ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Р.А. Вайнштейн, В.В. Шестакова, Н.В. Коломиец

ПРОГРАММНЫЕ КОМПЛЕКСЫ В УЧЕБНОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЧАСТИ СТАНЦИЙ

Рекомендовано в качестве учебного пособия
Редакционно-издательским советом
Томского политехнического университета

Издательство
Томского политехнического университета
2010

УДК 121.311.001.24(075.8)
ББК 31.27в6я73
В176

Вайнштейн Р.А.

В176 Программные комплексы в учебном проектировании электрической части электростанций: учебное пособие / Р.А. Вайнштейн, В.В. Шестакова, Н.В. Коломиец. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 123 с.

В учебном пособии рассматриваются математические модели элементов энергосистем для расчета установившихся режимов и переходных процессов, принципы моделирования действий релейной защиты и автоматики в программном комплексе «Мустанг», технология ввода данных моделей элементов энергосистемы для расчета установившихся режимов и переходных процессов. Предназначено для студентов направления 140200 «Электроэнергетика» специальностей 140203 «Релейная защита и автоматика»,140204 «Электрические станции».

УДК 121.311.001.24(075.8)
ББК 31.27в6я73

Рецензенты

Кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой электрических станций
Новосибирского государственного технического университета
И.П.Тимофеев

Начальник службы электрических режимов
Томского районного диспетчерского управления
П.В. Якис

Оглавление

1. Модели элементов энергосистемы в расчетах установившихся режимов

1.1. Модели генераторов

Известные способы моделирования генераторов для расчета установившихся режимов отличаются друг от друга выбором задаваемых и рассчитываемых режимных параметров обеспечением учета ограничений по максимуму тока статора и по максимуму и минимуму тока ротора.

В настоящее время в широко используемых программах заложены возможности моделирования генераторов в расчетах установившихся режимов по следующим вариантам:

- задаются $P_г$ и $U_г$, а $Q_г$ и $\delta_г$ рассчитываются,
- задаются $P_г$ и $Q_г$, а $U_г$ и $\delta_г$ рассчитываются.

Реальный режим работы генератора отражает *PU*-модель, так как можно считать, что напряжение на выводах генератора поддерживается почти неизменным за счет действия автоматического регулятора возбуждения (АРВ), а активная мощность определяется загрузкой турбины и от электрического режима не зависит.

При использовании *PU*-модели задаются также пределы по максимуму и минимуму реактивной мощности генератора $Q_{Г\,max}$ и $Q_{Г\,min}$. Если в процессе расчета реактивная мощность достигает предельного значения по максимуму или минимуму, то автоматически происходит замена *PU*-модели на *PQ*-модель с фиксацией реактивной мощности соответственно на уровне $Q_{Г\,max}$ или $Q_{Г\,min}$. Достижение предельных значений по реактивной мощности означает, что заданное значение напряжения генератора не может поддерживаться при заданном значении активной мощности.

Практически, при эксплуатации, режим работы генератора контролируется не по реактивной мощности, а по току статора и ротора.

Режим поддержания заданного напряжения при определенной активной мощности возможен лишь до тех пор, пока не будут достигнуты предельные значения:

- по току статора

$$I_г \le I_{доп}, \tag{1.1}$$

- по току ротора

$$I_{f\,min} \le I_f \le I_{f\,доп}. \tag{1.2}$$

Необходимость ограничения токов статора и ротора по максимуму определяется условиями охлаждения обмоток.

Ограничение тока ротора по минимуму необходимо по двум причинам:

– для предотвращения перегрева торцевых зон обмотки статора.

– для предотвращения нарушения устойчивости при глубоком снижении тока возбуждения по внутреннему пределу статической устойчивости генератора.

Указанные ограничения практически при эксплуатации обеспечиваются либо дежурным персоналом, либо с помощью автоматических устройств.

При достижении каким-либо из режимных параметров предельного значения осуществляется соответствующее изменение режима.

При достижении максимально допустимого тока статора снижается уставка автоматического регулятора возбуждения (АРВ). При этом уменьшается ток возбуждения и ЭДС E_q, что приводит к снижению напряжения $U_г$ и выдаваемой реактивной мощности. Если для обеспечения выполнения условия (1.1) требуется снизить напряжение ниже минимально допустимого, то это означает, что при данной активной мощности режим не осуществим и необходимо разгружать генератор по активной мощности.

Контроль условия по максимально допустимому току ротора на современных генераторах осуществляется ограничителем перегрузки, который входит в состав АРВ. Ограничитель перегрузки работает с выдержкой времени зависящей от кратности перегрузки по току ротора.

При достижении предельных условий по току ротора ограничитель перегрузки снижает ток возбуждения до значения меньшего номинального (примерно до 0,9 $I_{ном}$).

При снижении тока ротора, до минимально допустимого значения вступает в действие ограничитель минимального возбуждения ОМВ, который также имеется в составе АРВ, на современных крупных генераторах. ОМВ действует без выдержки времени и фиксирует ток возбуждения на уровне $I_{f\min}$. При этом АРВ выводится из работы до тех пор, пока напряжение генератора не снизится до уровня, при котором потребуется увеличение тока возбуждения для его поддержания.

Если не учитывать нелинейность характеристики холостого хода генератора то ЭДС E_q можно считать пропорциональной току возбуждения. Поэтому условия ограничения по току возбуждения (1.2) можно заменить условиями ограничения по ЭДС E_q

$$E_{q\min} \le E_q \le E_{q\,доп}. \qquad (1.3)$$

Модель *PU* генераторного узла правильно отражает свойства реального генератора только до тех пор, пока не наступают ограничения по реактивной мощности и не происходит переход на *PQ*-модель. В свою очередь *PQ*-модель не отражает свойства реального объекта, так как фактически режим ограничивается не реактивной мощностью, а E_q на уровне $E_{\text{q min}}$ и $E_{\text{q max}}$. Генератор при этом в отличие от *PQ*-модели продолжает участвовать в балансировании реактивной мощности. В частности, реактивная мощность генератора будет изменяться, например, при изменении напряжения в сети.

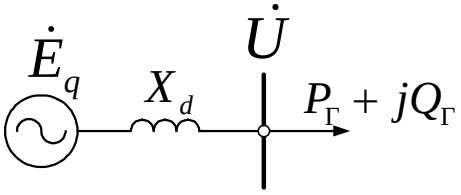
В связи с этим в настоящее время разрабатываются программы, в которых генератор моделируется ЭДС E_q за продольным реактивным сопротивлением X_d (для турбогенератора) или ЭДС E_Q за поперечным реактивным сопротивлением (для генераторов с явновыраженными полюсами). Такая модель названа в [1] в общем случае PE_q - модель.

При проведении расчетов пределы по реактивной мощности могут определяться по диаграмме мощности генератора, которая связывает между собой допустимые значения реактивной мощности с заданными значениями активной мощности и напряжение при изменении коэффициента мощности.

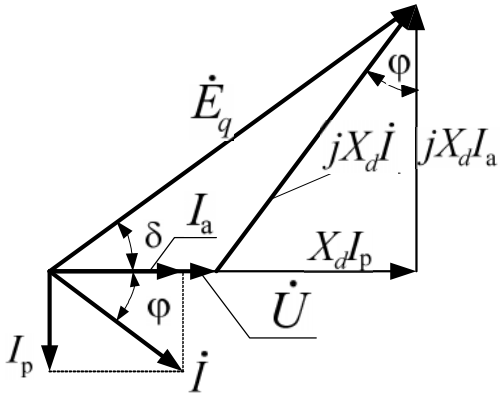
Основой для построения диаграммы мощности генератора (рис. 1.1, а) является векторная диаграмма, построенная для номинального режима без учета насыщения машины (рис. 1.1, б).

Умножив векторы напряжения *U*, ЭДС E_q, падения напряжения на сопротивлениях генератора на множитель, равный отношению напряжения к синхронному реактивному сопротивлению (U/X_d), получим векторную диаграмму рис. 1.1, в.

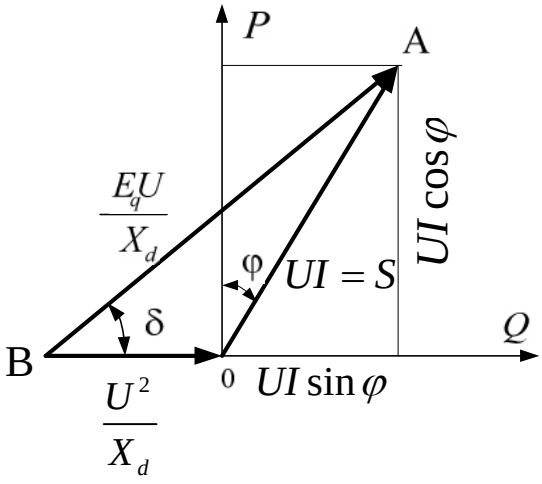
При работе генератора с различными коэффициентами мощности область допустимых нагрузок генератора ограничивается номинальными токами ротора и статора (участки АД, АК), максимальной мощностью турбины (участок KG), нагревом крайних пакетов активной стали (участок GH) и условиями обеспечения статической устойчивости (участок HF). Принципы построения диаграммы мощностей генератора рассмотрены в [2].



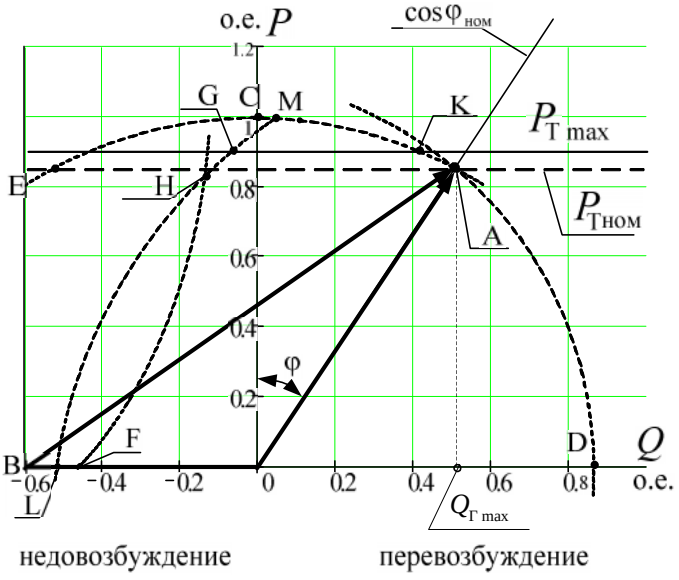
а



б



в



г

Рис. 1.1.

а – схема замещения генератора,

б – векторная диаграмма ненасыщенного неявнополюсного генератора,

в – к построению диаграммы мощностей,

г – диаграмма мощностей генератора

Более удобным может быть определение $Q_{\text{г max}}$ и $Q_{\text{г min}}$ расчетным путем. При этом используются следующие соотношения, связывающие режимные параметры генератора. Для генераторов с явновыраженными полюсами на роторе

$$E_q = \frac{U_{\text{г}}^4 + Q_{\text{г}} \cdot U_{\text{г}}^2 \cdot \left(X_d + X_q\right) + \left(P_{\text{г}}^2 + Q_{\text{г}}^2\right) \cdot X_d \cdot X_q}{U_{\text{г}} \cdot \sqrt{U_{\text{г}}^4 + 2 \cdot Q_{\text{г}} \cdot U^2 \cdot X_q + \left(P_{\text{г}}^2 + Q_{\text{г}}^2\right) \cdot X_q^2}}, \tag{1.4}$$

$$P_{\text{г}} = \frac{E_q U_{\text{г}}}{X_d} \sin \delta_{\text{г}} + \frac{U_{\text{г}}^2}{2} \frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \sin 2\delta_{\text{г}}, \tag{1.5}$$

$$Q_{\text{г}} = \frac{E_q U_{\text{г}}}{X_d} \sin \delta_{\text{г}} + \frac{U_{\text{г}}^2}{2} \frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \cos 2\delta_{\text{г}} - \frac{U^2}{2} \frac{X_d + X_q}{X_d X_q}. \tag{1.6}$$

Для генераторов с неявновыраженными полюсами на роторе ($X_d = X_q$)

$$E_q = \frac{\sqrt{\left(U_{\text{г}}^2 + Q_{\text{г}} X_d\right)^2 + P_{\text{г}}^2 X_d^2}}{U_{\text{г}}}, \tag{1.7}$$

$$P_{\text{г}} = \frac{E_q U_{\text{г}}}{X_d} \sin \delta_{\text{г}}, \tag{1.8}$$

$$Q_{\text{г}} = \frac{E_q U_{\text{г}}}{X_d} \cos \delta_{\text{г}} - \frac{U_{\text{г}}^2}{X_d}. \tag{1.9}$$

Для генераторов любой конструкции ток статора

$$I_{\text{г}} = \frac{\sqrt{P_{\text{г}}^2 + Q_{\text{г}}^2}}{\sqrt{3} U_{\text{г}}}. \tag{1.10}$$

Далее соотношения приводятся для случая $X_d = X_q$. Максимально допустимая реактивная мощность, соответствующая условию $I_{\text{г}} = I_{\text{доп}}$

$$Q_{\text{г max}}^{(I)} = \sqrt{S_{\text{доп}}^2 - P_{\text{г}}^2}, \tag{1.11}$$

где $S_{\text{доп}} = \sqrt{3} I_{\text{доп}} U_{\text{г}}$.

Разделив и умножив правую часть (1.11) на $S_{\text{ном}}$, получим

$$Q_{\text{г max}}^{(I)} = S_{\text{ном}} \sqrt{\frac{S_{\text{доп}}^2}{S_{\text{ном}}} - \frac{P_{\text{г}}^2}{S_{\text{ном}}}}. \tag{1.12}$$

Первую составляющую подкоренного выражения (1.12) запишем как $S_{\text{ном}} = \sqrt{3} I_{\text{ном}} U_{\text{ном}}$, а вторую – $S_{\text{ном}} = \dfrac{P_{\text{ном}}}{\cos\varphi}$. Тогда после преобразований получим

$$Q_{\text{г max}}^{(I)} = S_{ном} \cdot \sqrt{K_I^2 \cdot \left(\frac{U_{\text{г}}}{U_{ном}}\right)^2 - \left(\frac{P_{\text{г}}}{P_{ном}}\right)^2} \cdot \cos\varphi_{ном} . \qquad (1.13)$$

где $K_I = \dfrac{I_{доп}}{I_{ном}}$ – кратность допустимого тока по отношению к номинальной.

Максимально допустимая реактивная мощность из условия $E_q = E_{q\ \text{доп}}$. Рассмотрим совместно выражения для реактивной и активной мощности (1.8) и (1.9) при $E_q = E_{q\ \text{доп}}$

$$Q_{\text{г max}}^{(E)} = \frac{E_{q\ \text{доп}} U_{\text{г}}}{X_d} \cos\delta_{\text{г}} - \frac{U_{\text{г}}^2}{X_d}, \qquad (1.14)$$

$$P_{\text{г}} = \frac{E_{q\ \text{доп}} U_{\text{г}}}{X_d} \sin\delta_{\text{г}} . \qquad (1.15)$$

Найдем из (1.15)

$$\cos\delta_{\text{г}} = \sqrt{1 - \sin^2\delta_{\text{г}}} = \sqrt{1 - \left(\frac{P_{\text{г}} X_d}{E_{q\text{доп}} U_{\text{Г}}}\right)^2} ,$$

подставим в (1.14) и после некоторых преобразований получим

$$Q_{\text{г max}}^{(E)} = \frac{1}{X_d}\left(\sqrt{K_E E_{q\text{ном}}^2 U_{\text{г}}^2 - P_{\text{г}}^2 X_d^2} - U_{\text{г}}^2\right), \qquad (1.16)$$

где $K_E = \dfrac{E_{q\ \text{доп}}}{E_{q\ \text{ном}}}$ – кратность допустимого тока возбуждения к номинальному.

Минимально допустимая реактивная мощность $Q_{\text{г min}}$, определенная из условия $E_q = E_{q\ \text{min}}$, может быть ориентирована на использование одного из возможных алгоритмов работы ограничителя минимального возбуждения, который должен предотвращать снижение реактивной со-

ставляющей тока статора ниже минимально допустимого значения $I_{p\min}$.

Один из возможных алгоритмов ОМВ реализует зависимость минимально допустимого тока ротора от активной составляющей тока статора в следующем виде

$$I_{p\min} = I_{p\min}^{(0)} - KI_a, \tag{1.17}$$

где $I_{p\min}^{(0)}$ – минимально допустимый реактивный ток при $I_a = 0$ и номинальном напряжении.

Выразим в (1.17) токи через соответствующие мощности

$$\frac{Q_{\text{г}\min}}{U_{\text{г}}} = \frac{Q_{\text{г}\min(0)}}{U_{\text{ном}}} - K\frac{P_{\text{г}}}{U_{\text{г}}}, \tag{1.18}$$

Умножим (1.18) на $U_{\text{г}}$

$$Q_{\text{г}\min} = Q_{\text{г}\min(0)}\frac{U_{\text{г}}}{U_{\text{ном}}} - KP_{\text{г}}. \tag{1.19}$$

Так как минимально допустимая реактивная мощность при номинальной активной мощности и номинальном напряжении $Q_{\text{г}\min(\text{ном})}$ известна, то коэффициент *K* может быть определен из соотношения

$$Q_{\text{г}\min(1)} = Q_{\text{г}\min(0)} - K\cdot P_{\text{г}\,\text{ном}}.$$

Таким образом

$$K = \frac{Q_{\text{г}\min(0)} - Q_{\text{г}\min(\text{ном})}}{P_{\text{г}\,\text{ном}}}.$$

Окончательно получим

$$Q_{\text{г}\min} = Q_{\text{г}\min(0)}\frac{U_{\text{г}}}{U_{\text{ном}}} - \left(Q_{\text{г}\min(0)} - Q_{\text{г}\min(1)}\right)\frac{P_{\text{г}}}{P_{\text{ном}}}. \tag{1.20}$$

В справочных данных обычно отсутствуют данные о минимальной допустимой реактивной мощности при $P_{\text{г}} = 0$. Поэтому в [1] рекомендуется в качестве $Q_{\text{г}\min(0)}$ принимать значение минимально допустимой реактивной мощности при $P_{\text{г}} = 0{,}4P_{\text{г ном}}$. В [1] также даются дополнительные рекомендации по уточнению расчетных значений $Q_{\text{г}\min}$.

Соотношения (1.13), (1.16), (1.20) позволяют корректировать значения $Q_{\text{г max}}$ и $Q_{\text{г min}}$ в зависимости от $U_{\text{г}}$ и $P_{\text{г}}$.

1.2. Модели пассивных элементов схемы

1.2.1. Трансформаторы и автотрансформаторы

В данной работе для всех трансформаторов принято, что сопротивления обмоток трансформаторов приведены к высокому напряжению. Принципиально они могут быть приведены к любой ступени напряжения.

В формулах для расчета сопротивлений обмоток трансформатора приняты следующие обозначения и размерности:

$\Delta P_{\text{к}}$ – потери мощности в трех фазах (кВт),

$\Delta P_{\text{х}}$ – общие потери холостого хода (кВт),

$U_{\text{ном}}$ – линейное номинальное напряжение обмотки (кВ),

$S_{\text{ном}}$ – номинальная мощность трансформатора (МВА),

$I_{\text{х}\%}$ – ток холостого хода (%),

$u_{\text{К}}$ – напряжение короткого замыкания (%),

$Z_{\text{т}}, r_{\text{т}}, x_{\text{т}}$ – соответственно полное, активное и реактивное сопротивления трансформатора (Ом),

$g_{\text{т}}, b_{\text{т}}$ – соответственно активная и реактивная проводимости трансформатора (См).

.

Двухобмоточный трансформатор

Параметры схемы замещения двухобмоточных трансформаторов определяются по каталожным данным, составленным по результатам опытов холостого хода и короткого замыкания.

Активное сопротивление обмоток двухобмоточного трансформатора (рис. 1.2) определяется в виде

$$r_{\text{т}} = \frac{\Delta P_{\text{К}} U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{ном}}^2 1000}.$$

Полное сопротивление трансформатора определяется напряжением короткого замыкания. Полное сопротивление трансформатора

$$Z_{\text{т}} = \frac{u_{\text{к}\%}}{100}\frac{U^2_{\text{ном}}}{S_{\text{ном}}}.$$

Реактивное сопротивление обмоток трансформатора

$$x_{\text{т}} = \sqrt{Z^2_{\text{т}} - r^2_{\text{т}}},$$

Для трансформаторов большой мощности (выше 1000 кВА) $x_{\text{т}} >> r_{\text{т}}$. Поэтому для мощных трансформаторов с достаточной степенью точности можно принять

$$x_{\text{т}} \approx Z.$$

В схему замещения трансформаторов включается идеальный трансформатор (ИТ), моделирующий коэффициент трансформации, то есть преобразование (понижение или повышение) напряжения переменного тока одного класса напряжения в другой.

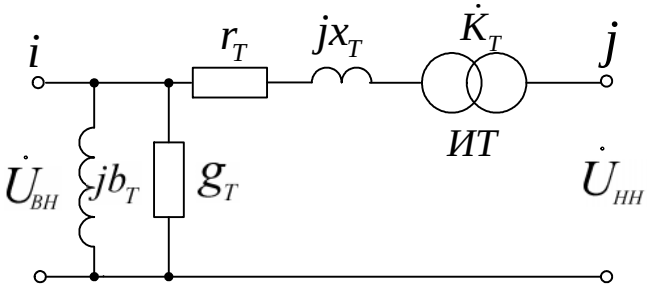


Рис. 1.2. Схема замещения двухобмоточного трансформатора

Трансформаторы выпускаются с различными системами регулирования напряжения [2]:

– без регулирования напряжения,

– с регулированием напряжения путем переключения числа витков обмоток без возбуждения (система ПБВ),

– регулирование напряжения под нагрузкой (система РПН).

Для трансформаторов без регулирования напряжения комплексный коэффициент трансформации равен

$$\dot{K}_{\text{т}} = K_{\text{т}} e^{j\delta_U},$$

где $K_{\text{т}} = \frac{U_{\text{ВН}}}{U_{\text{НН}}}$ – модуль коэффициента трансформации, характеризующий отношение напряжений на зажимах трансформатора.

δ_U – угол комплексного коэффициента трансформации. Учитывается только в случае, если используется поперечное регулирование по напряжению, обеспечивающее изменение напряжения по фазе.

Для трансформаторов, оснащенных системами ПБВ или РПН

$$K_{\text{Т}} = \frac{U_{\text{ВН}}(1 \pm n\Delta U_{\text{СТ}*})}{U_{\text{НН}}},$$

где n – число ступеней регулирования,

$\Delta U_{\text{СТ}*}$ – относительное изменение напряжения на одну ступень при холостом ходе трансформатора, отнесенное к высшему номинальному напряжению $U_{\text{ВН}}$.

Проводимости схемы замещения трансформатора определяют по результатам опыта холостого хода.

Активная проводимость трансформатора (См)

$$g_{\text{Т}} = \frac{\Delta P_{\text{Х}}}{U^2_{\text{ном}} 1000}, \qquad (1.21)$$

где $\Delta P_{\text{Х}}$ – общие потери холостого хода.

Реактивную проводимость ветви намагничивания определяют в виде

$$b_{\text{Т}} = \frac{I_{\text{Х}\%}}{100} \frac{S_{\text{ном}}}{U^2_{\text{ном}}}. \qquad (1.22)$$

где $I_{\text{Х}\%}$ – ток холостого хода, %.

Как правило, значения активной и реактивной проводимостей трансформатора весьма незначительны, поэтому при расчете установившихся и переходных режимов обычно принимают $g_T = 0,\ b_T = 0$.

Трансформатор с расщепленной обмоткой

Трансформаторы с расщепленной обмоткой являются разновидностью двухобмоточного трансформатора. В таком трансформаторе обмотка НН выполнена из двух обмоток, расположенных симметрично по отношению к обмотке ВН. Схема замещения трансформатора с расщепленной обмоткой имеет вид трехлучевой звезды (рис.1.3), где

$r_{н1}$, $r_{н2}$, $x_{н1}$, $x_{н2}$ – активные и индуктивные сопротивления расщепленных обмоток.

Сопротивления трансформатора между выводами обмотки ВН выводами НН-1, НН-2 будут равны так называемым общим (сквозным) сопротивлениям трансформатора

$$r_{общ} = \frac{\Delta P_К U^2_{ном}}{S^2_{ном} 1000},$$

$$x_{общ} = \frac{u_{К\%}}{100} \frac{U^2_{ном}}{S_{ном}}.$$

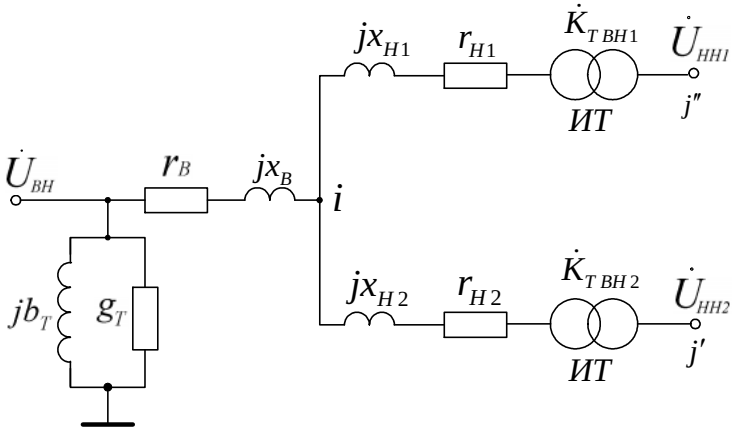


Рис. 1.3. Схема замещения трансформатора с расщепленной обмоткой

Мощность каждой обмотки НН равна половине мощности обмотки ВН, то есть половине номинальной мощности трансформатора, следовательно, сопротивления

$$r_{н1} = r_{н2} = 2r_в.$$

С учетом данного соотношения сопротивлений имеем

$$r_B = 0,5 r_{общ},\ r_{н1} = r_{н2} = r_{общ}.$$

Распределение реактивных сопротивлений между лучами схемы замещения (обмотками) рекомендуется принимать следующим [3]

$$x_B = 0,125 x_{общ},\ x_{H1} = x_{H2} = 1,75 x_{общ}.$$

Система регулирования напряжения (ПБВ или РПН) для трансформаторов с расщепленной обмоткой располагается на стороне ВН. Моду-

ли коэффициентов трансформации в этом случае определяются аналогично коэффициенту трансформации двухобмоточного трансформатора

$$K_{\text{Т ВН1}} = \frac{U_{\text{ВН}}(1 \pm n\Delta U_{\text{СТ}*})}{U_{\text{НН1}}}, \quad K_{\text{Т ВН2}} = \frac{U_{\text{ВН}}(1 \pm n\Delta U_{\text{СТ}*})}{U_{\text{НН2}}}.$$

Трехобмоточные трансформаторы

Схема замещения трехобмоточного трансформатора одной фазы представляет трехлучевую звезду (рис.1.4). Параметры ветви намагничивания определяют так же, как и для двухобмоточных трансформаторов по (1.21) и (1.22).

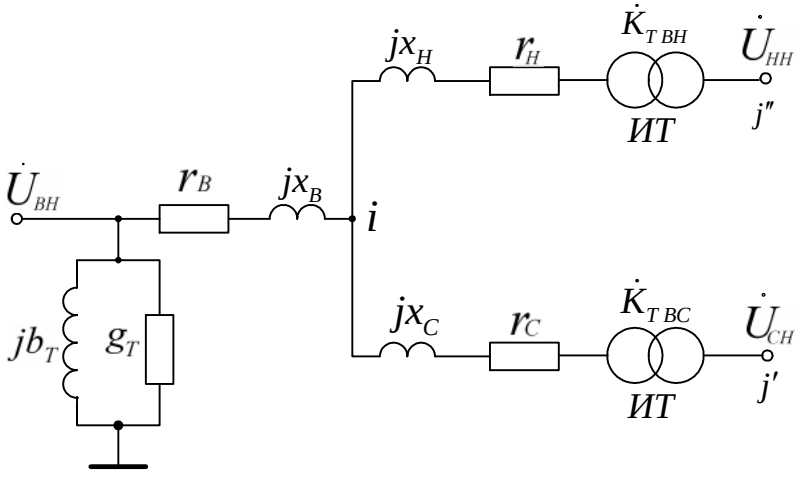


Рис. 1.4. Схема замещения трехобмоточного трансформатора

Для трехобмоточного трансформатора, в отличие от двухобмоточного, нужно определить сопротивление каждой обмотки в отдельности по данным опытов короткого замыкания. Результаты опытов короткого замыкания позволяют определить

$$\begin{aligned} u_{\text{КВ}} &= \frac{1}{2}\left(u_{\text{КВ-С}} + u_{\text{КВ-Н}} - u_{\text{КС-Н}}\right), \\ u_{\text{КС}} &= \frac{1}{2}\left(u_{\text{КВ-С}} + u_{\text{КС-Н}} - u_{\text{КВ-Н}}\right), \\ u_{\text{КН}} &= \frac{1}{2}\left(u_{\text{КВ-Н}} + u_{\text{КС-Н}} - u_{\text{КВ-С}}\right). \end{aligned} \qquad (1.23)$$

Реактивные сопротивления обмоток определяют по формулам

$$x_{\text{В}} = \frac{u_{\text{КВ\%}}}{100}\frac{U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{ном}}}, \quad x_{\text{С}} = \frac{u_{\text{КС\%}}}{100}\frac{U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{ном}}}, \quad x_{\text{Н}} = \frac{u_{\text{КН\%}}}{100}\frac{U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{ном}}}.$$

Реактивное сопротивление $x_{\text{С}}$, соответствующее обмотке СН, расположенной между обмотками НН и ВН, благодаря их взаимному влиянию, обычно имеет значение, близкое к нулю, либо небольшое отрицательное значение. В расчетах принимается равным, например, $x_C = 0{,}001$ Ом (для программы «Мустанг» недопустимо задавать ветвь с нулевым сопротивлением).

Для трансформаторов с одинаковыми мощностями обмоток суммарные потери короткого замыкания на пару обмоток поровну распределяются между обмотками, то есть активные сопротивления лучей схемы замещения вычисляют по формуле (Ом)

$$r_{\text{Н}} = r_{\text{В}} = r_{\text{С}} = \frac{1}{2}\frac{\Delta P_{\text{К}} U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{ном}}^2 1000}.$$

Системы регулирования напряжения для трехобмоточных трансформаторов могут располагаться на стороне СН и в нейтрали ВН. Модули коэффициентов трансформации в этом случае определяются аналогично коэффициенту трансформации двухобмоточного трансформатора

$$K_{\text{Т ВН}} = \frac{U_{\text{ВН}}(1 \pm n\Delta U_{\text{СТ*}})}{U_{\text{НН}}}, \quad K_{\text{Т ВС}} = \frac{U_{\text{ВН}}(1 \pm n\Delta U_{\text{СТ*}})}{U_{\text{СН}}\left(1 \pm n\Delta U_{\text{СТ*}}\dfrac{U_{\text{ВН}}}{U_{\text{СН}}}\right)}.$$

Если система регулирования напряжения располагается только в нейтрали ВН

$$K_{\text{Т ВС}} = \frac{U_{\text{ВН}}(1 \pm n\Delta U_{\text{СТ*}})}{U_{\text{СН}}}.$$

Автотрансформаторы

Схема замещения автотрансформатора принята такой же, как и для трехобмоточного трансформатора (рис.1.4).

Для автотрансформаторов в паспортных данных потери $\Delta P_{\text{КВ-С}}$ приводятся отнесенными к номинальной мощности автотрансформатора, а значения $\Delta P_{\text{КВ-Н}}$, $\Delta P_{\text{КС-Н}}$ (обозначим эти паспортные данные $\Delta P'_{\text{КВ-Н}}$, $\Delta P'_{\text{КС-Н}}$) – к номинальной мощности обмотки НН. Значения $\Delta P'_{\text{КВ-Н}}$, $\Delta P'_{\text{КС-Н}}$ пересчитывают к номинальной мощности автотрансформатора следующим образом

$$\Delta P_{\text{КВ-Н}} = \frac{\Delta P'_{\text{КВ-Н}}}{\alpha^2}, \qquad \Delta P_{\text{КС-Н}} = \frac{\Delta P'_{\text{КС-Н}}}{\alpha^2}, \tag{1.24}$$

где $\alpha = S_{\text{нн}}/S_{\text{ном}}$ – коэффициент приведения.

Далее значения, полученные в (1.24) подставляют в выражения для определения потерь КЗ соответствующих обмоток

$$\Delta P_{КВ} = \frac{1}{2}\left(\Delta P_{КВ-С} + \Delta P_{КВ-Н} - \Delta P_{КС-Н}\right),$$

$$\Delta P_{КС} = \frac{1}{2}\left(\Delta P_{КВ-С} + \Delta P_{КС-Н} - \Delta P_{КВ-Н}\right),$$

$$\Delta P_{КН} = \frac{1}{2}\left(\Delta P_{КВ-Н} + \Delta P_{КС-Н} - \Delta P_{КВ-С}\right).$$

Расчет активных сопротивлений обмоток автотрансформатора выполняют по формулам

$$r_{\text{В}} = \frac{\Delta P_{\text{КВ}} U^2_{\text{ном}}}{S^2_{\text{ном}} 1000}, \quad r_{\text{С}} = \frac{\Delta P_{\text{КС}} U^2_{\text{ном}}}{S^2_{\text{ном}} 1000}, \quad r_{\text{Н}} = \frac{\Delta P_{\text{КН}} U^2_{\text{ном}}}{S^2_{\text{ном}} 1000}.$$

Если заданы потери кроткого замыкания на одну пару обмоток, например, $\Delta P_{\text{КВ-С}}$, то расчет выполняют по выражению

$$r_H = r_B = r_C = \frac{1}{2}\frac{\Delta P_{\text{КВ-С}} U^2_{\text{ном}}}{S^2_{\text{ном}} 1000}.$$

Если известны потери $\Delta P_{\text{КВ-Н}}$, то для определения сопротивлений автотрансформатора пользуются формулами

$$r_B = r_C = \left(\frac{\alpha}{\alpha + 1}\right)\frac{\Delta P_{\text{КВ-Н}} U^2_{\text{ном}}}{S^2_{\text{ном}} 1000}, \quad r_H = \frac{1}{\alpha} r_B.$$

Обычно мощность обмотки НН автотрансформаторов равна 50% номинальной мощности. В этом случае коэффициент приведения равен коэффициенту выгодности

$$\alpha = \alpha_B = 1 - \frac{U_{CH}}{U_{BH}}.$$

В отдельных автотрансформаторах мощность обмотки НН составляет 20, 25, 40% и не равна типовой мощности. В этом случае коэффициент выгодности α_B не равен отношению $\alpha = S_{\text{нн}}/S_{\text{ном}}$ [3].

Реактивные сопротивления лучей схемы замещения вычисляют с помощью выражений

$$x_B = \frac{u_{KB\%}}{100}\frac{U^2_{\text{ном}}}{S_{\text{ном}}}, \quad x_C = \frac{u_{KC\%}}{100}\frac{U^2_{\text{ном}}}{S_{\text{ном}}}, \quad x_H = \frac{u_{KH\%}}{100}\frac{U^2_{\text{ном}}}{S_{\text{ном}}}..$$

При этом в технических справочниках, как правило, даются уже приведенные к номинальной мощности автотрансформатора значения $u_{\text{К В-Н}}$ и $u_{\text{К С-Н}}$, которые непосредственно подставляются в (1.23).

Автотрансформаторы имеют несколько вариантов регулирования коэффициентов трансформации с учетом расположения систем регулирования напряжения. Возможны несколько вариантов, когда система регулирования расположена:

– в нейтрали обмоток ВН и СН,

– на выводах обмотки СН,

– в нейтрали ВН.

Для автотрансформаторов с системой регулирования, расположенной в общей нейтрали обмоток ВН и СН, коэффициенты трансформации определяются следующим образом

$$K_{\text{Т ВН}} = \frac{U_{\text{ВН}}(1 \pm n\Delta U_{\text{СТ}*})}{U_{\text{НН}}}, \quad K_{\text{Т ВС}} = \frac{U_{\text{ВН}}(1 \pm n\Delta U_{\text{СТ}*})}{U_{\text{СН}}\left(1 \pm n\Delta U_{\text{СТ}*}\dfrac{U_{\text{ВН}}}{U_{\text{СН}}}\right)}.$$

где n – число ступеней регулирования,

$\Delta U_{\text{СТ}*}$ – относительное изменение напряжения на одну ступень при холостом ходе трансформатора, отнесенное к высшему номинальному напряжению $U_{\text{ВН}}$.

В случае, если система расположена на стороне СН

$$K_{\text{ТВС}} = \frac{U_{\text{ВН}}}{U_{\text{СН}}\left(1 \pm n\Delta U_{\text{СТ}*}\dfrac{U_{\text{ВН}}}{U_{\text{СН}}}\right)}, \quad K_{\text{ТВН}} = \frac{U_{\text{ВН}}}{U_{\text{НН}}}.$$

Множитель $\dfrac{U_{\text{ВН}}}{U_{\text{СН}}}$ вводится в том случае, если относительное напряжение одной ступени при холостом ходе трансформатора отнесено к высшему напряжению.

При установке системы только в нейтрали ВН коэффициенты трансформации определяются в виде

$$K_{\text{ТВС}} = \frac{U_{\text{ВН}}(1 \pm n\Delta U_{\text{СТ}*})}{U_{\text{СН}}}, \quad K_{\text{ТВН}} = \frac{U_{\text{ВН}}(1 \pm n\Delta U_{\text{СТ}*})}{U_{\text{НН}}}.$$

Трехфазные группы **однофазных автотрансформаторов** учитываются схемой замещения, соответствующей трехфазному автотрансформатору.

Расчет сопротивлений обмоток ведется с использованием фазного напряжения, заданных в каталоге потерь короткого замыкания и мощности одной фазы

$$r_{\text{Т}} = \frac{\Delta P_{\text{К}}\left(\dfrac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}}\right)^2}{S^2_{\text{ном}}1000}, \quad x_{\text{Т}} = \frac{u_{\text{КН}}}{100}\frac{\left(\dfrac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}}\right)^2}{S_{\text{ном}}}.$$

1.2.2. Линии электропередачи

Линии электропередачи длиной не более 300 км при расчете представляют П-образной схемой замещения (рис. 1.5).

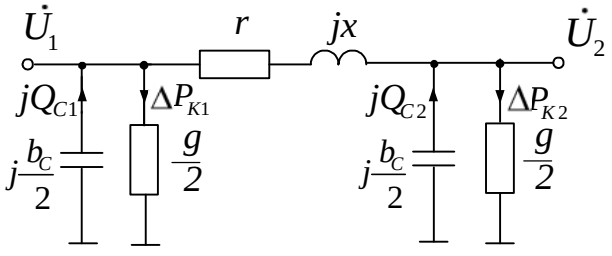


Рис. 1.5. Схема замещения линии электропередачи длиной до 300 км

При расчете симметричных установившихся режимов ЭЭС схему замещения линии составляют для одной фазы, то есть ее параметры, сопротивление $\underline{Z} = r + jx$ (Ом), изображают и вычисляют для одного фазного провода (жилы).

Активное сопротивление r определяется материалом проводов (медь, алюминий, сталь) и площадью поперечного сечения проводов.

Индуктивное сопротивлении x определяется магнитным полем вокруг и внутри проводов. Индуктивное сопротивление единицы длины линии зависит от взаимного расположения проводов и диаметра провода. Если каждый из трех проводов находится в одинаковых условиях (например, при расположении треугольником Δ), то индуктивные сопротивления фазных проводов одинаковы.

Во многих случаях это не соблюдается (расположение проводов в ряд • • •) и поэтому индуктивные сопротивления фазных проводов различны. Чтобы избежать несимметрии применяют транспозицию [3] и принимают удельное индуктивное сопротивление проводов одинаковым, независимо от конструкции линии.

Емкостная проводимость b_C учитывает проводимости (емкости) между фазами, между фазами и землей и отражает генерацию зарядной мощности всей трехфазной линии

$$Q_{C1} = \frac{1}{2} b_C U_1^2, \quad Q_{C2} = \frac{1}{2} b_C U_2^2.$$

Активная проводимость линий g, изображаемая в виде шунта между фазой (жилой) и точкой нулевого потенциала (землей), учитывает суммарные потери активной мощности на корону трех фаз

$$\Delta P_{K1} = \frac{1}{2} g U_1^2, \quad \Delta P_{K2} = \frac{1}{2} g U_2^2.$$

Активная проводимость в нормальных условиях эксплуатации очень мала и в расчетах, как правило, не учитывается и принимается $g = 0$.

Для линий указанной длины (до 300км)

$$r = r_0 l, \; x = x_0 l, \; b = b_0 l. \qquad (1.25)$$

где l – длина линии (км),
r_0 (Ом/км), x_0 (Ом/км), b_0 (мкСм/км)– погонные параметры линии.

Если длина линии больше 300км в (1.25) вводят поправочные коэффициенты, которые позволяют учесть распределенность параметров линии,

$$r = k_r r_0 l,\ x = k_x x_0 l,\ b = k_c b_0 l,$$

где

$$k_r = 1 - \frac{l^2}{3} x_0 b_0,\ \ k_x = 1 - \frac{l^2}{6}\left(x_0 b_0 - r_0^2 \frac{b_0}{x_0} \right),\ \ k_c = 0{,}5 \frac{3 + k_r}{1 + k_r}. \qquad (1.26)$$

Заметное уточнение параметров (более 1%) посредством поправочных коэффициентов (1.25) проявляется для воздушных линий длиной более 300 км и для кабельных линий – более 50 км.

Более точно распределенность параметров вдоль линии можно учесть, представляя протяженную ЛЭП цепочечной схемой замещения (рис.1.6).

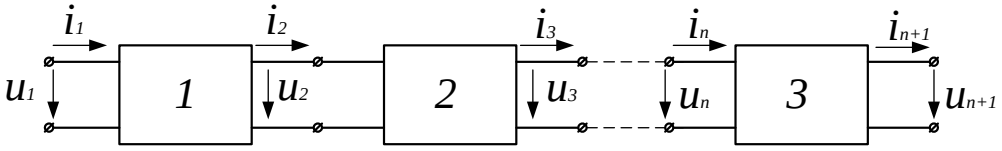


Рис. 1.6. Цепочечная схема замещения линии

Каждое звено представляет собой участок линии длиной от 100 до 300 км с П-образной схемой замещения (рис. 1.5).

1.2.3. Токоограничивающие реакторы

Номинальные сопротивления одинарных реакторов $x_р$ (Ом) приводятся в справочных данных. Активным сопротивлением фазы пренебрегаем.

а б

Рис. 1.7. Одинарный реактор
а – условное обозначение, б – электрическая схема

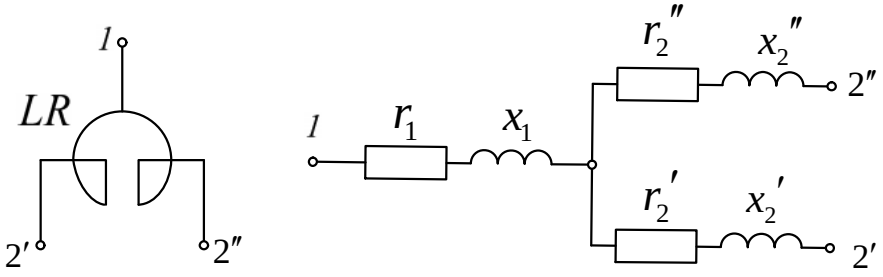
Схема замещения сдвоенного токоограничивающего реактора представляет собой трехлучевую звезду (рис. 1.8). Индуктивное сопротивление луча со стороны зажима 1 (то есть зажима, обращенного в сторону источника энергии) определяют по формуле

$$x_1 = -K_{св} x_р , \qquad (1.27)$$

где $K_{св}$ – коэффициент связи между ветвями реактора,
$x_р$ – номинальное индуктивное сопротивление реактора (тое есть сопротивление одной ветви реактора при отсутствии тока в другой ветви), Ом.

Индуктивные сопротивления двух других лучей схемы замещения одинаковы и определяются по формуле

$$x_2' = x_2'' = (1 + K_{св}) x_р . \qquad (1.28)$$



а б

Рис. 1.8. Сдвоенный реактор
а – условное обозначение, б – электрическая схема

Активные сопротивления реактора как правило не учитывают, принимая его равным нулю.

Представленная на рис. 1.8, б электрическая схема замещения сдвоенного реактора и выражение (1.28) справедливо в случае, если токи в ветвях реактора практически одинаковы.

1.3. Модели нагрузки

В программных комплексах существуют несколько способов представления нагрузки в расчетах установившихся режимов.

1. Любая электрическая нагрузка характеризуется потребляемой ею активной и реактивной мощностью. Величина мощности зависит от напряжения и частоты электрической сети, а также от режима их работы во времени. Зависимости, учитывающие изменение активной и реактив-

ной мощности нагрузки от частоты и напряжения при медленных изменениях называют статическими характеристиками нагрузки (СХН). Такой способ моделирования нагрузки наиболее полно учитывает действительные изменения электрических нагрузок и является наиболее точным способом представления электрических нагрузок.

В программном комплексе «Мустанг» учитываются только СХН по напряжению, частота считается неизменной.

Статические характеристики можно выразить аналитически в виде полиномов *n*-ой степени. В общем случае реальную сложную нагрузку, которая содержит различные элементы (асинхронные двигатели, плавильные печи, синхронные двигатели и т.д.) задают в виде эквивалентных статических характеристик нагрузки (СХН)

$$P_{\text{Н}} = P_{\text{норм}} \left[a_0 + a_1 \frac{U}{U_{\text{норм}}} + a_2 \left(\frac{U}{U_{\text{норм}}} \right)^2 \right], \qquad (1.29)$$

$$Q_{H} = Q_{норм} \left[b_0 + b_1 \frac{U}{U_{норм}} + b_2 \left(\frac{U}{U_{норм}} \right)^2 \right]. \qquad (1.30)$$

где $P_{\text{норм}}, Q_{\text{норм}}$ – активная и реактивная мощности нагрузки, заданные в соответствующем нагрузочном узле,

$U_{\text{норм}}$ – заданное напряжение в узле, которое может отличаться от номинального напряжения,

$a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2$ – коэффициенты СХН, которые подбираются так, чтобы зависимости (1.29), (1.30) по возможности совпадали с реальными зависимостями, причем при этом должны выполняться равенства

$$a_0 + a_1 + a_2 = 1,$$
$$b_0 + b_1 + b_2 = 1.$$

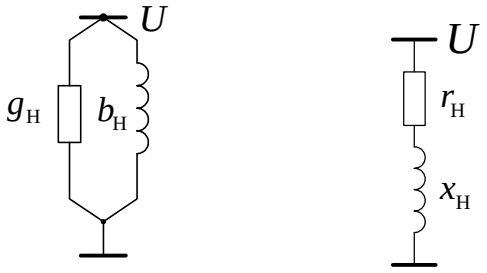
В [3] приведены рекомендации по значениям коэффициентов полиномов для некоторых видов характеристик (таблица 1.2).

Позиция 2 в таблице 1.2 соответствует случаю, когда в расчетной схеме эквивалентная комплексная нагрузка приведена к напряжению 6 – 10 кВ, а позиция 3, когда эквивалентная комплексная нагрузка приведена к напряжению 110 – 220 кВ и включает в себя понизительные трансформаторы и элементы распределительных сетей.

Таблица 1.2

№	Вид характеристик	a_0	a_1	a_2
1	Типовая характеристика активной мощности	0,83	–0,3	0,47
		b_0	b_1	b_2
2	Типовая характеристика реактивной мощности на стороне **6 – 10** кВ	4,9	–10,1	6,2
3	Типовая характеристика реактивной мощности на стороне **110 – 220** кВ	3,7	–7	4,3

2. В упрощенных расчетах установившихся режимов нагрузку также допустимо представлять постоянными проводимостями или постоянными сопротивлениями (рис. 1.9). Такое представление нагрузок в принципе соответствует их статическим характеристикам в виде квадратичных парабол. При этом коэффициенты a_0, a_1, b_0, b_1 в (1.29), (1.30) принимаются равными нулю, а коэффициенты a_2, b_2 – единице.



а б

Рис. 1.9. Представление нагрузки
а – постоянными проводимостями, б – постоянными сопротивлениями

Расчет постоянных проводимостей для схемы рис. 1.9, а производится следующим образом

$$g_{\text{Н}} = \frac{P_{\text{норм}}}{U^2}, \quad b_{\text{Н}} = \frac{Q_{\text{норм}}}{U^2}.$$

где $P_{\text{норм}}, Q_{\text{норм}}$ – постоянные активная и реактивная мощности нагрузки, заданные в соответствующем нагрузочном узле,

U – напряжение нагрузки.

Постоянные сопротивления в схеме рис. 1.9, б определяются

$$Z_{\text{Н}} = r_{\text{Н}} + jx_{\text{Н}} = \frac{U^2}{S_{\text{Н}}}\cos\varphi_{\text{Н}} + j\frac{U^2}{S_{\text{Н}}}\sin\varphi_{\text{Н}}.$$

где $\varphi_{\text{Н}}$ – угол нагрузки,

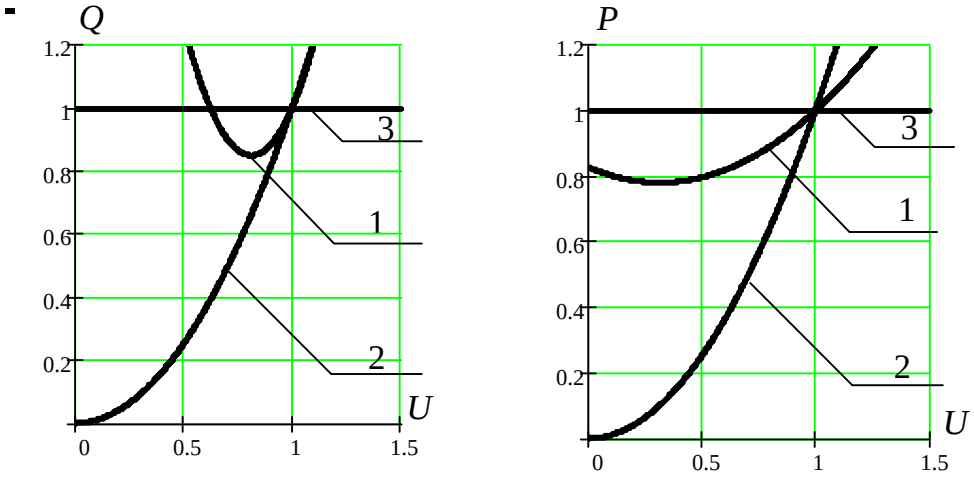
$S_{\text{Н}}$ – полная мощность нагрузки.

3. Наиболее простой способ задания нагрузки – задание нагрузки постоянной активной и реактивной мощностями в соответствующем нагрузочном узле $P_{\text{норм}} = \text{const}, Q_{\text{норм}} = \text{const}$.

Такое представление нагрузки соответствует замене действительных СХН условными, представляющими собой прямую линию. При этом коэффициенты a_1, a_2, b_1, b_2 в (1.29), (1.30) принимаются равными нулю, а коэффициенты a_0, b_0 – единице.

Расхождение таких условных характеристик с действительными СХН довольно велико, поэтому этот способ задания нагрузки является достаточным для систем электроснабжения, оснащенных устройствами регулирования напряжения. В этом случае можно считать, что напряжение на нагрузке поддерживается практически неизменным.

На рисунке 1.10 приведены статические характеристики нагрузок при различных способах их моделирования.



а б

Рис. 1.10. Статические характеристики нагрузки по напряжению
1 – задание нагрузки типовыми (обобщенными) СХН,
2 – задание нагрузки постоянными проводимостями,
3 – задание нагрузки постоянной активной и реактивной мощностями

2. Модели элементов энергосистемы в расчетах переходных процессов

2.1. Модели генератора

2.1.1. Уравнение движения ротора агрегата турбина-генератор

Основой для получения уравнения движения ротора агрегата турбина-генератор является уравнение вращающих моментов, действующих на вал агрегата

$$M_Э + M_j + M_{пот} = M_T , \qquad (2.1)$$

где $M_Э$ – электромагнитный момент генератора,

M_j – момент инерционных сил,

$M_{пот}$ – момент механических потерь,

M_T – момент турбины.

Момент, обусловленный механическими потерями у мощных агрегатов, очень мал и поэтому его обычно не учитывают.

Представим уравнение (2.1) в виде

$$J\frac{d\omega}{dt} = M_T - M , \qquad (2.2)$$

где ω – угловая частота вращения вала агрегата,
J – момент инерции вращающихся масс.

Перейдем к относительным единицам, приняв за базисные номинальные значения частоты $\omega_{ном}$ и момента $M_{ном}$. Тогда

$$J\frac{\omega_{ном}}{M_{ном}}\frac{d\omega_*}{dt} = M_{T*} - M_* . \qquad (2.3)$$

Величина $J\dfrac{\omega_{ном}}{M_{ном}} = T_j$ – имеет размерность времени [с] и является механической постоянной времени вращающихся масс агрегата. Таким образом, имеем

$$T_j\frac{d\omega_*}{dt} = M_{T*} - M_* . \qquad (2.4)$$

2.1.2. Модель электромагнитного момента синхронной машины

Система координат *d-q* это прямоугольная система координат, жестко связанная с ротором. Причем ось *d*, называемая продольной, совпадает с направлением полюсов ротора, а ось *q*, называемая поперечной, расположена симметрично между полюсами и отстает от оси *d*.

Известно, что мгновенные значения фазных величин (*u*, *i*, *e*, *ψ*) можно получить различными путями, например, как проекции фазных векторов соответствующих величин на неподвижную ось времени (рис. 2.1) или как проекции обобщенного вектора на неподвижные магнитные оси (рис. 2.2).

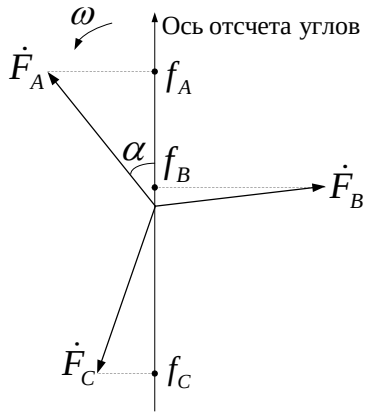


Рис. 2.1. Определение мгновенных значений через векторы трехфазной системы

$$\begin{aligned} f_A &= F_A \cos\alpha, \\ f_B &= F_A \cos(\alpha - 120^0), \\ f_C &= F_C \cos(\alpha - 240^0). \end{aligned} \qquad (2.5)$$

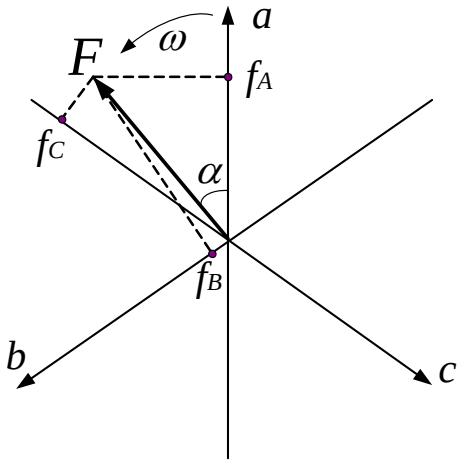


Рис. 2.2. Определение мгновенных значений через обобщенный вектор

$$
\begin{aligned}
f_A &= F\cos\alpha,\\
f_B &= F\cos(\alpha - 120^0),\\
f_C &= F\cos(\alpha - 240^0).
\end{aligned}
\tag{2.6}
$$

Обобщенный вектор может быть спроектирован на оси любой системы координат, поэтому он позволяет перейти от одной системы координат к другой, то есть осуществить линейное преобразование координат (рис. 2.3).

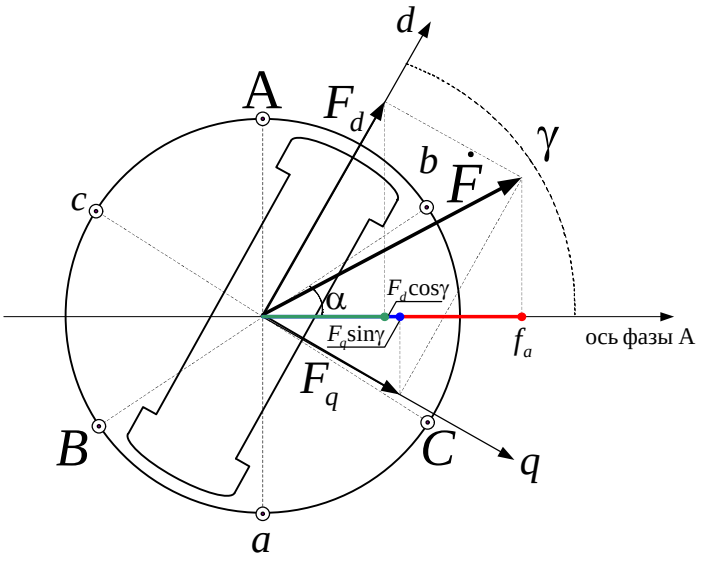


Рис. 2.3. Обобщенный вектор в системе координиат *d-q*

Рассмотрим уравнения для синхронной машины в осях *d-q*. Пусть ротор вращается с произвольной угловой скоростью ω (рис. 2.3), тогда

$$
\begin{aligned}
f_a &= F_d\cdot\cos\gamma + F_q\cdot\sin\gamma,\\
f_b &= F_d\cdot\cos\left(\gamma - 120^0\right) + F_q\cdot\sin\left(\gamma - 120^0\right),\\
f_c &= F_d\cdot\cos\left(\gamma - 240^0\right) + F_q\cdot\sin\left(\gamma - 240^0\right).
\end{aligned}
\tag{2.7}
$$

Из уравнений (2.7) можно выразить в явном виде F_d и F_q

$$
\begin{aligned}
F_d &= \frac{2}{3}\left[f_a\cdot\cos\gamma + f_b\cdot\cos\left(\gamma - 120^0\right) + f_c\cdot\cos\left(\gamma - 240^0\right)\right],\\
F_q &= \frac{2}{3}\left[f_a\cdot\sin\gamma + f_b\cdot\sin\left(\gamma - 120^0\right) + f_c\cdot\sin\left(\gamma - 240^0\right)\right].
\end{aligned}
\tag{2.8}
$$

Для иллюстрации некоторых свойств преобразования координат (2.8) рассмотрим два примера.

Пример 1. Исходная трехфазная система токов симметрична и частота их изменения равна частоте вращения ротора, то есть

$$i_A = I_m \cdot \cos\left(\omega t + \alpha\right),$$
$$i_B = I_m \cdot \cos\left(\omega t + \alpha - 120^0\right),$$
$$i_C = I_m \cdot \cos\left(\omega t + \alpha - 240^0\right).$$

Угол γ изменяется по закону $\gamma = \omega t + \gamma_0$. При таких условиях по (2.8) получаем

$$I_d = I_m \cdot \cos\left(\gamma_0 - \alpha\right),$$
$$I_q = I_m \cdot \sin\left(\gamma_0 - \alpha\right).$$

Как видно в данном случае составляющие I_d и I_q являются постоянными во времени величинами. Токи I_d и I_q создают соответствующие намагничивающие силы (реакцию якоря), которые вместе с намагничивающей силой, создаваемой током возбуждения, определяют результирующий магнитный поток машины.

Угол $\left(\gamma_0 - \alpha\right)$ зависит от характера нагрузки генератора (рассматривается далее с помощью векторных диаграмм).

Пример 2. Исходная трехфазная система токов симметрична, но частота их изменения не равна частоте вращения ротора. Примем $\gamma = \omega_1 \cdot t + \gamma_0$, $\omega_1 \neq \omega$.

В этом случае

$$I_d = I_m \cdot \cos\left[\left(\omega_1 - \omega\right)t + \left(\gamma_0 - \alpha\right)\right],$$
$$I_q = I_m \cdot \sin\left[\left(\omega_1 - \omega\right)t + \left(\gamma_0 - \alpha\right)\right].$$

Разность $\omega_1 - \omega = \omega_S$ есть частота скольжения. Таким образом, реакция якоря по оси *d* и *q* изменяется с частотой скольжения, во всех замкнутых контурах по оси *d* и по оси *q* наводятся токи с частотой скольжения.

Напряжение на обмотке статора, например, фазы А, равно

$$U_A = -\frac{d\Psi_A}{dt} - r_A \cdot i_A, \qquad (2.9)$$

где Ψ_A – полное потокосцепление обмотки фазы А,

i_A, r_A – соответственно ток фазы *A* и активное сопротивление обмотки.

Применим для тока и потокосцепления преобразование (2.7)

$$\Psi_A = \Psi_d \cdot \cos\gamma + \Psi_q \cdot \sin\gamma, \tag{2.10}$$

$$i_A = I_d \cdot \cos\gamma + I_q \cdot \sin\gamma. \tag{2.11}$$

С учетом (2.10) и (2.11)

$$U_A = -\frac{d}{dt}\left(\psi_d \cos\gamma + \psi_q \sin\gamma\right) - I_d r_A \cos\gamma - I_q r_A \sin\gamma \tag{2.12}$$

Преобразуем (2.12) с учетом того, что угол γ является функцией времени

$$\gamma = \omega t + \gamma_0, \tag{2.13}$$

$$U_A = -\frac{d\psi_d}{dt}\cos\gamma + \psi_d \sin\gamma \frac{d\gamma}{dt} - \frac{d\psi_q}{dt}\sin\gamma - \psi_q \cos\gamma \frac{d\gamma}{dt} - \\ -I_d r_A \cos\gamma - I_q r_A \sin\gamma. \tag{2.14}$$

Составляющие в (2.14) с множителем «$\cos\gamma$» совпадают по направлению с осью «*d*», а с множителем «$\sin\gamma$» с осью «*q*». Поэтому выделим в (2.14) составляющие по оси «*d*» и оси «*q*»

$$U_d = -\frac{d\Psi_d}{dt} - \Psi_q \cdot \frac{d\gamma}{dt} - I_d \cdot r_A, \tag{2.15}$$

$$U_q = -\frac{d\Psi_q}{dt} + \Psi_d \cdot \frac{d\gamma}{dt} - I_q \cdot r_A. \tag{2.16}$$

Учтем (2.13), а также и то, что в общем случае частота вращения ротора может отличаться от синхронной и быть равной $\omega + \omega_S$, ω_S – частота скольжения

$$U_d = -\frac{d\Psi_d}{dt} - \Psi_q \cdot \omega - \Psi_q \cdot \omega_S - I_d \cdot r_A, \tag{2.17}$$

$$U_q = -\frac{d\psi_q}{dt} + \psi_d \omega + \psi_d \omega_S - I_q r_A. \tag{2.18}$$

Уравнения (2.17) и (2.18) называют уравнениями Парка-Горева.

Составляющие напряжений в (2.17) и (2.18) порождаются определенными процессами и в соответствии с этим называются следующим образом:

$\frac{d\psi_d}{dt}, \frac{d\psi_q}{dt}$ – ЭДС трансформации,

$\psi_d\omega,\ \psi_q\omega$ – ЭДС синхронного вращения,

$\psi_d\omega_S,\quad \psi_q\omega_S$ – ЭДС скольжения.

При использовании математической модели синхронной машины, основанной на преобразовании Парка-Горева для исследования электромеханических переходных процессов уравнения (2.17) и (2.18) упрощают, а именно пренебрегают активным сопротивлением обмотки статора, ЭДС трансформации и ЭДС скольжения. Следовательно, далее используются уравнения в виде

$$U_d = -\Psi_q \cdot \omega, \tag{2.19}$$

$$U_q = \Psi_d \cdot \omega \cdot \tag{2.20}$$

Важно обратить внимание на то, что магнитный поток по оси «*q*» наводит ЭДС по оси «*d*» и на оборот. Это объясняется тем, что индуктируемая ЭДС сдвинута на 90° по отношению к соответствующему переменному магнитному потоку.

Кроме обмоток статора по оси «*d*» и по оси «*q*» имеются замкнутые контуры, которые образованы либо специально выполненными обмотками, либо конструктивными элементами, по которым могут замыкаться токи, наводимые в них изменяющимися магнитными потоками.

В обычных машинах с роторами любой конструкции по продольной оси расположена обмотка возбуждения. В синхронных машинах с явновыраженными полюсами имеются специальные короткозамкнутые демпферные обмотки, которые образуют контуры как по продольной, так и по поперечной осям. В синхронных машинах с неявновыраженными полюсами специальных демпферных обмоток нет. Роль таких контуров выполняет проводящий массив ротора.

Параметры контуров ротора (индуктивность и активное сопротивление) в общем случае не остаются постоянными, а из-за поверхностного эффекта зависят от скорости изменения токов. Особенно сильно эта зависимость проявляется в синхронных машинах с неявновыраженными полюсами.

Влияние реальных демпферных контуров обычно учитывают, помещая по продольной и поперечной осям ограниченное число замкнутых контуров с сосредоточенными параметрами.

Во многих случаях демпферную систему замещают одним контуром по оси «*d*» и одним контуром по оси «*q*». Такой модели соответствует следующее расположение контуров (рис. 2.4).

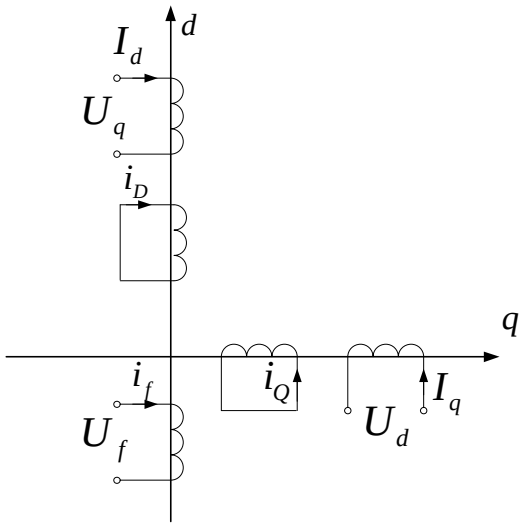


Рис. 2.4. Расположение контуров по осям *d*-*q*

Уравнения (2.19) и (2.20) должны быть дополнены дифференциальными уравнениями контуров:

- возбуждения

$$\frac{d\Psi_f}{dt} + r_f \cdot i_f = U_f, \tag{2.21}$$

- демпферного контура по продольной оси

$$\frac{d\psi_D}{dt} + r_D i_D = 0, \tag{2.22}$$

- демпферного контура по поперечной оси

$$\frac{d\Psi_Q}{dt} + r_Q \cdot i_Q = 0. \tag{2.23}$$

Все контуры по продольной оси и все контуры по поперечной оси магнитно связаны между собой. Но между контурами продольной и поперечной осей магнитная связь отсутствует, так плоскости их обмоток расположены под 90^0.

Магнитные потоки обмоток с учетом того, что в реальной электромагнитной системе не весь создаваемый обмотками магнитный поток сцепляется с другими обмотками из-за явления магнитного рассеяния (рис. 2.5).

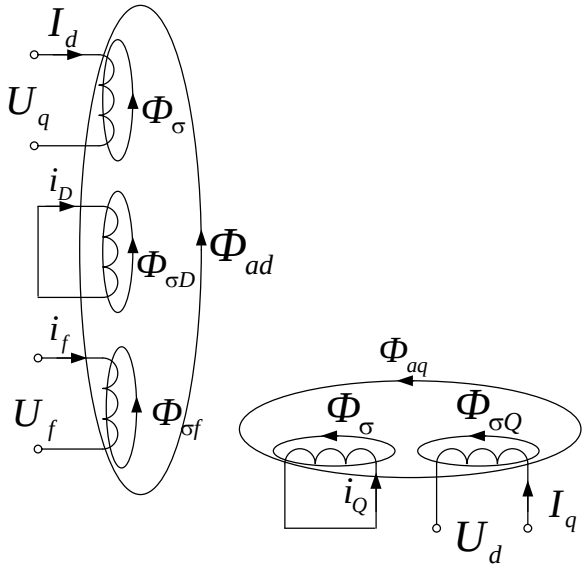


Рис. 2.5. Магнитные потоки обмоток

На рис. 2.5 приняты обозначения:
Φ_{ad} и Φ_{aq} – магнитные потоки взаимной индукции по продольной и поперечной оси.
Φ_σ, $\Phi_{\sigma D}$, $\Phi_{\sigma f}$, $\Phi_{\sigma Q}$ – магнитные потоки рассеяния. Принадлежность потоков к определенной обмотке определена индексом. Потокам рассеяния обмоток статора по оси d и q (Φ_σ) присвоен общий индекс, так как они одинаковы.

Магнитно-связанные контуры, как известно, можно представить в виде схемы замещения, в которой полная (или собственная) индуктивность каждой обмотки состоит из двух составляющих взаимной индуктивности и индуктивности рассеяния. В соответствии с этим для каждого контура:
- по оси «d»

$$L_d = M_{ad} + L_\sigma,$$
$$L_D = M_{ad} + L_{\sigma D},$$
$$L_f = M_{ad} + L_{\sigma f},$$

- по оси «q»

$$L_q = M_{aq} + L_\sigma,$$
$$L_Q = M_{aq} + L_{\sigma Q},$$

где M_{ad} и M_{aq} – коэффициенты взаимной индуктивности контуров соответственно по продольной и поперечной осям.

Индуктивность рассеяния имеют индекс «σ» и индекс принадлежности к определенному контуру.

Потокосцепления каждого из магнитно-связанных контуров зависит от токов всех контуров и определяются следующим образом

- по оси «*d*»

$$\Psi_d = -I_d \cdot L_d + i_D \cdot M_{ad} + i_f \cdot M_{ad}, \quad (2.24)$$

$$\psi_D = i_D L_D + i_f M_{ad} - I_d M_{ad}, \quad (2.25)$$

$$\Psi_f = i_f \cdot L_f + i_D \cdot M_{ad} - I_d \cdot M_{ad}, \quad (2.26)$$

- по оси «*q*»

$$\Psi_q = -I_q \cdot L_q + i_Q \cdot M_{aq}, \quad (2.27)$$

$$\Psi_Q = i_Q \cdot L_Q - I_q \cdot M_{aq}, \quad (2.28)$$

В формулах (2.24) – (2.28) составляющие с токами I_d и I_q приняты отрицательными для удобства вывода последующих соотношений.

Полученные уравнения в принципе могут использоваться в составе расчетных моделей энергосистем. Если в ходе расчета определяются значения U_d, U_q, I_d, I_q, то может быть определена активная мощность генератора как

$$P_Г = U_d I_q + U_q I_d .$$

Вращающий электромагнитный момент с учетом (2.19) и (2.20)

$$M_Г = \frac{P_Г}{\omega} = -\psi_q I_d + \psi_d I_q . \quad (2.29)$$

2.1.3. Индуктивные сопротивления синхронной машины

Индуктивные сопротивления синхронной машины, значения которых входят как коэффициенты в уравнения математической модели, определяются при следующих условиях.

Сверхпереходное индуктивное сопротивление (x''_d) определяется в первый момент внезапного (скачкообразного) изменения режима с учетом влияния демпферного контура и контура возбуждения.

Переходное сопротивление (x'_d) определяется расчетными условиями, соответствующими первому моменту внезапного изменения режима без учета влияния демпферного контура.

Использование таких условий возможно в связи с тем, что свободные токи в демпферных контурах затухают значительно быстрее, чем в обмотке возбуждения.

Для определения сопротивлений x'_d и x''_d, x''_q используется теорема о постоянстве потокосцепления с замкнутым контуром, активное сопротивление которого равно нулю (сверхпроводящий контур).

Суммарное потокосцепление контура с собственной индуктивностью L, имеющего магнитную связь с другим контуром равно

$$\Psi_K = \Psi_L + \Psi_M = Li + \Psi_M ,$$

где Ψ_M – потокосцепление взаимоиндукции.

Дифференциальное уравнение такого контура

$$\frac{d\left(Li + \Psi_M\right)}{dt} = 0 .$$

Следовательно

$$Li + \Psi_M = \text{const} .$$

Последнее соотношение означает, что любое изменение потокосцепления взаимной индукции со сверхпроводящим контуром Ψ_M вызывает протекание тока в контуре такой величины и такого направления, что поле этих токов компенсирует изменение Ψ_M. Иными словами, ток в сверхпроводящем короткозамкнутом контуре определяется из условия сохранения потокосцепления с контуром неизменным.

Реальные контуры синхронной машины обладают, хотя и малыми, но конечными активными сопротивлениями. Все же на некотором отрезке времени, значительно меньшим постоянной времени контура, можно последний рассматривать как сверхпроводящий и использовать теорему о постоянстве потокосцепления.

Применим теорему о постоянстве потокосцепления для магнитной системы по рис.2.6. Контур II является сверхпроводящим.

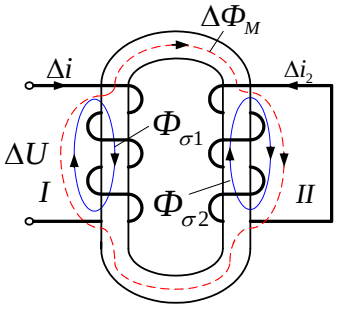


Рис.2.6. Магнитная система

Уравнения для изменений потокосцеплений при изменении тока в контуре I

$$\Delta i_1 L_1 + \Delta i_2 M = \Delta\Psi_1, \qquad (2.30)$$

$$\Delta i_2 L_2 + \Delta i_1 M = \Delta\Psi_2. \qquad (2.31)$$

Согласно теореме о постоянстве потокосцепления $\Delta\Psi_2 = 0$. Выразим при этих условиях Δi_2 из уравнения (2.31), подставим в (2.30) и выделим отношение $L_Э = \dfrac{\Delta\Psi_1}{\Delta i}$, которое определяет результирующую индуктивность контура I

$$L_Э = L_1 - \frac{M^2}{L_2}.$$

С учетом магнитного рассеивания контуров

$$L_1 = M + L_{\sigma 1}, \quad L_2 = M + L_{\sigma 2}.$$

Тогда

$$L_Э = \frac{ML_{\sigma 2} + ML_{\sigma 1} + L_{\sigma 1}L_{\sigma 2}}{M + L_{\sigma 2}} = L_{\sigma 1} + \frac{ML_{\sigma 2}}{M + L_{\sigma 2}}.$$

Так как практически $M >> L_{\sigma 2}$, то $L_Э \approx L_{\sigma 1} + L_{\sigma 2}$ и это означает, что все изменения тока Δi_1 вызывают только изменения потока на пути рассеивания. Магнитное сопротивление на пути рассеивания значительно больше, поэтому индуктивность, а следовательно и индуктивное сопротивление в первый момент изменения режима меньше.

После затухания свободных токов в обмотке возбуждения и в демпферных контурах магнитные потоки, создаваемые током обмотки статора беспрепятственно замыкаются по наименьшему магнитному сопротивлению, которому соответствуют синхронные индуктивные сопротивления по продольной оси – x_d и по поперечной оси – x_q. В синхронных машинах с явновыраженными полюсами на роторе магнитное сопротивление по продольной оси значительно меньше, чем по поперечной и поэтому у таких машин $x_d > x_q$.

2.1.4. Постоянные времени синхронной машины по продольной и поперечной осям

В систему уравнений синхронной машины входят постоянные времени для различных стадий процесса при разомкнутой и замкнутой обмотке статора.

При разомкнутой обмотке статора постоянные времени должны определяться с учетом взаимной индукции между обмоткой возбуждения и эквивалентным демпферным контуром. Так как постоянные времени определяются только параметрами схемы, то место приложения внешнего воздействия, вызывающего переходный процесс, при рассмотрении данного вопроса не имеет значения. Примем, что переходный процесс вызывается изменением напряжения на обмотке возбуждения, чему соответствует схема

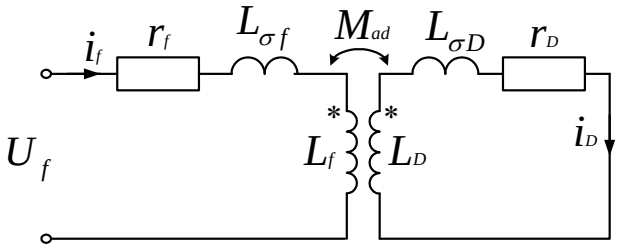


Рис. 2.7. Схема замещения синхронной машины

Собственные индуктивности контуров

$$L_f = M_{ad} + L_{\sigma f},$$
$$L_D = M_{ad} + L_{\sigma D}.$$

Дифференциальные уравнения контуров

$$L_f \frac{di_f}{dt} + i_f r_f + M_{ad} \frac{di_D}{dt} = U_f,$$

$$L_D \frac{di_D}{dt} + i_D r_D + M_{ad} \frac{di_f}{dt} = 0.$$

В операторной форме

$$L_f p i_f(p) + i_f(p) r_f + M_{ad} p i_D(p) = U_f(p), \qquad (2.32)$$

$$L_D p i_D(p) + i_D(p) r_D + M_{ad} p i_f(p) = 0. \qquad (2.33)$$

Выразим из (2.33) ток $i_D(p)$ и подставим в (2.32)

$$i_f(p)\left(r_f + L_f p\right) - \frac{M_{ad}^2 i_f(p)\, p}{r_D + L_D p} = U_f(p).$$

Характеристическое уравнение

$$\left(L_f L_D - M_{ad}^2\right) p^2 + \left(L_D r_f + L_f r_D\right) p + r_f r_D = 0. \qquad (2.34)$$

Коэффициент при p^2 преобразуем следующим образом

$$L_f L_D - M_{ad}^2 = L_f L_D \left(1 - \frac{M_{ad}^2}{L_f \cdot L_D}\right) = L_f L_D \sigma_{fD}, \qquad (2.35)$$

где σ_{fD} – коэффициент рассеивания между контуром возбуждения и демпферным контуром.

Разделим уравнение (2.34) на $r_f r_D$ и с учетом (2.35) получим

$$\sigma_{fD} T_f T_D p^2 + \left(T_f + T_D\right) p + 1 = 0, \qquad (2.36)$$

где $T_f = \frac{L_f}{r_f}$, $T_D = \frac{L_D}{r_D}$ – постоянные времени соответственно контура возбуждения и демпферного контура в отсутствии взаимного влияния.

В рассматриваемой схеме может иметь место только затухающие апериодически свободные токи, то есть корни будут вещественные отрицательные. Постоянные времени связаны с корнями, как известно, соотношением $p = -\frac{1}{T}$.

Уравнение (2.36) относительно постоянных времени

$$T^2 - \left(T_f + T_D\right) T + \sigma_{fD} T_f T_D = 0. \qquad (2.37)$$

Решение (2.37)

$$T_{1,2} = \frac{T_f + T_D}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{T_f + T_D}{2}\right)^2 - \sigma_{fD} T_f T_D}\,. \qquad (2.38)$$

Коэффициент рассеяния σ_{fD} у генераторов различных типов лежит в переделах 0,05–0,15, поэтому

$$\sigma_{fD} T_f T_D << \left(\frac{T_f + T_D}{2}\right)^2.$$

Это дает возможность разложением второй составляющей в (2.38) в степенной ряд использовать приближенное выражение

$$T_{1,2} \approx \frac{T_f + T_D}{2} \pm \left(\frac{T_f + T_D}{2} - \frac{\sigma_{fD} T_f T_D}{T_f + T_D} \right).$$

Меньшая из двух постоянных времени называется сверхпереходной постоянной времени по продольной оси при разомкнутой обмотке статора

$$T''_{d0} \approx \frac{\sigma_{fD} T_f T_D}{T_f + T_D}.$$

Большая постоянная времени – переходная постоянная времени по продольной оси при разомкнутой обмотке статора

$$T'_{d0} \approx T_f + T_D - T''_{d0}.$$

Для определения постоянных времени при замкнутой накоротко обмотке статора можно контур обмотки статора считать сверхпроводящим, так как потери в активном сопротивлении этого контура полностью покрываются за счет механической энергии, подводимой к ротору генератора от турбины. Поэтому схема для определения постоянных времени в этом случае имеет вид

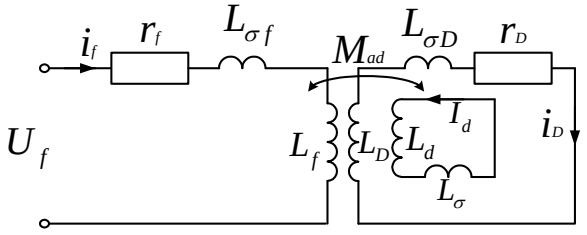


Рис. 2.8. Схема замещения для определения постоянных времени

Коэффициент взаимоиндукции между всеми контурами, как принято выше, одинаков и равен M_{ad}.

Уравнения двух взаимосвязанных контуров возбуждения и демпферной обмотки дополним уравнением короткозамкнутого контура обмотки статора, принимая активное сопротивление этой обмотки равным нулю

$$L_f \frac{di_f}{dt} + i_f r_f + M_{ad} \frac{di_D}{dt} + M_{ad} \frac{dI_d}{dt} = U_f, \qquad (2.39)$$

$$L_D \frac{di_D}{dt} + i_D r_D + M_{ad} \frac{di_f}{dt} + M_{ad} \frac{dI_d}{dt} = 0, \qquad (2.40)$$

$$L_d \frac{dI_d}{dt} + M_{ad} \frac{d}{dt}\left(i_f + i_D\right) = 0. \qquad (2.41)$$

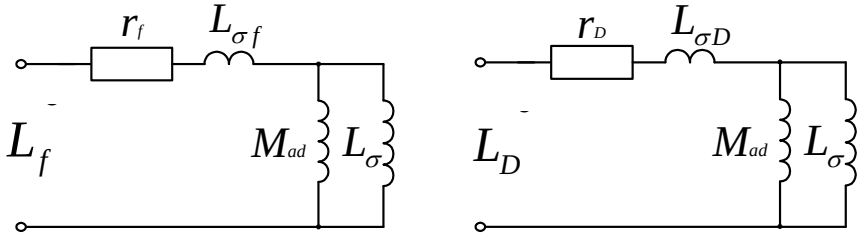
Из (2.41) выразим $\frac{dI_d}{dt}$, подставим в (2.39) и (2.40) и после преобразований получим

$$L_f \frac{di_f}{dt} + M \frac{di_D}{dt} + i r = U, \qquad (2.42)$$

$$L_D \frac{di_D}{dt} + M \frac{di_f}{dt} + i r = 0, \qquad (2.43)$$

где $L_f = \sigma L$, $L = \sigma L$, $M = M\left(1 - \frac{M_{ad}}{L_d}\right)$ – эквивалентные индуктивности контура возбуждения и демпферного контура обмотки статора,

$\sigma_{fd} = 1 - \frac{M_Э^2}{L_f L_d}$, $\sigma_{Dd} = 1 - \frac{M_Э^2}{L_D L_d}$ – коэффициенты рассеяния соответственно между контурами возбуждения и демпферным контуром и контуром обмотки статора.



а б

Рис. 2.9. Схемы замещения
а – соответствующая эквивалентной индуктивности $L_{fэ}$,
б – соответствующая эквивалентной индуктивности $L_{Dэ}$

Для определения постоянных времени в (2.42) и (2.43) справедливо соотношение, подобное (2.38), в котором исходные постоянные времени будут равны $T_f = \frac{L_f}{r_f}$ и $T_D = \frac{L_D}{r_D}$. Эти постоянные времени меньше,

чем соответственно T_f и T_D, так как $L_f < L'$ и $L_{D\Э} < L_D$. Таким образом, постоянные времени при замкнутой накоротко обмотке статора:

- сверхпереходная постоянная времени по продольной оси при замкнутой обмотке статора

$$T''_d \approx \frac{\sigma_{fD} T_{f\Э} T_{D\Э}}{T_{f\Э} + T_{D\Э}}.$$

- переходная постоянная времени по продольной оси при замкнутой обмотке статора

$$T'_d \approx T_f + T - T''.$$

Можно также показать, что между постоянными времени имеет место следующая связь

$$T'_d = T'_{d0} \frac{x'_d}{x_d}, \quad T''_d = T''_{d0} \frac{x''_d}{x'_d}.$$

По поперечной оси аналогичным образом могут быть определены постоянные времени соответственно при разомкнутой замкнутой обмотке статора T''_{q0} и T''_q.

Эти постоянные времени связаны соотношением

$$T''_q = T''_{q0} \frac{x''_q}{x_q}.$$

2.1.5. Система уравнений генератора в форме ЭДС без учета влияния демпферных контуров

Для вывода системы уравнений генератора в форме ЭДС запишем основные соотношения справедливые для установившегося режима, полученные ранее. Для удобства присвоим данным уравнениям новые номера.

$$U_d = -\psi_q \omega, \tag{2.44}$$

$$U_q = \psi_d \omega, \tag{2.45}$$

$$\psi_d = -I_d L_d + i_f M_{ad}, \tag{2.46}$$

$$\psi_f = i_f L_f - I_d M_{ad}, \tag{2.47}$$

$$\psi_q = -I_q L_q . \qquad (2.48)$$

Подставим (2.46) в (2.45)

$$U_q = (i_f M_{ad} - I_d L_d)\omega . \qquad (2.49)$$

В выражении (2.49) множитель при I_d есть синхронное реактивное сопротивление.

$$x_d = L_d \omega . \qquad (2.50)$$

Первый член в (2.49) – ЭДС за синхронным реактивным сопротивлением

$$E_q = i_f M_{ad} \omega = i_f x_{ad} , \qquad (2.51)$$

где $x_{ad} = M_{ad}\omega$ – сопротивление взаимной индукции.

Как видно из (2.51), E_q пропорциональна току возбуждения. С учетом (2.51) выражение (2.49) можно представить в виде

$$U_q = E_q - I_d x_d . \qquad (2.52)$$

При принятых условиях по «*q*» учитывается только контур обмотки статора.

Подставим (2.48) в (2.44)

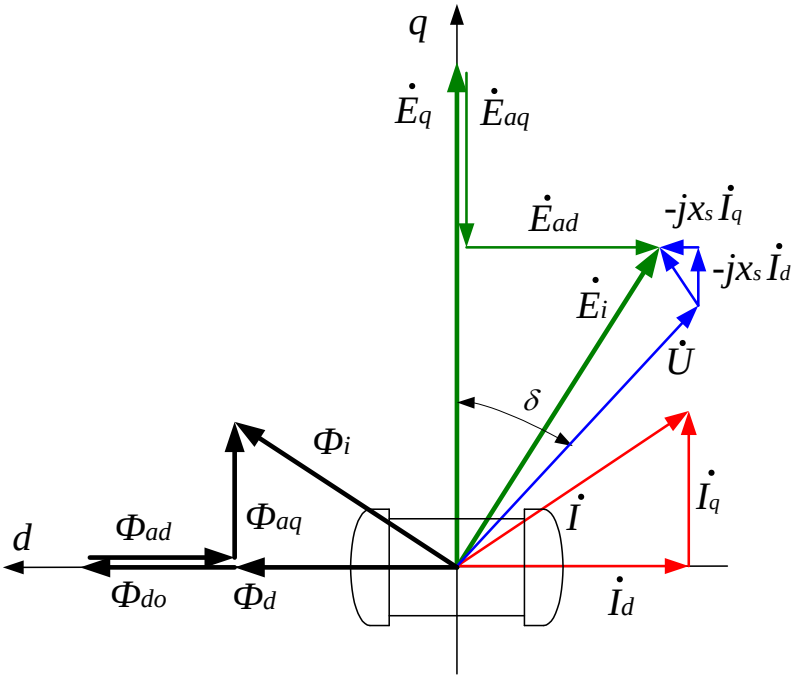
$$U_d = I_q L_q \omega = I_q x_q , \qquad (2.53)$$

где $x_q = L_q \omega$ – синхронное реактивное сопротивление по поперечной оси.

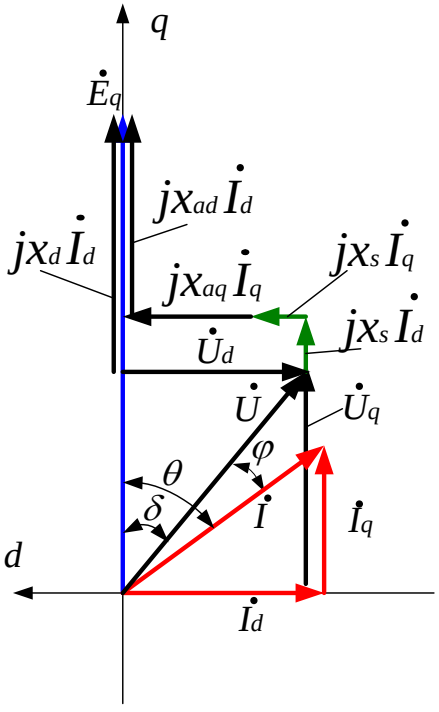
Для составляющих в выражениях (2.52) и (2.53) выполним переход от координат *d, q* к фазным координатам.

Например, для тока фазы А

$$i_A = I_d \cos(\omega t + \gamma_0) + I_q \sin(\omega t + \gamma_0) .$$

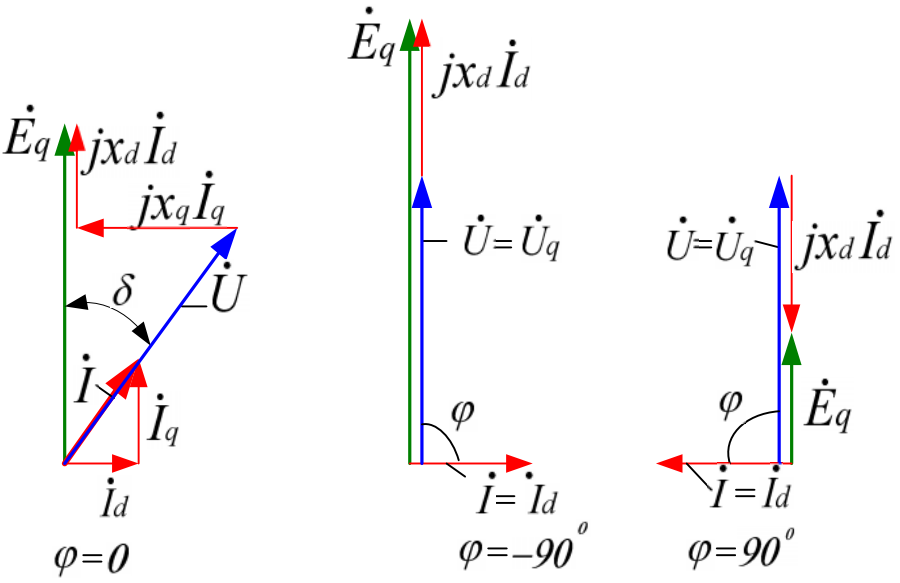


а



б

Рис. 2.10. Векторные диаграммы синхронной машины
а – магнитные потоки и ЭДС явнополюсного генератора
б – нормальный режим работы явнополюсного генератора



а б в

Рис. 2.11. Векторные диаграммы при различном характере нагрузки
а – активная нагрузка,
б – индуктивная нагрузка,
в – емкостная нагрузка

Очевидно, что теперь возможно применение символического метода и представление выражений (2.52) и (2.53) в векторной форме. При этом нужно применить оператор поворота на 90^0, как это принято при записи комплексных чисел, чтобы сохранить направление составляющих в (2.52) по оси *q*, а в (2.53) по оси *d*.

$$\dot{U}_q = \dot{E}_q - \dot{I}_d\, jx_d\,,$$

$$\dot{U}_d = \dot{I}_q\, jx_q\,.$$

Выведем соотношения для переходной стадии процесса. Из (2.47) выразим ток i_f

$$i_f = \frac{\psi_f + I_d M_{ad}}{L_f}\,. \qquad (2.54)$$

Подставим (2.54) в (2.49)

$$U_q = \left[\frac{M_{ad}}{L_f}\left(\psi_f + I_d M_{ad}\right) - I_d L_d\right]\omega\,.$$

Группируем члены, содержащие I_d

$$U_q = \psi_f \frac{M_{ad}}{L_f}\omega - I_d\left(L_d - \frac{M_{ad}^2}{L_f}\right)\omega . \qquad (2.55)$$

В (2.55) множитель при I_d есть переходное реактивное сопротивление, что можно показать на основе теоремы о постоянстве потокосцепления. Изменения напряжения, потокосцепления и тока при возникновении какого-либо возмущения по (2.55)

$$\Delta U_q = \Delta\psi_f \frac{M_{ad}}{L_f}\omega - \Delta I_d\left(L_d - \frac{M_{ad}^2}{L_f}\right)\omega . \qquad (2.56)$$

Так как потокосцепление с замкнутым контуром не может измениться скачком, то $\Delta\psi_f = 0$ и из (2.56) отношение

$$\frac{\Delta U_q}{\Delta I_d} = x'_d = \left(L_d - \frac{M_{ad}^2}{L_f}\right)\omega ,$$

где x'_d – переходное реактивное сопротивление по продольной оси.

Первый член в выражении (2.55), пропорциональный потокосцеплению обмотки возбуждения – есть ЭДС E'_q за переходным сопротивлением

$$E'_q = \psi_f \frac{M_{ad}}{L_f}\omega .$$

Выражение (2.55) можно представить в виде

$$U_q = E'_q - I_d x'_d \ .$$

В выражении для $x'_d = \left(L_d - \frac{M_{ad}^2}{L_f}\right)\omega$ учтем, что

$$L_d = M_{ad} + L_\sigma , \quad L_f = M_{ad} + L_{\sigma f} .$$

Тогда

$$x'_d = \left(M_{ad} + L_\sigma - \frac{M_{ad}^2}{M_{ad} + L_{\sigma f}} \right) \omega =$$

$$= \frac{M_{ad}^2 + L_\sigma M_{ad} + L_{\sigma f} M_{ad} + L_\sigma L_{\sigma f} - M_{ad}^2}{M_{ad} + L_{\sigma f}} \omega =$$

$$= \frac{L_\sigma (M_{ad} + L_{\sigma f}) + L_{\sigma f} M_{ad}}{M_{ad} + L_{\sigma f}} \omega.$$

Таким образом, окончательно

$$x'_d = \left(L_\sigma + \frac{L_{\sigma f} M_{ad}}{M_{ad} + L_{\sigma f}} \right) \omega. \qquad (2.57)$$

Формуле (2.57) соответствует схема замещения

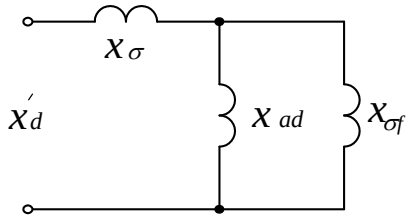


Рис. 2.12. Схема замещения для x'_d через внутренние параметры генератора

2.1.6. Система уравнений генератора в форме ЭДС с учетом влияния демпферных контуров

Для вывода системы уравнений генератора в форме ЭДС с учетом влияния демпферных контуров запишем основные соотношения, полученные ранее. Для удобства снова присвоим данным уравнениям новые номера.

Соотношения для оси *d*

$$U_q = \Psi_d \omega, \qquad (2.58)$$

$$\Psi_d = i_f M_{ad} + i_D M_{ad} - I_d L_d, \qquad (2.59)$$

$$\Psi_f = i_f L_f + i_D M_{ad} - I_d M_{ad}, \qquad (2.60)$$

$$\Psi_D = i_D L_D + i_f M_{ad} - I_d M_{ad}. \qquad (2.61)$$

Из (2.60) и (2.61) выразим i_f и i_D. Для определения i_D умножим (2.60) на M_{ad}, а (2.61) на L_f

$$\Psi_f M_{ad} = i_f M_{ad} L_f + i_D M_{ad}^2 - I_d M_{ad}^2, \qquad (2.62)$$

$$\Psi_D L_f = i_D L_D L_f + i_f M_{ad} L_f - I_d M_{ad}^2 L_f. \qquad (2.63)$$

Вычтем (2.63) из (2.62), сгруппируем члены, содержащие i_D и I_d, и выразим искомый ток i_D

$$i_D = \frac{\Psi_D L_f - \Psi_f M_{ad} + I_d \left(M_{ad} L_f - M_{ad}^2 \right)}{L_D L_f - M_{ad}^2}. \qquad (2.64)$$

Для определения i_f умножим (2.60) на L_D, а (2.61) на M_{ad}

$$\Psi_f L_D = i_f L_D L_f + i_D M_{ad} L_D - I_d M_{ad} L_D. \qquad (2.65)$$

$$\Psi_D M_{ad} = i_D L_D M_{ad} + i_f M_{ad}^2 - I_d M_{ad}^2. \qquad (2.66)$$

Вычтем (2.66) из (2.65), сгруппируем члены, содержащие i_D и I_d, и выразим искомый ток i_f

$$i_f = \frac{\Psi_f L_D - \Psi_D M_{ad} + I_d \left(M_{ad} L_D - M_{ad}^2 \right)}{L_D L_f - M_{ad}^2}. \qquad (2.67)$$

Подставим (2.64) и (2.67) в (2.59), а затем в (2.58), и после преобразований получим

$$\begin{aligned} U_q = & \frac{\Psi_f \left(L_D - M_{ad} \right) M_{ad} + \Psi_D \left(L_f - M_{ad} \right)}{L_D L_f - M_{ad}^2} \omega - \\ & - I_d \left(L_d - \frac{M_{ad} L_f + M_{ad} L_D - 2 M_{ad}^2}{L_D L_f - M_{ad}^2} M_{ad} \right) \omega. \end{aligned} \qquad (2.68)$$

В выражении (2.68) первая составляющая пропорциональна линейной комбинации полных потокосцеплений обмотки возбуждения и демпферной обмотки имеет размерность напряжения и в принятой системе уравнений называется сверхпереходный ЭДС E_q''. Коэффициент при I_d имеет физический смысл индуктивного сопротивления обмотки статора в начальный момент изменения режима, например в момент ко-

роткого замыкания. Это сопротивление есть сверхпереходное индуктивное сопротивление обмотки статора по продольной оси – x_d''.

Можно показать, что коэффициент при I_d в (2.68) действительно имеет смысл индуктивного сопротивления в начальный момент скачкообразного изменения режима на основе теоремы о постоянстве потокосцепления.

Если выражение (2.68) записать относительно изменений $\Delta U_q, \Delta I_d, \Delta\Psi_f, \Delta\Psi_D$ и принять на основании упомянутой теоремы $\Delta\Psi_f = 0$, $\Delta\Psi_D = 0$, то получим, что

$$\frac{\Delta U_q}{\Delta I_d} = \left(L_d - \frac{M_{ad}L_f + M_{ad}L_D - 2M_{ad}^2}{L_D L_f - M_{ad}^2} M_{ad} \right) \omega = x_d''. \qquad (2.69)$$

Для сверхпереходных электрических величин также как и для переходных и установившихся можно записать соотношение

$$U_q = E_q'' - I_d x_d''. \qquad (2.70)$$

Вывод уравнения для U_d потребует следующих соотношений, полученных ранее

$$U_d = -\Psi_q \omega, \qquad (2.71)$$

$$\Psi_q = i_Q M_{aq} - I_q L_q, \qquad (2.72)$$

$$\Psi_Q = i_Q L_Q - I_q M_{aq}, \qquad (2.73)$$

Из (2.73) выразим ток i_Q

$$i_Q = \frac{\Psi_Q + I_q M_{aq}}{L_Q}. \qquad (2.74)$$

Подставим (2.74) в (2.72) и после преобразований

$$\Psi_q = \frac{\Psi_Q M_{aq}}{L_Q} - I_q \left(L_q - \frac{M_{aq}^2}{L_Q} \right). \qquad (2.75)$$

С учетом (2.75) напряжение по продольной оси будет равно

$$U_d = \left[-\frac{\Psi_Q M_{aq}}{L_Q} + I_q \left(L_q - \frac{M_{aq}^2}{L_Q} \right) \right] \omega. \qquad (2.76)$$

В (2.76) член в скобках в квадратных скобках, пропорциональный потокосцеплению поперечного демпферного контура есть сверхпереходная ЭДС, направленная по продольной оси E''_d, а выражение $\left(L_q - \frac{M^2_{aq}}{L_Q}\right) = x''_q$ – сверхпереходное сопротивление по поперечной оси. Таким образом, можно также как и ранее ввести соотношение

$$U_d = -E''_d + I_q x''_q. \qquad (2.77)$$

2.2. Модель турбины и регулятора частоты вращения

В качестве основы для расчетной математической модели используется упрощенная схема регулятора с местной жесткой обратной связью. Такой регулятор обеспечивает регулирование по статической характеристике, наклон которой определяется либо коэффициентом статизма σ, либо коэффициентом крутизны частотной характеристики, который равен $k_f = 1/\sigma$.

Исходный режим всех агрегатов в программах, где не учитывается изменение частоты в расчетах установившегося режима, определяется состоянием энергосистемы после отработки вторичных регуляторов частоты на регулирующих агрегатах. Частота при этом практически равна номинальной, а активная мощность соответствует заданной в генераторных узлах. Таким образом, в исходном режиме статическая характеристика каждого агрегата проходит через точку $P_{Г0}$ и $f_0\ (\omega_0)$ (рис. 2.13)

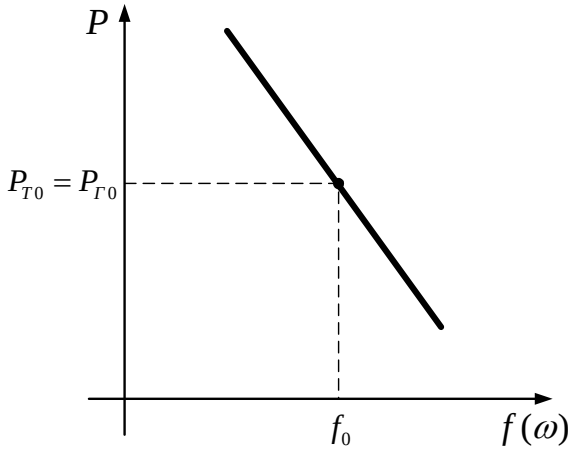


Рис. 2.13. Статическая характеристика агрегата

Регулятор приходит в действие и изменяет мощность турбины, если отклонение частоты от исходного значения $f_0\,(\omega_0)$ превысит зону нечувствительности измерительного органа регулятора.

Мощность паровой турбины определяется соотношением

$$P_T = A_П D H_0 \eta\,, \tag{2.78}$$

где D – расход пара в единицу времени (т/час),

$A_П$ – коэффициент пропорциональности,

H_0 – располагаемый тепловой перепад,

η – коэффициент полезного действия.

Мощность турбины меняют за счет изменения расхода пара *Д*. У паровых турбин в качестве регулирующих элементов используются специальные регулирующие клапаны.

Мощность гидротурбины

$$P_Г = A_Г Q H \eta\,, \tag{2.79}$$

где $A_Г$ – коэффициент пропорциональности,

Q – расход воды ($м^3/с$),

H – напор воды.

У гидротурбин в качестве регулирующего элемента используется устройство, которое называется направляющим аппаратом. В установившихся режимах расход пара через турбину при постоянном давлении пара пропорционален относительному открытию регулирующих клапанов μ_* (за единицу принимается открытие, соответствующее номинальной мощности турбины).

Изменение мощности турбины запаздывает по отношению к изменению положения регулирующих клапанов из-за энергетической инерционности паровых объемов.

Паровая турбина без промежуточного перегрева пара. Инерционность в изменении мощности турбины в этом случае определяется паровым объемом, заключенным между регулирующими клапанами и первым рядом сопл турбины.

Турбина в этом случае моделируется инерционным звеном 1-го порядка

$$W_{ТП}(p) = \frac{1}{T_П p + 1}\,,$$

где $T_П$ – постоянная времени парового объема в ЦВД.

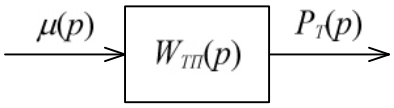


Рис. 2.14. Модель паровой турбины без промежуточного перегрева пара,
μ – параметр, характеризующий положение регулирующих клапанов

Паровая турбина с промежуточным перегревом пара. Технологическая схема турбины с промежуточным перегревом пара показана на рис. 2.15.

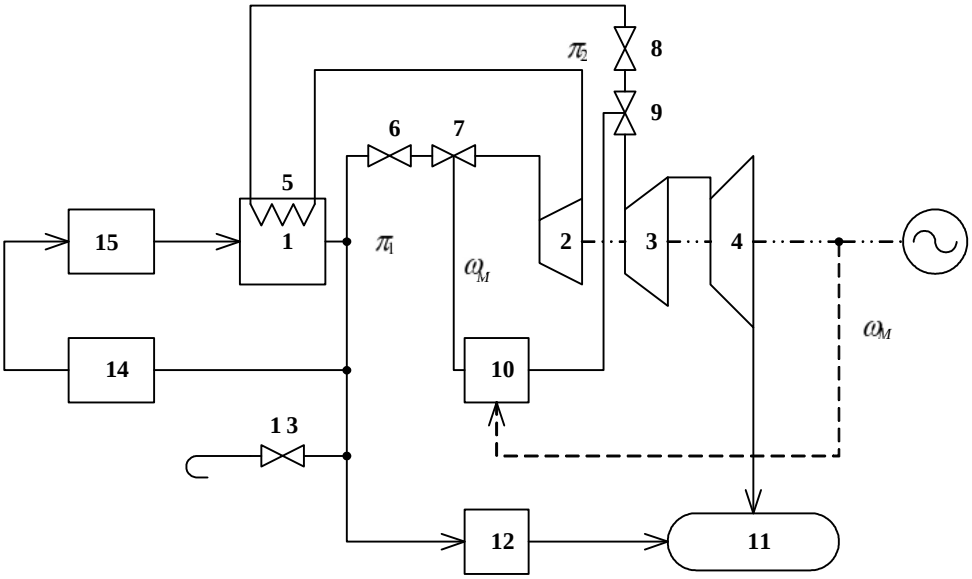


Рис. 2.15. Технологическая схема турбоагрегата с промежуточным перегревом пара
1– котельный агрегат,
2 – цилиндр высокого давления (ЦВД),
3 – цилиндр среднего давления (ЦСД),
4 – цилиндр низкого давления (ЦНД),
5 – теплообменник промежуточного перегрева,
6 – стопорный клапан ЦВД,
7 – регулирующий клапан ЦВД,
8 – стопорный клапан ЦСД,
9 – регулирующий клапан ЦСД,
10 – АРЧВ – автоматический регулятор частоты вращения турбины,
конденсатор турбины,
11 – быстродействующая редукционная охладительная установка (БРОУ),
12 – аварийный предохранительный клапан,
13 – устройство для измерения давления пара,
14 – устройство измерения давления пара,
15 – регулятор нагрузки котла – изменяет подачу топлива в топку, по факту отклонения давления пара от заданной величины.

Давление пара на выходе котла – π_1, на входе ЦСД – π_2.

При рассмотрении этой технологической схемы сделаем следующее допущение: за время переходного процесса давление π_1 не изменяется.

Влияние промперегрева объясняется тем, что во всех элементах тракта промперегрева находится большой объем пара и поэтому изменение мощности ЦСД и ЦНД существенно запаздывает от изменения положения регулирующих клапанов, причем это запаздывание значительно больше, чем запаздывание, которое определяется паровым объемом в ЦВД.

Запаздывание в тракте промперегрева также моделируются инерционным звеном 1-го порядка, в соответствие со следующей передаточной функцией

$$W_{\text{ПП}}(p) = \frac{1}{T_{\text{ПП}} p + 1},$$

где $T_{\text{ПП}}$ – постоянная времени парового объема в промперегреве.

Суммарная мощность, которую вырабатывают турбины, некоторым образом распределена между ЦВД (до премперегрева), ЦСД и ЦНД (после промперегрева). Доля мощности ЦВД (обозначим её *C*) составляет в установившемся режиме *C* = 0,15–0,3 от полной мощности турбины. В программе «Мустанг» используется параметр $D_{n0} = 1 - C$.

Далее важно учесть, что в пределах практических регулировочных диапазонов турбины регулирование осуществляется только клапанами ЦВД, причем клапаны ЦСД полностью открыты и вступают в действие, начиная закрываться, когда мощность турбины снижается до 10÷15% от номинальной мощности.

Приблизительно связь между мощностью турбины и положением клапанов 7 и 9 можно отобразить графиком (рис. 2.16)

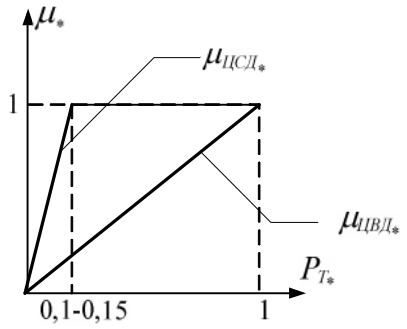


Рис. 2.16. Примерный вид зависимости положения клапанов ЦВД и ЦСД от мощности турбины,
$\mu = 1$ – открытие клапанов, соответствующее номинальной мощности

Запаздывание в изменении мощности в ЦВД моделируется точно также как и в турбине без промежуточного перегрева пара. С учетом последнего обстоятельства структурная схема модели турбины с промежуточным перегревом пара представлена на рис.2.17.

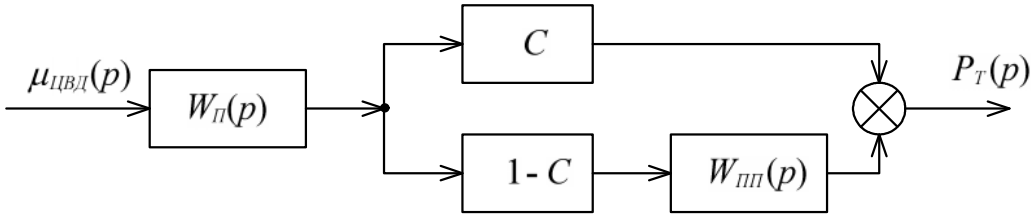


Рис. 2.17. Структурная схема модели турбины с промежуточным перегревом пара

Практически значение $T_П$ много меньше, чем $T_{ПП}$, поэтому часто величиной $T_П$ пренебрегают и учитывают только $T_{ПП}$. Большое запаздывание изменения мощности турбины, из-за промперегрева ухудшает качество регулирования, поэтому применяются специальные меры для компенсации этого влияния. Типовым способом решения этого вопроса является форсирование открытия клапанов ЦВД в переходном режиме. Такое мероприятие называется начальной коррекцией неравномерности (НКН) регулирования турбины. Сигнал для введения компенсации формируется в соответствие с отношением

$$\mu_{НКН} = k_{НКН}\left(P_{Г*} - k\pi_2\right).$$

где $k_{НКН}$ – коэффициент пропорциональности,
k – коэффициент, который выбирается так, чтобы обе составляющие сигнала $\mu_{НКН}$ в установившемся режиме взаимно компенсировались, то есть в установившемся режиме $\mu_{НКН} = 0$. В установившемся режиме давление за промежуточным перегревателем π_2 пропорционально расходу пара через турбину и, следовательно, мощности генератора $P_Г$.

2.3. Модель асинхронного двигателя

Основой математической модели асинхронного двигателя в расчетах электромеханических переходных процессов является уравнение движения ротора двигателя и приводимого им механизма.

$$J\frac{d\omega_R}{dt} = M_{ЭМ} - M_{МЕХ}, \qquad (2.80)$$

где J – момент инерции вращающихся масс двигателя и приводимого механизма,

ω_R – частота вращения ротора двигателя относительно неподвижного статора,

$M_{\text{ЭМ}}$ – электромагнитный момент, развиваемый двигателем,

$M_{\text{МЕХ}}$ – механический момент сопротивления на валу двигателя.

Очевидно, что характер движения ротора асинхронного двигателя в переходных процессах, значение частоты вращения в установившемся режиме, а также устойчивость установившегося режима двигателя определяется характером зависимости моментов $M_{\text{ЭМ}}$ и $M_{\text{МЕХ}}$ от частоты вращения.

При анализе процессов в асинхронном двигателе используется обычно не частота вращения, а скольжение, которое получается, если неподвижная ось отсчета заменяется вектором, вращающимся с определенной частотой. Эта замена целесообразна в связи с тем, что электромагнитный момент определяется скольжением ротора относительно вектора напряжения, приложенного к двигателю.

Моменты, имеющие чисто механическую природу $J\frac{d\omega_R}{dt}$ и $_{MEX}$ зависят от частоты вращения относительно неподвижного статора и для них скольжение определяется относительно вектора, вращающегося с номинальной частотой (синхронно вращающаяся ось). Для перехода к уравнению, выраженному через скольжение, дополнительно к уравнению (2.80) рассмотрим еще одно очевидное уравнение

$$\frac{d\omega_{ном}}{dt} = 0\,. \qquad (2.81)$$

Вычтем из уравнения (2.81) уравнение (2.80) и получим

$$J\frac{d(\omega_{\text{ном}} - \omega_R)}{dt} = M_{\text{МЕХ}} - M_{\text{ЭМ}}\,. \qquad (2.82)$$

Перейдем к относительным единицам, приняв за базисные величины номинальную частоту $\omega_{ном}$ и номинальный момент $M_{\text{ном}}$. В этом случае (2.82) будет иметь вид

$$T_{\text{Д}}\frac{ds_R}{dt} = M_{\text{МЕХ}*} - M_{\text{ЭМ}*}\,, \qquad (2.83)$$

где $T_Д = \frac{\omega_{ном}}{M_{ном}} J$ – механическая постоянная времени вращающихся масс двигателя и приводимого им механизма,

$s_R = \frac{\omega_{ном} - \omega_R}{\omega_{ном}}$ – скольжение ротора относительно вектора, вращающегося с номинальной частотой.

Модель электромагнитного момента асинхронного двигателя может быть построена с учетом электромагнитных переходных процессов в контурах ротора с использованием преобразования Парка-Горева подобно тому, как это делается для синхронной машины. Однако при этом возникает необходимость учета изменения параметров контуров ротора в большом диапазоне скольжений, что существенно усложняет модель. Поэтому в программах расчета электромеханических переходных процессов широко используется модель без учета электромагнитных переходных процессов в контурах ротора. Далее рассматривается такая модель.

Электромагнитный момент, развиваемый двигателем, связан с активной мощностью через частоту напряжения, приложенного к двигателю, следующим образом

$$M_{ЭМ} = \frac{P_д}{\omega}. \qquad (2.84)$$

Активная мощность, потребляемая двигателем, является функцией скольжения ротора относительно вектора напряжения, которое равно

$$s = \frac{\omega - \omega_R}{\omega} = \frac{\omega - \omega_{ном}(1 - s_R)}{\omega}. \qquad (2.85)$$

Частота напряжения, приложенного к двигателю, может отличаться от номинальной, и в установившемся режиме она равна фактической частоте в энергосистеме.

Активная и реактивная мощности, потребляемые двигателем, могут быть определены по упрощенной схеме замещения асинхронного двигателя, приведенной на рис. 2.18.

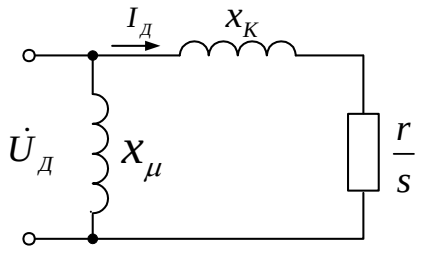


Рис. 2.18. Схема замещения асинхронного двигателя

Активная мощность двигателя

$$P_Д = I_Д^2 \frac{r}{s}. \tag{2.86}$$

Так как в принятой схеме $I_Д = \dfrac{U_Д}{\sqrt{x_K^2 + \left(\dfrac{r}{s}\right)^2}}$, то

$$P_Д = \frac{U_Д^2 rs}{x_K^2 s^2 + r^2}.$$

Дополнительно может быть учтена зависимость сопротивления x_K от частоты. Тогда

$$P_Д = \frac{U_Д^2 rs}{\left(x_K \dfrac{\omega}{\omega_{ном}}\right)^2 s^2 r^2}. \tag{2.87}$$

Как отмечалось выше, существенным обстоятельством является то, что электромагнитный момент двигателя должен достаточно точно воспроизводиться при изменении скольжения от рабочего до 100% для возможности моделирования процесса пуска двигателя.

При этом частота тока в контурах ротора будет изменяться от низкой частоты рабочего скольжения до частоты напряжения сети. При этом из-за явления вытеснения тока в проводниках обмотки ротора при больших скольжениях ее активное сопротивление возрастает, а индуктивное уменьшается. Соответственно должны изменяться $x_К$ и r в (2.87).

Особенно сильно этот эффект проявляется в тех случаях, когда для улучшения пусковых свойств двигателя проводники обмотки ротора выполняются вытянутыми в радиальном направлении (глубокопазный ротор) или в виде двух обмоток, расположенных на различном радиальном расстоянии (двухклеточный ротор).

В [1] предложено приближенно учитывать зависимость $x_К$ и r от скольжения в виде кусочно-линейных функций, вид которых показан на рис. 2.19.

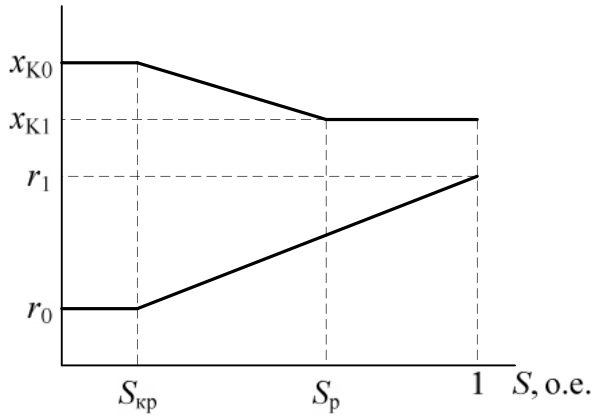


Рис. 2.19. Зависимость $x_К$ и r от скольжения

Реактивная мощность состоит из двух составляющих

$$Q_д = Q_К + Q_\mu . \qquad (2.88)$$

Первая составляющая – реактивная мощность, выделяемая на сопротивлении $x_К$

$$Q_К = I_д^2 x_К \frac{\omega}{\omega_{ном}} . \qquad (2.89)$$

Из (2.87) следует

$$I_Д^2 = P_Д \frac{s}{r},$$

поэтому

$$Q_К = P'' \frac{s}{r} x \frac{\omega}{\omega_{ном}} . \qquad (2.90)$$

Вторая составляющая Q_μ – реактивная мощность намагничивания. Ветвь намагничивания асинхронного двигателя x_μ нелинейная (рис.2.18). Вольтамперная характеристика ветви намагничивания (характеристика холостого хода) имеет вид, показанный на рис.2.20.

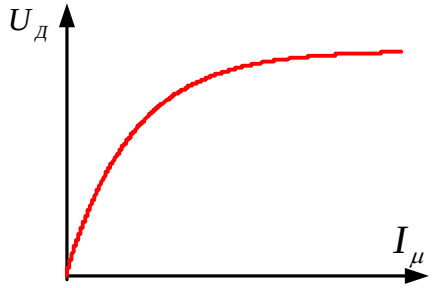


Рис. 2.20. Вольтамперная характеристика ветви намагничивания

Для определения Q_μ может использоваться следующее приближенное выражение

$$Q_\mu = \frac{U_Д^2}{x_\mu \dfrac{\omega}{\omega_{ном}}} f(U_Д). \qquad (2.91)$$

Характер зависимости I_μ от $U_Д$ таков, что Q_μ с ростом $U_Д$ нарастает в степени выше второй. Этим определяется требуемый вид функции $f(U_Д)$, например,

$$f(U_Д) = \left(\frac{U_Д}{U_{Д\,ном}} \right)^{K_\mu - 2}. \qquad (2.92)$$

Степень нелинейности этой функции определяется коэффициентом K_μ.

При моделировании комплексной нагрузки, асинхронные двигатели, имеющиеся в составе нагрузки, моделируются некоторым эквивалентным двигателем, мощность которого задается как некоторая доля $Д_{ас}$ от суммарной мощности нагрузки, заданной в узле ($P_{норм}$ и $Q_{норм}$).

$$P_{д\,норм} = Д_{ас} P_{норм}.$$

Условная полная номинальная мощность эквивалентного асинхронного двигателя определяется по $P_{Д\,норм}$ и заданным значением номинального коэффициента мощности ($\cos\varphi_{ном}$) и коэффициентом загрузки $K_{заг} = \dfrac{P_{Д\,норм}}{P_{Д\,ном}}$.

$$S_{\text{Д ном}} = \frac{P_{\text{Д норм}}}{K_{\text{заг}} \cos\varphi_{\text{ном}}}. \qquad (2.93)$$

Вычислительные процедуры с использованием формул (2.87), (2.89), (2.90) ведутся в относительных единицах при базисной мощности, равной номинальной и номинальном напряжении в узле примыкания нагрузки.

При замене асинхронной нагрузки эквивалентным асинхронным двигателем в расчетах используется не напряжении $U_{\text{Д}}$ непосредственно на зажимах двигателя, а напряжение в узле примыкания нагрузки U. Между этим узлом и узлами непосредственного подключения двигателей имеются линии и трансформаторы, которые в схеме не учитываются. Это приводит к тому, что напряжение, определяющее поведение двигателя, зависит от схемы и режима не учтенной части сети. Учет этого обстоятельства осуществляется введением множителя, учитывающего отличие заданного напряжения $U_{\text{норм}}$ от номинального и текущего значения напряжения от расчетного напряжения в некотором режиме.

Выражения для активной и реактивной мощности двигателя

$$P_{\text{Д}} = S_{\text{ном}} \left(\frac{U_{\text{Д норм}}}{U_{\text{Д ном}}} \frac{U}{U_{ИР}} \right)^2 \frac{r_* s}{\left(\omega_* x_K s\right)^2 + r_*^2}, \qquad (2.94)$$

$$Q_{\text{Д}} = P_{\text{Д}} \frac{x_K s}{r_*} \omega_* + S_{\text{ном}} \frac{\omega_*}{x_{\mu *}} \left(\frac{U_{\text{Д норм}}}{U_{\text{Д ном}}} \frac{U}{U_{ИР}} \right)^{K_\mu - 2}. \qquad (2.95)$$

где $U_{ИР}$ – напряжение исходного режима.

Механический момент сопротивления на валу двигателя задается как функция частоты вращения ротора ω_R в следующем виде

$$M_{\text{МЕХ}} = M_{\text{норм}} \left[M_{\text{ст}*} + \left(1 - M_{\text{ст}*}\right) \left(\frac{\omega_R}{\omega_{R\ \text{норм}}} \right)^2 \right]. \qquad (2.96)$$

где $M_{\text{норм}} = \frac{P_{\text{д норм}}}{\omega} = \frac{S_{\text{д ном}} K_{\text{заг}} \cos\varphi_{\text{ном}}}{\omega}$,

$M_{\text{ст}*}$ – статический момент сопротивления на валу двигателя (момент при $\omega_R = 0$),

$\omega_{R\ \text{норм}}$ – частота вращения ротора в предшествующем установившемся режиме.

Частота вращения ω_R и $\omega_{R\ \text{норм}}$ могут быть выражены через скольжения $\omega_R = (1 - S_R)\omega_{\text{ном}}$ и $\omega_{R\ \text{норм}} = (1 - S_{R\ \text{норм}})\omega_{\text{ном}}$.

Тогда

$$\frac{\omega_R}{\omega_{R\ \text{норм}}} = \frac{1 - S_R}{1 - S_{R\ \text{норм}}}.$$

Может также учитываться момент трения покоя – момент трогания, удовлетворяющий следующим условиям

$$M_{\text{тр}} \neq 0 \ \text{ при } \ \omega = 0,$$
$$M_{\text{тр}} = 0 \ \text{ при } \ \omega \neq 0.$$

Пояснение к (2.96) приведено на рис. 2.23. Значение $M_{\text{ст*}}$ задается в зависимости от вида приводимого механизма. Например, для насосов рекомендуется $M_{\text{ст*}} \approx 0.5$, для механизмов вентиляторного типа $M_{\text{ст*}} \approx 0.1$, для поршневых компрессоров $M_{\text{ст*}} \approx 1$.

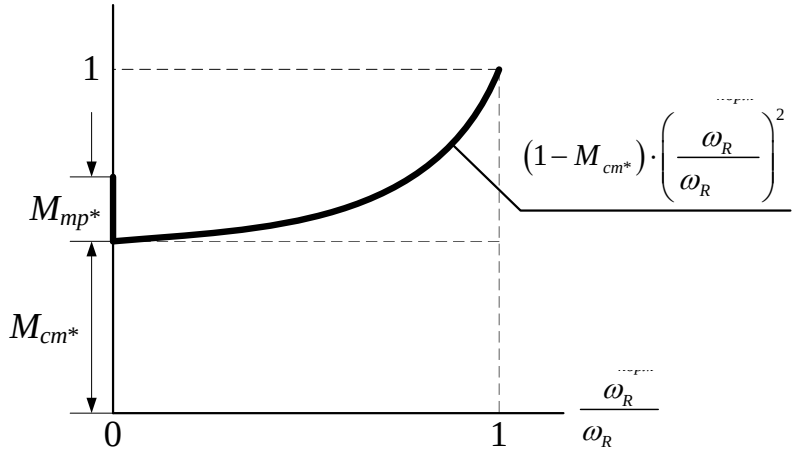


Рис.2.23. Зависимость механического момента сопротивления на валу двигателя от частоты вращения ротора

2.4. Особенности модели синхронного двигателя

Конструкция синхронного двигателя принципиально не отличается от конструкции синхронного генератора. В современных программных комплексах основой математической модели синхронного двигателя является модель синхронного генератора (п. 2.1).

Необходимые для моделирования синхронного двигателя данные: сопротивления, постоянные времени, момент инерции, активная мощность вводятся в генераторные таблицы. В качестве логического признака, позволяющего программе отличить двигатель от генератора, активная мощность синхронного двигателя вводится со знаком «–».

Режимной особенностью синхронного двигателя по сравнению с синхронным генератором является необходимость моделирования режима пуска, в течение которого скольжение двигателя изменяется от 0 до 100%. В то время как для синхронных генераторов в реальных переходных режимах скольжение не превышает нескольких процентов.

В настоящее время типовым способом пуска синхронного двигателя является прямой асинхронный пуск, при котором двигатель без возбуждения подключается к сети и разгоняется до скорости близкой к синхронной. После этого обмотка возбуждения подключается к источнику постоянного тока, и двигатель втягивается в синхронизм. Во время пуска обмотка возбуждения может быть замкнута накоротко или на гасительное сопротивление.

В связи с указанными особенностями СД в программе «Мустанг» предусмотрена асинхронная характеристика СД, представляющая собой зависимость асинхронного момента от скольжений. Корректировка параметров в процессе расчета демпферных контуров производится таким образом, чтобы асинхронный момент соответствовал асинхронной характеристике.

Информация об асинхронных характеристиках СД имеется в справочных данных [4].

Одним из ценных свойств СД является то, что он может работать как с отстающим, так и с опережающим током. В режиме недовозбуждения СД потребляет реактивную мощность, а в режиме перевозбуждения выдает реактивную мощность в сеть. При вводе данных необходимо согласовать установившийся режим с данными по режиму СД. Если СД выдает реактивную мощность, то в установившемся режиме $Q_{ном}$ двигателя задается отрицательной, если потребляет – положительной.

3. Примеры моделирования действий релейной защиты и автоматики

3.1.Моделирование трехфазного короткого замыкания

Пусть необходимо рассчитать ток трехфазного устойчивого КЗ на шинах ГРУ (рис. П.1). В программе **«Мустанг»** трехфазное КЗ моделируется включением шунта в определенном узле, отключение КЗ – отключением шунта.

Пусть металлическое трехфазное КЗ произошло на шинах ГРУ в секции 1 (рис. П.2, узел 12) в момент времени t = 0,1 с.

Для ввода данной информации необходимо выполнить следующие действия.

● **Главное меню →Дин-данные → Автоматика.**

● После нажатия клавиши **Insert** на экране появляется панель диалога с названием **Факторы/Действия**. Активизируйте закладку **Факторы**, затем в верхнем окне выберите фактор **Время**. В таблице появится строка **Время.** В столбец N введите номер автоматики – 1, в столбец **Уставка/Парам 1** введите момент времени, когда происходит КЗ – 0.1с (табл.3.1).

Таблица 3.1

Mustang - [Автоматика]

Файлы УР Дин.-данные Дин.-результаты Утяжеление Прочие функции Установки Окна ?

Стандартные | АЛАР | Программируемые

	Пояснение	N	Логика		Фактор	Ni	Nj	Nп	Уставка	T1	Кв	Zk1	Zk2
				T2	Действие	Ni	Nj	Nп	Парам1	Парам2	Парам3		
		1			Время				0.100				
					Шунт	25				0.001			
				10.000	Шунт	25				-0.001			

● Далее необходимо указать действия автоматики. Нажимается клавиша **Insert**, снова появляется окно **Факторы**. Активизируйте закладку **Действия** и выберите действие **Шунт**. В столбце **Ni** указывается номер узла, где подключается шунт (12 узел). В столбце **T1/Парам 2** указывается сопротивление шунта (Ом). В случае металлического КЗ можно принять какое-либо малое значение, например, $\mathbf{X_ш}$ = 0.001 Ом.

● В окне **Действия** снова выберите действие **Шунт**. В таблице появится третья строка. В столбце **T2** указать время, когда отключится КЗ. Если в автоматике не моделируется действие релейной защиты, то можно указать любой достаточно большой промежуток времени, в течение которого гарантированно наступит установившийся режим, например 10 с. В столбце **Ni** укажите номер узла в котором отключится шунт (12 узел), в столбце **T1/Парам 2** – указать принятое выше сопротивление шунта со знаком «–».

● После ввода всех необходимых факторов и действий производится запись автоматики на диск. **Главное меню → Файлы → Сохранить автоматику → имя файла**.

3.2. Моделирование трехфазного короткого замыкания на выводах генератора, работающего в режиме холостого хода

Для моделирования режима холостого хода генератор необходимо отключить от схемы. Например, выведем генератор *G*3 (рис. П.1) в режим холостого хода и смоделируем трехфазное КЗ на его выводах в момент времени t = 0,2 с.

Для этого необходимо выполнить следующие директивы:

● в таблице **Ветви** произведите логическое отключение ветви 3 – 15 нажатием клавиш **Ctrl D** (строка окрашивается в серый цвет),

● в таблице **Узлы** присвойте генераторному узлу 3 код балансирующего узла 1100,

● в таблице **Узлы** задайте активную и реактивную мощности третьего генератора равными нулю **Pг = 0, Qг = 0**,

● в таблице **Узлы** задайте для третьего генератора небольшую нагрузку **Pн0 = 0.1** МВт, учитывающую потери в генераторе в режиме холостого хода,

● в таблице **Регулятор возбуждения (РВ)** для *G*3 снимите ограничение по току возбуждения, то есть задайте **Eq– = 0**. В таблице **Регулятор скорости турбины (РС)** снимите ограничение по нижнему пределу регулирования мощности турбины, то есть задайте **Ptmin = 0.**

Дальнейшие действия аналогичны действиям при моделировании трехфазного КЗ (п. 3.1). Автоматика, моделирующая трехфазное КЗ на выводах *G*3 в момент времени t = 0,2 с представлена в таблице 3.2.

Таблица 3.2

Пояснение	N	Логика		Фактор	Ni	Nj	Nn	Уставка	T1	Kв	Zk1	Zk2
			T2	Действие	Ni	Nj	Nn	Парам1	Парам2	Парам3		
	1			Время				0.200				
				Шунт	3				0.001			
			10.000	Шунт	3				-0.001			

3.3. Моделирование процессов выбега и самозапуска асинхронных двигателей

3.3.1.Общие сведения о повреждениях в системе собственных нужд электростанций

В процессе эксплуатации возможны кратковременное понижение и даже полное исчезновение напряжения на шинах с.н., что не должно приводить к расстройству технологического процесса электростанции. Для этого необходимо, чтобы электродвигатели ответственных рабочих машин, затормозившиеся при нарушении нормального питания, вновь развернулись до нормальной частоты вращения, то есть, чтобы состоялся самозапуск электродвигателей с.н.

Промежуток времени с момента отключения до полного останова двигателя называется **временем выбега** двигателя. Промежуток времени с момента включения двигателя до момента, когда его скольжение станет равным номинальному, называется **временем пуска**.

На примере одного энергоблока (рис. 3.1) рассмотрим основные причины, вызывающие кратковременное нарушение нормального электроснабжения системы с.н., возможную длительность этих перерывов и процессы последующего самозапуска двигателей [5].

1. Трехфазное КЗ на выводах одного из двигателей (рис.3.1, точка К1). Напряжение на шинах падает практически до нуля. Работает РЗ – токовая отсечка и отключает *Q*1. Время перерыва питания $t_{\text{ПП}}$ складывается из времени действия защиты $t_{\text{РЗ}}$ и времени отключения выключателя $t_{\text{ОВ}}$

$$t_{\text{ПП}} = t_{\text{РЗ}} + t_{\text{ОВ}} = 0{,}1 + 0{,}12 = 0{,}22 \text{ с.}$$

Успешный самозапуск позволяет удержать энергоблок под нагрузкой.

2. Короткое замыкание в цепи рабочего питания, например, КЗ в рабочем ТСН (точка К2). РЗ отключает выключатели *Q*2, *Q*3 и *Q*9. Устройство АВР со временем действия $t_{\text{АВР}}$ переводит питание с.н. на резервный трансформатор – включаются выключатели *Q*4, *Q*5, *Q*6. Время перерыва питания при работе основных (дифференциальной или газовой) защит составит

$$t_{\text{ПП}} = t_{\text{РЗ}} + t_{\text{ОВ}} + t_{\text{АВР}} = 0{,}1 + 0{,}12 + (0{,}4 - 0{,}6) = 0{,}62 - 0{,}82 \text{ с.}$$

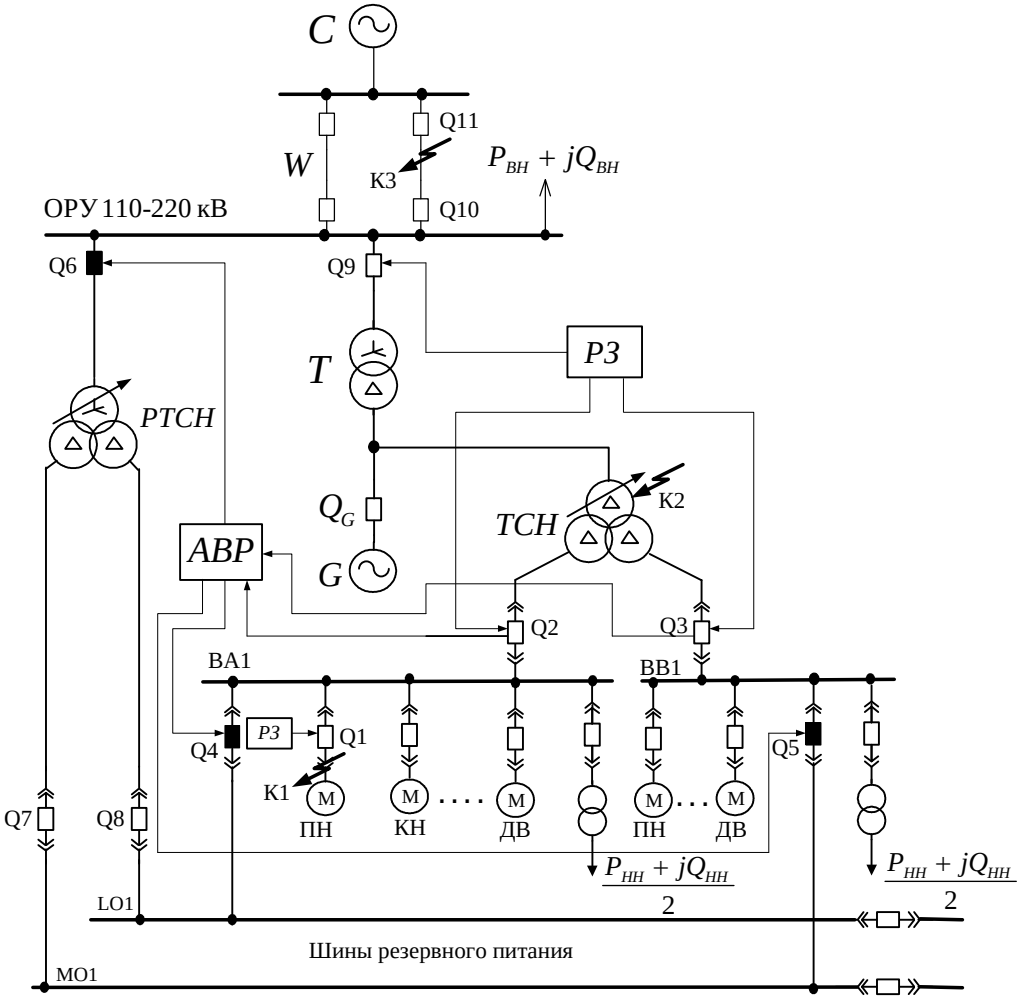


Рис. 3.1. Схема питания секций 6,3 кВ с.н. энергоблока
ТСН – трансформатор собственных нужд,
РТСН – резервный трансформатор собственных нужд

При отказе основной защиты и действия резервной защиты (МТЗ) время перерыва питания соответственно возрастает

$$t_{\text{ПП}} = t_{\text{РЗрез}} + t_{\text{ОВ}} + t_{\text{АВР}} = (1-1,5) + 0,12 + (0,4-0,6) = 1,52-2,22 \text{ с.}$$

Энергоблок должен быть аварийно остановлен. Для безопасного останова необходимо обеспечить самозапуск двигателей дымососов, циркуляционных и конденсатных насосов.

3. Короткое замыкание во внешней цепи (точка К3). На шинах с.н. ВА1, ВВ1 имеет место глубокая посадка напряжения (ниже $0,7U_{\text{ном}}$). После отключения выключателей $Q10$, $Q11$ напряжение восстанавливается. Успешный самозапуск электродвигателей сохраняет энергоблок под нагрузкой. Время нарушения нормального питания с.н. определяет-

ся временем отключения КЗ, которое в случае действия основной защиты не превосходит 0,1–0,3 с, а при ее отказе и действии резервной защиты – 1 с.

4. Отказы в технологической части, не требующие продолжительных восстановительных работ. Работают технологические защиты. При закрытии стопорных клапанов турбины формируются импульсы на отключение выключателей *Q*2, *Q*3, *Q*9. Работает устройство АВР. Перерыв питания с.н. составит

$$t_{\text{ПП}} = t_{\text{ОВ}} + t_{\text{АВР}} = 0{,}12 + (0{,}4 - 0{,}6) = 0{,}52 - 0{,}72 \text{ с.}$$

Успешный самозапуск электродвигателей с.н. позволяет перевести котел в растопочный режим, что убыстряет восстановление нормальной работы блока после устранения повреждения.

5. Ошибочное или самопроизольное отключение рабочего питания с.н. При ошибочном или самопроизвольном отключении выключателей *Q*2 или *Q*3 работает устройство АВР и переводит питание с.н. на резервный трансформатор. Перерыв питания будет равен времени действия АВР

$$t_{\text{ПП}} = t_{\text{АВР}} = 0{,}4 - 0{,}6 \text{ с.}$$

Самозапуск двигателей секции с.н. происходит при пониженном напряжении и может быть успешным и неуспешным. Успешным является лишь такой самозапуск, при котором ответственные электродвигатели достигают нормальной частоты вращения за время, допустимое по условиям сохранения устойчивости технологического режима электростанции и нагрева двигателей.

Допустимое время самозапуска двигателей с.н. составляет:

- для ТЭС среднего давления – 35 с (определяется нагревом электродвигателей),
- для ТЭС высокого давления с поперечными связями по пару – 25 с (определяется устойчивостью режима котлов высокого давления, обладающих малой аккумулирующей способностью),
- для блочных ТЭС с агрегатами мощностью более 150 МВт – 20 с (определяется условием сохранения технологического режима блока).

Длительность процесса самозапуска определяется тремя основными факторами:

- временем перерыва нормального электроснабжения,
- параметрами элементов цепи питания,
- составом и характеристиками группы самозапускающихся двигателей.

Время перерыва электроснабжения с.н. не должно превышать:

- 0,7 с – при отключении цепи рабочего питания действием основной защиты,
- 1,5 с – при отключении цепи рабочего питания действием резервной защиты,
- 2 с – при отключении рабочего ТСН (с расщепленными обмотками) действием резервной защиты на стороне ВН.

Электромеханический переходный процесс, вызванный кратковременным снижением или исчезновением напряжения на шинах питания электродвигателей, имеет две характерные стадии: группового выбега и группового разворота (самозапуска) электродвигателей. Расчет этого переходного процесса в программе **«Мустанг»** ведется путем совместного решения дифференциальных уравнений электромеханических и электромагнитных переходных процессов во всех элементах схемы

Для облегчения самозапуска ответственных электродвигателей при глубоких продолжительных снижениях напряжения в сети с.н. неответственные электродвигатели (например, на ТЭС двигатели шаровых мельниц, перекачивающих насосов, багерных насосов гидрозолоудаления, топливоподачи и т.д.) автоматически отключаются.

Для этой цели предусматривается защита минимального напряжения с напряжением срабатывания первой ступени 0,65–0,7 $U_{ном}$ и выдержкой времени 0,5–1 с. Если спустя 9 секунд с момента нарушения режима нормального питания с.н. напряжение остается ниже $0{,}5U_{ном}$, то действует вторая ступень защиты и осуществляет аварийный останов блока.

Схеме питания собственных нужд энергоблока рис. 3.1 соответствует схема замещения, представленная на рис. 3.2. Правила составления схемы замещения и расчета ее параметров изложены в пунктах 1.2, 2.1.1, 2.1.2.

3.3.2. Моделирование действий релейной защиты и автоматики при повреждениях в системе собственных нужд электростанций

Трехфазное КЗ в асинхронном двигателе

Рассмотрим моделирование действий релейной защиты при трехфазном КЗ в асинхронном двигателе, используемом для привода питательного насоса ПН (рис. 3.2, узел 10).

Пусть КЗ в двигателе произошло в момент t = 0,5 с. Будем считать, что КЗ неметаллическое и сопротивление в месте КЗ равно 0,02 Ом.

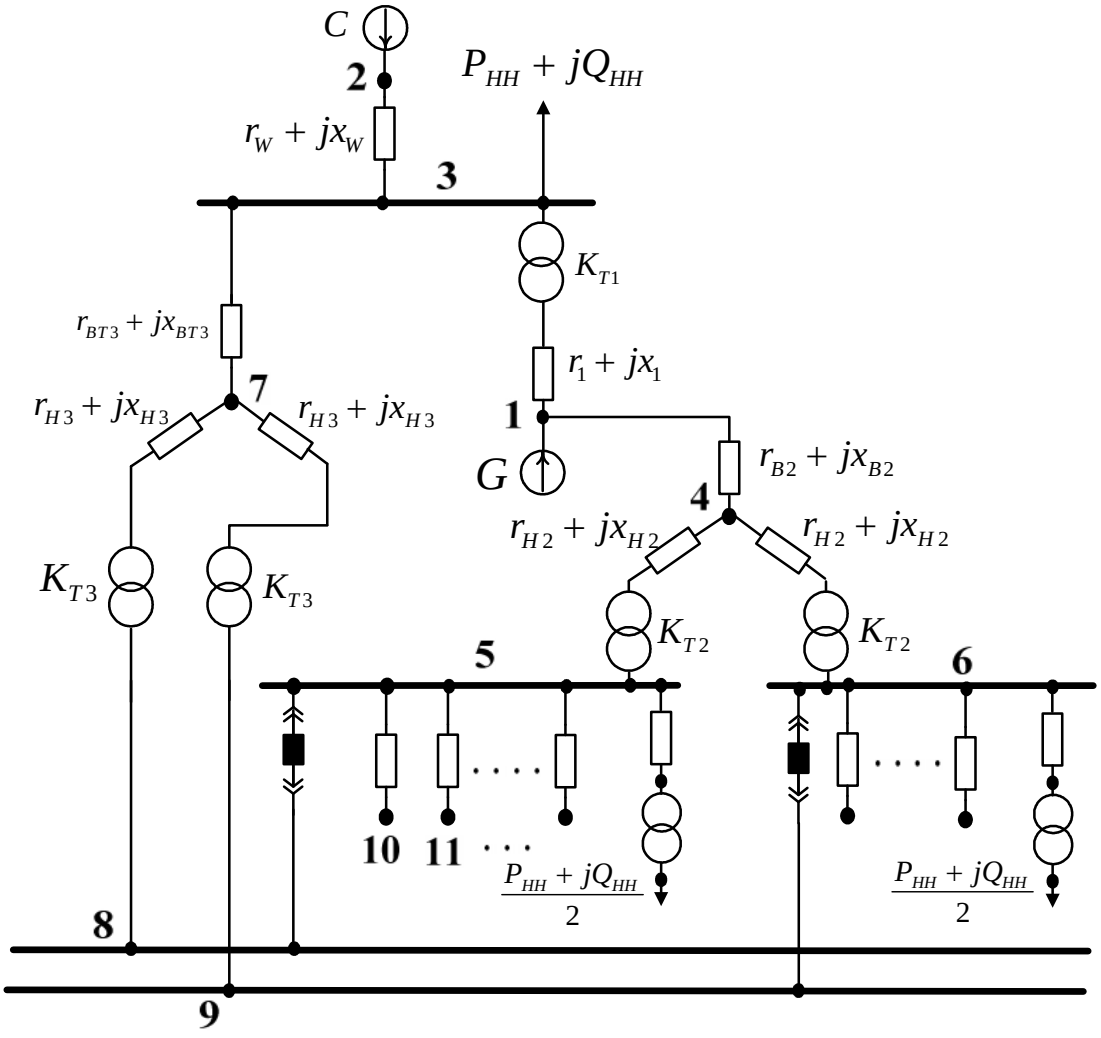


Рис. 3.2. Схема замещения электрической схемы
питания секции 6,3 кВ собственных нужд энергоблока

Пусть релейная защита (токовая отсечка) отключает поврежденный двигатель через 0,1 с (связь 10–5), время отключения выключателя 0,12 с. Таким образом, суммарное время отключения двигателя равно 0,22 с.

Такой последовательности событий соответствует автоматика, представленная в таблице 3.3. Порядок ввода данной информации изложен в примере 3.1.

Таблица 3.3

Mustang - [Автоматика]

Файлы УР Дин.-данные Дин.-результаты Утяжеление Прочие функции Установки Окна ?

Стандартные | АДАР | Программируемые

Пояснение	N	Логика		Фактор	Ni	Nj	Nп	Уставка	T1	Кв	Zk1	Zk2
			T2	Действие	Ni	Nj	Nп	Парам1	Парам2	Парам3		
	1			Время				0.500				
				Шунт	10				0.020			
			0.220	Шунт	10				-0.020			
			0.220	Отключить связь	10	5						

Трехфазное КЗ в рабочем трансформаторе собственных нужд

Пусть КЗ в рабочем трансформаторе с.н. произошло в момент t = 0,2 с. Включаем шунт в узел 4 (рис. 3.2) с сопротивлением 0,01 Ом.

Основная защита отключает выключатели $Q2$, $Q3$ и $Q9$ через 0,22 с (в программе отключаются ветви 3–1, 4–5, 4–6).

Устройство АВР через $t_{\text{АВР}} = 0,5$ с переводит питание с.н. на резервный трансформатор – включаются выключатели $Q4$, $Q5$, $Q6$ (включаются ветви 3–7, 5–8, 6–9).

Такой последовательности событий соответствует автоматика, представленная в таблице 3.4. Порядок ввода данной информации описывается в пункте 2.3.

Таблица 3.4

Mustang - [Автоматика]

Файлы УР Дин.-данные Дин.-результаты Утяжеление Прочие функции Установки Окна ?

Стандартные | АЛАР | Программируемые

Пояснение	N	Логика		Фактор	Ni	Nj	Nn	Уставка	T1	Кв	Zk1	Zk2
			T2	Действие	Ni	Nj	Nn	Парам1	Парам2	Парам3		
	1			Время				0.200				
	1			Шунт	4				0.010			
	1		0.220	Шунт	4				-0.010			
	1		0.220	Отключить связь	3	1						
			0.220	Отключить связь	4	5						
			0.220	Отключить связь	4	6						
			0.500	Включить связь	3	7						
			0.500	Включить связь	5	8						
			0.500	Включить связь	6	9						

3.4. Моделирование действия максимальной токовой защиты с блокировкой минимального напряжения

Смоделируем действия максимальной токовой защиты с блокировкой минимального напряжения, установленной на трансформаторе T (рис. 3.3).

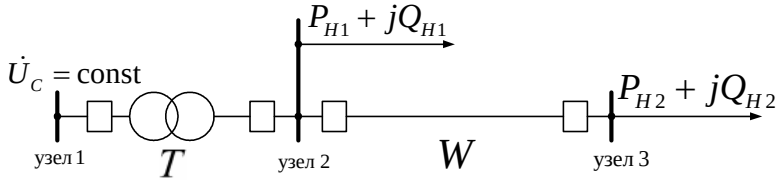


Рис. 3.3. Схема участка сети

Напряжение системы 110 кВ. Трансформатор ТМН 10000/110/10. Примем ток срабатывания защиты 85 А, напряжение срабатывания 77 кВ, выдержка времени защиты 1 с, время срабатывания выключателя 0,1 с.

Пусть в момент t = 0,5 с произошло трехфазное КЗ в узле 3. Если ток в трансформаторе превысит заданную уставку и напряжение будет меньше уставки реле минимального напряжения, то, спустя заданную выдержку времени, отключить линию *W* со стороны питания (время отключения выключателя учитывать).

Данным действиям соответствует автоматика, представленная в таблице 3.5.

Таблица 3.5

Mustang - [Автоматика]

Файлы УР Дин.-данные Дин.-результаты Утяжеление Прочие функции Установки Окна ?

Стандартные | АЛАР | Программируемые

Пояснение	N	Логика		Фактор	Ni	Nj	Nп	Уставка	T1	Кв	Zk1	Zk2
			T2	Действие	Ni	Nj	Nп	Парам1	Парам2	Парам3		
	1			Время				0.500				
	1			Шунт	3				0.001			
	2			Imax	2	3		0.085	1.000			
	2	И		Umin	2			77.000				
	2		0.100	Отключить конец связи	2	3						

4. Лабораторные работы

4.1 Подготовка базы данных и отладка расчета установившегося режима

Подготовка к работе

Изучив теоретический материал, ответить на вопросы.
1. Какой режим называют установившимся?
2. Назовите возможные варианты задания режимных параметров узлов для расчета установившегося режима.
3. Какие величины определяют в результате расчета УР.
4. Какими причинами обусловлены ограничения по реактивной мощности генераторов.
5. Расчет параметров схемы замещения двухобмоточного трансформатора.
6. Расчет параметров схемы замещения трехобмоточного трансформатора.
7. Расчет параметров схемы замещения одинарного и сдвоенного реакторов при одинаковой нагрузке ветвей.
8. Расчет параметров схемы замещения ЛЭП. Какие существуют способы, чтобы учесть распределенность параметров протяженной ЛЭП.
9. Что представляет собой РПН, его назначение.
10. Почему передача реактивной мощности на большие расстояния нецелесообразна?
11. К каким последствиям приводит дефицит реактивной мощности на станции?

Программа работы

1. Для разработанной принципиальной схемы станции, принятой к расчету в курсовом проекте по дисциплине «Электрическая часть станций» составьте схему замещения, руководствуясь указаниями пункта П.1.1.

Рассчитайте активные и реактивные сопротивления всех элементов схемы замещения станции (п. 1.2.1, 1.2.2, 1.2.3). Результаты расчетов внесите в таблицу, аналогичную по структуре таблице П.1.

2. По согласованию с преподавателем выберите линию связи с системой [2, стр.20, 432]. Введите ее в схему замещения.
3. Внесите данные о параметрах схемы замещения в базу данных программы **«Мустанг»**, используя указания, изложенные в пункте П.1.1. Рассчитайте установившийся режим.

После получения сообщения **РАСЧЕТ ЗАВЕРШЕН** по таблице **УР → Исходные данные → Результаты** определите следующие параметры:

- расчетные напряжения на шинах РУ,

- перетоки активной и реактивной мощности в линии связи с системой и в ветвях схемы замещения трансформаторов связи (с учетом знака). Если контролируемый переток мощности $\mathbf{Q_{i-j}}$ в ветви **i-j** положителен, то мощность направлена от узла **i** к узлу **j**.

- загрузку генераторов по реактивной мощности. Если расчетная **Qг** положительна, это значит, что генератор выдает реактивную мощность, если отрицательная, то потребляет.

Результаты внесите в таблицу. Возможная структура таблицы, соответствующая схеме замещения станции (рис. П.2) приведена ниже (таблица 4.1).

Таблица 4.1

Напряжение на РУ, кВ		**Перетоки активной и реактивной мощности**			**Коэффициенты трансформации**		**Загрузка генераторов по активной и реактивной мощности**		
узел	U_i	ветви	P_{i-j} МВт	Q_{i-j} МВар	ветви	Кт	Генератор (номер узла)	Рк МВт	$Q_К$ МВар
6		5–7			10–6		G1 (1)		
7		10–6			11–6		G2 (2)		
8		10–7			10–8		G3 (3)		
9		10–8			11–9		G4 (4)		
					7–15				
					7–16				

4. Далее необходимо провести отладку режима, то есть добиться, чтобы напряжения в узлах и перетоки мощности по ветвям схемы удовлетворяли некоторым условиям.

Условие 1. Реактивная мощность генераторов не должна выходить за установленные ограничения **Qrmin** и **Qrmax**.

Условие 2. Перетоки реактивной мощности по ветвям трансформаторов связи должны быть минимальными, согласно возможностям имеющихся средств регулирования.

Условие 3. Напряжение на РУ не должно превышать длительно допустимое напряжение [6, стр. 8].

Условие 4. Переток реактивной мощности по линии связи с системой должен быть по возможности минимальным.

На станции существуют следующие средства регулирования параметров режима:

- устройство РПН, установленное на трансформаторах связи, позволяющее регулировать коэффициент трансформации $K_т$,

- устройства АРВ, позволяющие изменять напряжение на выводах генератора (в генераторных узлах).

Если реактивная мощность передается из системы, и не все генераторы загружены по реактивной мощности (то есть **Qг < Рг ном·tgφ$_г$)**, то необходимо нагрузить генераторы за счет регулирования коэффициента трансформации $K_т$ у трансформаторов связи, чтобы загрузка генераторов по реактивной мощности увеличилась. При этом необходимо следить за тем, чтобы суммарная реактивная мощность распределялась между генераторами примерно пропорционально их номинальной мощности.

Коэффициент трансформации $K_т$ нужно изменять в соответствии с фактическими диапазонами и ступенями, указанными в паспортных данных трансформаторов [2, стр.116]. При этом необходимо следить за тем, чтобы напряжения на РУ (на рис.П.2 узлы 6, 7) удовлетворяли условию 3.

Если реактивная мощность передается от станции в систему, то это означает, что в приемной части имеется дефицит реактивной мощности и решение вопроса о снижении выработки реактивной мощности на станции может быть принято при условии, что при этом у потребителей по другую сторону электропередачи напряжение не снизится ниже допустимого.

Для регулирования перетоков реактивной мощности после исчерпания возможностей регулирования за счет коэффициента трансформации можно использовать изменение напряжения в генераторных узлах в пределах не более ±5% от номинального.

Полученные результаты внесите в таблицу 4.2.

Таблица 4.2

Напряжение на РУ, кВ		**Перетоки активной и реактивной мощности**			**Коэффициенты трансформации**		**Загрузка генераторов по активной и реактивной мощности**		
узел	U_i	ветви	$P_{i–j}$ МВт	$Q_{i–j}$ МВар	ветви	*К*т	Генератор (номер узла)	*Р*к МВт	$Q_К$ МВар
6		5–7			10–6		G1 (1)		
7		10–6			11–6		G2 (2)		
8		10–7			10–8		G3 (3)		
9		10–8			11–9		G4 (4)		
					7–15				
					7–16				

Сравните полученные данные в таблицах 4.1 и 4.2. Сделайте выводы по работе.

4.2. Влияние статических характеристик нагрузок (СХН) на параметры установившегося режима

Подготовка к работе

Изучив теоретический материал, ответить на вопросы.

1. Какие зависимости называются статическими характеристиками нагрузки?
2. Какое математическое выражение может использоваться для аналитического представления СХН?
3. Какому условию должны удовлетворять значения коэффициентов $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2$ для любой СХН?
4. Какие характеристики называются типовыми (обобщенными) СХН? Перечислите примерный состав нагрузки, соответствующий типовым (обобщенным) СХН. Какая нагрузка составляет основную долю обобщенной нагрузки (около 50%)?

Программа работы

В качестве объекта исследования принимается станция, для которой был рассчитан и отлажен установившийся режим в лабораторной работе №4.1.

1. Для определения механизма влияния характеристик нагрузки на уровни напряжений предварительно проделайте следующий опыт.

● Составьте схему замещения простейшей схемы электропередачи (рис. 2.1) и внесите ее параметры в базу данных программы **«Мустанг»**.

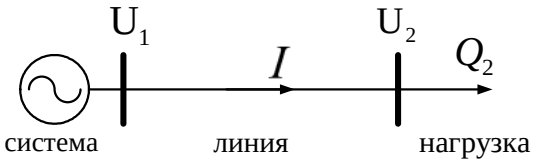


Рис. 2.1.

Для всех вариантов примите следующие данные:

- напряжение на передающем конце $U_1 = 120$ кВ,
- нормальное заданное напряжение на принимающем конце линии $U_{2норм} = 110$ кВ,
- длина линии – 100 км,
- удельное сопротивление линии x_0 = 0,4 Ом/км (активными потерями в линии пренебрегаем),

- $Q_{2норм} = 27{,}5$ МВар (активную составляющую мощности нагрузки считаем равной нулю).

● Используя программу **Mathcad**, постройте зависимости мощности источника от напряжения $Q_1(U_2)$ по формуле

$$Q_1(U_2) = IU_2 = \frac{U_1 - U_2}{x}U_2 . \qquad (4.1)$$

Постройте идеализированные графики нагрузки, мощность которой не зависит от напряжения

$$Q_{2min} = 0{,}5Q_{2норм}, \quad Q_{2норм}, \quad Q_{2max} = 1{,}3Q_{2норм} . \qquad (4.2)$$

Очевидно, что напряжение U_2, соответствующее различным мощностям нагрузки, определится по точкам пересечения прямых (4.2) с графиком, построенным по (4.1) (можно использовать команду «Трассировка»).

При тех же значениях нагрузки (4.2) по (1.29) постройте зависимости мощности нагрузки от напряжения $Q_2(U_2)$ и также определите напряжение U_2, соответствующее различным мощностям нагрузки, с учетом СХН.

Значения напряжений при изменении мощности нагрузки без учета СХН и с учетом СХН занесите в таблицу 4.3.

● Рассчитайте УР, определите расчетное напряжение на нагрузке. Уменьшите в два раза нагрузку, а потом увеличьте на 30%. Зафиксируйте изменение напряжения на нагрузке и занесите эти данные в таблицу 4.3. Восстановите исходную нагрузку.

● Руководствуясь указаниями п. П.1.3 введите в программу данные статических характеристик нагрузки (СХН). При этом в (1.30) задайте следующие значения коэффициентов: $b_0 = 2{,}7, \quad b_1 = -6, \quad b_2 = 4{,}3$.

● Повторите опыты с изменением нагрузки с учетом СХН. Зафиксируйте изменение напряжения на нагрузке, занесите эти данные в таблицу 4.3.

2. Внесите в таблицу 4.4 в графу «Исходные данные» значения напряжений на шинах РУ станции, принятой к расчету в лабораторной работе 4.1 при исходной нагрузке.

Уменьшите в два раза нагрузку, подключенную к шинам СН и НН, а потом увеличьте нагрузку на 30%. Данные о напряжениях на шинах РУ внесите в таблицу 4.4 в графу «Без учета СХН».

Таблица 4.3

Математическая модель			Q_{2min}	$Q_{2норм}$	Q_{2max}
		МВар	13,75	27,5	35,75
Mathcad	Напряжение, кВ	Без учета СХН			
		С учетом СХН			
Мустанг	Напряжение, кВ	Без учета СХН			
		С учетом СХН			

Таблица 4.4

СХН	Нагрузка	$U_{НН}$ кВ (узел)	$P_{НН}+jQ_{НН}$ МВА (узел)	$U_{СН}$ кВ (узел)	$P_{СН}+jQ_{СН}$ МВА (узел)	$U_{ВН}$ кВ (узел)	$P_{ВН}+jQ_{ВН}$ МВА (узел)
Исходные данные	НН –100%						
	СН –100%						
	ВН– 100%						
Без учета СХН	НН –50%						
	СН –50%						
	ВН– 50%						
	НН –130%						
	СН –130%						
	ВН– 130%						
С учетом СХН	НН –50%						
	СН –50%						
	ВН– 50%						
	НН –130%						
	СН –130%						
	ВН– 130%						

3. Руководствуясь указаниями п. П.1.3 задайте статические характеристики нагрузки (СХН) станции. Повторите опыты п. 2 с учетом СХН. Полученные данные занесите также занесите в таблицу 4.4 в графу «С учетом СХН».

4. Сделайте выводы о влиянии СХН на уровни напряжений.

В дальнейших лабораторных работах к расчету принимаются нагрузки с учетом СХН.

4.3. Определение предела передаваемой мощности линии электропередачи по статической апериодической устойчивости

Подготовка к работе

Изучив теоретический материал, ответьте на вопросы.
1. Что такое предел статической апериодической устойчивости?
2. Запишите выражение для предела мощности по статической апериодической устойчивости при передаче мощности от генератора с постоянной ЭДС в систему бесконечной мощности через линию, в схеме замещения которой учитывается только реактивное сопротивление.

Программа работы

Объект исследования – простейшая схема электропередачи (рис. 2.2).

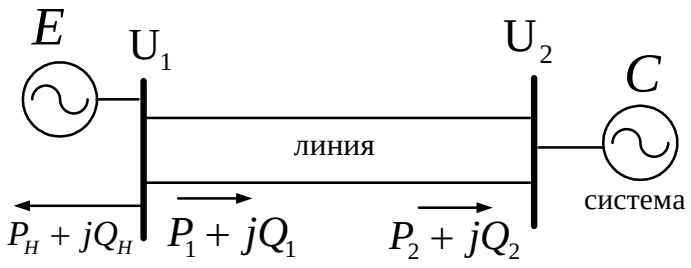


Рис. 2.2

Станция (*E*) установленной мощности $P_{уст}$ = 450 МВт, cos φ = 0,85 передает избыточную мощность в систему (*C*) по двухцепной линии связи.

Для всех вариантов примите следующие данные:
- напряжение на передающем конце $U_1 = 230$ кВ,
- напряжение на принимающем конце линии $U_2 = 220$ кВ,
- удельное реактивное сопротивление линии x_0 = 0,4 Ом/км,
- удельное активное сопротивление линии r_0 = 0,075 Ом/км,
- удельное реактивная проводимость линии $b_0 = 2{,}67 \cdot 10^{-6}$ См/км,
- длина линии 250 км,
- местная нагрузка на станции $P_H = 200$ МВт, cos φ = 0,85.

1. Составьте схему замещения схемы электропередачи (рис. 2.2) и внесите ее параметры в базу данных программы **«Мустанг»**. В данной ра-

боте рекомендуется принять следующие ограничения по реактивной мощности **Qrmin** = –1000 Мвар, **Qrmax** = $P_{\text{уст}}\text{tg}\varphi$ = 620 Мвар.

Рассчитайте исходный установившийся режим. По таблице **УР → Исходные данные → результаты** определите генерируемую реактивную мощность $Q_Г$, активную и реактивную мощности в начале ($P_1 + jQ_1$) и в конце ($P_2 + jQ_2$) линии, потери активной (dP) и реактивной (dQ) мощностей в линии.

Внесите полученные данные в таблицу 4.5

Таблица 4.5

	$P_Г + jQ_Г$	$P_1 + jQ_1$	$P_2 + jQ_2$	dP	dQ	$P_Н + jQ_Н$
Норм. Режим						
После-варийный режим						
После-варийный режим при $K_3 = 0,08$						

2. Отключите одну из параллельных линий (клавишами Ctrl D). Рассчитайте послеаварийный режим. Полученные данные также внесите в таблицу 4.5.

3. Для определения предела передаваемой мощности по статической апериодической устойчивости воспользуйтесь директивой **Утяжеление → Исходные данные.**

Руководствуясь указаниями пункта П.1.4, внесите в базу данных программы данные об утяжелении.

За узел воздействия примите генераторный узел. Изменяемым параметром будет активная мощность генератора $P_Г$. Примите шаг изменения активной мощности 10 МВт (**Ршаг** = 10), предельную мощность примите равной 1000 МВт (**Рпред** = 1000).

Ветвь, в которой будет контролироваться переток мощности – оставшаяся в работе линия электропередачи.

В окне **«Константы»** задайте следующие параметры:

Uкр = 0.7, **Точ** = 5, **KQг** = 1, **TgH** = 0.

4. Рассчитайте утяжеленный режим, используя директивы **Утяжеление → Расчет.** Запишите полученную мощность сечения в предельном

режиме $P_{\text{пр}}$, $Q_{\text{пр}}$. По таблице **УР-данные** → **Узлы-Ветви** определите предельную мощность генератора $P_{\text{Гпр}} + jQ_{\text{Гпр}}$.

5. Коэффициент запаса статической устойчивости линии электропередач определяется следующим образом

$$K_{\text{З}} = \frac{P_{\text{пр}} - P_{\text{факт}} - \Delta P_{\text{нк}}}{P_{\text{пр}}}, \qquad (4.3)$$

где $P_{\text{пр}}$ – предельная мощность, при которой происходит нарушение устойчивости,

$P_{\text{факт}}$ – фактически передаваемая по линии мощность,

$\Delta P_{\text{нк}}$ – нерегулируемые колебания мощности.

В лабораторной работе можно принять $\Delta P_{\text{нк}} = 0$.

Согласно нормативным документам в послеаварийном режиме коэффициент запаса статической устойчивости должен быть не менее 8% . На основании (4.3) рассчитайте фактически передаваемая по линии мощность $P_{\text{факт}}$, полагая $K_{\text{З}} = 0,08$.

Определите мощность, на которую нужно уменьшить мощность генератора, чтобы режим балансировался, то есть при котором не нарушается устойчивость

$$\Delta P = P_{\text{пр}} - P_{\text{факт}}.$$

В таблицу **УР-данные** → **Узлы-Ветви** введите вместо $P_{\text{Гпр}}$ значение мощности $P_{\text{Г}} = P_{\text{Гпр}} - \Delta P$. Снова рассчитайте установившийся режим (без утяжеления). Внесите полученные данные в таблицу 4.5.

6. Сделайте выводы по работе.

4.4. Расчет и отладка установившегося режима схемы собственных нужд 6 кВ энергоблока

Подготовка к работе

Изучив теоретический материал, ответить на вопросы:

1. Что понимают под собственными нуждами электростанции. Почему все механизмы с.н. условно разделяют на ответственные и неответственные, какие механизмы относят к тем и другим?

2. Как влияет напряжение на работу асинхронных двигателей, что называют критическим напряжением?
3. Что понимают под самозапуском двигателей, назовите отличия самозапуска от обычного пуска?
4. От каких факторов зависит величина расхода электроэнергии на с.н.?
5. Изложите основные принципы составления схем с.н. на ТЭЦ и КЭС.
6. Как осуществляется резервное питание с.н. на напряжении 6 кВ?

Программа работы

Объектом исследования является схема с.н. электростанции, принятая к расчету в курсовом проекте по дисциплине «Режимы работы и эксплуатации электрооборудования электростанций».

Схема рабочего и резервного питания с.н. составляется для одного из блоков станции, для которой был рассчитан и отлажен УР в лабораторных работах №4.1, 4.2. Возможны также и другие варианты схем, которые необходимо согласовать с преподавателем.

1. Составьте схему замещения с.н. (рис. 3.1, 3.2), рассчитайте параметры ее элементов (п. 1.2) и, руководствуясь указаниями п. 2.1.2, введите полученные значения в базу данных программы «**Мустанг**». Рассчитайте установившийся режим.
2. Изменяя коэффициенты трансформации ТСН и РТСН, установите напряжение на рабочих шинах с.н. 6±0,3 кВ и напряжение на шинах резервного питания 6,6 ± 0,3 кВ.
3. По таблице **УР** → **Исходные данные** → **Результаты** → **Ветви** (**Кусты узлов**) определите в нормальном режиме перетоки $P_{km} + jQ_{km}$ и потери $dP_{km} + jdQ_{km}$ активной и реактивной мощности в трансформаторе с.н., где k, m номера узлов на схеме замещения.
4. Рассчитайте установившийся режим для случая, когда механизмы с.н. питаются через резервный трансформатор (рабочий ТСН отключен). Также определите перетоки и потери активной и реактивной мощности в резервном трансформаторе с.н.
5. Рассчитайте установившийся режим для случая, когда отключен один из трансформаторов (автотрансформаторов) связи. Механизмы с.н. питаются через рабочий трансформатор с.н. Определите перетоки и потери активной и реактивной мощности в трансформаторе с.н.

Полученные результаты внесите в таблицу. В таблице 4.6 представлен один из возможных вариантов таблицы, составленной для схемы замещения рис. 3.2.

Таблица 4.6

Нормальный режим		Резервное питание		Отключен один из трансформаторов связи (на рис. 1.13 не показан)	
Перетоки мощности (МВт, МВар)					
$P_{14} + jQ_{14}$		$P_{37} + jQ_{37}$		$P_{14} + jQ_{14}$	
$P_{45} + jQ_{45}$		$P_{78} + jQ_{78}$		$P_{45} + jQ_{45}$	
$P_{46} + jQ_{46}$		$P_{79} + jQ_{79}$		$P_{46} + jQ_{46}$	
Потери мощности (МВт, МВар)					
$dP_{14} + jdQ_{14}$		$dP_{37} + jdQ_{37}$		$dP_{14} + jdQ_{14}$	
$dP_{45} + jdQ_{45}$		$dP_{78} + jdQ_{78}$		$dP_{45} + jdQ_{45}$	
$dP_{46} + jdQ_{46}$		$dP_{79} + jdQ_{79}$		$dP_{46} + jdQ_{46}$	
Напряжения на шинах (кВ)					
U_5		U_8		U_5	
U_6		U_9		U_6	

4.5. Расчет токов трехфазного короткого замыкания

Подготовка к работе

Изучив теоретический материал, ответьте на вопросы.

1. Принципы составления исходной комплексной схемы замещения для расчета несимметричных КЗ.
2. Что такое периодическая и апериодическая составляющие тока КЗ?
3. Как определить ударный ток КЗ? В какой момент времени он имеет место?
4. Почему при КЗ, электрически близких к генераторам, имеет место изменение периодической составляющей тока замыкания?

Программа работы

В данной работе моделируется трехфазное КЗ на шинах распределительных устройств высокого, среднего и низкого напряжений станции, для которой был рассчитан и отлажен УР в лабораторной работе №4.1.

С точки зрения выбора коммутационной аппаратуры представляет интерес полный ток КЗ. В связи с этим рекомендуется ввести в схему замещения фиктивные ветви.

Для станции, рассматриваемой в качестве примера (рис. П.1), расчет токов трехфазного КЗ производится в трех точках:
К1 – на шинах ГРУ 10 кВ (узел 12),
К2 – на шинах СН 35 кВ (узел 13),
К3 – на шинах ВН 220 кВ (узел 14).

Фиктивные дополнительные ветви, в которых наблюдается полный ток КЗ: 6 – 13, 7 – 14, 8 – 12.

1. Руководствуясь указаниями, изложенными в П.2.1, П.2.2 введите данные для моделей синхронных генераторов, систем возбуждения, АРВ, турбины и АРЧВ (РС).

2. В таблицах **Узлы, Ветви** введите дополнительные узлы и ветви. Руководствуясь указаниями, изложенными в примере 3.1, поочередно смоделируйте трехфазное КЗ в распределительных устройствах высокого, среднего и низкого напряжений. При этом целесообразно новые режимы записать, как новые файлы под другими именами.

3. Руководствуясь указаниями п. П.4, внесите в таблицу **Контролируемые параметры** ветви, в которых будет определяться ток КЗ.

Например, для рассматриваемой станции (рис. П.2) при КЗ на ГРУ (точка К1) целесообразно контролировать токи в ветвях:
8 – 12 – суммарный ток КЗ,
$\boldsymbol{I_{Г1}}$ – ток подтекающий к точке КЗ от генератора 1,
10 – 8 – ток от системы и генераторов 3, 4.
9 – 8 – ток, протекающий через секционный реактор от генератора 2.

4. Руководствуясь указаниями п. П.4 рассчитайте токи КЗ.

Необходимо отметить, что в программе «**Мустанг**» на графиках показаны изменения периодических составляющих токов КЗ во времени (огибающие кривых токов). Очевидно, что максимальное значение периодической составляющей тока КЗ $I_{П,0}$ будет иметь место в момент замыкания.

5. Полученные значения $I_{П,0}$ внесите в таблицу.

Один из возможных вариантов таблицы, представлен в таблице 4.7, структура которой соответствует схеме замещения рассматриваемой станции (рис. П.2).

Таблица 4.7

Составляющие токов короткого замыкания

Точка КЗ	**Источник**	$I_{П,0}$ кА	**Точка КЗ**	**Источник**	$I_{П,0}$ кА	**Точка КЗ**	**Источник**	$I_{П,0}$ кА
К1	**G1**		**К2**	**G1 + G2**		**К3**	**G1 + G2** + Система	
	G2			G3+G4			G3+G4	
	G3+G4+ Система			Система				
	Суммарное значение			Суммарное значение			Суммарное значение	

6. Объясните причину изменения периодической составляющей тока замыкания при КЗ в точках К1, К2, К3.

4.6. Моделирование трехфазного КЗ на выводах генератора, работающего в режиме холостого хода

Подготовка к работе

Изучив теоретический материал, ответьте на вопросы.

1. Почему у СГ ток установившегося КЗ меньше, чем номинальный ток?
2. Как изменится ток возбуждения, если ток в обмотке ротора равен току КЗ.

Программа работы

В данной работе моделируется трехфазное КЗ на выводах генератора, работающего в режиме холостого хода на станции, для которой был рассчитан и отлажен УР в лабораторной работе №4.1.

Данные для расчета динамики (модели синхронных генераторов, систем возбуждения, АРВ, турбины и АРЧВ (РС)) введены в базу данных в лабораторной работе №4.5.

1. Руководствуясь указаниями, изложенными в примере 3.2, смоделируйте короткое замыкание на выводах одного из генераторов, работающем в режиме холостого хода.

2. Руководствуясь указаниями пункта П.4, получите зависимости **Eqe(t), Eq(t)** и **Iг(t).** На основании полученных зависимостей определите значение периодической составляющей тока генератора в начальный момент времени (t = 0) и после окончания переходного процесса. Полученные значения сравните с расчетными

$$I_{\Gamma(t=0)} = \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}X_d''}, \quad I_{\Gamma(t=\infty)} = \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}X_d}.$$

4.7. Моделирование процессов пуска и самозапуска электродвигателей собственных нужд

Подготовка к работе

Изучив теоретический материал, ответить на вопросы.

1. Назовите основные причины кратковременного нарушения нормального электроснабжения системы с.н.
2. Допустимое время самозапуска двигателей с.н. для ТЭС среднего давления.
3. В каком случае самозапуск электродвигателей является успешным?
4. Какими основными факторами определяется длительность процесса самозапуска?
5. Допустимое время перерыва электроснабжения при отключении рабочего ТСН действием резервной защиты на стороне ВН.
6. Для двигателей каких механизмов с.н. необходимо обеспечить успешный самозапуск, чтобы обеспечить безопасный останов энергоблока?
7. Какие электродвигатели можно отключить для облегчения самозапуска ответственных электродвигателей при глубоких продолжительных снижениях напряжения в сети с.н.?

Программа работы

В качестве объекта исследования принимается схема собственных нужд энергоблока, для которой был рассчитан и отлажен установившийся режим в лабораторной работе №4.4.

1. Руководствуясь указаниями, изложенными в примере 3.3, смоделируйте действия РЗ при трехфазном КЗ на выводах одного из самых

мощных двигателей (рис. 3.1, точка К1) и процесс самозапуска для неповрежденных двигателей.

Получите зависимости **$S_{Р\ АД}$(t), I(t), Мэл(t), Мтор(t)** для всех типов двигателей, а также зависимость **U(t)** – зависимость модуля напряжения на рабочих шинах с.н. (расшифровка названий указанных параметров приведена в таблице П.11).

В случае неуспешного самозапуска в этом или в других опытах, описанных ниже, определите какую часть двигателей нужно отключить для обеспечения успешного самозапуска. После их отключения вновь моделируется самозапуск электродвигателей. После успешного самозапуска наиболее ответственных механизмов с.н. поочередно подключите оставшиеся электродвигатели.

2. Повторите опыты п. 1 при КЗ на выводах одного из двигателей малой мощности.

3. Смоделируйте действия основной РЗ и переход на резервное питание при трехфазном КЗ в рабочем ТСН (рис. 3.1, точка К2).

Получите зависимости **$S_{Р\ АД}$(t), I(t), Мэл(t), Мтор(t)** для всех типов двигателей.

4. Смоделируйте действия РЗ при трехфазном КЗ во внешней цепи (рис. 3.1, точка К3).

Получите зависимости **$S_{Р\ АД}$(t), I(t), Мэл(t), Мтор(t)** для всех типов двигателей.

5. Проанализируйте полученные зависимости с точки зрения требований к самозапуску.

4.8. Исследование электромеханических переходных процессов при коротком замыкании на линии связи с системой

Подготовка к работе

Изучив теоретический материал, ответить на вопросы.

1. Влияние АРВ на электромеханический переходный процесс.
2. Что такое ресинхронизация?
3. Влияние АРЧВ на электромеханический переходный процесс.

Программа работы

В качестве объекта исследования принимается схема станции, для которой был рассчитан и отлажен установившийся режим в лабораторной работе №4.1.

1. Смоделируйте трехфазное короткое замыкание в начале и в конце линии связи с системой (пример 3.1) и ее отключение основной быстродействующей защитой, например, высокочастотной. Линия отключается одновременно с обоих концов. Примите время отключения линии 0,1с. Повторите опыты, увеличив время отключения линии до 0,2 с.
2. Для одного или нескольких генераторов получите зависимости **$P_Г(t)$, $P_Т(t)$, Sг(t), $U_Г(t)$, $I_Г(t)$** при КЗ в начале и в конце линии связи с системой при времени отключения линии 0,1с и 0,2 с (расшифровка названий указанных параметров приведена в таблице 2.11). Объясните, как влияет на электромагнитный переходный процесс место КЗ и время отключения КЗ.
3. Смоделируйте трехфазное короткое замыкание в начале и в конце линии связи с системой и ее каскадное отключение резервной защитой, например, дистанционной. ($t_{откл Q1}$ = 0,12с, $t_{откл Q2}$ = 0,5с).
4. Для тех же генераторов, что и в п.2 получите зависимости **$P_Г(t)$, $P_Т(t)$, Sг(t), $U_Г(t)$, $I_Г(t)$** при трехфазном КЗ в начале и в конце линии связи с системой при каскадном отключении. Сравните полученные зависимости с зависимостями п.2.
5. Смоделируйте трехфазное короткое замыкание на тупиковой линии, отходящей от шин ВН или СН при различной удаленности точки КЗ от РУ. Удаленность КЗ моделируйте путем изменения сопротивления шунта: Хш = 0,001 Ом – соответствует близкому трехфазному замыканию, Хш = 10 Ом – удаленному. Сопротивление линии при этом входит в значение Хш. Время отключения линии со стороны питания 0,12 с.
6. Для опытов п.5 также получите зависимости **$P_Г(t)$, $P_Т(t)$, Sг(t), $U_Г(t)$, $I_Г(t)$** для тех же генераторов, что и в п.2.
7. Выведите из работы автоматическое регулирование возбуждения для всех генераторов станции. Для этого необходимо обнулить все коэффициенты усиления в таблицах **РВ**, **Возбудитель**. Без АРВ смоделируйте трехфазное КЗ в начале линии связи с системой. При таком повреждении получите электромеханический переходный процесс предельный по динамической устойчивости. Предела динамической устойчивости можно добиться путем из-

менения длительности КЗ и сопротивления шунта. При этих условиях вновь введите в работу АРВ. Получите зависимости **$P_Г(t)$, $P_Т(t)$, Sг(t), $U_Г(t)$, $I_Г(t)$.**

8. Выведите из работы автоматический регулятор частоты вращения (АРЧВ) для всех генераторов станции. Для этого необходимо обнулить все коэффициенты усиления в таблице **РС**. Без АРЧВ смоделируйте трехфазное КЗ в начале линии связи с системой. При таком повреждении получите нарушение динамической устойчивости путем изменения длительности КЗ и сопротивления шунта. При этих условиях вновь введите в работу АРЧВ. Получите зависимости **$P_Г(t)$, $P_Т(t)$, Sг(t), $U_Г(t)$, $I_Г(t)$**.

Библиографический список

1. Эксплуатация турбогенераторов с непосредственным охлаждением Под общ. ред. Линдорфа Л.Г. и Мамиконянца Л.Г. – М.: Энергия, 1972. – 352 с.
2. Неклепаев Б.Н., Крючков И.П. Электрическая часть электростанций и подстанций: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования. – М.:Энергоатомиздат, 1989. – 608 с.
3. Герасименко А.А., Федин В.Т. Передача и распределение электрической энергии: Учебное пособие. – Ростов-н / Д.: Красноярск: Издательские проекты, 2006. – 720 с.
4. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.
5. Околович М.И. Проектирование электрических станций: Учебник для вузов. – М.:Энергоиздат, 1982. – 400 с.
6. Рожкова Л.Д. , Козулин В.С. Электрооборудование станций и подстанций.-2-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 648 с.
7. Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е., Окин А.А. Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах. – М.: Энергоатомиздат, 1990.–348 с.

Приложение 1

П1. Ввод данных для расчета установившихся режимов

П1.1. Составление схемы замещения

Рассмотрим, в качестве примера, составление схемы замещения для схемы тепловой электростанции (рис.П.1).

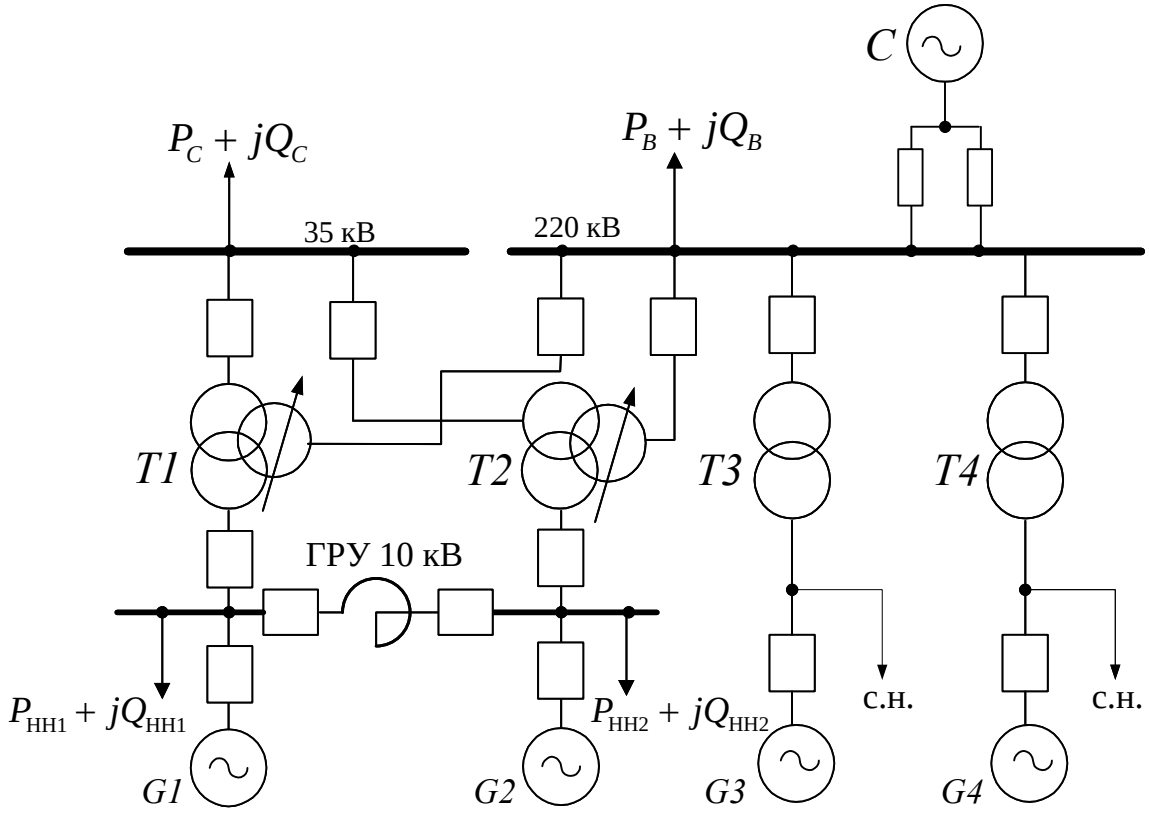


Рис. П.1. Схема ТЭЦ

Необходимые для расчета параметров схемы замещения данные по генераторам, трансформаторам, линиям, реакторам, а также заданные мощности нагрузок целесообразно свести в таблицу, подобную таблице П1. Далее, руководствуясь указаниями, изложенными в части 1 данного пособия, необходимо рассчитать параметры схем замещения всех элементов станции и занести их в соответствующие графы таблицы П.1.

Таблица П.1

Генераторы

Тип генератора	Обозначение на схеме	Номинальные параметры			система возбуждения	Данные для динамики					
		$P_{ном}$ (МВт)	cos φ	$U_{ном}$ (кВ)		T_j с	X_d *о.е.*	X'_d *о.е.*	X''_d *о.е.*	X_q *о.е.*	T_{d0} *с*
ТВФ-63-2ЕУ3	*G*1, *G*2	63	0,8	10,5	ВЧ	7,25	1,513	0,202	0,1361	1,5	6,15
ТВФ-110-2ЕУ3	*G*3, *G*4	110	0,8	10,5	независимое тиристорное	7,8	2,04	0,271	0,189	2	6,7

Трансформаторы

Тип	обозначение	K_T	напряжения обмоток (кВ)		$u_к$ (%)	потери (кВт)		Сопротивления обмоток (Ом)	
ТДЦ 125	*T*3, *T*4	22	ВН	230	11	$\Delta P_к$	380	x_T	46,6
			НН	10.5				r_T	1,28

Трехобмоточные трансформаторы и автотрансформаторы связи

Тип	обозначение	Коэффициент трансформации		Напряжения обмоток (кВ)		Напряжение короткого замыкания (%)		Потери (кВт)		Сопротивления обмоток (Ом)	
ТДЦ ТН 63	*T*1, *T*2	$K_{ÒÂÑ}$	6	$U_{ÂÍ}$	230	$u_{ÊÂ-Ñ}$	11	ΔP_X	320	x_B	96,5
						$u_{ÊÂ-Í}$	32			x_C	0
				$U_{ÑÍ}$	38.5	$u_{ÊÑ-Í}$	20			x_H	172
		$K_{ÒÂÍ}$	22			$u_{ÊÂ}$	11,5			r_B	2,13
				$U_{ÍÍ}$	10.5	$u_{ÊÑ}$	-0,5			r_C	2,13
						$u_{ÊÍ}$	20,5			r_H	2,13

Двухцепная линия связи с системой

Линия	Длина (км)	Марка провода	Удельные параметры			Параметры ЛЭП		
5 –22	80	АС-500	r_0	0,065	Ом/км	r	5,2	Ом
			x_0	0,401		x	32,08	
			b_0	2,84	мкСм/км	b	227	мкСм

Секционный реактор

РБДГ-10-2500-0,35, потери на фазу 23,9 кВт

x_{LR} = Ом, r_{LR} = Ом,

Нагрузки (с учетом коэффициента системы)

шины ГРУ:	
секция 1 $P_{НÍ\ 1} + jQ_{НÍ\ 1}$	15 + j8,5 МВА
секция 2 $P_{НÍ\ 2} + jQ_{НÍ\ 2}$	15 + j8,5 МВА
шины СН 35 кВ $P_C + jQ_C$	35 + j19,8 МВА
шины ВН 220 кВ $P_B + jQ_B$	60 + j34 МВА

Схема замещения, соответствующая схеме ТЭЦ рис. П.1, представлена на рис.П.2.

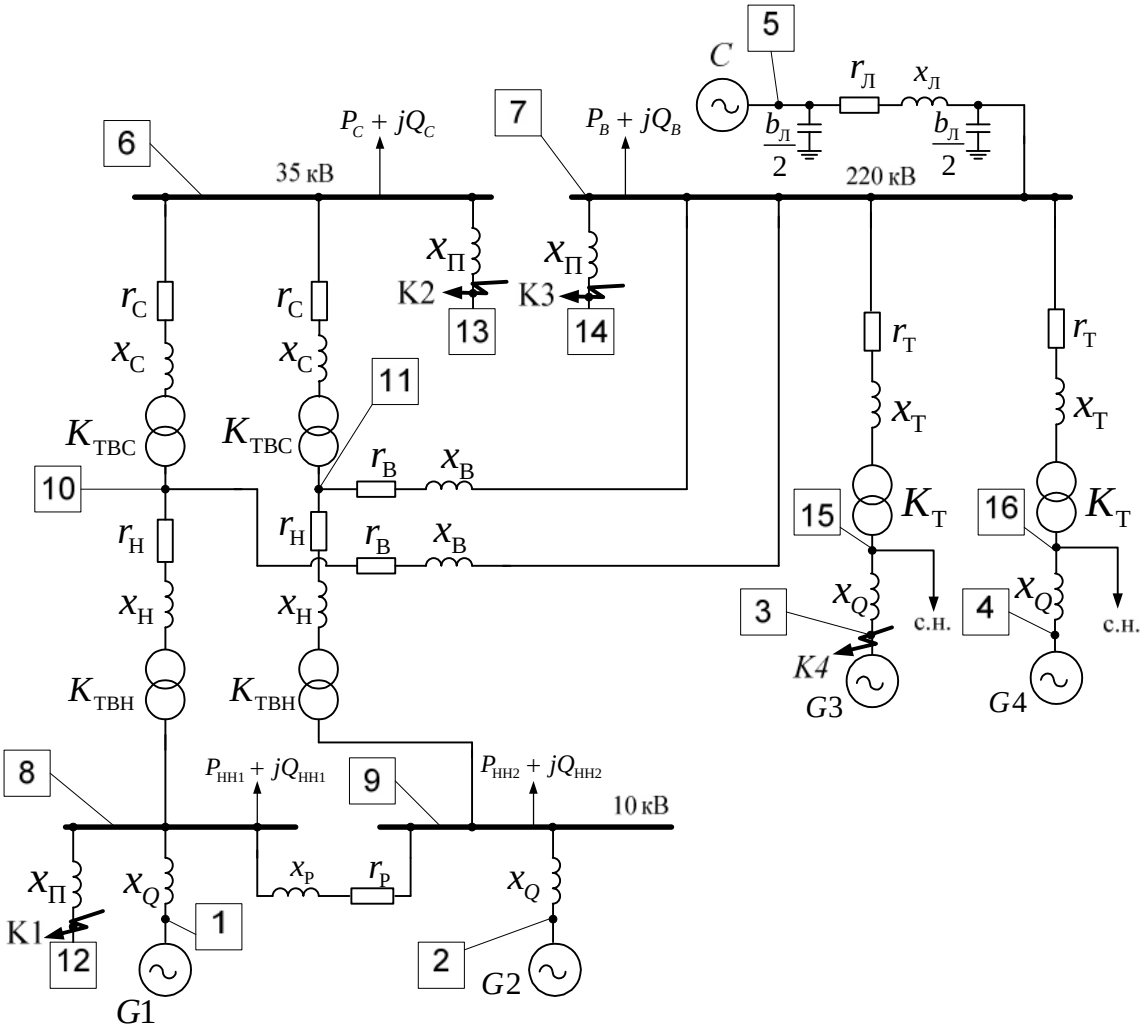


Рис.П.2. Схема замещения станции

Сопротивления трансформаторов в рассматриваемом примере приведены к высшему напряжению.

На рис.2 число в квадратной рамке обозначает номер узла,

x_Q – малое реактивное сопротивление (например 0,001 Ом), отделяющее генераторный узел от нагрузочного.

В общем случае порядок нумерации узлов произвольный, однако, можно рекомендовать делать нумерацию в следующем порядке:

1) генераторы (узлы 1, 2, 3, 4),
2) система (узел 5),
3) шины РУ (узлы 6, 7, 8, 9),
4) все остальные узлы схемы (узлы 10 – 16).

Ветви 8 – 12, 6 – 13, 7 – 14 фиктивные, введены в схему для вывода полного тока КЗ на шинах. Реактивное сопротивление $x_П$ = 0,001 Ом – малое сопротивление фиктивных ветвей (наличие ветвей с нулевым сопротивлением в программе не допускается).

П1.2. Ввод параметров схемы замещения

Сети современных электрических систем обычно трехфазные. В программе **«Мустанг»** расчет симметричных установившихся режимов производится по расчетной схеме одной фазы.

Все пассивные элементы электрических систем – воздушные и кабельные линии, трансформаторы и автотрансформаторы, реакторы и компенсирующие устройства – считают линейными.

Активные элементы в электрических системах – это источники тока, соответствующие генераторам электрических станций. При расчетах установившихся режимов, как правило, задающие токи выражаются через потоки мощностей, представляющие собой нелинейные функции напряжения.

Установившиеся режимы с нелинейными источниками описываются нелинейными алгебраическими уравнениями, составленными на основании метода узловых потенциалов. Если рассчитываемая схема имеет n узлов, то она описывается (***n* – 1**) уравнением в комплексной форме и **2(*n* – 1**) уравнениями в действительной форме.

Режим электрической сети будет полностью определен, если в каждом узле известны:

U – модуль напряжения узла (кВ),

δ – угол напряжения (град),

P – активная мощность (МВт),

Q – реактивная мощность (МВар).

Таким образом, электрический режим схемы характеризуется 2(n – 1) параметром в комплексной форме и 4(n – 1) параметром в действительной форме. Следовательно, с точки зрения разрешимости уравнений, в каждом узле два режимных параметра должно быть задано, а два оставлено свободными для расчета.

В программе **«Мустанг»** каждый узел имеет определенный тип и соответствующий ему четырехзначный код. В таблице П.2 приведены типы узлов и соответствующие им коды, которые рекомендуется использовать при вводе данных в программу.

Таблица П.2

U	δ	P	Q	Тип узла
1	1	0	0	Балансирующий
1	0	1	0	Генераторный
0	0	1	1	Нагрузочный

Задаваемые (фиксированные) режимные параметры узла отмечаются в коде «1», а рассчитываемые (свободные) – «0».

Балансирующий узел – это узел, балансирующий по мощности и базисный по напряжению. Для такого узла задаются модуль и фаза напряжения (фаза считается равной нулю) и рассчитываются активная и реактивная мощности. В схеме замещения станции (рис. П.2) балансирующим является узел 5.

Генераторный узел – имеет фиксированные модуль напряжения U и активную мощность $P_г$ (PU-модель). Рассчитываемыми параметрами для него являются фаза напряжения δ и реактивная мощность $Q_г$. Задание постоянного модуля напряжения при $Q_г$ = varianta соответствует реальным условиям работы генераторов, оборудованных регуляторами возбуждения, поддерживающими напряжение генератора примерно постоянным. В схеме замещения станции (рис. П.2) генераторными являются узлы 1, 2, 3, 4.

Нагрузочный узел – имеет фиксированные активную и реактивную мощности. Рассчитываемыми параметрами являются модуль и фаза напряжения узла. В схеме замещения станции нагрузочными являются узлы 6 – 16. Нагрузочные узлы с заданной нагрузкой соответствуют в данном случае шинам РУ (узлы 6, 7, 8, 9) и отпайке на собственные нужды в блоках (узлы 15, 16). Узлы 10, 11 являются частным случаем нагрузочного узла – узлами разветвления и нагрузки не имеют.

Структурно комплекс программ **«Мустанг»** состоит из трех основных расчетных программ:

- программы расчета установившегося режима,
- программы расчета переходного процесса,
- программы утяжеления режимов (которые фактически представляют собой последовательную серию расчетов установившихся режимов).

Ввод данных и вывод результатов расчета осуществляется с помощью таблиц.

Для расчета установившегося режима необходимо, если создается новый файл, выполнить директивы:

УР → **Новая схема** → **УР** → **Исходные данные. Результаты**.

При первичном вводе информации нажать клавишу **Insert,** после чего появится первая пустая строка редактирования, в числовое поле которой следует ввести исходные данные.

Если необходимо прочитать уже созданный файл:

Файлы → **Читать УР** → имя файла.

Если в файле уже имеется информация о генераторах, нагрузке, автоматике, контролируемых параметрах и т.д., то необходимо также выполнить директивы

Читать генераторы → имя файла,
Читать автоматику → имя файла,
Читать нагрузки → имя файла,
Читать контролируемые параметры → имя файла
и т.д.

Сначала необходимо внести информацию об узлах схемы в таблицу **Узлы**.

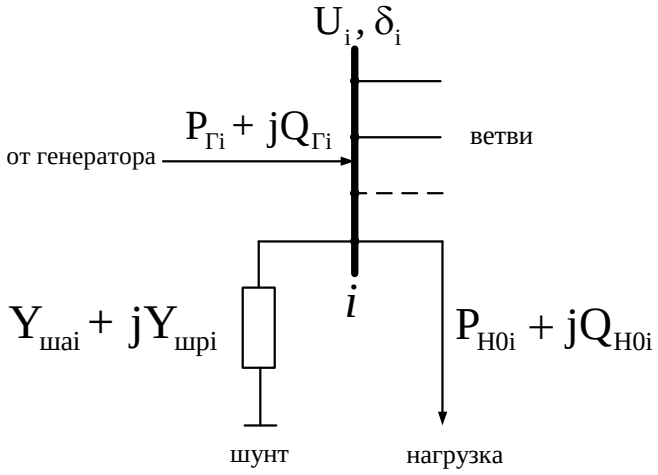


Рис. П.3. Схема замещения узла **i**

Каждый узел **i** в общем случае характеризуется при расчёте стационарного режима следующими данными (рис.П.3)

- активной и реактивной нагрузкой $P_{н\ 0i} + jQ_{н\ 0i}$,

- напряжением (модулем и фазой в узле) U_i, δ_i ,
- активной и реактивной генерируемой мощностью $P_{Ãi} + jQ_{Ãi}$,
- активной и реактивной проводимостью шунта на землю, включённого в **i**-й узел $Y_{ø\,ài} + jY_{ø\,ði}$.

В таблице **Узлы** приняты следующие обозначения:
№ – номер узла, любое целое число,
Код – четырехзначное число, состоящее из 0 и 1, соответствующее типу узла (таблица П.2),
Uстарт – модуль начального напряжения в узле, которое остается неизменным в генераторном узле, если $Q_{Ãmin} < Q_Ã < Q_{Ãmax}$ (кВ),
Uрасч – модуль расчетного напряжения в узле (кВ),
dU – угол напряжения (град.)
Pн0 – исходная активная мощность нагрузки (МВт),
Qн0 – исходная реактивная мощность нагрузки (МВар),
Uнорм – модуль нормального напряжения в узле (кВ),
Uном – модуль номинального напряжения в узле (кВ),
Nсхн – номера статических характеристик активной и реактивной нагрузки в узле,
Pг – генерируемая активная мощность в узле (МВт),
Qг – генерируемая реактивная мощность в узле (МВар),
Yша – активная составляющая проводимости шунта в узле (мкСм),
Yшр – реактивная составляющая проводимости шунта в узле (мкСм),
Qmin – ограничение на минимальную реактивную мощность, генерируемую в узле (МВар),
Qmax – ограничение на максимальную реактивную мощность, генерируемую в узле (МВар).

Для **балансирующего** узла задается следующий набор параметров:

<N> <Код> <Uстарт> <Uнорм> <Uном> <Qmin> <Qmax>

Ограничения по реактивной мощности **<Qmin>** и **<Qmax>** задаются заведомо больше ожидаемого небаланса реактивной мощности.

Для **генерирующих** узлов задаются:

<N> <Код> <Uстарт> <Pг> <Uнорм> <Uном> <Qmin> <Qmax>

Ограничения по реактивной мощности рассчитываются в зависимости от напряжения и активной мощности [1], но можно принять для начальных расчетов

Qгmin = **–0,4Рг ном· tgφ$_г$**, **Qгmax = Рг ном· tgφ$_г$**.

Для **нагрузочных** узлов задаются:

<N> <Код> <Uстарт> <Uнорм> <Uном> <Рн0> <Qн0> <Nсхн>

Если в узле нет нагрузки, то **Рн0 = 0, Qн0 = 0**. Если расчет проводится без учета влияния СХН, то **Nсхн** не заполняется.

Далее вносится информация о ветвях схемы, для этого переходим ко второй таблице **Ветви**.

Каждая ветвь **i-j** представляется **П**-образной схемой замещения (рис.П.4).

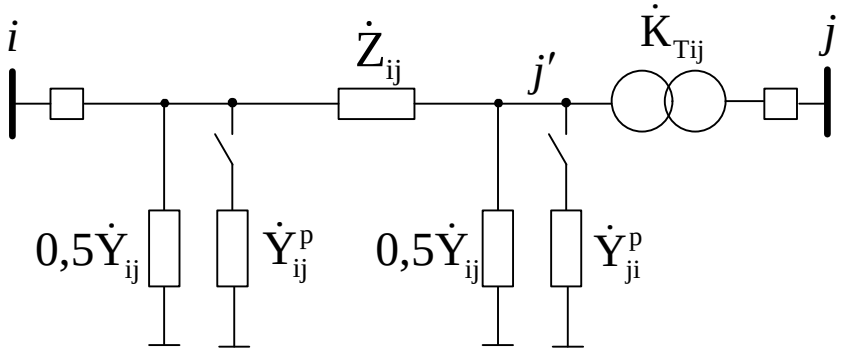


Рис. П.4. Схема замещения ветви связи **i-j**

На рис.П.4 приняты обозначения:

$\underline{Z}_{ij} = R_{ij} + jX_{ij}$ – комплексное продольное сопротивление связи,

$0{,}5\underline{Y}_{ij} = 0{,}5\hat{A}_{ij}$ – разнесенная по **П**-образной схеме замещения, емкостная поперечная проводимость линии (задается отрицательной),

$\underline{Y}^{p}_{ij} = G^{p}_{ij} + jB^{p}_{ij}$, $\underline{Y}^{p}_{ji} = G^{p}_{ji} + jB^{p}_{ji}$ – комплексные проводимости узлов **i, j**. Это проводимости компенсирующих устройств на линии. Как правило, – шунтирующие реакторы.

$\underline{\hat{E}}_{\grave{O}ij}$ – комплексный коэффициент трансформации.

В таблице **Ветви** приняты следующие обозначения:

Ni, Nj – номера узлов, ограничивающих ветвь,

Nп – номер параллельности для параллельных линий. Например, для

двухцепной линии связи с системой (рис.П.2, ветвь 5–7) в таблицу заносится следующая информация

<Ni>	**<Nj>**	**<Nп>**
5	7	1
5	7	2

Если параллельных ветвей нет, то **Nп** не задается.

R – продольное активное сопротивление связи (Ом).

X – продольное реактивное сопротивление связи (Ом).

Кт – модуль коэффициента трансформации.

dKт – фаза комплексного коэффициента трансформации.

G – поперечная активная проводимость связи (мкСм). Как правило, активную проводимость в расчетах режимов энергосистем не учитывают.

B – поперечная реактивная проводимость связи (мкСм), задается отрицательной.

После заполнения таблиц **Узлы, Ветви,** внесенные данные сохраняются в файл:

Файлы → **Сохранить УР** → имя файла.

Далее при помощи директив **УР** → **Общая информация** необходимо осуществить ввод исходных данных, определяющих точность расчета.

Окно диалога данной директивы имеет следующие группы информации.

1. Окно **«Пояснения»** – окно для ввода поясняющей информации. Количество строк неограниченно.

2. Окно **«Управляющие константы»** – служит для ввода некоторых констант:

- **Узловая точность УР** – точность расчета установившегося режима в сети напряжением 110 кВ и выше. Рекомендуемое значение 0.01 МВт, но может быть задана и большая точность.
- **Системная точность** – точность расчета сети ниже 110 кВ. Может также приниматься равной 0,01 МВт.

После выполнения этих операций производится расчет установившегося режима с помощью директивы **УР** → **Расчет**.

После расчета УР выводится протокол расчета и, если введенная база данных не содержит ошибок, сообщение «**Расчет УР завершен**». Для анализа полученных данных расчета необходимо войти в таблицу **УР** → **Исходные данные** → **Результаты**.

Для анализа результатов расчета и редактирования в «**Мустанг.WIN**» предусмотрена директива **Кусты узлов**, которая представляет информацию о схеме фрагмента сети, примыкающего к рассматриваемому узлу (узел – отходящие связи) структурно-графическом виде (рис.П.5).

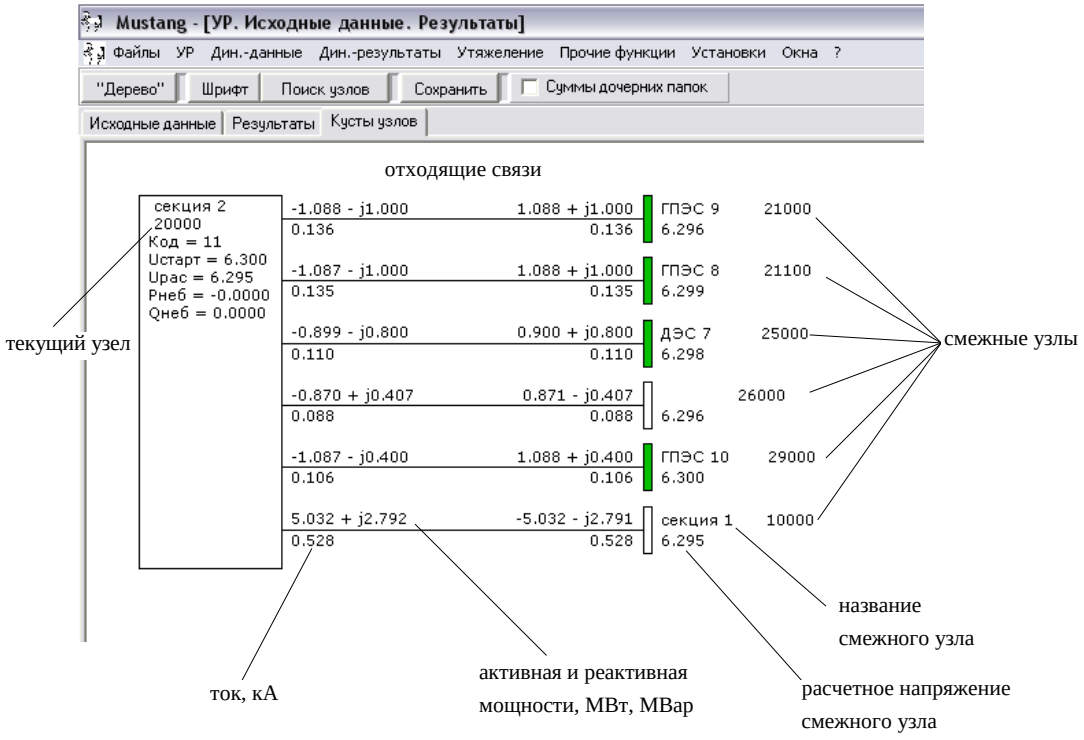


Рис.П.5. Структурно-графическое представление информации результатов расчета по директиве **Кусты узлов**

Для перехода от табличного представления какого-либо узла в структурно-графическое следует сделать двойной щелчок левой кнопкой манипулятора мышь по интересующему узлу в таблице **Узлы** или в таблице **Ветви.**

Над изображением каждой связи (рис.П.5) у соответствующих концов связи в форме $P_{ij} + jQ_{ij}$ отображаются перетоки активной и реактивной мощности в связи между узлами *i*-м и *j*-м. Знак «–» означает, что поток мощности направлен к узлу.

Под изображением связи у соответствующих концов связи отображаются значения модулей токов (кА).

Двойной щелчок левой клавиши манипулятора мышь в области какой-либо ветви вызывает панель диалога, позволяющую включать и отключать ветвь с одной или с двух сторон.

Двойной щелчок левой клавиши манипулятора мышь в области текущего узла вызывает панель диалога для коррекции информации текущего узла. Если в результате коррекции информации узла его состояние установлено "ОТКЛ", то состояния всех отходящих связей также устанавливаются "ОТКЛ" и, соответственно, наоборот.

Все операции по редактированию информации узлов и ветвей в окне **Кусты узлов** автоматически изменяют информацию таблиц исходных данных **Узлы, Ветви**.

Любой смежный узел становится текущим после двойного щелчка левой клавиши манипулятора мышь в области смежного узла.

Щелчок правой клавиши манипулятора мышь на свободном поле вызывает всплывающее меню, позволяющее отобразить результаты расчета УР или исходные данные:

Режим отображения ветвей → • **результаты расчета УР**
• **исходные данные**

Данная функция переключает вид отображения параметров ветвей - исходные данные или результаты расчета.

В режиме отображения **результаты расчета УР** обозначения аналогичны обозначениям, принятым на рис. 1.13.

В режиме отображения **исходные данные** над изображением каждой связи в форме $\underline{Z} = R + jX$ отображается продольное сопротивление связи (Ом). Под изображением в форме $\underline{Y} = G + jB$ – поперечная проводимость по **П**-образной схеме замещения (мкСм). Еще ниже, под соответствующим концом связи, в форме $Yp=Ypa + jYpr$ отображаются проводимости линейных реакторов, если данные элементы имеются в схеме (мкСм).

Если данная связь трансформаторная, то над изображением связи отображается модуль и угол комплексного коэффициента трансформации.

Еще ниже в форме $\underline{Sp} = Pp + jQp$ отображаются мощности линейных реакторов, если данные элементы имеются в схеме (МВт).

Если связь отключена с одного конца, то над изображением отключенного выключателя отображается значение модуля напряжения.

П1.3. Ввод данных по статическим характеристикам нагрузки

Для ввода информации о нагрузке выберите: **Главное меню** → **Дин.-данные** → **Характеристики СХН/ДХН.**

При первичном вводе информации нажать клавишу **Insert,** после чего появится первая пустая строка редактирования, в числовое поле которой следует ввести значения коэффициентов полинома, аппрокси-

мирующего СХН. Для добавления новых элементов также следует использовать клавишу **Insert**.

В таблице **N** – номер статической характеристики изменения активной и реактивной мощностей нагрузки (до 30 позиций).

Следует иметь в виду, что номер СХН (**Nсхн**) в таблице **Узлы** задается одним числом, которое формируется следующим образом

Номер СХН узла = номер СХН **Рн** ·100 + номер СХН·**Qн**.

Например, в таблице коэффициентов СХН заданы две характеристики с номерами 1 и 2 (таблица П.3). В этом случае возможны следующие комбинации для задания **Nсхн**:

1) 1·100 + 1 = 101, то есть **Nсхн** = 101,
2) 1·100 + 2 = 102, то есть **Nсхн** = 102,
3) 2·100 + 2 = 202, то есть **Nсхн** = 202,
4) 2·100 + 1 = 201, то есть **Nсхн** = 201.

В первом случае в зависимостях (1) и (2) при расчете используются коэффициенты: A0 = 0.1, A1 = 0.9, B1 = 1.

Во втором случае: A0 = 0.1, A1 = 0.9, B0 = 0.2. B1 = 0.8.

В третьем случае: A0 = –0.2, A1 = 1.2, B1 = 0.2, B2 = 0.8.

В четвертом случае: A0 = –0.2, A1 = 1.2, B1 = 1.

Таблица П.3

N	Коэффициенты для **Рн**				Коэффициенты для **Qн**			
	A0	A1	A2	A3	B0	B1	B2	B3
1	0.1	0.9				1		
2	–0.2	1.2			0.2	0.8		

Полученный номер СХН (например, 101) вносится в таблицу **Узлы** в столбец <**Nсхн**>.

П1.4. Ввод исходных данных по утяжелению режима

Расчетная программа «**Утяжеление режима**» представляет собой последовательную серию расчетов установившегося режима с одной и той же электрической схемой, находящейся в оперативной памяти ЭВМ. В исходный установившийся режим вносятся изменения при помощи директив коррекции установившегося режима, и производится расчет нового УР.

При помощи директивы **Утяжеление** → **Исходные данные** осуществляется ввод исходных данных для проведения расчетов по програм-

ме утяжеления. Окно диалога данной директивы имеет следующие группы информации.

1. Окно **«Узлы схемы»** – отображает список всех узлов текущего режима. Нажатием клавиши >> выбранный узел копируется в окно «**Узлы воздействия»**.

2. Окно **«Ветви схемы»** – отображает список ветвей текущего режима. Нажатием клавиши >> выбранная ветвь копируется в окно «**Ветви воздействия»**.

3. Окно, расположенное в верхней строке таблицы **Исходные данные по утяжелению** – служит для установки типа изменяемого параметра в узлах, задаваемых в окне «**Узлы воздействия»**.

Рг, Qг – активная и реактивная мощности генератора,

Рн, Qн – активная и реактивная мощности нагрузки,

Uг – напряжение генератора.

4. В окна **«Шаг»** и **«Max»** – необходимо внести информацию об изменении мощности в узлах воздействия.

● **Шаг** – шаг изменения мощности на каждом шаге утяжеления (МВт). Знак «–» означает уменьшение величины активной мощности изменяемого параметра,

● **Max** – предельное значение изменяемого параметра (МВт).

При помощи директивы **Утяжеление** → **Управляющие константы** вводятся некоторые константы:

● **Uкр** – наименьшее допустимое напряжение в нагрузочных узлах (о.е.),

● **KQrmax** – коэффициент, на который умножается параметр **Qrmax** всех генераторов на старте программы расчета утяжеления,

● **Число шагов.**

● **KTg** – коэффициент изменения реактивной мощности нагрузки **Qн** для узлов воздействия.

Если **TgH** ≠ 0, то расчет значений нагрузки на следующем i + 1 шаге утяжеления для узлов воздействия следующий:

$$Pн(i+1) = Pн(i) + Pшаг,$$
$$Qн(i+1) = Qн(i) + Pшаг \cdot TgH.$$

Если **TgH** = 0, то расчет значений нагрузки на следующем i + 1 шаге утяжеления для узлов воздействия следующий:

$$Pн(i+1) = Pн(i) + Pшаг,$$
$$Qн(i+1) = Qн(i) + Qн(i) / Pн(i) \cdot Pшаг.$$

Приложение 2
П2. Ввод параметров моделей элементов энергосистемы для расчета переходных процессов

П2.1. Ввод параметров моделей синхронного генератора, системы возбуждения и АРВ

Все необходимые для моделей синхронного генератора, системы возбуждения и АРВ данные последовательно вносятся в таблицы:

1. **«Генераторы»,**
2. **«РВ»** – регулятор возбуждения,
3. **«Возбудитель»**.

1. Таблица **«Генераторы»** располагается: **Главное меню** → **Дин.-данные** → **Генераторы, РС, РВ** → **Генераторы.**

В таблице **«Генераторы»** приняты следующие обозначения:

N – номер узла, соответствующий номеру узла генератора на схеме замещения,

Uг ном – модуль номинального напряжения генератора (кВ),

Рг ном – номинальная активная мощность генератора (МВт). В случае синхронного двигателя необходимо задавать Рг ном <0, в случае синхронного компенсатора (СК) на месте Рг ном ставится Qг ном. В качестве признака СК задают параметр cos φ = 0,

cos φ – номинальный коэффициент мощности,

D – коэффициент демпфирования (о.е.),

Mj/Tj – механическая постоянная инерции генератора вместе с турбиной (с),

Xd' – переходное реактивное сопротивление по продольной оси (о.е.),

Xd – синхронное реактивное сопротивление по продольной оси (о.е.),

Xq – синхронное реактивное сопротивление по поперечной оси (о.е.),

Xd'' – сверхпереходное реактивное сопротивление по продольной оси (о.е.),

Xq'' – сверхпереходное реактивное сопротивление по поперечной оси (о.е.),

Td0' – переходная постоянная времени по продольной оси при разомкнутой обмотке статора (с). В некоторых справочниках [2] эта величина обозначается T_{d0},

Td0'' – сверхпереходная постоянная времени по продольной оси при разомкнутой обмотке статора (с),

Tq0'' – сверхпереходная постоянная времени по поперечной оси при разомкнутой обмотке статора (с).

Минимальный необходимый для модели по упрощенным уравнениям Парка-Горева набор параметров представлен в таблице П.4. Остальные параметры рассчитываются программой или задаются определенными значениями по умолчанию.

Таблица П.4

N	**Uг ном**	**Pг ном**	**cosφ**	**Mj /Tj**	**Xd'**	**Xd**	**Xq**	**Xd''**	**Td0'**

Если в рассчитываемой схеме есть шины бесконечной мощности, то для этих балансирующих узлов необходимо внести в таблицу «**Генераторы**» следующую информацию:

<N> <Uг ном> <Xd'>

где **N** – номер узла, соответствующий номеру узла системы на схеме замещения.

Uг ном – напряжение системы.

Переходное реактивное сопротивление **Xd'** можно принять 0,1 Ом.

В принятой модели параметр **D** не задается.

В паспортных данных генераторов задается маховый момент **GD²** (т·м²), через который определяется T_j по следующей формуле

$$T_j = k\frac{GD^2 n_{\text{íîì}}^2}{Ð_{\text{íîì}}}[\tilde{n}], \qquad (П.1)$$

где $n_{\text{íîì}}$ – частота вращения [об/мин],

$P_{\text{íîì}}$ – номинальная мощность [МВт],

$k = 2.74 \times 10^{-6}$.

Значения механической постоянной инерции (**T_j**) и данные о маховом моменте **GD²** для некоторых турбоагрегатов приведены в таблице П.5.

Таблица П.5

Тип турбо-генератора/ турбины	**GD²** генерато-ра	**GD²** тур-бины	**P**	**n**	**T_j**
	[тм²]	[тм²]	[МВт]	[об/мин];	[с]
Т-2-25-2	4,94	3,6	25	3000	8,5

Т-2-50-2	13,5	9,3	50	3000	11,2
ТВФ-60-2	8,85	8,75	60	3000	7,25
Т-2-100-2	23	18,7	100	3000	10
ТВФ-100-2	13	18,7	100	3000	7,8
ТВ2-150-2	30	28,5	150	3000	9,6
ТВВ-165-2	17,5	28,5	165	3000	6,85
ТВВ-200-2	22,4	35	200	3000	7,05
ТГВ-200	25	35	200	3000	7,4
ТГВ-300	31,1	48	300	3000	6,5
ТВВ-320-2	30	48	300	3000	6,4
ТВВ-800-2	61	111	800	3000	5,3

2. Все необходимые данные для модели регулятора возбуждения вносятся в таблицу **«РВ»**, которая располагается: **Главное меню** → **Дин.-данные** → **Генераторы** → **РВ**.

В таблице П.6 представлены типы систем возбуждения, применяемые в программе «Мустанг».

Таблица П.6

№	Тип системы возбуждения (СВ)
1	Независимое тиристорное возбуждение, или тиристорная СВ, или бесщеточная СВ с вращающимися тиристорами
2	Тиристорное самовозбуждение
3	Бесщеточная СВ с вращающимися диодами
4	Высокочастотная СВ без блока сильной стабилизации
5	Высокочастотная СВ с блоком сильной стабилизации
6	Электромашинное возбуждение с возбудителем постоянного тока, релейная форсировка напряжения

Ввод информации о регуляторах возбуждения осуществляется построчно для каждого генератора.

В таблице **«РВ»** приняты следующие обозначения:

N – номер узла, соответствующий номеру узла генератора с регулятором возбуждения,

Tрв – постоянная времени регулятора возбуждения (с),

Uрв–, Uрв+ – ограничения входного сигнала регулятора возбуждения (ед.ном.воз.),

Ku – коэффициент регулирования по отклонению напряжения (ед.ном.воз./ ед.напр.),

K'u – коэффициент регулирования по производной напряжения,

K'If – коэффициент регулирования по производной тока ротора,

Kf – коэффициент регулирования по отклонению частоты на шинах генератора от ее предшествующего значения,

K'f – коэффициент регулирования по производной частоты,

Tf – постоянная времени в канале отклонения частоты (с),
Alfa (A) – коэффициент изменения частоты, позволяющий учитывать изменение уставки по напряжению.

Рекомендуемые значения указанных коэффициентов, постоянных времени и т.д. представлены в таблице П.7. В таблице **«РВ»** в программе также указаны другие коэффициенты (Kia, Kip и др.). Они предназначены для моделирования систем возбуждения синхронных двигателей, которые в рамках данного курса не рассматриваются.

Таблица П.7

Наименование	Обозначение	Тип системы возбуждения					
		1	2	3	4	5	6
Пост. времени АРВ	Трв	0.04	0.04	0.04	0.1*	0.1	2*
Ограничения в регул. возб.	Uрв+	6	6	6	2	2	2
	Uрв–	-6	-6	-6	0	0	0
Коэфф. регул.	Ku	50	50	50	7	7	10
Коэфф. регул.	K'u	5*	5*	5*	-	-	-
Коэфф. регул.	K'if	5*	5*	5*	-	-	-
Коэфф. регул.	Kf	2*	2*	2*	-	-	-
Коэфф. регул.	K'f	5*	5*	5*	-	-	-
Пост. времени в канале f	Tf	0.9	0.9	0.9	-	-	-
Коэф. dUr/df	A	-	-	-	1	1	1

Параметры, помеченные *, уточняются при настройке АРВ конкретных генераторов путем проведения специальных расчетных экспериментов [1].

3. Таблица **«Возбудители»** расположена: **Главное меню** → **Дин.-данные** → **Генераторы** → **Возбудители**.

В таблице **«Возбудители»** приняты следующие обозначения:
N – номер генератора с возбудителем.
Nф – тип форсировки и расфорсировки. Для современных систем возбуждения генераторов обычно **Nф** = 0.
Nсист – условный номер системы возбуждения. **Nсист** = 0 означает отсутствие возбудителя (то есть Eqe = const). В этом случае нет необходимости вообще задавать информацию о возбудителе и регуляторе возбуждения. Номера **Nсист** = 0, 1, 2…6 условно привязаны к определенным системам возбуждения (таблица 1.4).
Eqe–, Eqe+ – минимальное и максимальное значение ЭДС Eqe, пропорциональной напряжению возбуждения. Равенство нулю **Eqe–** и **Eqe+** означает отсутствие ограничений по напряжению возбуждения.

Eq–, Eq+ – минимальное и максимальное значение ЭДС Eq, пропорциональные току возбуждения. Равенство нулю **Eq–** и **Eq+** означает отсутствие ограничений по току возбуждения.
Тв – постоянная времени возбудителя (с).
KI – коэффициент регулирования по току статора.
Kif – коэффициент регулирования по току ротора.
Uркр, Ктв – параметры гибкой обратной связи системы возбуждения для высокочастотной системы возбуждения с блоком сильной стабилизации.

Рекомендуемые значения указанных коэффициентов, постоянных времени и т.д. представлены в таблице П.8.

Таблица П.8

Наименование	Обозначение	Тип системы возбуждения					
		1	2	3	4	5	6
Пост. времени СВ	Тв	0.04	0.04	0.1	0.3	0.3	0.3
Ограничения по Uf	Eqe+ Eqe–	2 –1.6	2.5 –2	2 0	2 0	2 0	2 0
Ограничения по If	Eq+ Eq–	2 0.6	2 0.6	2 0.6	- -	- -	- -
Коэфф. регул.	KIf	-	-	-	1.2	1.2	-
Коэфф. регул.	KI	-	-	-	-	-	0.7
СВ типа 5	Uркр	-	-	-	-	0.5*	-
Параметр ГОС	Ктв	-	-	-	-	10	-

Параметры, помеченные *, уточняются при настройке АРВ конкретных генераторов.

П2.2. Ввод параметров модели автоматического регулятора частоты вращения турбины (в программе «Мустанг» АРЧВ обозначено РС)

Таблица **«Регулятор скорости»** расположена: **Главное меню** → **Дин.-данные** → **Генераторы** → **РС**.

В таблице **«РС»** приняты следующие обозначения:
N – номер узла, соответствующий номеру узла генератора с регулятором скорости,
Статизм – коэффициент статизма регулятора скорости (%),
Зона – зона «нечувствительности» регулятора скорости (%),
Тоткр – постоянная времени регулятора скорости на открытие клапанов турбины(с),
Тзакр – постоянная времени регулятора скорости на закрытие клапанов турбины (с),

Рт min, Рт max – ограничения по мощности турбины (%),
Dпо – доля мощности, вырабатываемая ЦСД и ЦНД в тракте промперегрева [о.е.],
Тпо – постоянная времени паровых объемов (с).

Рекомендуемые значения указанных величин приведены в таблице П. 9.

Таблица П.9

Обозначение величины	Единицы измерения	Ориентировачные значения	
		Турбогенераторы	Гидрогенераторы
Статизм	%	5	5–10
Зона	%	0,5	0
Тоткр	с	1,5	2
Тзакр	с	0,5	2
Рт min	%	0	0
Рт max	%	110	110
Dпо	о.е.	Для ТГ с промперегревом 0,7	0
Тпо	с	1,5	0

Значение параметров **Ртmin = Ртмах** = 0 означает отсутствие ограничений на изменение мощности турбины.

После заполнения таблиц **«Генераторы», «РВ», «Возбудитель»,** «**Регулятор скорости**» запишите введенные данные на диск: **Главное меню → Файлы → Сохранить генераторы**.

П2.3. Ввод данных модели асинхронного двигателя (АД)

Для моделирования асинхронных двигателей выполняются следующие операции. В директиве **Дин.-данные** выбирается строка **Характеристики СХН/ДХН**. На экране появится таблица, имеющая две закладки **СХН/ДХН**. Активизируйте закладку **ДХН.** На экране появится таблица, в которую вводятся каталожные и расчетные параметры выбранных двигателей. При этом номер строки для двигателей разных типов будет соответствовать номеру ДХН (динамические характеристики нагрузки).

В таблице приняты следующие обозначения:

Тип – номер типа асинхронного двигателя; в комплексе может быть использовано неограниченное количество типов АД. Один и тот же тип АД может быть использован в различных узлах схемы.

Вид – параметр Вид (Вид = 1 или Вид = 2) определяет два вида задания информации об асинхронном двигателе, т.е. информация для ДХН - 1 либо для ДХН -2, соответственно. В рамках данного курса рекомендуется применять ДХН - 1 (параметр Вид 1).

Тдв – механическая постоянная инерции асинхронного двигателя вместе с приводимым механизмом [с],

Dac – доля активной мощности, потребляемой асинхронными двигателями в суммарной активной нагрузке узла в нормальном режиме. Если в данном узле имеется синхронная нагрузка, то Dac - доля активной мощности, потребляемой асинхронными двигателями в оставшейся (за вычетом активной мощности, потребляемой синхронными двигателями) активной нагрузке узла. Если в данном узле включен один асинхронный двигатель, то **Dac** =1.

cosφ – номинальный коэффициент мощности АД.

Кзаг – коэффициент загрузки, т.е. отношение номинальной мощности механизма к номинальной мощности двигателя.

Мст – статический момент сопротивления (в долях полного момента сопротивления на валу) в долях номинального.

Ориентировочные значения статического момента сопротивления механизма **Мст** [1]:

- турбокомпрессоры 0.1,
- поршневые компрессоры 1.0,
- мельницы, дробилки 1.0,
- насосы 0.5,
- нефтеперекачка 0.4,
- нефтяные качалки 1.0,
- кустовые насосы 0.9,
- вентиляторы 0.15–0.2.

Мтрог – дополнительный момент сопротивления, возникающий при трогании асинхронного двигателя, в долях его номинального момента [о.е.]. Значение **Мтрог** обычно невелико, задается в пределах 0.01–0.05 в долях номинального.

Км – показатель степени в выражении, аппроксимирующем зависимость реактивной мощности холостого хода от напряжения. Рекомендуется принимать **Км** = 4.

Uдв/Uном – номинальное напряжение на шинах двигателей (в среднем по нагрузке узла) в долях номинального.

Ммах – максимальный момент в долях номинального.

Мпуск – пусковой момент в долях номинального.

Iпуск – пусковой ток в долях номинального,

Sдв ном – номинальное скольжение двигателя [%] .

Sr/Rст – в модели ДХН-1 (параметр Вид =1), Sr – скольжение [%] в кусочно-линейной апроксимации Хк(S), начиная с которого вводится учет вытеснения тока в роторе. Рекомендуемое значение **Sr/Rст** = 70%.

Один и тот же тип асинхронного двигателя можно использовать для нескольких узлов нагрузки, для этого необходимо выполнить следующие директивы.

Дин.-данные → **Узлы с СХН / ДХН**. Окно диалога данной директивы имеет следующие группы информации:

1. Окно **Узлы УР** – отображает список всех узлов текущего режима.

2. Окно **Узлы с СХН / ДХН**.

Формирование списка узлов воздействия производится следующим образом: нажатием клавиши >> узел копируется в окно **Узлы с СХН / ДХН**. Далее в столбец **ДХН** вносится номер **ДХН** из таблицы в директиве **Характеристики СХН/ДХН**.

После заполнения таблиц **Характеристики СХН/ДХН** и **Узлы с СХН / ДХН** производится запись информации о нагрузке: **Файлы** → **Сохранить нагрузку** → имя файла.

П2.4. Ввод данных модели синхронного двигателя (СД)

Сопротивления, постоянные времени, момент инерции, мощность для синхронного двигателя вводятся в таблицу **Генераторы**. В качестве признака синхронного двигателя в графу **Рг ном** вносится **активная мощность** синхронного двигателя со знаком «–».

Для моделирования синхронных двигателей используются следующие директивы: **Главное меню** → **Дин.-данные** → **Генераторы РВ, РС…СД** → **СД**.

В таблице **СД** приняты следующие обозначения:

N – номер узла с синхронной нагрузкой,

Dp – доля активной мощности, потребляемой синхронными двигателями от активной нагрузки узла (о.е.). 0 < **Dp** < 1,

cos(φраб)– рабочий коэффициент мощности СД. Если СД генерирует реактивную мощность, то **cos(φраб)** задают со знаком «+», если двигатель потребляет реактивную мощность, то со знаком «–».

M(ст) – статический момент сопротивления на валу (в долях полного момента сопротивления) (о.е.).

Ориентировочные значения статического момента сопротивления механизма **M(ст)**:

- турбокомпрессоры 0.1,

- поршневые компрессоры 1.0,
- мельницы, дробилки 1.0,
- насосы 0.5,
- нефтеперекачка 0.4,
- нефтяные качалки 1.0,
- кустовые насосы 0.9,
- вентиляторы 0.15–0.2.

dMстарт – дополнительный момент сопротивления, возникающий при трогании СД, в долях от его номинального момента (о.е.). Ориентировочное значение дополнительного момента сопротивления для СД **dMстарт = 0.1.**

Значения каталожных параметров скорректированы для получения правильной асинхронной характеристики в рамках примененной модели СД, в которой задается только **Мп**. Если использовать задание всей асинхронной характеристики синхронного двигателя, то следует пользоваться обычными каталожными параметрами двигателя [4].

Ввод асинхронной характеристики СД (АХСД)

При помощи данной директивы осуществляется ввод асинхронных характеристик СД (синхронного двигателя) АХСД для узлов, к которым подключен СД.

Эта информация представляет собой зависимость асинхронного момента в долях номинального момента [о.е.] **Mac** от скольжений СД **S1,S2,...,Sk** (в процентах) без разрывов любого рода, т.е. обязательно: **S1 < S2 < S3 < ... < Sk**. Информация о зависимостях **Mac(S)** для СД различного типа приведена в [9].

Характеристика для каждого СД вводится вручную. Используя окно <Текущий список генераторов> можно скопировать отдельный номер узла СД или группу узлов в окно <Характеристика СД>, используя кнопку >.

При активизации кнопки <Расч> производится расчет асинхронной характеристики СД для номера узла, на который указывает курсор в окне <Характеристика СД>. Появляется новое окно диалога, в котором можно увидеть расчетную АХСД – зависимости **Mac(S), K(S)**. Здесь **K(S)** – коэффициент, равный отношению активного сопротивления демпферного контура при текущем скольжении **S** к его активному сопротивлению при **S** = 0. Коэффициенты **K** для осей d и q одинаковы.

В АХСД может быть задана всего одна точка, но обязательно для S=100% (пусковой момент).

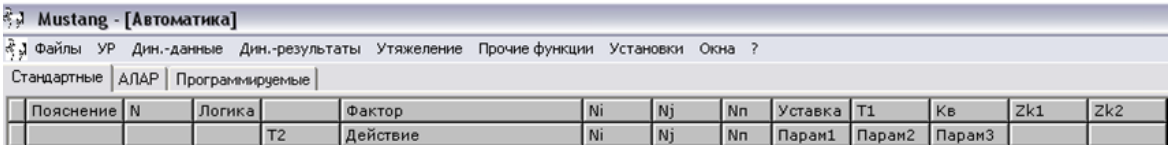
После заполнения таблицы **СД** производится запись информации о нагрузке: **Файлы** → **Сохранить нагрузку** → Имя файла.

Приложение 3
П3. Ввод данных для моделирования действий релейной защиты и автоматики

Предлагаемая в комплексе **«Мустанг»** модель автоматики позволяет моделировать различные коммутации и возмущения, происходящие в схеме, а также действия релейной защиты и автоматики.

Автоматика реализована по естественному признаку: если выполняется некоторый фактор, то в указанное время выполняется некоторое действие. Под факторами имеются в виду, например, значения электрических величин: ток, напряжение, частота, а также другие параметры. Полный список факторов и действий, предусмотренных в программе, приведен в таблице **Дин-данные** → **Автоматика** → **Факторы/действия** (таблица П.10).

Таблица П.10



В таблице П.10 приняты следующие обозначения:

N – номер данной автоматики,

Фактор – группа символов, определяющих сам фактор (данные группы символов содержатся в библиотеке факторов),

Действие – группа символов, собственно, определяющих само действие (данные группы символов хранятся в библиотеке действий),

Ni, Nj – номера узлов в схеме,

Nп – номер параллельности (для связей),

Уставка – максимальное (или минимальное) значение контролируемого параметра, определённого в ключевом слове фактора,

T1 – выдержка времени на запуск автоматики [с], во время этого интервала времени происходит контроль за выполнением данного фактора,

Кв – коэффициент возврата,

Zk1 – величина первого сопротивления компенсации УГЛОВОГО РЕЛЕ, либо максимальное количество циклов в факторе ЦИКЛ (в рамках данного курса не применяется),

Zk2 – величина второго сопротивления компенсации УГЛОВОГО РЕЛЕ (в рамках данного курса не применяется),

T2 – время задержки выполнения действия после выполнения заданного фактора,

Парам 1, Парам 2, Парам 3 – параметры, имеющие различный смысл в зависимости от конкретного ключевого слова действия, как правило,

это новые значения параметров элементов сети, генераторов, нагрузок и т.д.

● После нажатия клавиши **Insert** на экране появляется панель диалога с названием **Факторы/Действия**. Сначала активизируется закладка **Факторы**, затем в верхнем окне выбирается фактор **Время**. В таблице появится строка **Время.** В столбец N введите номер автоматики – 1, в столбец **Уставка/Парам 1** введите момент времени, когда происходит моделируемое событие (например, КЗ).

В нижнем окне панели диалога **Факторы/Действия** – выбирается тип логической связи с предыдущим фактором (если требуется).

● Далее указываются действия автоматики. Нажимается клавиша **Insert**, снова появляется окно **Факторы**. Активизируется закладка **Действия** и выбирается одно из действий (например, **Шунт**).

После ввода всех необходимых факторов и действий производится запись автоматики на диск. **Главное меню → Файлы → Сохранить автоматику → имя файла**.

Замена ключевых слов, обозначающих фактор или действие, производится двойным нажатием левой клавиши манипулятора «Мышь» на поле заменяемого ключевого слова. При этом на экране появляется панель диалога с названием **Факторы/действия**, активизируйте требуемую закладку, выберите требуемое ключевое слово, нажмите **ОК**. Произойдет замена ключевого слова, при этом числовая информация останется прежней.

Логическое отключение производится сразу для всей автоматики путем нажатия клавиш **Ctrl** и **L**. Повторное нажатие клавиш **Ctrl** и **L** логически включит данную автоматику в работу.

Приложение 4
П4. Вывод результатов расчета динамики

Перед расчетом динамики (переходного процесса) необходимо задать время расчета и выбрать контролируемые параметры элементов, которые будут рассчитаны за время переходного процесса, и которые необходимо отобразить на экране в виде графиков или таблиц.

В строке главного меню выбрать директиву **Дин. данные** → **Управляющая**.

В этой директиве необходимо задать:

Трас – время расчета переходного процесса (с), устанавливается таким, чтобы в конце расчета прекращалось изменение всех наблюдаемых параметров,

Тпеч = 0.01 шаг печати (с),

h = 0.01 шаг интегрирования (с),

Uкр = 0.7 критическое напряжение,

Tf = 0.1 постоянная времени для сглаживания частоты (с),

Нграф = 240 высота форматного листа для графиков на печать (мм),

Вграф = 120 ширина форматного листа для графиков на печать (мм),

f0 = 50 номинальная частота в сети переменного тока (Гц).

Выбор контролируемых параметров производится в следующем порядке:

● В строке главного меню **Дин.-данные** выбрать директиву **Кон. параметры**. На экране появляется окно с таблицами.

● В верхней части таблицы отмечается, к какому виду относится контролируемый элемент:

УЗЛЫ ВЕТВИ ГЕНЕРАТОРЫ ВПТ

Например, выбирается вид элемента **ВЕТВИ**.

● В нижней правой части таблицы отмечается контролируемая величина, например, $\mathbf{I_{лин}}$ – ток в ветви (расшифровка всех ключевых слов контролируемых параметров приведена в таблице П.11).

● В списке **Ветви** выбирается первая ветвь, в которой будет контролироваться ток (рис. П.2), например, между узлами 10 – 8.

● Нажатием клавиши > выбранная ветвь «перебрасывается» в таблицу **Контролируемые параметры**.

Аналогичным образом в таблицу **Контролируемые параметры** заносятся другие ветви, в которых контролируется ток, узлы, для которых контролируется напряжение и т.д.

После заполнения таблицы **Контролируемые параметры**. выполняется команды **OK** и производится запись **Файлы** → **Сохранить кон. параметры** в свой файл, например, под именем, например, **IVANOV1.KNP**.

Целесообразно выводить на экран не более 8 графиков одновременно. Ограничений по числу графиков нет.

На экране на одном и том же графике удобнее наблюдать только два параметра, например, токи в ветвях и напряжения в узлах. Если необходимо контролировать более двух параметров, то необходимо создать новый файл контролируемых параметров под другим именем, например, **IVANOV2.KNP.**

● После задания контролируемых параметров формируют список расчетных таблиц:

Главное меню → Дин. результаты → Расчет.

На экране появится таблица **Установка списков файлов**, в которой находятся файлы контролируемых параметров, например:
IVANOV1.DKP
IVANOV2. DKP
IVANOV3. DKP
….

Если таблица формируется впервые, то необходимо очистить таблицу, подав команду **Очистить** и внести в список файлы контролируемых параметров из каталога наборов, сохраненных на диске, с помощью команды **Добавить**, **ОК**.

После получения сообщения **Расчет переходного процесса завершен,** выберите в верхней части таблицы директиву **Контролируемые параметры**. На экране появится таблица рассчитанных значений контролируемых величин.

Держа курсор на любом столбце полученных расчетных значений, нажмите правую кнопку манипулятора «Мышь». Выберите в меню команду **Графики**. Рассчитанные значения будут представлены в графической форме.

В таблице П.11 приводится перечень ключевых слов контролируемых параметров, разбитых по группам – для генераторов, для узлов, для ветвей.

Таблица П.11

ГЕНЕРАТОРЫ
Рг – активная мощность генератора [МВт],
Qг – реактивная мощность генератора [Мвар],
Рас г – асинхронная мощность генератора [МВт],
Рт г – механическая мощность на валу генератора [МВт],
Угол рот – угол ротора генератора [град],
Eq – ЭДС Eq генератора [кВ],
E’q рас – расчетная ЭДС E’qр генератора [кВ],

E"d – ЭДС E"d генератора [кВ],
E"q – ЭДС E"q генератора [кВ],
Eг – модуль ЭДС E’ или E" [кВ]. E’ для генераторов, у которых принято E’ = const; E" для генераторов, у которых учитываются электромагнитные переходные процессы,
Up – напряжение на выходе регулятора возбуждения генератора [кВ],
Iг – модуль тока статора генератора [кА],
Sг – скольжения ротора генератора [%],
Eqe – напряжение на выходе возбудителя генератора Eqe [кВ],
Угол Eг – угол ЭДС E’ или E" [град] (в зависимости от способа задания генератора),
Угол Iг – угол тока статора генератора [град],
Wк рот – кинетическая энергия относительного движения ротора [МВт·с]1000 (если скольжение генератора отрицательно, то кинетической энергии присваивается знак "-"),
Uрв – напряжение на входе регулятора возбуждения генератора [кВ],
Id – составляющая тока статора генератора Id [кА],
Iq – составляющая тока статора генератора Iq [кА],
Арот – ускорение ротора генератора [Гц/с],
Отн угол рот <I> <J> относительный угол ротора генератора [град],
Fрв – частота в канале частоты регулятора возбуждения [Гц],
<I> <J> - номера узлов.

УЗЛЫ

Pн – активная мощность нагрузки [МВт],
Qн – реактивная мощность нагрузки [Мвар],
Pш – активная мощность шунта [МВт],
Qш – реактивная мощность шунта [Мвар],
Угол U – угол напряжения [град],
Отн угол U <I> <J> – относительный угол напряжения [град], т.е. разность между углом напряжения в узле <I> и углом ротора генератора <J>,
Разн. углов U <I> <J> – разность углов напряжений узлах <I> <J> [град],
U – модуль напряжения в узле [кВ],
Частота – расчетная частота в узле [Гц],
Sp ад – скольжение ротора асинхронного двигателя относительно синхронно вращающейся оси [%],
S дв – скольжение ротора асинхронного двигателя относительно вектора напряжения своего узла [%],
Su – скольжение вектора напряжения [%],
Мтор ад – тормозной момент (момент сопротивления) асинхронного

двигателя [о.е.], Мэл ад – электромагнитный момент асинхронного двигателя [о.е.]. Примечание: в о.е. в номинальном режиме АД момент равен $\cos\varphi_{ном}$. Iша – активная составляющая тока шунта [кА], Iшr – реактивная составляющая тока шунта [кА], <I> <J> – номера узлов.
ВЕТВИ
Pij – переток активной мщности [МВт], Qij – переток реактивной мощности [Мвар], Iлин – модуль токов по связи [кА], Угол Iлин – угол тока по связи [град], Zлин – модуль расчетного полного сопротивления от узла I в направлении связи I - J [Ом], Угол Z – угол сопротивления на связи I - J [град], Угол реле <Zк1> <Zк2> – угол реле [град], Rлин – активное сопртивление линии [Ом], Хлин – реактивное сопртивление линии [Ом], <I> <J> – номера узлов, <Nп> – номер параллельной ветви, <Zk1> <Zk2> – min и max сопротивления реле сопротивления.

Приложение 5

П5. Состав механизмов собственных нужд для энергоблоков различной мощности

Таблица П2.1

Мощность блока, МВт	АГРЕГАТ			МЕХАНИЗМ					
	Обоз.	$K_з$	P_Σ	Кол-во	$P_{расч.\ уд.}$	$n_о$	$M_{ст}$	$J_{мех}$	p
	–	о.е.	кВт	шт.	кВт	об/мин	о.е.	кг·м^2	о.е.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
50-60	ПН	0,8	4000	2	2000	3000	0,13	4,75	3
	ЦН	0,7	660	2	330	375	0,13	300	2
	КН	0,6	320	2	160	1000	0,15	5,1	3
	ВГД	0,8	100	2	50	1000	0,12	56	2
	ДВ	0,9/0,7	500/210	2	250/105	1000/750	0,1	400	2
	МВ	0,8	400	2	200	1500	0,19	190	2
	ДС	0,9	540	2	270	750	0,15	1125	2
	РВ	0,7	800	1	800	1000	0,1	1125	1
	БН	0,67	600	2	300	1000	0,15	22	2
	М	0,75	1000	2	500	500	0,79	850	0
	Д	0,6	230	1	230	500	0.9	4625	0
100–125	ПН	0,8	6400	2	3200	3000	0,13	6	3
	ЦН	0,7	1000	2	500	500	0,13	150	2
	КН	0,6	500	2	250	1500	0,15	3	3
	ВГД	0,8	190	2	95	1000	0,12	112	2
	ДВ	0,9/0,7	800/340	2	400/170	600/500	0,1	575	2
	МВ	0,8	750	3	250	1500	0,19	220	2
	ДС	0,9	1000	2	500	750	0,15	1925	2
	РВ	0,7	1100	1	1100	1000	0,1	1125	1
	БН	0,67	1000	2	500	750	0,15	15	2
	М	0,75	1600	2	800	750	0,8	1000	0

	Д	0,6	460	2	230	500	0.9	4625	0
Мощ-ность блока, МВт	Обоз.	$K_з$	P_Σ	Кол-во	$P_{\text{расч. уд.}}$	n_0	$M_{ст}$	$J_{мех}$	p
	–	о.е.	кВт	шт.	кВт	об/ мин	о.е.	кг·м^2	о.е.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
160-165	ПН	0,7	8600	2	4300	3000	0,11	54	3
	ЦН	0,9	1600	2	800	375	0,12	300	2
	КН	0,85	640	2	320	1500	0,13	3,75	3
	ВГД	0,7	300	2	150	750	0,11	434	2
	ДВ	0,6/0,9	1260/320	2	630/320	750/600	0,09	1575	2
	МВ	0,6	800	2	400	1500	0,15	259	2
	ДС	0,55	1600	2	800	750	0,16	3500	2
	РВ	0,7	1100	1	1100	1000	0,1	1125	1
	БН	0,7	1000	2	500	750	0,2	10,2	2
	М	0,6	2000	2	1000	750	0,8	59	0
	Д	0,7	1600	2	800	600	0,9	4625	0
200–220	ПН	0,7	16000	2	8000	3000	0,1	1,25	3
	ЦН	0,9	2500	2	1250	375	0,1	300	2
	КН	0,85	1000	2	500	1500	0,12	3,75	3
	ВГД	0,7	400	2	200	1000	0,11	550	2
	ДВ	0,6/0,9	1260/640	2	630/320	750/600	0,1	1575	2
	МВ	0,6	1260	2	630	1500	0,16	382	2
	ДС	0,5	2600	2	1300	600	0,09	2812	2
	РВ	0,7	1800	1	1800	1000	0,1	1125	1
	БН	0,7	1200	2	600	750	0,2	21,3	3
	М	0,6	3000	3	1000	750	0,8	59	0
	Д	0,7	800	1	800	600	0,96	4625	0

Мощность блока, МВт	Обоз.	$K_з$	P_Σ	Кол-во	$P_{расч.\ уд.}$	n_0	$M_{ст}$	$J_{мех}$	p
	–	о.е.	кВт	шт.	кВт	об/мин	о.е.	кг·м^2	о.е.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
300–320	ПН	0,83	8000	1	8000	3000	0,12	1,25	3
	ЦН	0,85	2000	2	1000	500	0,13	150	2
	КН	0,91	1500	3	500	1500	0,14	3,75	3
	ВГД	0,82	500	2	250	750	0,12	550	2
	ДВ	0,63/0,85	1600/800	2	800/400	750/600	0,11	2150	2
	МВ	0,65	1250	2	630	1500	0,17	382	2
	ДС	0,71	3400	2	1700	500	0,1	5375	2
	РВ	0,5	1800	1	1800	750	0,1	1125	1
	БН	0,64	2250	3	750	1500	0,13	27	3
	М	0,6	4000	4	1000	600	0,99	4634	0
	Д	0,9	1250	1	1250	500	0,97	4625	0
500	ПН	0,93	8000	1	8000	3000	0,14	1,25	3
	ЦН	0,75	2500	2	1250	375	0,14	300	2
	КН	0,45	2500	5	500	1500	0,14	3,75	3
	ВГД	0,75	750	3	250	750	0,12	550	2
	ДВ	0,42/0,45	3000/1500	3	1000/500	750/600	0,12	3250	2
	МВ	0,65	1600	2	800	1500	0,16	436	2
	ДС	0,47	5100	3	1700	500	0,11	5375	2
	РВ	0,72	3200	1	3200	750	0,11	1125	1
	БН	0,57	4000	4	1000	1500	0,15	27	3
	М	0,6	6400	4	1600	600	0,99	4634	0
	Д	0,9	1600	2	800	500	0,97	4625	0

	К	0,7	3400	2	1700	3000	0,2	2000	1
Мощ-ность блока, МВт	Обоз.	$K_з$	P_Σ	Кол-во	$P_{расч.\ уд.}$	n_0	$M_{ст}$	$J_{мех}$	p
	–	о.е.	кВт	шт.	кВт	об/ мин	о.е.	кг·м^2	о.е.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
800	ПН	0,96	8000	1	8000	3000	0,15	1,25	3
	ЦН	0,59	5000	4	1250	375	0,15	300	2
	КН	0,79	3000	6	500	1500	0,15	3,75	3
	ВГД	0,6	1600	4	400	750	0,11	550	2
	ДВ	0,7/0,8	4000/2000	4	1000/500	750/600	0,12	3250	2
	МВ	0,65	2000	2	1000	1500	0,17	436	2
	ДС	0,54	6800	4	1700	600	0,12	5375	2
	РВ	0,95	4000	2	2000	750	0,12	1125	1
	БН	0,67	3000	6	500	3000	0,16	0,59	3
	М	0,75	8000	4	2000	100	0,79	4634	0
	Д	0,8	2500	2	1250	500	0,97	4625	0
	К	0,7	5000	2	2500	3000	0,2	2000	1
1200	ЦН	0,97	5100	3	1700	375	0,19	3000	3
	КН1	0,8	800	2	400	1000	0,16	6,65	3
	КН2	0,85	6000	3	2000	1500	0,15	12,5	3
	ДВ	0,45/0,6	5000/3000	4	1250/750	750/600	0,12	3250	2
	ЭВД	0,7	12600	2	6300	1500	0,12	550	2
	ДС	0,8	8000	4	1700	600	0,13	5375	2
	РВ	0,7	4000	2	2000	750	0,12	1125	1
	М	0,6	8000	4	2000	1500	0,8	4634	0
	Д	0,9	2500	2	1250	600	0,97	4625	0
	К	0,7	6000	2	3000	3000	0,2	2000	1

Принятые в таблице обозначения

ПН – питательный насос,
ЦН – циркуляционный насос,
КН – конденсационный насос,
ВГД – вентилятор горячего дутья,
ДС – дымосос,
МВ – мельничный вентилятор,
ДВ – дутьевой вентилятор,
РВ – резервный возбудитель,
БН – бустерный (багерный) насос,
М – мельница молотковая или барабанная,
Д – дробилка,
КН1(2) – конденсационный насос первой (второй) ступени,
К – компрессор,
ЭВД – электровоздуходувка,
$K_З$ – коэффициент загрузки,
P_Σ – суммарная мощность конкретных агрегатов собственных нужд,
$P_{\text{расч.уд.}}$ – расчетная мощность электродвигателя единичного механизма с.н.,
$n_о$ – скорость вращения механизма,
$M_{ст}$ – статический момент сопротивления механизма,
$J_{мех}$ – момент инерции механизма,
p – показатель степени, характеризующий тип механической характеристики механизма.

Учебное издание

ВАЙНШТЕЙН Роберт Александрович
ШЕСТАКОВА Вера Васильевна
КОЛОМИЕЦ Наталья Васильевна

ПРОГРАММНЫЕ КОМПЛЕКСЫ В УЧЕБНОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЧАСТИ СТАНЦИЙ

Учебное пособие

Научный редактор
доктор наук,
профессор *Б.В. Лукутин*

Редактор *О.Н. Свинцова*

Подписано к печати 00.00.2008. Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл.печ.л. 000. Уч.-изд.л. 000.
Заказ . Тираж экз.

Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2000

ИЗДАТЕЛЬСТВО ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.