/4 = 0,194.$$

Индуктивное сопротивление трансформатора равно:

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

Остаточное напряжение на выводах двигателя равно:

$$U_{\text{ост*}} = \frac{1,05 \cdot 0,194}{0,194 + 0,075} = 0,76.$$

Кратность тока самозапуска через трансформатор

$$k_i = \frac{1,05}{0,194 + 0,075} = 3,90.$$

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:

$$U_{\text{дв*}} = 0,76 \geq \sqrt{1,22 \cdot 0,3 \cdot 0,8 / 2,6} = 0,34.$$

Все условия по проверке самозапуска асинхронных электродви-

гателей выполнены, поэтому самозапуск возможен не более трех раз в сутки.

Пример 11. Рассчитать возможность прямого пуска асинхронного двигателя. Двигатель и нагрузка питаются от системы неограниченной мощности через трансформатор мощностью 6,3 МВА, $U_{\text{НОМ}} = 35/6,3$ кВ, $U_{\text{к}} = 7,5$ %.

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

Расчетная пусковая мощность электродвигателя при номинальном напряжении равна:

$$S_{\text{пс}} = 1000 \cdot 6 / (0,83 \cdot 0,947) = 7633 \text{ кВА.}$$

Сопротивление двигателя равно:

$$z_{\text{дв*}} = \frac{6300 \cdot 6^2}{7633 \cdot 6,3^2} = 0,749.$$

Сопротивление нагрузки равно:

$$z_{\text{н*}} = \frac{1^2}{3/6,3} = 2,1.$$

Сопротивление двигателя с учетом нагрузки равно:

$$z'_{\text{дв*}} = \frac{0,749 \cdot 2,1}{0,749 + 2,1} = 0,572.$$

Индуктивное сопротивление трансформатора равно:

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

Остаточное напряжение на шинах двигателя и нагрузки равно:

$$U_{\text{ост*}} = \frac{1,05 \cdot 0,572}{0,572 + 0,075} = 0,93.$$

Кратность тока пуска через трансформатор

$$k_i = \frac{1,05}{0,572 + 0,075} = 1,62 \leq 4 \text{ (условие выполнено).}$$

Проверяем по условию обеспечения пускового момента на всем диапазоне скольжения:

$$U_{\text{дв*}} = 0,93 \geq \sqrt{1,22 \cdot 0,3 \cdot 0,8/2,6} = 0,34 \text{ (условие выполнено).}$$

Пример 12. Рассчитать возможность реакторного пуска асинхронного двигателя с ограничением кратности пуска до 4,5. Двигатель и нагрузка питаются от системы неограниченной мощности через трансформатор мощностью 6,3 МВА, $U_{\text{НОМ}} = 35/6,3$ кВ, $U_{\text{к}} = 7,5$ %.

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

Полная мощность электродвигателя при номинальном напряжении равна:

$$S_{\text{дв}} = 1000 / (0,83 \cdot 0,947) = 1272 \text{ кВА.}$$

Расчетная пусковая мощность электродвигателя при номинальном напряжении равна:

$$S_{\text{п}} = 1000 \cdot 6 / (0,83 \cdot 0,947) = 7633 \text{ кВА.}$$

Сопротивление двигателя равно:

$$z_{\text{дв}*} = \frac{6300 \cdot 6^2}{7633 \cdot 6,3^2} = 0,749.$$

Предварительно принимаем к установке реактор типа РБ10-630-2У3. Сопротивление реактора равно:

$$z_{\text{р}*} \approx x_{\text{р}*} = x_{\text{р}} \frac{S_{\text{Б}}}{U_{\text{нсети}}^2} = 2 \frac{6,3}{6,3^2} = 0,317. \quad (4.22)$$

Сопротивление нагрузки равно:

$$z_{\text{н}*} = \frac{1^2}{3 / 6,3} = 2,1.$$

Сопротивление двигателя с учетом нагрузки равно:

$$z'_{\text{дв}*} = \frac{(0,749 + 0,317) \cdot 2,1}{(0,749 + 0,317) + 2,1} = 0,707.$$

Сопротивление трансформатора равно:

$$z_{\text{тр}*} = 7,5 / 100 \cdot 6300 / 6300 = 0,075.$$

Остаточное напряжение на шинах нагрузки равно:

$$U_{\text{ост}*} = \frac{1,05 \cdot 0,707}{0,707 + 0,075} = 0,95.$$

Кратность тока пуска двигателя

$$I_{\text{п}*} = \frac{0,95}{0,749 + 0,317} \frac{6300}{1272} = 4,41 \leq 4,5 \text{ (условие выполнено).}$$

Остаточное напряжение на шинах двигателя равно:

$$U'_{\text{ост}*} = \frac{0,95 \cdot 0,749}{0,749 + 0,317} = 0,67.$$

Кратность тока пуска через трансформатор

$$k_i = \frac{1,05}{0,707 + 0,075} = 1,34.$$

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

Проверяем по условию обеспечения пускового момента на всем диапазоне скольжения:

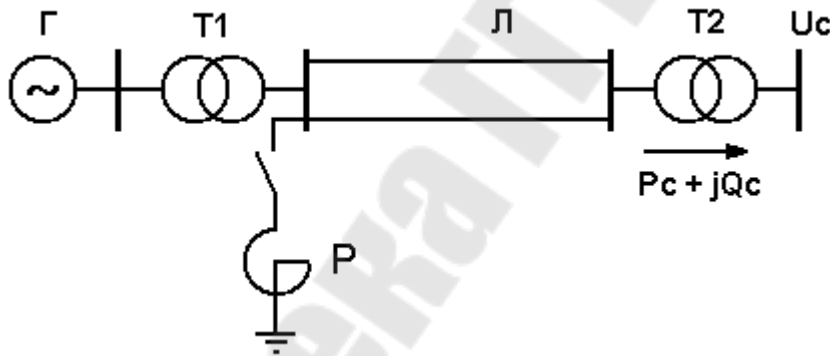
$$U_{дв*} = 0,67 \geq \sqrt{1,22 \cdot 0,3 \cdot 0,8/2,6} = 0,34 \text{ (условие выполнено).}$$

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. 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:

а) при точном приведении коэффициентов трансформации;



б) при приближенном приведении.

Исходные данные:

– генератор: $P_{ном} = 300$ МВт; $\cos \varphi_{ном} = 0,85$; $x'_d = 0,352$; $U_{ном} = 20$ кВ; $x_d = 2,11$; $T_j = 7$ с;

– трансформатор Т1: $S_{ном} = 400$ МВА; $U_{ном} = 20/345$ кВ; $U_k = 11$ %;

– линия: $x_0 = 0,4$ Ом/км; $L = 245$ км;

– трансформатор Т2: $S_{ном} = 400$ МВА; $U_{ном} = 330/242$ кВ; $U_k = 11$ %;

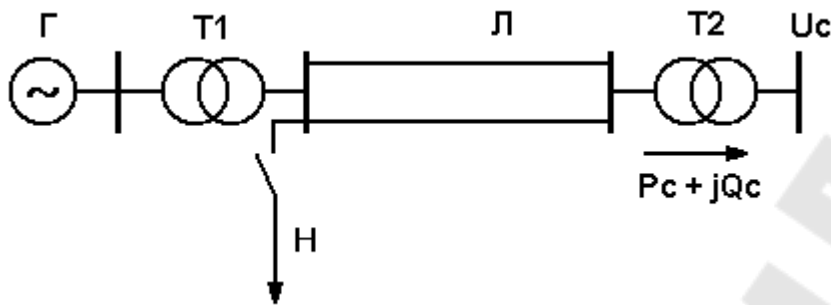
– передаваемая мощность $P_c = 260$ МВт и $Q_c = 130$ Мвар.

Задача 2. Рассмотрим схему электропередачи, в которой генератор работает через трансформатор и двухцепную линию электропередачи на

шины приемной системы бесконечной мощности. 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.

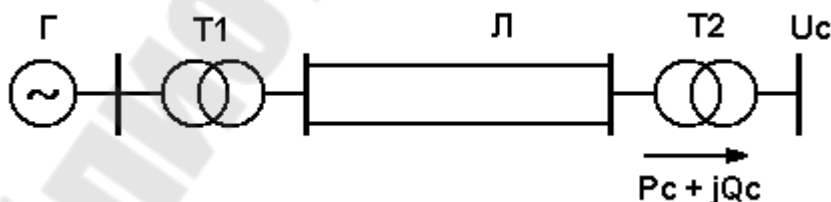


Исходные данные:

- 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. 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.



Исходные данные:

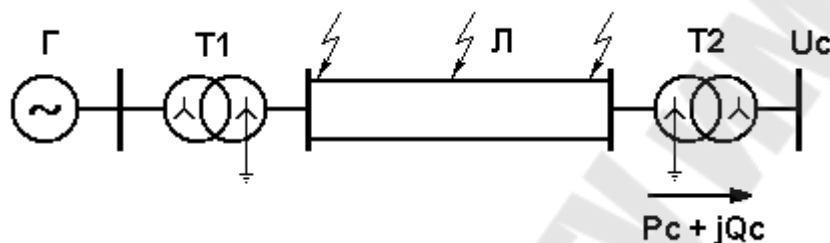
- генератор: $P_{\text{ном}} = 160$ МВт; $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,85$; $x'_d = 0,304$; $U_{\text{ном}} = 18$ кВ;

$$x_d = 1,713; T_j = 5,42 \text{ с};$$

- трансформатор Т1: $S_{\text{НОМ}} = 200 \text{ МВА}; U_k = 10 \text{ \%};$
- линия: $x_0 = 0,4 \text{ Ом/км}; L = 300 \text{ км};$
- трансформатор Т2: $S_{\text{НОМ}} = 200 \text{ МВА}; U_k = 10 \text{ \%};$
- передаваемая мощность $P_c = 120 \text{ МВт}$ и $Q_c = 80 \text{ Мвар}.$

Задача 4. 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 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.



Исходные данные:

- генератор: $P_{\text{НОМ}} = 160 \text{ МВт}; \cos \varphi_{\text{НОМ}} = 0,85; x'_d = 0,304; U_{\text{НОМ}} = 18 \text{ кВ};$
 $x_d = 1,713; T_j = 5,42 \text{ с};$
- трансформатор Т1: $S_{\text{НОМ}} = 200 \text{ МВА}; U_{\text{НОМ}} = 18/242 \text{ кВ}; U_k = 11 \text{ \%};$
- линия: $x_0 = 0,4 \text{ Ом/км}; L = 300 \text{ км};$
- трансформатор Т2: $S_{\text{НОМ}} = 200 \text{ МВА}; U_{\text{НОМ}} = 220/121 \text{ кВ}; U_k = 11 \text{ \%};$
- передаваемая мощность $P_c = 120 \text{ МВт}$ и $Q_c = 80 \text{ Мвар}.$

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

- трансформатор Т1: $S_{\text{ном}} = 80 \text{ МВА}$; $U_{\text{ном}} = 10/242 \text{ кВ}$; $U_k = 11 \%$;
- линия: $x_0 = 0,4 \text{ Ом/км}$; $L = 90 \text{ км}$;
- трансформатор Т2: $S_{\text{ном}} = 125 \text{ МВА}$; $U_{\text{ном}} = 220/38,5 \text{ кВ}$; $U_k = 11 \%$;
- передаваемая мощность $P_c = 40 \text{ МВт}$ и $Q_c = 20 \text{ Мвар}$.

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

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

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

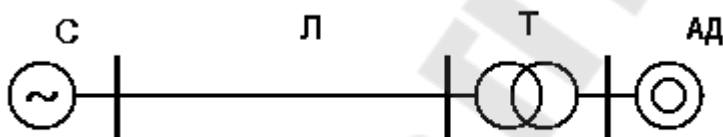
синхронном отключении короткого замыкания в линии через 0,5 с. Численно решить дифференциальное уравнение: а) методом последовательных интервалов, б) методом Рунге-Кутты в пакете MSAD.

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, $U_{\text{ном}} = 35/6,3$ кВ, $U_{\text{к}} = 7,5$ %. Нагрузка на валу двигателей вентиляторная. Время перерыва питания равно: а) 0,4 с, б) 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, $k_{\text{з}} = 0,8$, $m_{\text{тр}} = 0,5$, $m_{\text{п}} = 1$.

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 трансформатор 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, $k_3 = 0,8$, $m_{\text{тр}}=0,7$, $m_{\text{п}} = 1$.

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, $k_3 = 0,7$, $m_{\text{тр}}=0,4$, $m_{\text{п}} = 1$.

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, $k_3 = 0,7$, $m_{\text{тр}}=0,4$, $m_{\text{п}} = 1$.

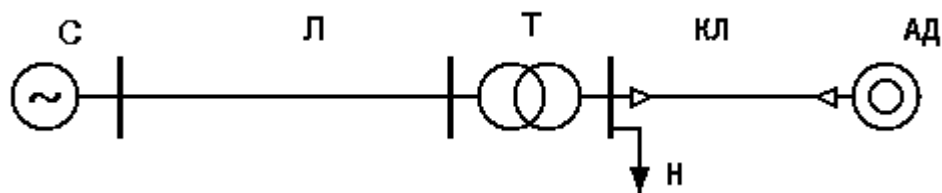
Задача 17. Для задачи 13 рассчитать пуск одного двигателя. Выбрать групповой пусковой реактор для уменьшения пускового тока в 1,5 раза и проверить все условия пуска.

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 питаются 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 мм². Мощность неотключаемой нагрузки равна $(10 + j4)$ МВА.



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

ЛИТЕРАТУРА

1. Правила устройств электроустановок. – 6 изд. – М.: Атомиздат, 1999.
2. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. – М.: Высшая школа, 1985.
3. Жданов П.С. Вопросы устойчивости электрических систем. – М.: Энергия, 1979.
4. Неклепаев Б.Н., Крючков И.П. Электрическая часть электростанций и подстанций: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
5. Овчаренко А.С., Розинский Д.И. Повышение эффективности электроснабжения промышленных предприятий. – К.: Техника, 1989.
6. Методические указания по устойчивости энергосистем. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2005.
7. Куликов Ю.А. Переходные процессы в электрических системах: Учеб. Пособие. – Новосибирск: НГТУ, М.: Мир: ООО «Издательство АСТ», 2003.
8. Калентиюнок Е.В. Устойчивость электроэнергетических систем: учебное пособие. – Минск: Техноперспектива, 2008.

СОДЕРЖАНИЕ

1. СТАТИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ	3
2. ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ	16
3. УСТОЙЧИВОСТЬ НАГРУЗКИ	28
4. САМОЗАПУСК И ПУСК АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ	39
5. ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ	49
ЛИТЕРАТУРА	55

**Токочаков Владимир Иванович
Рудченко Юрий Александрович
Кротенок Владимир Владимирович**

УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**ПРАКТИКУМ
по одноименному курсу
для студентов специальности 1-43 01 02
«Электроэнергетические системы и сети»
дневной формы обучения**

Подписано к размещению в электронную библиотеку
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного
учебно-методического документа 01.12.09.

Рег. № 61Е.

E-mail: ic@gstu.gomel.by
<http://www.gstu.gomel.by>