

621.3  
У 81

3174



Министерство образования  
Республики Беларусь

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

---

---

Кафедра «Электрические системы»

**УСТОЙЧИВОСТЬ  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ  
СБОРНИК ЗАДАЧ И ПРИМЕРЫ ИХ РЕШЕНИЯ**

Методическое пособие к практическим занятиям

Минск 2007

Министерство образования Республики Беларусь  
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

---

---

Кафедра «Электрические системы»

УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

СБОРНИК ЗАДАЧ И ПРИМЕРЫ ИХ РЕШЕНИЯ

Методическое пособие к практическим занятиям  
по дисциплинам «Устойчивость электроэнергетических систем»,  
«Переходные процессы в электроэнергетических системах»,  
«Надежность и устойчивость работы систем электроснабжения»  
для студентов электроэнергетических специальностей вузов

Под редакцией доцента Е.В. Калентионка

Минск 2007

УДК 621.311.014.3

ББК 31.279-04я73

К17 У81

Авторы:

Е.В. Калентионок, А.А. Волков, Е.В. Мышковец,  
В.М. Цыганков

Рецензенты:

О.А. Жерко, А.М. Зорич, Т.А. Шиманская-Семенова

**Калентионок, Е.В.**

К 17 Устойчивость электроэнергетических систем. Сборник задач и примеры их решения: методическое пособие к практическим занятиям по дисциплинам «Устойчивость электроэнергетических систем», «Переходные процессы в электроэнергетических системах», «Надежность и устойчивость работы систем электроснабжения» для студентов электроэнергетических специальностей вузов / Е.В. Калентионок, А.А. Волков, Е.В. Мышковец, В.М. Цыганков; под ред. Е.В. Калентионка. – Минск : БНТУ, 2007. – 131 с.

ISBN 978-985-479-655-0.

В методическом пособии приведены краткие теоретические положения, составлены задачи для индивидуального решения по различным разделам дисциплин. Даны примеры решения задач по устойчивости и переходным электромеханическим процессам в электроэнергетических системах.

Пособие предназначено для студентов очного и заочного отделений специальностей 1-43 01 01 «Электрические станции», 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети», 1-43 01 03 «Электроснабжение», 1-53 01 04 «Автоматизация производственных процессов в энергетике», 1-08 01 01 «Профессиональное обучение» специализация «Энергетика», а также для инженеров, чья деятельность связана с оценкой и обеспечением устойчивости электроэнергетических систем.

УДК 621.311.014.3

ББК 31.279-04я73

ISBN 978-985-479-655-0

© БНТУ, 2007

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий сборник – это первая попытка создать комплексное методическое пособие к практическим занятиям по различным разделам курсов устойчивости и электромеханических переходных процессов электроэнергетических систем. Наиболее полно переходные процессы электрических систем в примерах и иллюстрациях представлены в уникальной книге [1]. Однако она не позволяет дать студенту задачи по индивидуальному варианту, кроме того, книга была издана 40 лет назад и в настоящее время малодоступна. Другие, позднее изданные книги, в которых содержатся примеры решения задач по устойчивости и переходным процессам, приведены в списке литературы [2 – 9].

Авторы включили в пособие наиболее характерные задачи, отражающие основные разделы курсов, связанных с нарушением устойчивости и переходными электромеханическими процессами в электроэнергетических системах. Весь материал, приведенный в сборнике, ориентирован на вычисления с помощью простейших расчетных средств. Получив практические навыки расчета простейших задач, учащиеся смогут пользоваться сложными промышленными программами на ЭВМ.

Данный сборник задач может быть использован для аудиторных и домашних занятий студентов очного отделения, а также в качестве пособия при выполнении контрольных и курсовых работ и для аудиторных занятий студентов-заочников.

Материал рукописи подготовлен следующим образом:

|                  |  |
|------------------|--|
| Е.В. Калентиюнок | предисловие, задачи 1.1, 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.6, 3.1, 3.2, 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 5.1, 5.2, общее редактирование рукописи |
| А.А. Волков      | задачи 2.7, 2.8, 2.9, 2.10, 2.11, 4.7  |
| Е.В. Мышковец    | задачи 3.3, 3.4, 3.5, 4.5, 4.6, 5.3, 5.4   |
| В.М. Цыганков    | задачи 1.2, 1.3  |

Авторы выражают искреннюю благодарность доценту Шиманской-Семеновой Т.А., старшим преподавателям Зоричу А.М. и Жерко О.А. за редактирование рукописи, сделанные замечания и данные советы, способствующие улучшению издания.

Авторы считают своим долгом выразить также благодарность Заборской Е.А. и Ковенской Е.Л., которые кропотливо трудились, подготавливая рукопись к изданию.

# 1. СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

## Задача 1.1

На рис. 1.1 приведена принципиальная схема электрической системы. Для одного из заданных вариантов (табл. 1.1 и 1.2) требуется составить схему замещения системы и определить ее параметры.

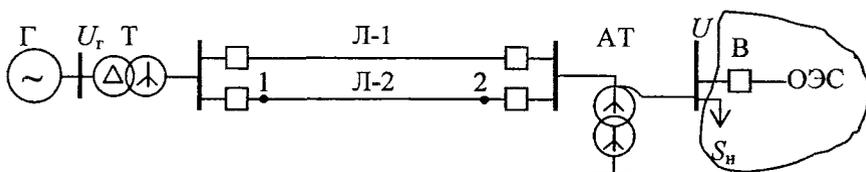


Рис. 1.1. Схема электрической системы

Таблица 1.1

Параметры элементов электрической системы

| Последняя цифра шифра  | 0            | 1            | 2          | 3             | 4            | 5             | 6          | 7          | 8            | 9           |
|------------------------|--------------|--------------|------------|---------------|--------------|---------------|------------|------------|--------------|-------------|
| 1                      | 2            | 3            | 4          | 5             | 6            | 7             | 8          | 9          | 10           | 11          |
| $P_{нг}$ , МВт         | 60           | 200          | 300        | 100           | 150          | 200           | 300        | 160        | 100          | 60          |
| $\cos\varphi_{нг}$     | 0,8          | 0,9          | 0,85       | 0,85          | 0,85         | 0,9           | 0,9        | 0,85       | 0,85         | 0,85        |
| $U_{нг}$ , кВ          | 10,5         | 13,8         | 20         | 15,75         | 10,5         | 15,75         | 20         | 18         | 10,5         | 6,3         |
| Количество блоков, $n$ | 1            | 1            | 1          | 3             | 1            | 2             | 2          | 2          | 2            | 2           |
| $x_d$ , %              | 200          | 210          | 186        | 210           | 220          | 197           | 210        | 240        | 190          | 161         |
| $x'_d$ , %             | 32           | 30           | 27         | 35            | 32,9         | 29            | 26         | 29         | 28           | 28          |
| $x_2$ , %              | 28           | 27           | 22         | 30            | 28           | 25            | 21         | 26         | 24           | 22          |
| $S_{нг}$ , МВ·А        | 80           | 250          | 400        | 125           | 200          | 250           | 400        | 200        | 125          | 80          |
| $n_T$                  | 1            | 1            | 1          | 3             | 1            | 2             | 2          | 2          | 2            | 2           |
| $K_T$                  | 121/<br>10,5 | 242/<br>13,8 | 330/<br>20 | 242/<br>15,75 | 120/<br>10,5 | 242/<br>15,75 | 330/<br>20 | 242/<br>18 | 120/<br>10,5 | 120/<br>6,3 |
| $S_{нАТ}$ , МВ·А       | 125          | 300          | 400        | 125           | 240          | 300           | 400        | 240        | 125          | 125         |
| $n_{АТ}$               | 1            | 1            | 1          | 3             | 1            | 2             | 2          | 2          | 2            | 2           |

|                                  |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |
|----------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 1                                | 2           | 3           | 4           | 5           | 6           | 7           | 8           | 9           | 10          | 11          |
| $K_{AT}$                         | 330/<br>115 | 330/<br>242 | 787/<br>330 | 330/<br>242 | 347/<br>115 | 347/<br>242 | 787/<br>330 | 347/<br>242 | 330/<br>121 | 330/<br>121 |
| $U_{к, в-с}$                     | 10          | 11          | 8           | 9           | 10          | 7           | 7,6         | 8           | 9           | 10          |
| $U$ , кВ                         | 330         | 330         | 750         | 330         | 330         | 330         | 750         | 330         | 330         | 330         |
| $U_{нл}$ , кВ                    | 110         | 220         | 330         | 220         | 110         | 220         | 330         | 220         | 110         | 110         |
| $x_0$ , Ом/км                    | 0,42        | 0,41        | 0,32        | 0,40        | 0,41        | 0,42        | 0,33        | 0,41        | 0,43        | 0,42        |
| $P_{н}$ , МВт                    | 55          | 180         | 250         | 195         | 140         | 190         | 480         | 300         | 190         | 110         |
| Вид КЗ                           | $K^{(2)}$   | $K^{(1,1)}$ | $K^{(1)}$   | $K^{(2)}$   | $K^{(1,1)}$ | $K^{(2)}$   | $K^{(1,1)}$ | $K^{(2)}$   | $K^{(1,1)}$ | $K^{(2)}$   |
| Место КЗ                         | 1           | 2           | 2           | 1           | 2           | 1           | 2           | 1           | 2           | 1           |
| Длительность КЗ ( $t_{отк}$ ), с | 0,30        | 0,2         | 0,16        | 0,25        | 0,34        | 0,24        | 0,16        | 0,2         | 0,35        | 0,32        |

*Примечания:*

1. Шифр: для студентов дневного отделения – номер по журналу, для студентов заочного отделения – индивидуальный номер зачетной книжки.

2. Значение  $U_k$  трансформатора рассчитывается в зависимости от  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  – количество букв в фамилии, имени и отчестве студента:

$$U_k = (\alpha + \beta + \gamma) / 3, \%$$

3. Номинальное напряжение трансформаторов  $U_{HT}$  и автотрансформаторов  $U_{НАТ}$  принять по числителю  $K_T$  и  $K_{AT}$  соответственно.

4. Вид КЗ:  $K^{(1)}$  – однофазное;  $K^{(2)}$  – двухфазное;  $K^{(1,1)}$  – двухфазное на землю.

5. Сопротивление нулевой последовательности линии  $x_{л0} = 4,0x_{л}$ .

6. Реактивная мощность нагрузки  $Q_H = 0,5P_H$ .

7. Статические характеристики нагрузки по напряжению:

$$P = P_H (0,83 - 0,3U_* + 0,47U_*^2);$$

$$Q = Q_H (4,9 - 10,1U_* + 6,2U_*^2).$$

Таблица 1.2

Исходные данные по длинам линий и постоянной механической инерции генераторов

| Первая буква фамилии | Последняя цифра номера варианта |     |     |     |     |     |     |     |     |     | $T_{гр}, с$ |
|----------------------|---------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------------|
|                      | 0                               | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   |             |
|                      | $\ell = \ell_1 = \ell_2, км$    |     |     |     |     |     |     |     |     |     |             |
| А, Б, В              | 120                             | 420 | 520 | 160 | 200 | 300 | 410 | 250 | 60  | 110 | 4           |
| Г, Д, Е,             | 125                             | 430 | 530 | 180 | 195 | 290 | 400 | 260 | 65  | 120 | 5           |
| Ж, З, И              | 130                             | 440 | 540 | 190 | 190 | 280 | 390 | 270 | 70  | 130 | 6           |
| К, Л                 | 135                             | 450 | 560 | 200 | 185 | 270 | 380 | 280 | 75  | 140 | 7           |
| М, Н, О              | 140                             | 460 | 580 | 210 | 170 | 260 | 370 | 290 | 80  | 150 | 8           |
| П, Р, С              | 145                             | 470 | 600 | 220 | 175 | 250 | 360 | 300 | 85  | 160 | 9           |
| Т, У, Ф              | 150                             | 480 | 620 | 230 | 160 | 240 | 350 | 310 | 90  | 170 | 10          |
| Х, Ц, Ч, Ш           | 155                             | 490 | 640 | 240 | 155 | 230 | 340 | 315 | 95  | 180 | 11          |
| Щ, Э, Ю, Я           | 160                             | 500 | 650 | 250 | 150 | 220 | 330 | 320 | 100 | 190 | 12          |

**Решение.** Схему замещения данной системы (см. рис. 1.1) можно представить в виде, приведенном на рис. 1.2.

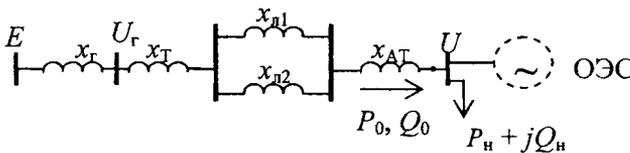


Рис. 1.2. Схема замещения электрической системы

Расчет устойчивости можно проводить как в абсолютных, так и относительных единицах. Но удобнее такие расчеты производить в системе относительных единиц. Для рассматриваемой системы за базисные величины целесообразно принять: активную мощность ( $P_0$ ), которая передается генераторами в ОЭС, в данном случае равную мощности нагрузки ( $P_n$ )  $S_б = P_0 = P_n$ , и значение напряжения на шинах системы  $U_б = U$ . Поскольку в электрической системе имеются, как правило, несколько ступеней напряжения, то все сопротивления системы должны быть приведены к одной ступени напряжения, принятой за базисную

$$X_* = X[Om] \frac{S_6}{U_6^2} \cdot K_1^2 \cdot K_2^2 \cdot \dots \cdot K_n^2, \quad (1.1)$$

где  $X$  – сопротивление элемента системы в абсолютных единицах на своей ступени напряжения;

$K_1, K_2, K_n$  – коэффициенты трансформации, через которые данное сопротивление связано со ступенью базисного напряжения (берутся в направлении от ступени с базисным напряжением к ступени с сопротивлением, которое рассчитываем).

В отношении данной системы и принятого базисного напряжения относительные индуктивные сопротивления генераторов станции находятся по формулам:

$$\begin{aligned} x_{d*} &= \frac{x_d \%}{100 \cdot n} \cdot \frac{U_{\text{нг}}^2}{S_{\text{нг}}} \cdot \frac{S_6}{U_6^2} \cdot K_{\text{T}}^2 \cdot K_{\text{АТ}}^2, \\ x_{d'*} &= \frac{x_{d'} \%}{100 \cdot n} \cdot \frac{U_{\text{нг}}^2}{S_{\text{нг}}} \cdot \frac{S_6}{U_6^2} \cdot K_{\text{T}}^2 \cdot K_{\text{АТ}}^2, \\ x_{2*} &= \frac{x_2 \%}{100 \cdot n} \cdot \frac{U_{\text{нг}}^2}{S_{\text{нг}}} \cdot \frac{S_6}{U_6^2} \cdot K_{\text{T}}^2 \cdot K_{\text{АТ}}^2, \end{aligned} \quad (1.2)$$

где  $x_{d*}, x_{d'*}, x_{2*}$  – синхронное, переходное сопротивления и сопротивление обратной последовательности генераторов станции.

Индуктивные сопротивления трансформатора и автотрансформатора определяются из уравнений:

$$\begin{aligned} x_{\text{T}*} &= \frac{U_{\text{к}} \%}{100} \cdot \frac{U_{\text{нг}}^2}{S_{\text{нг}}} \cdot \frac{S_6}{U_6^2} \cdot K_{\text{АТ}}^2; \\ x_{\text{АТ}*} &= \frac{U_{\text{к,В-С}} \%}{100} \cdot \frac{U_{\text{НАТ}}^2}{S_{\text{НАТ}}} \cdot \frac{S_6}{U_6^2}. \end{aligned} \quad (1.3)$$

Индуктивное сопротивление одной линии

$$x_{л1*} = x_0 \cdot \ell \frac{S_6}{U_6^2} \cdot K_{AT}^2. \quad (1.4)$$

Индуктивное сопротивление двух параллельных линий

$$x_{л*} = \frac{x_{л1*}}{2}. \quad (1.5)$$

Сопротивление нулевой последовательности

$$x_{л0} \approx 4x_{л*}. \quad (1.6)$$

Постоянная механической инерции генераторов станции

$$T_{j*} = \frac{T_{jГ} \cdot n \cdot S_{нГ}}{S_6}. \quad (1.7)$$

Сопротивление внешней сети системы в нормальном режиме

$$x_{с*} = x_{Г*} + x_{л*} + x_{AT*}. \quad (1.8)$$

Сопротивление внешней сети системы при отключении одной линии

$$x_{с1*} = x_{Г*} + x_{л1*} + x_{AT*}. \quad (1.9)$$

Мощности, которые выдаются в приемную систему и потребляются нагрузкой:

$$P_{0*} = P_{н*} = \frac{P_{н}}{S_6}; \quad (1.10)$$

$$Q_{0*} = Q_{н*} = \frac{Q_{н}}{S_6}.$$

## Напряжение на шинах системы

$$U_* = \frac{U}{U_6}. \quad (1.11)$$

В дальнейших примерах знак «\*» в относительных единицах величин опускается.

**Пример к задаче 1.1.** Для электрической системы (см. рис. 1.1) требуется найти параметры схемы замещения (см. рис. 1.2).

Параметры элементов системы:

Генератор Г:  $P_{\text{Г}} = 150 \text{ МВт}$ ,  $\cos\varphi_{\text{Г}} = 0,85$ ,  $U_{\text{Г}} = 18 \text{ кВ}$ ,  $x_{d\text{Г}} = 148,7 \%$ ,  $x'_d = 18 \%$ ,  $x_{2\text{Г}} = 14,5 \%$ ,  $T_{\text{Г}} = 8,0 \text{ с}$ ,  $n = 1$ .

Трансформатор Т:  $S_{\text{Т}} = 200 \text{ МВ}\cdot\text{А}$ ,  $U_{\text{Т}} = 242 \text{ кВ}$ ,  $K_{\text{Т}} = 242/18$ ,  $U_{\text{к}} = 11 \%$ ,  $n_{\text{Т}} = 1$ .

Линии Л1, Л2:  $\ell = 120 \text{ км}$ ,  $x_0 = 0,43 \text{ Ом/км}$ .

Автотрансформатор АТ:  $S_{\text{НАТ}} = 240 \text{ МВ}\cdot\text{А}$ ,  $U_{\text{НАТ}} = 347 \text{ кВ}$ ,  $K_{\text{АТ}} = 347/242$ ,  $U_{\text{к,в-с}} = 7,6 \%$ ,  $n_{\text{АТ}} = 1$ .

Нагрузка:  $P_{\text{н}} = 140 \text{ МВт}$ ,  $Q_{\text{н}} = 70 \text{ Мвар}$ .

**Решение.** Расчет параметров элементов системы выполним в относительных единицах. Примем в качестве базисных величин номинальное напряжение ОЭС  $U_6 = 330 \text{ кВ}$  и активную номинальную мощность нагрузки  $S_6 = 140 \text{ МВ}\cdot\text{А}$ .

С учетом действительных коэффициентов трансформации получаем следующие значения реактивных сопротивлений генератора:

$$x_d = \frac{x_{d\text{Г}} \cdot U_{\text{Г}}^2 \cdot S_6}{100 \cdot S_{\text{Г}} \cdot U_6^2} \cdot K_{\text{Т}}^2 \cdot K_{\text{АТ}}^2 = \frac{148,7 \cdot 18^2 \cdot 0,85 \cdot 140}{100 \cdot 150 \cdot 330^2} \cdot \left(\frac{242}{18}\right)^2 \cdot \left(\frac{347}{242}\right)^2 = 1,3;$$

$$x'_d = \frac{x'_d \cdot U_{\text{Г}}^2 \cdot S_6}{100 \cdot S_{\text{Г}} \cdot U_6^2} \cdot K_{\text{Т}}^2 \cdot K_{\text{АТ}}^2 = \frac{18 \cdot 18^2 \cdot 0,85 \cdot 140}{100 \cdot 150 \cdot 330^2} \cdot \left(\frac{242}{18}\right)^2 \cdot \left(\frac{347}{242}\right)^2 = 0,16;$$

$$x_{2\text{Г}} = \frac{x_{2\text{Г}} \cdot U_{\text{Г}}^2 \cdot S_6}{100 \cdot S_{\text{Г}} \cdot U_6^2} \cdot K_{\text{Т}}^2 \cdot K_{\text{АТ}}^2 = \frac{14,5 \cdot 18^2 \cdot 0,85 \cdot 140}{100 \cdot 150 \cdot 330^2} \cdot \left(\frac{242}{18}\right)^2 \cdot \left(\frac{347}{242}\right)^2 = 0,13.$$

Индуктивные сопротивления трансформатора и автотрансформатора:

$$x_T = \frac{U_K \cdot U_{HT}^2 \cdot S_6}{100 \cdot S_{HT} \cdot U_6^2} \cdot K_{AT}^2 = \frac{11 \cdot 242^2 \cdot 140}{100 \cdot 200 \cdot 330^2} \cdot \left(\frac{347}{242}\right)^2 = 0,09;$$

$$x_{AT} = \frac{U_{K,B-C} \cdot U_{НАТ}^2 \cdot S_6}{100 \cdot S_{НАТ} \cdot U_6^2} = \frac{7,6 \cdot 347^2 \cdot 140}{100 \cdot 240 \cdot 330^2} = 0,05.$$

Индуктивное сопротивление одной линии

$$x_{л1} = x_{л2} = x_0 \cdot \ell \cdot \frac{S_6}{U_6^2} \cdot K_{AT}^2 = 0,43 \cdot 120 \cdot \frac{140}{330^2} \cdot \left(\frac{347}{242}\right)^2 = 0,14,$$

двух линий

$$x_{л} = x_{л1} / 2 = 0,07.$$

Сопротивление передающей сети системы в нормальном режиме

$$x_c = x_T + x_{л} + x_{AT} = 0,09 + 0,07 + 0,05 = 0,21.$$

Мощность нагрузки:

$$P_H = P_H / S_6 = 140 / 140 = 1;$$

$$Q_H = Q_H / S_6 = 70 / 140 = 0,5.$$

Постоянная механической инерции генератора

$$T_j = \frac{T_{jГ} \cdot n \cdot S_{HT}}{S_6} = \frac{8,0 \cdot 1 \cdot 150}{0,85 \cdot 140} = 10,08 \text{ с.}$$

## Задача 1.2

На рис. 1.3 представлена схема замещения электрической системы. Требуется определить собственные и взаимные сопротивления электростанций методом преобразования схемы сети.

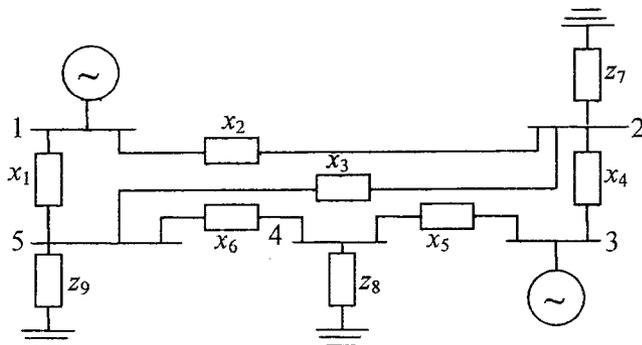


Рис. 1.3. Схема замещения электрической системы

Исходные данные по вариантам в относительных единицах представлены в табл. 1.3.

Таблица 1.3

### Параметры элементов схемы замещения электрической системы

| № варианта | $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ | $x_4$ | $x_5$ | $x_6$ | $z_7$        | $z_8$        | $z_9$        |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|--------------|--------------|
| 1          | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8            | 9            | 10           |
| 1          | 0,55  | 0,38  | 0,41  | 0,75  | 0,39  | 0,45  | $2,00+j0,40$ | $1,85+j0,39$ | $2,60+j0,75$ |
| 2          | 0,20  | 0,25  | 0,15  | 0,35  | 0,22  | 0,19  | $5,10+j3,18$ | $3,27+j1,74$ | $2,64+j2,67$ |
| 3          | 0,30  | 0,80  | 0,24  | 0,50  | 0,30  | 0,25  | $3,20+j1,80$ | $3,31+j2,50$ | $3,20+j2,40$ |
| 4          | 0,40  | 0,50  | 0,15  | 0,18  | 0,39  | 0,15  | $1,30+j0,51$ | $0,33+j0,13$ | $2,14+j1,40$ |
| 5          | 0,58  | 0,25  | 0,32  | 0,19  | 0,16  | 0,40  | $2,14+j1,06$ | $1,74+j0,85$ | $2,18+j1,20$ |
| 6          | 0,62  | 0,50  | 0,90  | 0,47  | 0,30  | 0,70  | $4,21+j2,01$ | $1,22+j0,60$ | $2,10+j0,92$ |
| 7          | 1,20  | 0,35  | 0,65  | 0,81  | 0,40  | 0,20  | $0,30+j0,27$ | $2,30+j1,60$ | $1,80+j1,50$ |
| 8          | 0,27  | 0,19  | 0,45  | 0,90  | 0,41  | 0,35  | $4,38+j2,73$ | $4,90+j3,05$ | $2,71+j2,30$ |
| 9          | 1,04  | 0,30  | 0,58  | 0,14  | 0,27  | 0,40  | $2,10+j1,50$ | $2,49+j2,01$ | $2,10+j1,90$ |
| 10         | 0,51  | 0,60  | 0,32  | 0,24  | 0,80  | 0,20  | $3,02+j1,88$ | $4,90+j3,05$ | $5,43+j4,78$ |
| 11         | 0,70  | 0,53  | 0,27  | 0,31  | 0,45  | 0,64  | $5,70+j3,00$ | $2,38+j1,92$ | $0,48+j0,26$ |
| 12         | 0,22  | 0,22  | 0,17  | 0,18  | 0,55  | 0,86  | $0,52+j0,17$ | $0,46+j0,34$ | $0,33+j1,30$ |
| 13         | 0,32  | 0,24  | 0,65  | 0,26  | 0,47  | 0,30  | $1,80+j1,45$ | $2,60+j2,10$ | $3,10+j1,60$ |

| 1  | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8          | 9          | 10         |
|----|------|------|------|------|------|------|------------|------------|------------|
| 14 | 0,19 | 0,32 | 0,17 | 0,10 | 0,44 | 0,54 | 1,50+j0,58 | 3,65+j2,94 | 0,47+j0,37 |
| 15 | 0,14 | 0,62 | 0,29 | 0,19 | 0,19 | 0,40 | 2,28+j1,11 | 1,58+j0,73 | 2,60+j1,27 |
| 16 | 0,31 | 0,50 | 0,35 | 0,18 | 0,26 | 0,22 | 3,45+j1,60 | 2,60+j1,20 | 4,30+j4,30 |
| 17 | 0,15 | 0,24 | 0,31 | 0,52 | 0,45 | 0,35 | 0,52+j0,25 | 2,70+j2,30 | 1,40+j0,85 |
| 18 | 0,64 | 0,20 | 0,46 | 0,30 | 0,14 | 0,65 | 3,32+j1,61 | 1,22+j0,60 | 3,70+j2,60 |
| 19 | 0,28 | 0,35 | 0,52 | 0,70 | 0,14 | 0,30 | 1,17+j0,85 | 2,10+j1,50 | 0,64+j0,48 |
| 20 | 0,40 | 0,50 | 0,24 | 0,12 | 0,35 | 0,25 | 4,10+j1,96 | 1,28+j0,96 | 2,30+j1,60 |
| 21 | 0,61 | 0,26 | 0,31 | 0,17 | 0,33 | 0,24 | 3,65+j1,70 | 2,60+j1,26 | 1,31+j1,34 |
| 22 | 0,55 | 0,35 | 0,28 | 0,64 | 0,32 | 0,16 | 4,50+j2,20 | 0,40+j0,30 | 2,14+j1,05 |
| 23 | 0,25 | 0,42 | 0,31 | 0,12 | 0,86 | 0,44 | 0,40+j0,20 | 5,00+j2,00 | 2,00+j1,80 |
| 24 | 0,35 | 0,18 | 0,42 | 0,24 | 0,78 | 0,54 | 0,60+j0,30 | 5,30+j2,30 | 2,20+j2,00 |
| 25 | 0,45 | 0,72 | 0,53 | 0,33 | 0,73 | 0,24 | 0,80+j0,40 | 4,30+j2,00 | 2,40+j1,10 |
| 26 | 0,52 | 0,32 | 0,63 | 0,17 | 0,61 | 0,44 | 0,90+j0,40 | 4,10+j2,00 | 2,60+j1,30 |
| 27 | 0,65 | 0,23 | 0,71 | 0,43 | 0,52 | 0,34 | 1,20+j0,60 | 3,00+j1,50 | 2,80+j1,40 |
| 28 | 0,75 | 0,54 | 0,21 | 0,72 | 0,48 | 0,64 | 1,60+j0,80 | 3,50+j1,70 | 1,80+j1,60 |
| 29 | 0,27 | 0,63 | 0,36 | 0,53 | 0,38 | 0,74 | 1,80+j0,90 | 3,80+j1,90 | 3,30+j3,00 |
| 30 | 0,48 | 0,28 | 0,48 | 0,61 | 0,22 | 0,84 | 4,20+j2,00 | 4,10+j2,00 | 2,30+j2,20 |
| 31 | 0,42 | 0,50 | 0,24 | 0,55 | 0,17 | 0,18 | 2,30+j1,60 | 4,39+j2,73 | 1,25+j0,60 |
| 32 | 0,54 | 0,25 | 0,15 | 0,25 | 0,65 | 0,19 | 4,90+j3,15 | 2,10+j1,54 | 2,10+j1,54 |
| 33 | 0,76 | 0,30 | 0,32 | 0,35 | 0,17 | 0,47 | 2,49+j2,01 | 3,12+j1,88 | 1,48+j0,96 |
| 34 | 0,29 | 0,35 | 0,90 | 0,45 | 0,29 | 0,81 | 4,95+j3,05 | 5,71+j3,00 | 2,64+j1,26 |

**Решение.** Преобразуем предлагаемую схему. Заменяем многолучевую звезду полным многоугольником (рис. 1.4). Используем зависимость

$$x_{ik} = x_i x_k \cdot \sum_{j=1}^m \frac{1}{x_j}. \quad (1.12)$$

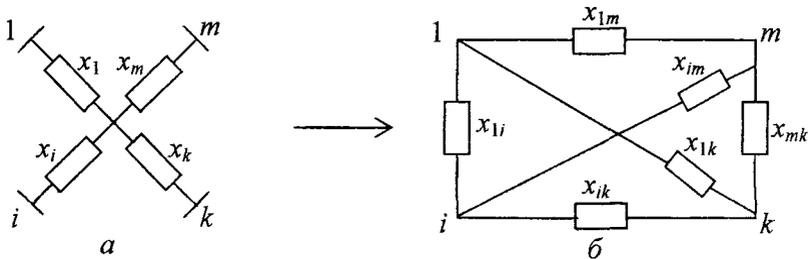


Рис. 1.4. Замена многолучевой звезды полным многоугольником:  
а – многолучевая звезда; б – полный многоугольник

На рис. 1.5 показано исключение узла 4.

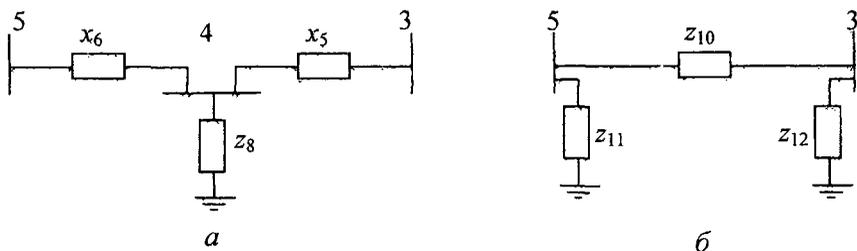


Рис. 1.5. Пример исключения узла 4:  
 а – схема связей узла 4; б – преобразованная схема без узла 4

$$z_{10} = x_6 \cdot x_5 \left( \frac{1}{x_6} + \frac{1}{x_5} + \frac{1}{z_8} \right);$$

$$z_{11} = x_6 \cdot z_8 \left( \frac{1}{x_6} + \frac{1}{x_5} + \frac{1}{z_8} \right);$$

$$z_{12} = x_5 \cdot z_8 \left( \frac{1}{x_6} + \frac{1}{x_5} + \frac{1}{z_8} \right).$$

Нетрудно заметить, что преобразование «звезды» в «треугольник» – частный случай вышеприведенного преобразования многолучевой звезды в полный многоугольник. Преобразовывая звезду в треугольник, имеем (см. рис. 1.5):

$$z_{10} = x_6 + x_5 + \frac{x_6 x_5}{z_8};$$

$$z_{11} = x_6 + z_8 + \frac{x_6 z_8}{x_5};$$

$$z_{12} = x_5 + z_8 + \frac{x_5 z_8}{x_6}.$$

При этом нетрудно доказать тождество

$$x_6 \cdot x_5 \left( \frac{1}{x_6} + \frac{1}{x_5} + \frac{1}{z_8} \right) = x_6 + x_5 + \frac{x_6 x_5}{z_8}.$$

Проделав умножение в левой части, имеем

$$x_5 + x_6 + \frac{x_6 x_5}{z_8} = x_6 + x_5 + \frac{x_6 x_5}{z_8}.$$

Покажем исключение узла 5 (рис. 1.6). Сопротивление  $z_{13}$  получим параллельным сложением  $z_9$  и  $z_{11}$ :

$$z_{13} = z_9 \parallel z_{11} = \frac{z_9 z_{11}}{z_9 + z_{11}};$$

$$z_{14} = x_1 \cdot z_{10} \left( \frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_3} + \frac{1}{z_{10}} + \frac{1}{z_{13}} \right);$$

$$z_{15} = x_3 \cdot z_{10} \left( \frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_3} + \frac{1}{z_{10}} + \frac{1}{z_{13}} \right);$$

$$z_{16} = x_1 \cdot x_3 \left( \frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_3} + \frac{1}{z_{10}} + \frac{1}{z_{13}} \right);$$

$$z_{17} = x_1 \cdot z_{13} \left( \frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_3} + \frac{1}{z_{10}} + \frac{1}{z_{13}} \right);$$

$$z_{18} = z_{13} \cdot x_3 \left( \frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_3} + \frac{1}{z_{10}} + \frac{1}{z_{13}} \right);$$

$$z_{19} = z_{13} \cdot z_{10} \left( \frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_3} + \frac{1}{z_{10}} + \frac{1}{z_{13}} \right).$$

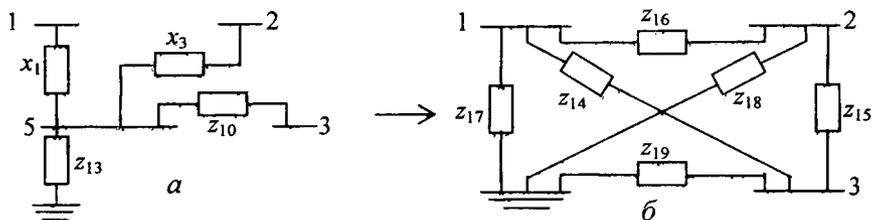


Рис. 1.6. Исключение узла 5:  
*a* – схема связей узла 5; *б* – преобразованная схема без узла 5

На рис. 1.7 представлено исключение узла 2.

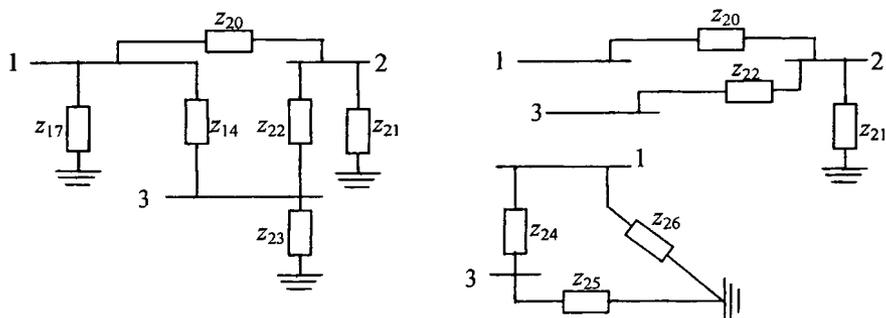


Рис. 1.7. Пример исключения узла 2

$$z_{20} = x_2 \parallel z_{16}, \quad z_{21} = z_7 \parallel z_{18}, \quad z_{22} = x_4 \parallel z_{15}, \quad z_{23} = z_{12} \parallel z_{19};$$

$$z_{24} = z_{20} \cdot z_{22} \left( \frac{1}{z_{20}} + \frac{1}{z_{22}} + \frac{1}{z_{21}} \right);$$

$$z_{25} = z_{22} \cdot z_{21} \left( \frac{1}{z_{20}} + \frac{1}{z_{22}} + \frac{1}{z_{21}} \right);$$

$$z_{26} = z_{20} \cdot z_{21} \left( \frac{1}{z_{20}} + \frac{1}{z_{22}} + \frac{1}{z_{21}} \right).$$

Приведем схему замещения к конечному виду (рис. 1.8):

$$z_{27} = z_{23} \parallel z_{25}, \quad z_{28} = z_{14} \parallel z_{24}, \quad z_{29} = z_{17} \parallel z_{26},$$

$$z_{30} = \frac{z_{28}z_{29}}{z_{27} + z_{28} + z_{29}};$$

$$z_{31} = \frac{z_{27}z_{28}}{z_{27} + z_{28} + z_{29}};$$

$$z_{32} = \frac{z_{27}z_{29}}{z_{27} + z_{28} + z_{29}}.$$

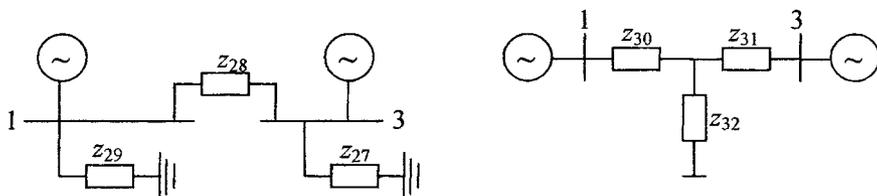


Рис. 1.8. Преобразованные схемы замещения

Собственные и взаимные сопротивления системы составят:

$$z_{11} = z_{30} + (z_{31} \parallel z_{32}); \quad z_{33} = z_{31} + (z_{30} \parallel z_{32});$$

$$z_{13} = z_{30} + z_{31} + \frac{z_{30}z_{31}}{z_{32}}.$$

### Задача 1.3

В электрической системе (рис. 1.9) требуется вычислить собственные и взаимные проводимости схемы. Расчет выполнить:

- 1) методом преобразований цепи;
- 2) методом единичных токов.

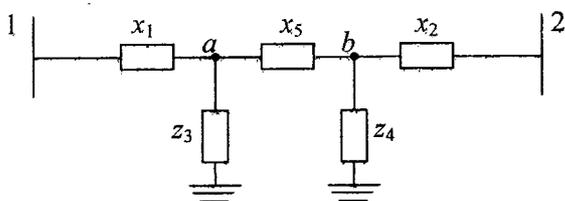


Рис. 1.9. Схема замещения электрической системы

Исходные данные и варианты представлены в табл. 1.4.

Таблица 1.4

Исходные данные к схеме системы, приведенной на рис. 1.9

| № варианта | $x_1$ | $x_2$ | $z_3$ | $z_4$ | $x_5$ |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1          | 2     | 2     | 4     | 6     | 2     |
| 2          | 1     | 4     | 5     | 8     | 4     |
| 3          | 3     | 5     | 4     | 2     | 6     |
| 4          | 5     | 1     | 2     | 4     | 7     |
| 5          | 2     | 4     | 3     | 5     | 6     |
| 6          | 1     | 3     | 6     | 2     | 6     |
| 7          | 3     | 1     | 2     | 8     | 5     |
| 8          | 4     | 2     | 1     | 3     | 9     |
| 9          | 5     | 6     | 2     | 4     | 7     |
| 10         | 7     | 6     | 2     | 3     | 7     |
| 11         | 9     | 10    | 4     | 3     | 9     |
| 12         | 6     | 1     | 3     | 8     | 3     |
| 13         | 10    | 2     | 2     | 7     | 4     |
| 14         | 3     | 8     | 5     | 3     | 5     |
| 15         | 4     | 6     | 4     | 2     | 2     |
| 16         | 8     | 6     | 6     | 4     | 7     |
| 17         | 5     | 3     | 3     | 4     | 3     |

| № варианта | $x_1$ | $x_2$ | $z_3$ | $z_4$ | $x_5$ |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 18         | 4     | 7     | 7     | 4     | 6     |
| 19         | 8     | 1     | 1     | 5     | 5     |
| 20         | 2     | 4     | 4     | 2     | 4     |
| 21         | 5     | 4     | 4     | 3     | 7     |
| 22         | 9     | 2     | 2     | 5     | 6     |
| 23         | 3     | 9     | 9     | 4     | 2     |
| 24         | 4     | 8     | 8     | 8     | 3     |
| 25         | 4     | 1     | 1     | 6     | 10    |
| 26         | 3     | 6     | 6     | 3     | 1     |
| 27         | 1     | 3     | 2     | 7     | 2     |
| 28         | 9     | 5     | 4     | 2     | 6     |
| 29         | 10    | 6     | 1     | 4     | 3     |
| 30         | 7     | 5     | 6     | 8     | 2     |
| 31         | 5     | 4     | 8     | 10    | 3     |
| 32         | 2     | 3     | 2     | 3     | 6     |
| 33         | 1     | 2     | 4     | 4     | 2     |
| 34         | 3     | 5     | 5     | 8     | 1     |

**Решение.** Решим задачу методом преобразований цепи. Для этого приводим схему замещения системы к  $T$ -образной форме. «Треугольник»  $ab0$  преобразовываем в «звезду» ( $ac$ ,  $bc$ ,  $c0$ ). Преобразованная схема замещения системы представлена на рис. 1.10.

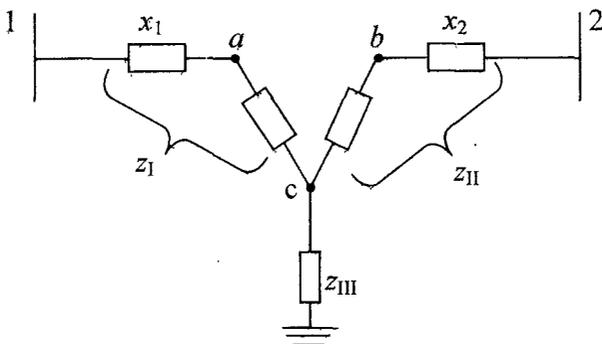


Рис. 1.10. Преобразованная схема замещения системы

$$z_{ac} = \frac{z_3 jx_5}{z_3 + jx_5 + z_4};$$

$$z_{bc} = \frac{jx_5 z_4}{z_3 + jx_5 + z_4};$$

$$z_{c0} = \frac{z_3 z_4}{z_3 + jx_5 + z_4}.$$

Определяем взаимные и собственные сопротивления электрической системы. Взаимные сопротивления находим как сторону треугольника:

$$z_I = jx_1 + z_{ac}, \quad z_{II} = jx_2 + z_{bc}, \quad z_{III} = z_{c0},$$

$$Z_{12} = z_I + z_{II} + z_I \cdot z_{II} / z_{III},$$

$$Z_{11} = z_I + (z_{II} \parallel z_{III}), \quad Z_{22} = z_{II} + (z_I \parallel z_{III}),$$

$$Y_{11} = 1/Z_{11}, \quad Y_{22} = 1/Z_{22}, \quad Y_{12} = 1/Z_{12}.$$

Для вычисления проводимостей  $Y_{11}$ ,  $Y_{22}$  и  $Y_{12}$  методом единичных токов соединяем точку 2 с обратным проводом схемы (рис. 1.11) и полагаем в этом режиме ток  $I_{20} = 1$ . В этом случае:

$$U_b = I_{20} \cdot x_2, \quad I_{b0} = U_b / z_4,$$

$$I_{ab} = I_{20} + I_{b0}, \quad \Delta U_{ab} = I_{ab} \cdot x_5, \quad U_a = U_b + \Delta U_{ab}, \quad I_{a0} = U_a / z_3,$$

$$I_1 = I_{ab} + I_{a0}, \quad \Delta U_1 = I_1 \cdot x_1, \quad U_1 = U_a + \Delta U_1,$$

$$z_{12} = U_1 / I_{20}, \quad Z_{11} = U_1 / I_1, \quad Y_{12} = 1 / Z_{12}, \quad Y_{11} = 1 / Z_{11}.$$

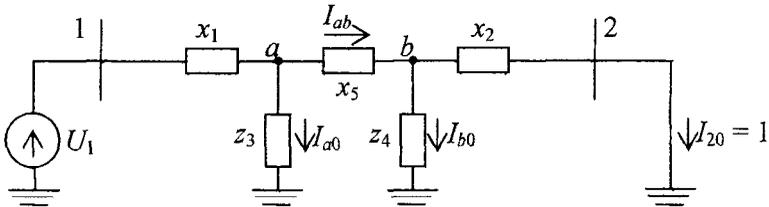


Рис. 1.11. Схема системы при наличии источника питания в узле 1

Для определения проводимости  $Y_{22}$  необходимо с обратным проводом соединить точку 1 (рис. 1.12) и положить в сопротивлении  $x_1$  ток  $I_{10} = 1$ . Выполняя расчет режима для схемы, рассчитываем аналогично определению  $Z_{11}$ ,  $U_a$ ,  $I'_{ab}$ ,  $I_{ba}$ ,  $\Delta U'_{ab}$ ,  $U'_b$ ,  $I_2$ ,  $\Delta U_2$ ,  $U_2$ .

$$Z_{22} = U_2 / I_2, \quad Y_{22} = 1 / Z_{22}, \quad Z_{12} = U_2 / I_{10}, \quad Y_{12} = 1 / Z_{12}.$$

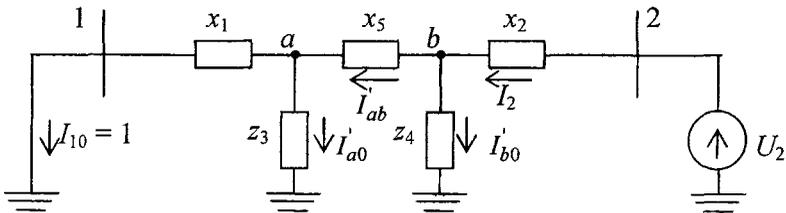


Рис. 1.12. Схема системы при наличии источника питания в узле 2

**Пример к задаче 1.3.** Для электрической системы, показанной в виде схемы замещения на рис. 1.9, требуется вычислить собственные и взаимные проводимости методами преобразования цепи и единичных токов. Принять  $jx_1 = j1$ ,  $jx_5 = j2$ ,  $jx_2 = j2$ ,  $z_3 = 10$ ,  $z_4 = 5$ .

**Решение.** Решая задачу методом преобразований, приводим цепь к  $T$ -образной форме. Для этого треугольник  $ab0$  схемы рис. 1.9 заменяем эквивалентной звездой:

$$z_{ac} = \frac{10 \cdot j2}{10 + 5 + j2} = \frac{j20(15 - j2)}{15^2 + 2^2} = 0,175 + j1,31;$$

$$z_{bc} = 0,0874 + j0,655;$$

$$z_{c0} = 3,28 - j0,437.$$

Сопrotивления ветвей  $T$ -образной схемы (см. рис. 1.10) равны:

$$z_I = j1 + 0,175 + j1,31 = 0,175 + j2,31 = 2,31 \angle 87,7^\circ;$$

$$z_{II} = j2 + 0,0874 + j0,655 = 0,0874 + j2,655 = 2,655 \angle 88,1^\circ;$$

$$z_{III} = 3,28 + j0,437 = 3,305 \angle -7,6^\circ.$$

Искомые проводимости определяются как

$$Y_{12} = \frac{1}{z_I + z_{II} + \frac{z_I z_{II}}{z_{III}}};$$

$$Y_{11} = \frac{1}{z_I + \frac{z_{II} z_{III}}{z_{II} + z_{III}}};$$

$$Y_{22} = \frac{1}{z_{II} + \frac{z_I z_{III}}{z_I + z_{III}}}.$$

Подставив соответствующие значения, получим:

$$\begin{aligned}
 Y_{12} &= \frac{1}{0,175 + j2,31 + 0,0874 + j2,655 + \frac{2,31 \angle 85,7^\circ \cdot 2,655 \angle 88,1^\circ}{3,305 \angle -7,6^\circ}} = \\
 &= \frac{1}{5,18 \angle 107,9^\circ}; \\
 Y_{11} &= \frac{1}{4,25 \angle 66,9^\circ}; \\
 Y_{22} &= \frac{1}{4,35 \angle 72^\circ}.
 \end{aligned}$$

Следовательно,

$$y_{12} = \frac{1}{5,18} = 0,193; \quad \alpha_{12} = 90 - 107,7 = -17,7^\circ;$$

$$y_{11} = \frac{1}{4,25} = 0,236; \quad \alpha_{11} = 90 - 66,9 = 23,1^\circ;$$

$$y_{22} = \frac{1}{4,35} = 0,230; \quad \alpha_{22} = 90 - 72 = 18,0^\circ.$$

Для вычисления проводимостей  $Y_{11}$  и  $Y_{12}$  методом единичных токов соединяем точку 2 с обратным проводом схемы (см. рис. 1.11) и полагаем в этом режиме ток  $\underline{I}_{20} = 1,0 \angle 0$ . В этом случае

$$\underline{U}_b = \underline{I}_{20} Z_2 = 1 \cdot j2 = j2;$$

$$\underline{I}_{b0} = \frac{\underline{U}_b}{Z_4} = \frac{j2}{5} = j0,4;$$

$$\underline{I}_{ab} = \underline{I}_{20} + \underline{I}_{b0} = 1 + j0,4;$$

$$\Delta \underline{U}_{ab} = \underline{U}_{ab} Z_5 = (1 + j0,4) \cdot j2 = -0,8 + j2;$$

$$\underline{U}_a = \underline{U}_{ab} + \Delta \underline{U}_{ab} = j2 - 0,8 + j2 = -0,8 + j4;$$

$$\underline{I}_{a0} = \frac{\underline{U}_a}{Z_3} = \frac{-0,8 + j4}{10} = -0,08 + j0,4;$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_{ab} + \underline{I}_{a0} = 1 + j0,4 - 0,08 + j0,4 = 0,92 + j0,8 = 1,22 \angle 41,0^\circ;$$

$$\Delta \underline{U}_1 = \underline{I}_1 Z_1 = (0,92 + j0,8) \cdot j1 = -0,8 + j0,92;$$

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_a + \Delta \underline{U}_1 = -0,8 + j4 + 0,8 + j0,92 = -1,6 + j4,92 = 5,18 \angle 108^\circ.$$

Следовательно, согласно определению

$$Y_{12} = \frac{1}{\underline{U}_1 / \underline{I}_{20}} = \frac{1}{5,18 \angle 108^\circ};$$

$$Y_{11} = \frac{1}{\frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_1}} = \frac{1}{\frac{5,18 \angle 108^\circ}{1,22 \angle 41^\circ}} = \frac{1}{4,25 \angle 67,0^\circ}.$$

Для определения проводимости  $Y_{22}$  необходимо с обратным проводом соединить точку 1 (см. рис. 1.12) и положить в сопротивлении  $Z_1$  ток  $\underline{I}_{10} = 1,0 \angle 0$ . Выполняя расчет режима для схемы (см. рис. 1.12), последовательно получаем:

$$\underline{U}_a = 1 \cdot j1 = j1;$$

$$\underline{I}'_{a0} = \frac{j1}{10} = j0,1;$$

$$\underline{I}_{ba} = 1 + j0,1;$$

$$\Delta \underline{U}'_{ab} = (1 + j0,1) \cdot j2 = -0,2 + j2;$$

$$\Delta \underline{U}'_b = j1 - 0,2 + j2 = -0,2 + j3;$$

$$\underline{I}'_{b0} = \frac{-0,2 + j3}{5} = -0,04 + j0,6;$$

$$\underline{I}_2 = 1 + j0,1 - 0,04 + j0,6 = 0,96 + j0,7 = 1,19 \angle 36,1^\circ;$$

$$\Delta \underline{U}_2 = (0,96 + j0,7) \cdot j2 = -1,4 + j2,92;$$

$$\underline{U}_2 = -0,2 + j3 - 1,4 + j1,92 = -1,6 + j4,92 = 5,18 \angle 108^\circ.$$

$$Y_{22} = \frac{1}{\frac{5,18 \angle 108^\circ}{1,19 \angle 36,1^\circ}} = \frac{1}{4,35 \angle 71,9^\circ}.$$

Взаимную проводимость находим как

$$Y_{12} = \frac{1}{\underline{U}_1 / \underline{I}_1} = \frac{1}{5,18 \angle 108^\circ}.$$

Этот расчет может служить для проверки достоверности предыдущих вычислений.

## 2. СТАТИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ И ХАРАКТЕРИСТИКИ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

### Задача 2.1

Для электрической системы (см. рис. 1.1) с генераторами без АРВ, с АРВ ПД и АРВ СД требуется:

1. Построить угловые характеристики мощности.
2. Графически определить пределы передаваемой мощности.
3. Рассчитать коэффициенты запаса статической устойчивости.

Параметры системы взять из задачи 1.1.

**Решение.** При проведении упрощенных расчетов статической устойчивости синхронные машины представляются по-разному в зависимости от типа автоматического регулирования возбуждения (АРВ). Общий подход к представлению генератора можно сформулировать следующим образом: в расчетах статической устойчивости генератор представляется такими ЭДС (напряжениями), которые АРВ генератора способны поддержать неизменными при изменении режима, и сопротивлениями, которые соответствуют им.

Рассмотрим три наиболее характерных типа регулирования возбуждения синхронных машин.

#### *Синхронные машины без автоматического регулятора возбуждения*

В этом случае регулирование тока возбуждения возможно только вручную, а синхронный генератор в расчетах устойчивости представляется неизменной ЭДС  $E_q$ , приложенной за синхронным сопротивлением  $x_d$ . При этом угловую характеристику мощности можно рассчитать по формуле

$$P = \frac{E_q U}{X_d \Sigma} \cdot \sin \delta, \quad (2.1)$$

где  $\delta$  – угол сдвига вектора ЭДС  $E_q$  относительно вектора напряжения системы  $U$ ;

$X_{d\Sigma} = x_d + x_c$  – суммарное индуктивное сопротивление системы.  
 Электродвижущая сила находится из выражения

$$E_q = \sqrt{\left(U + \frac{Q_0 X_{d\Sigma}}{U}\right)^2 + \left(\frac{P_0 X_{d\Sigma}}{U}\right)^2}. \quad (2.2)$$

Таким образом, подставляя постоянные значения  $E_q$ ,  $U$ ,  $X_{d\Sigma}$  в формулу (2.1) и изменяя угол  $\delta$  от  $0^\circ$  до  $180^\circ$ , можно построить угловую характеристику мощности системы с генераторами без АРВ (рис. 2.1, зависимость 1).

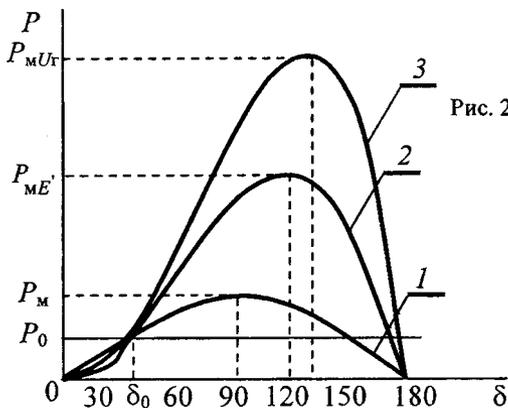


Рис. 2.1. Угловые характеристики мощности системы:  
 1 – с генераторами без АРВ;  
 2 – с генераторами с АРВ ПД;  
 3 – с генераторами с АРВ СД

Установившийся режим системы наступает при равенстве

$$P_T = P, \quad (2.3)$$

где  $P_T$  – мощность турбины;

$P$  – активная мощность генератора.

Если  $P_T = P = P_0$ , наступает установившийся режим, который характеризуется углом

$$\delta_0 = \arctg \frac{P_0 X_{d\Sigma}}{U^2 + Q_0 X_{d\Sigma}}. \quad (2.4)$$

Предел мощности системы имеет место при  $\delta = 90^\circ$  и находится по формуле

$$P_M = \frac{E_q U}{X_{d\Sigma}}. \quad (2.5)$$

Коэффициент запаса статической устойчивости вычисляется по формуле

$$K_p = \frac{P_M - P_0}{P_0} \cdot 100 \%. \quad (2.6)$$

Коэффициент запаса статической устойчивости системы по активной мощности должен быть больше нормативного, значение которого составляет величину 20 % в нормальном режиме, а в аварийном допускается его снижение до 8 %.

*Синхронная машина с автоматическим регулятором возбуждения пропорционального действия*

Автоматический регулятор возбуждения пропорционального действия (АРВ ПД) изменяет ток возбуждения в зависимости от отклонения каких-либо параметров режима (например,  $U_r, I_r$ ), что позволяет обеспечить неизменность ЭДС  $E'$ . В этом случае активную мощность генератора можно вычислить из выражения

$$P_{E_q'} = \frac{E_q' U}{X_{d\Sigma}'} \cdot \sin \delta - \frac{U^2}{2} \cdot \frac{x_d - x_d'}{X_{d\Sigma} X_{d\Sigma}'} \cdot \sin 2\delta, \quad (2.7)$$

где  $E_q'$  – поперечная составляющая переходной ЭДС  $E'$ ;

$X_{d\Sigma}' = x_d' + x_c$  – результирующее индуктивное переходное сопротивление системы.

Переходная электродвижущая сила находится из выражения

$$E' = \sqrt{\left( U + \frac{Q_0 X'_{d\Sigma}}{U} \right)^2 + \left( \frac{P_0 X'_{d\Sigma}}{U} \right)^2}. \quad (2.8)$$

Значение угла сдвига ЭДС  $E'$  относительно вектора напряжения системы  $U$  можно определить из уравнения

$$\delta'_0 = \arctg \frac{P_0 X'_{d\Sigma}}{U^2 + Q_0 X'_{d\Sigma}}. \quad (2.9)$$

Величина поперечной составляющей переходной ЭДС рассчитывается по формуле

$$E'_q = E' \cos(\delta_0 - \delta'_0). \quad (2.10)$$

Подставляя постоянные значения  $E'_q, U, x_d, x'_d, X_{d\Sigma}, X'_{d\Sigma}$  в формулу (2.7) и изменяя угол  $\delta$  от  $0^\circ$  до  $180^\circ$ , можно построить угловую характеристику мощности системы с генераторами, оснащенными АРВ ПД (см. рис. 2.1, зависимость 2).

Предел мощности системы в этом случае можно найти графически либо по формуле

$$P_{mE'} = \frac{E'U}{X'_{d\Sigma}}. \quad (2.11)$$

Необходимо отметить, что предел мощности системы с генераторами с АРВ ПД наступает, как правило, при углах  $\delta > 90^\circ$ . Коэффициент запаса статической устойчивости вычисляется по формуле (2.6), где  $P_m = P_{mE'}$ .

### *Синхронная машина с автоматическим регулятором возбуждения сильного действия*

Автоматический регулятор возбуждения сильного действия (АРВ СД) способен обеспечить постоянное напряжение на шинах

генератора  $U_{\Gamma}$ , поскольку регулирует ток возбуждения не только по отклонению параметров режима, но и по скорости и ускорению их изменения. В этом случае активная мощность генератора определяется по формуле

$$P_{U_{\Gamma q}} = \frac{U_{\Gamma q} U}{x_c} \sin \delta - \frac{U^2 x_d}{2X_{d\Sigma} x_c} \sin 2\delta, \quad (2.12)$$

где  $U_{\Gamma q}$  – поперечная составляющая напряжения  $U_{\Gamma}$ .

Напряжение на шинах генератора можно найти из выражения

$$U_{\Gamma} = \sqrt{\left(U + \frac{Q_0 x_c}{U}\right)^2 + \left(\frac{P_0 x_c}{U}\right)^2}. \quad (2.13)$$

Угол сдвига вектора напряжения генератора  $U_{\Gamma}$  относительно напряжения системы  $U$  находится по формуле

$$\delta_c = \arctg \frac{P_0 x_c}{U^2 + Q_0 x_c}. \quad (2.14)$$

Значение поперечной составляющей напряжения системы рассчитывается по уравнению

$$U_{\Gamma q} = U_{\Gamma} \cos(\delta_0 - \delta_c). \quad (2.15)$$

Подставляя постоянные значения  $U_{\Gamma q}$ ,  $U$ ,  $x_d$ ,  $x_c$ ,  $X_{d\Sigma}$  в формулу (2.12) и изменяя угол  $\delta$  от  $0^\circ$  до  $180^\circ$ , можно построить угловую характеристику активной мощности системы с генераторами, которые имеют АРВ СД (см. рис. 2.1, зависимость 3).

Предел мощности системы с генераторами с АРВ СД находится графически (см. рис. 2.1) или по формуле

$$P_{MU_{\Gamma}} = \frac{U_{\Gamma} U}{x_c}. \quad (2.16)$$

Коэффициент запаса статической устойчивости находится по формуле (2.6), где  $P_M = P_{M\Gamma}$ , и сравнивается с нормативным значением.

**Пример к задаче 2.1.** Для электрической системы (см. рис. 1.1) с генератором без автоматического регулятора возбуждения, с АРВ ПД и АРВ СД требуется:

1. Построить угловые характеристики мощности.
2. Определить пределы передаваемой мощности.
3. Рассчитать коэффициенты запаса статической устойчивости.

Передаваемую мощность в ОЭС принять равной мощности нагрузки, т. е.  $P_0 = P_{\text{н}}$ ,  $Q_0 = Q_{\text{н}}$ , а напряжение на шинах приемной системы  $U = 330$  кВ. Остальные параметры системы взять из примера 1.1.

**Решение.** Общее индуктивное сопротивление системы с генераторами без АРВ

$$X_{d\Sigma} = x_d + x_c = 1,3 + 0,21 = 1,51.$$

Напряжение на шинах приемной системы в относительных единицах

$$U = U/U_6 = 330/330 = 1,0.$$

Электродвижущая сила

$$E_q = \sqrt{\left(U + \frac{Q_0 \cdot X_{d\Sigma}}{U}\right)^2 + \left(\frac{P_0 \cdot X_{d\Sigma}}{U}\right)^2} = \sqrt{\left(1 + \frac{0,5 \cdot 1,51}{1}\right)^2 + \left(\frac{1 \cdot 1,51}{1}\right)^2} = 2,31.$$

Угол сдвига вектора ЭДС  $E_q$  относительно вектора напряжения системы и в установившемся режиме

$$\delta_0 = \arctg \frac{P_0 X_{d\Sigma}}{U^2 + Q_0 X_{d\Sigma}} = \arctg \frac{1 \cdot 1,51}{1^2 + 0,5 \cdot 1,51} = 40,6^\circ.$$

Угловая характеристика мощности без АРВ

$$P_{E_q} = \frac{E_q \cdot U}{X_{d\Sigma}} \sin \delta = \frac{2,31 \cdot 1}{1,51} \sin \delta = 1,53 \sin \delta.$$

По данному выражению, при изменении угла  $\delta$  от 0 до  $180^\circ$  построена угловая характеристика мощности системы с генератором без АРВ (рис. 2.2, зависимость 1). Предел мощности достигается при угле  $\delta_{M1} = 90^\circ$  и равен  $P_{M1} = 1,53$ .

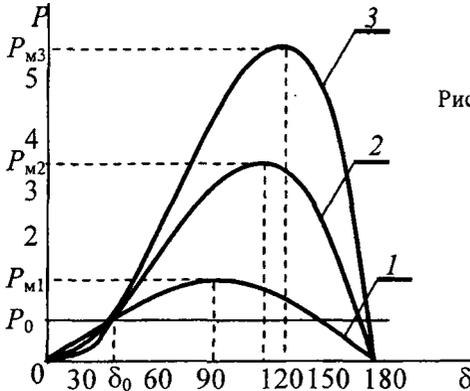


Рис. 2.2. Угловые характеристики мощности системы:  
 1 – генератор без АРВ;  
 2 – генератор с АРВ ПД;  
 3 – генератор с АРВ СД

Общее индуктивное переходное сопротивление системы с генераторами, оснащенными АРВ ПД

$$X'_{d\Sigma} = x'_d + x_c = 0,16 + 0,21 = 0,37.$$

Переходная ЭДС:

$$E' = \sqrt{\left( U + \frac{Q_0 \cdot X'_{d\Sigma}}{U} \right)^2 + \left( \frac{P_0 \cdot X'_{d\Sigma}}{U} \right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left( 1 + \frac{0,5 \cdot 0,37}{1} \right)^2 + \left( \frac{1 \cdot 0,37}{1} \right)^2} = 1,24.$$

Угол сдвига вектора ЭДС  $E'$  относительно вектора напряжения системы в установившемся режиме

$$\delta'_0 = \arctg \frac{P_0 X'_{d\Sigma}}{U^2 + Q_0 X'_{d\Sigma}} = \arctg \frac{1 \cdot 0,37}{1^2 + 0,5 \cdot 0,37} = 17,3^\circ.$$

Поперечная составляющая переходной ЭДС

$$E'_q = E' \cdot \cos(\delta_0 - \delta'_0) = 1,24 \cos(40,6^\circ - 17,3^\circ) = 1,14.$$

Активная мощность генератора с АРВ ПД

$$\begin{aligned} P_{E'_q} &= \frac{E'_q \cdot U}{X'_{d\Sigma}} \sin \delta - \frac{U^2}{2} \cdot \frac{x_d - x'_d}{X_{d\Sigma} \cdot X'_{d\Sigma}} \sin 2\delta = \\ &= \frac{1,14 \cdot 1}{0,37} \sin \delta - \frac{1^2}{2} \cdot \frac{1,3 - 0,16}{1,51 \cdot 0,37} \sin 2\delta = 3,08 \sin \delta - 1,02 \sin 2\delta. \end{aligned}$$

По данному выражению, при изменении угла  $\delta$  от 0 до  $180^\circ$  построена угловая характеристика мощности системы с генератором, оснащённым АРВ ПД (см. рис. 2.2, зависимость 2). Предел мощности достигается при угле  $\delta_{M2} = 117^\circ$  и равен  $P_{M2} = 3,53$ .

Напряжение на шинах генератора

$$U_r = \sqrt{\left(U + \frac{Q_0 \cdot x_c}{U}\right)^2 + \left(\frac{P_0 \cdot x_c}{U}\right)^2} = \sqrt{\left(1 + \frac{0,5 \cdot 0,21}{1}\right)^2 + \left(\frac{1 \cdot 0,21}{1}\right)^2} = 1,13.$$

Угол сдвига вектора напряжения генератора относительно вектора напряжения системы в установившемся режиме

$$\delta_{c0} = \arctg \frac{P_0 x_c}{U^2 + Q_0 x_c} = \arctg \frac{1 \cdot 0,21}{1^2 + 0,5 \cdot 0,21} = 10,7^\circ.$$

Поперечная составляющая напряжения генератора

$$U_{r\varphi} = U_r \cdot \cos(\delta_0 - \delta_{c0}) = 1,13 \cos(40,6^\circ - 10,7^\circ) = 0,98.$$

Угловая характеристика активной мощности генератора с АРВ СД

$$P_{U_{Tq}} = \frac{U_{Tq} \cdot U}{x_c} \sin \delta - \frac{U^2}{2} \cdot \frac{x_d}{X_{d\Sigma} \cdot x_c} \sin 2\delta =$$

$$= \frac{0,98 \cdot 1}{0,21} \sin \delta - \frac{1^2}{2} \cdot \frac{1,3}{1,51 \cdot 0,21} \sin 2\delta = 4,67 \sin \delta - 2,05 \sin 2\delta.$$

По данному выражению, при изменении угла  $\delta$  от 0 до  $180^\circ$  построена угловая характеристика мощности системы с генератором, оснащенным АРВ СД (см. рис. 2.2, зависимость 3). Предел мощности достигается при угле  $\delta_{M3} = 122^\circ$  и равен  $P_{M3} = 5,8$ .

Коэффициенты запаса статической устойчивости системы:

$$\text{без АРВ} - K_{p1} = \frac{P_{M1} - P_0}{P_0} = \frac{1,53 - 1}{1} = 0,53;$$

$$\text{с АРВ ПД} - K_{p2} = \frac{P_{M2} - P_0}{P_0} = \frac{3,53 - 1}{1} = 2,53;$$

$$\text{с АРВ СД} - K_{p3} = \frac{P_{M3} - P_0}{P_0} = \frac{5,8 - 1}{1} = 4,8.$$

Таким образом, коэффициенты запаса статической устойчивости по активной мощности удовлетворяют нормативным требованиям статической устойчивости. Расчет показывает, насколько эффективно применение различных типов АРВ. Так, применение АРВ ПД увеличивает коэффициент запаса в 4,7 раза, а АРВ СД – более чем в 9 раз.

### Задача 2.2

По значениям параметров, определенным в задаче 2.1, требуется построить векторную диаграмму рассматриваемой системы.

**Решение.** Векторная диаграмма системы строится на основе ранее определенных параметров: ЭДС  $E_q$ ,  $E'$ , напряжений  $U$ ,  $U_T$  и углов  $\delta_0$ ,  $\delta_0'$  и  $\delta_{c0}$  (рис. 2.3).

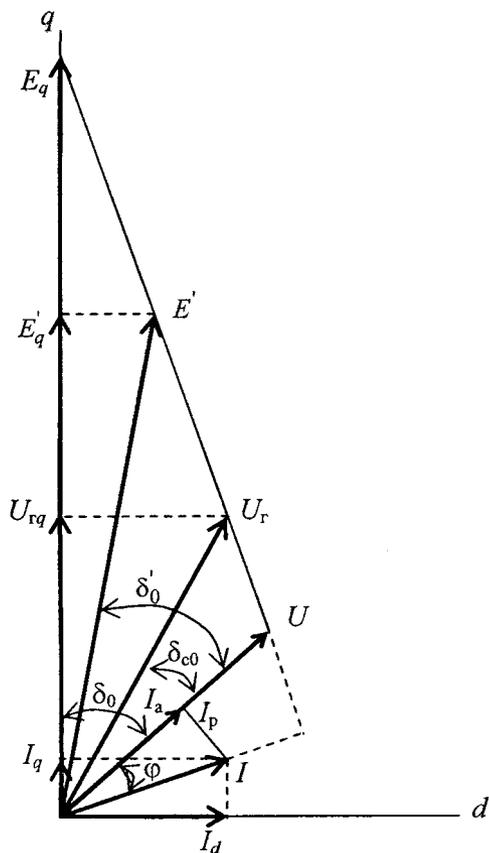


Рис. 2.3. Векторная диаграмма простейшей электрической системы

Величина тока  $I$  и его угол  $\varphi$  находятся из уравнений:

$$\varphi = \arctg \frac{Q_0}{P_0}; \quad (2.17)$$

$$I = \frac{S_0}{\sqrt{3}U}. \quad (2.18)$$

### Задача 2.3

На шины генераторного напряжения электрической системы (см. рис. 1.1) включена нагрузка  $S_H = P_H + jQ_H$ . В ОЭС передается мощность  $S_0 = P_0 + jQ_0$ . Схема замещения рассматриваемой системы представлена на рис. 2.4. По заданному варианту нагрузки  $S_H$  и мощности  $S_0$  (табл. 2.1) требуется:

1. Вычислить собственную и взаимную проводимость генераторов станции.
2. Записать уравнение и построить угловую характеристику мощности системы.

Параметры  $x_d$  и  $x_c$  взять из решения задачи 1.1, а  $U$  в относительных единицах принять равным 1,0.

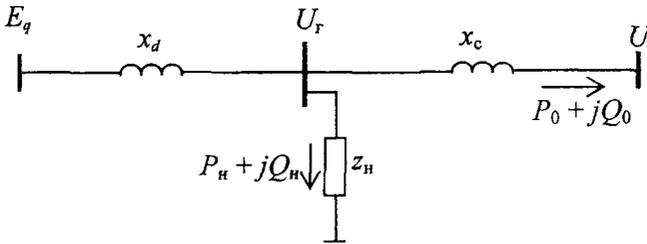


Рис. 2.4. Схема замещения системы

Таблица 2.1

Значения нагрузки системы и мощности, передаваемой в ОЭС

| № варианта | $P_H$ , МВт | $Q_H$ , Мвар | $P_0$ , МВт | $Q_0$ , Мвар |
|------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
| 1          | 160         | 80           | 40          | 20           |
| 2          | 200         | 100          | 100         | 50           |
| 3          | 220         | 110          | 80          | 40           |
| 4          | 100         | 50           | 40          | 20           |
| 5          | 300         | 150          | 100         | 50           |
| 6          | 400         | 200          | 200         | 100          |
| 7          | 180         | 90           | 80          | 40           |
| 8          | 140         | 70           | 60          | 30           |

| № варианта | $P_H$ , МВт | $Q_H$ , Мвар | $P_0$ , МВт | $Q_0$ , Мвар |
|------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
| 18         | 120         | 60           | 80          | 40           |
| 19         | 60          | 30           | 40          | 20           |
| 20         | 30          | 15           | 30          | 15           |
| 21         | 100         | 50           | 100         | 50           |
| 22         | 160         | 80           | 140         | 70           |
| 23         | 140         | 70           | 160         | 80           |
| 24         | 40          | 20           | 100         | 50           |
| 25         | 200         | 100          | 200         | 100          |

| № варианта | $P_H$ , МВт | $Q_H$ , Мвар | $P_0$ , МВт | $Q_0$ , Мвар |
|------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
| 9          | 80          | 40           | 20          | 10           |
| 10         | 40          | 20           | 20          | 10           |
| 11         | 140         | 70           | 60          | 30           |
| 12         | 220         | 110          | 100         | 50           |
| 13         | 180         | 90           | 120         | 60           |
| 14         | 120         | 60           | 20          | 10           |
| 15         | 340         | 170          | 60          | 30           |
| 16         | 500         | 250          | 100         | 50           |
| 17         | 200         | 100          | 60          | 30           |

| № варианта | $P_H$ , МВт | $Q_H$ , Мвар | $P_0$ , МВт | $Q_0$ , Мвар |
|------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
| 26         | 200         | 100          | 400         | 200          |
| 27         | 80          | 40           | 180         | 90           |
| 28         | 100         | 50           | 100         | 50           |
| 29         | 60          | 30           | 40          | 20           |
| 30         | 20          | 10           | 40          | 20           |
| 31         | 190         | 95           | 110         | 55           |
| 32         | 130         | 65           | 70          | 35           |
| 33         | 150         | 75           | 90          | 45           |
| 34         | 170         | 85           | 100         | 50           |

**Решение.** Сопротивление нагрузки находится по выражению

$$z_H = r_H + jx_H = \frac{U_\Gamma^2}{S_H} \left( \frac{P_H}{S_H} + j \frac{Q_H}{S_H} \right). \quad (2.19)$$

Собственные и взаимные сопротивления генераторов станции определяются из уравнений:

$$Z_{11} = jx_d + \frac{jx_c(r_H + jx_H)}{jx_c + r_H + jx_H}; \quad Z_{12} = jx_d + jx_c + \frac{jx_d jx_c}{r_H + jx_H}. \quad (2.20)$$

Собственные и взаимные проводимости генераторов станции находятся по выражениям:

$$Y_{11} = \frac{1}{Z_{11}} = y_{11} e^{j\psi_{11}}; \quad Y_{12} = \frac{1}{Z_{12}} = y_{12} e^{j\psi_{12}}. \quad (2.21)$$

Значения углов сопротивлений определяются из уравнений:

$$\alpha_{11} = 90^\circ - \psi_{11}; \quad \alpha_{12} = 90^\circ - \psi_{12}. \quad (2.22)$$

Потери реактивной мощности в сети

$$\Delta Q = \frac{P_0^2 + Q_0^2}{U^2} x_c. \quad (2.23)$$

ЭДС генераторов станции находится по формуле

$$E_q = \sqrt{\left( U_r + \frac{(Q_H + Q_0 + \Delta Q) \cdot x_d}{U_r} \right)^2 + \left( \frac{P_0 \cdot x_d}{U_r} \right)^2}. \quad (2.24)$$

Уравнение угловой характеристики мощности генераторов

$$P_1 = E_q^2 y_{11} \sin \alpha_{11} + E_q U y_{12} \sin(\delta_{12} - \alpha_{12}). \quad (2.25)$$

Изменяя угол  $\delta_{12}$  от 0 до  $180^\circ$ , по формуле (2.25) можно построить угловую характеристику мощности.

**Пример к задаче 2.3.** На шины генераторного напряжения электрической системы (см. рис. 1.1) подключена нагрузка  $P_H = 20,45$  МВт,  $Q_H = 40,9$  Мвар. В ОЭС передается  $P_0 = 40$  МВт,  $Q_0 = 20$  Мвар. Остальные параметры системы принять из примеров 1.1 и 2.1.

Для схемы замещения (см. рис. 2.4) требуется:

1. Вычислить собственную и взаимную проводимости генератора станции без АРВ.
2. Записать уравнение характеристики мощности.

**Решение.** Схема замещения рассматриваемой системы представлена на рис. 2.4.

Находим мощность нагрузки в относительных единицах:

$$P_H = \frac{P_H}{S_6} = \frac{20,45}{140} = 0,15; \quad Q_H = \frac{Q_H}{S_6} = \frac{40,9}{140} = 0,29;$$

$$S_H = \sqrt{0,15^2 + 0,29^2} = 0,326.$$

Передаваемая мощность в систему:

$$P_0 = \frac{P_0}{S_6} = \frac{40}{140} = 0,28; \quad Q_0 = \frac{Q_0}{S_6} = \frac{20}{140} = 0,14.$$

Напряжение на шинах генератора

$$U_r = \sqrt{\left(U + \frac{Q_0 \cdot x_c}{U}\right)^2 + \left(\frac{P_0 \cdot x_c}{U}\right)^2} = \\ = \sqrt{\left(1 + \frac{0,14 \cdot 0,21}{1}\right)^2 + \left(\frac{0,28 \cdot 0,21}{1}\right)^2} = 1,03$$

Находим сопротивление нагрузки

$$z_H = r_H + jx_H = \frac{U_r^2}{S_H} \left( \frac{P_H}{S_H} + j \frac{Q_H}{S_H} \right) = \frac{1,03^2}{0,326} \left( \frac{0,15}{0,326} + j \frac{0,29}{0,326} \right) = 1,5 + j2,9.$$

Собственное сопротивление генератора

$$Z_{11} = jx_d + \frac{jx_c(r_H + jx_H)}{jx_c + r_H + jx_H} = j1,3 + \frac{j0,21(1,5 + j2,9)}{j0,21 + 1,5 + j2,9} = 0,006 + j1,5.$$

Взаимное сопротивление генератора

$$Z_{12} = jx_d + jx_c + \frac{jx_d jx_c}{r_H + jx_H} = j1,3 + j0,21 + \frac{j1,3 \cdot j0,21}{1,5 + j2,9} = -0,04 + j1,58.$$

Собственные и взаимные проводимости генератора станции:

$$Y_{11} = \frac{1}{Z_{11}} = \frac{1}{0,006 + j1,5} = 0,003 - j0,7 = 0,7e^{j89,8^\circ};$$

$$Y_{12} = \frac{1}{Z_{12}} = \frac{1}{-0,04 + j1,58} = -0,016 - j0,63 = 0,63e^{j91,4^\circ}.$$

Значения углов сопротивлений:

$$\alpha_{11} = 90^\circ - 89,8^\circ = 0,2^\circ; \quad \alpha_{12} = 90^\circ - 91,4^\circ = -1,4^\circ.$$

Потери реактивной мощности в сети

$$\Delta Q = \frac{P_0^2 + Q_0^2}{U^2} x_c = \frac{0,28^2 + 0,14^2}{1^2} \cdot 0,21 = 0,021.$$

Находим ЭДС генератора станции

$$E_q = \sqrt{\left( U_\Gamma + \frac{(Q_H + Q_0 + \Delta Q) \cdot x_d}{U_\Gamma} \right)^2 + \left( \frac{(P_H + P_0) \cdot x_d}{U_\Gamma} \right)^2} =$$
$$= \sqrt{\left( 1,03 + \frac{(0,29 + 0,14 + 0,021) \cdot 1,3}{1,03} \right)^2 + \left( \frac{(0,15 + 0,28) \cdot 1,3}{1,03} \right)^2} = 1,69.$$

Уравнение характеристики мощности

$$P_1 = E_q^2 y_{11} \sin \alpha_{11} + E_q U y_{12} \sin(\delta_{12} - \alpha_{12}) = 1,69^2 \cdot 0,7 \cdot \sin 0,2^\circ +$$
$$+ 1,69 \cdot 1 \cdot 0,63 \cdot \sin(\delta_{12} + 1,4^\circ) = 0,007 + 1,06 \sin(\delta_{12} + 1,4^\circ).$$

### Задача 2.4

Для генераторов станции (см. рис. 1.1) требуется:

1. Построить угловые характеристики:
  - внутренней реактивной мощности;
  - реактивной мощности на шинах генераторного напряжения.
2. Сравнить режимы активной и реактивной мощности генераторов при изменении угла.

Параметры генераторов взять из задачи 1.1, а значения ЭДС  $E_q$  и напряжения  $U_\Gamma$  из задачи 2.1. Принять значения  $E_q$  и  $U_\Gamma$  независимыми от режима работы генераторов.

**Решение.** Внутренняя реактивная мощность генератора находится из уравнения

$$Q_{Eq} = \frac{E_q^2}{x_d} - \frac{E_q U_\Gamma}{x_d} \cos \delta_\Gamma. \quad (2.26)$$

Реактивная мощность, выдаваемая генератором:

$$Q_\Gamma = \frac{E_q U_\Gamma}{x_d} \cos \delta_\Gamma - \frac{U_\Gamma^2}{x_d}. \quad (2.27)$$

Изменяя угол  $\delta_\Gamma$  от 0 до  $360^\circ$ , в формулах (2.26) и (2.27) можно построить угловые характеристики реактивной мощности синхронных машин. Сопоставляя их с угловой характеристикой  $P_{Eq}$ , можно сравнить режимы  $P_\Gamma$  и  $Q_\Gamma$  генератора.

### Задача 2.5

Гидрогенератор в блоке с трансформатором предполагается включить на линию электропередачи, отключенную с другой стороны. Параметры элементов схемы приведены в табл. 2.2. Коэффициент трансформации трансформатора принять  $K_T = 1,05 U_{нл} / U_{нг}$ . Требуется проверить допустимость включения линии по условиям синхронного и асинхронного самовозбуждения генератора.

Таблица 2.2

Параметры элементов схемы к задаче 2.5

| № варианта | Генератор       |               |       |       |        | Трансформатор   |            | Линия         |              |               |                             |                             |
|------------|-----------------|---------------|-------|-------|--------|-----------------|------------|---------------|--------------|---------------|-----------------------------|-----------------------------|
|            | $S_{нг}$ , МВ·А | $U_{нг}$ , кВ | $x_d$ | $x_q$ | $x_d'$ | $S_{нт}$ , МВ·А | $x_T$ , Ом | $U_{нл}$ , кВ | $\zeta$ , км | $x_0$ , Ом/км | $r_0 \cdot 10^{-2}$ , Ом/км | $b_0 \cdot 10^{-6}$ , См/км |
| 1          | 2               | 3             | 4     | 5     | 6      | 7               | 8          | 9             | 10           | 11            | 12                          | 13                          |
| 1          | 710             | 15,75         | 1,5   | 0,9   | 0,47   | 750             | 38,0       | 750           | 800          | 0,32          | 2,2                         | 4,0                         |
| 2          | 624             | 15,75         | 1,6   | 0,91  | 0,42   | 710             | 42,0       | 750           | 750          | 0,31          | 2,1                         | 4,0                         |
| 3          | 590             | 15,75         | 1,57  | 0,93  | 0,41   | 620             | 48,0       | 750           | 700          | 0,30          | 2,0                         | 4,0                         |
| 4          | 353             | 15,75         | 1,67  | 1,01  | 0,47   | 417             | 53,5       | 750           | 750          | 0,29          | 1,9                         | 4,0                         |

| 1  | 2   | 3     | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9   | 10  | 11   | 12  | 13  |
|----|-----|-------|------|------|------|------|------|-----|-----|------|-----|-----|
| 5  | 306 | 15,75 | 1,65 | 0,97 | 0,42 | 333  | 65,0 | 750 | 600 | 0,28 | 1,8 | 4,0 |
| 6  | 264 | 15,75 | 1,07 | 0,73 | 0,35 | 333  | 65,0 | 750 | 550 | 0,32 | 1,7 | 4,0 |
| 7  | 206 | 15,75 | 1,02 | 0,67 | 0,33 | 240  | 69,0 | 750 | 500 | 0,31 | 1,6 | 4,0 |
| 8  | 190 | 15,75 | 1,1  | 0,75 | 0,38 | 210  | 72,0 | 750 | 450 | 0,30 | 1,5 | 4,0 |
| 9  | 176 | 13,8  | 1,02 | 0,68 | 0,35 | 210  | 72,0 | 750 | 400 | 0,29 | 1,4 | 4,0 |
| 10 | 128 | 13,8  | 0,96 | 0,64 | 0,28 | 150  | 84,0 | 750 | 380 | 0,28 | 1,3 | 4,0 |
| 11 | 710 | 15,75 | 1,5  | 0,9  | 0,47 | 740  | 21,2 | 500 | 600 | 0,32 | 3,0 | 3,7 |
| 12 | 624 | 15,75 | 1,6  | 0,91 | 0,42 | 680  | 23,4 | 500 | 580 | 0,31 | 2,9 | 3,7 |
| 13 | 590 | 15,75 | 1,57 | 0,93 | 0,41 | 633  | 25,6 | 500 | 560 | 0,30 | 2,8 | 3,7 |
| 14 | 353 | 15,75 | 1,67 | 1,01 | 0,47 | 417  | 28,7 | 500 | 540 | 0,29 | 2,7 | 3,7 |
| 15 | 306 | 15,75 | 1,65 | 0,97 | 0,42 | 417  | 28,7 | 500 | 520 | 0,28 | 2,6 | 3,7 |
| 16 | 264 | 15,75 | 1,07 | 0,73 | 0,35 | 333  | 34,6 | 500 | 500 | 0,32 | 2,5 | 3,7 |
| 17 | 206 | 15,75 | 1,02 | 0,67 | 0,33 | 333  | 34,6 | 500 | 480 | 0,31 | 2,4 | 3,7 |
| 18 | 190 | 15,75 | 1,1  | 0,75 | 0,38 | 210  | 57,8 | 500 | 460 | 0,30 | 2,3 | 3,7 |
| 19 | 176 | 13,8  | 1,02 | 0,68 | 0,35 | 210  | 57,8 | 500 | 440 | 0,29 | 2,2 | 3,7 |
| 20 | 128 | 13,8  | 0,96 | 0,64 | 0,28 | 133  | 92,5 | 500 | 400 | 0,28 | 2,0 | 3,7 |
| 21 | 710 | 15,75 | 1,5  | 0,9  | 0,47 | 1000 | 13,8 | 330 | 600 | 0,35 | 6,0 | 3,4 |
| 22 | 624 | 15,75 | 1,6  | 0,91 | 0,42 | 630  | 29,0 | 330 | 580 | 0,34 | 5,5 | 3,5 |
| 23 | 590 | 15,75 | 1,57 | 0,93 | 0,41 | 630  | 29,0 | 330 | 560 | 0,33 | 5,0 | 3,6 |
| 24 | 353 | 15,75 | 1,67 | 1,01 | 0,47 | 400  | 33,0 | 330 | 540 | 0,32 | 4,5 | 3,4 |
| 25 | 306 | 15,75 | 1,65 | 0,97 | 0,42 | 400  | 33,0 | 330 | 520 | 0,31 | 4,0 | 3,5 |
| 26 | 264 | 15,75 | 1,07 | 0,73 | 0,35 | 250  | 52,9 | 330 | 500 | 0,30 | 3,5 | 3,6 |
| 27 | 206 | 15,75 | 1,02 | 0,67 | 0,33 | 250  | 52,9 | 330 | 480 | 0,29 | 3,0 | 3,4 |
| 28 | 190 | 15,75 | 1,1  | 0,75 | 0,38 | 200  | 66,0 | 330 | 460 | 0,3  | 4,0 | 3,5 |
| 29 | 176 | 13,8  | 1,02 | 0,68 | 0,35 | 200  | 66,0 | 330 | 440 | 0,31 | 5,0 | 3,6 |
| 30 | 128 | 13,8  | 0,96 | 0,64 | 0,28 | 135  | 105  | 330 | 400 | 0,32 | 6,0 | 3,4 |
| 31 | 715 | 15,75 | 1,04 | 0,90 | 0,24 | 1000 | 13,8 | 330 | 410 | 0,34 | 4,3 | 4,5 |
| 32 | 620 | 15,75 | 1,09 | 0,95 | 0,35 | 630  | 29,0 | 330 | 455 | 0,31 | 5,2 | 5,7 |
| 33 | 174 | 15,75 | 1,18 | 0,89 | 0,41 | 210  | 57,8 | 330 | 470 | 0,32 | 2,9 | 3,4 |
| 34 | 314 | 15,75 | 1,43 | 0,94 | 0,29 | 333  | 34,6 | 330 | 435 | 0,30 | 3,4 | 4,4 |

**Решение.** Синхронное самовозбуждение возможно при выполнении неравенства

$$x_{q\Sigma} < x_c < x_{d\Sigma}, \quad (2.28)$$

а асинхронное самовозбуждение соответствует неравенству

$$x_{d\Sigma} < x_c < x_{q\Sigma}, \quad (2.29)$$

где  $x_c$  – емкостное сопротивление внешней сети;

$x_{d\Sigma}, x_{q\Sigma}, x_{d\Sigma}$  – суммарные индуктивные сопротивления блоков генератор-трансформатор.

Входное сопротивление линии электропередачи при ее представлении П-образной схемой замещения

$$r - jx_c = \frac{(r_{\text{л}} + jx_{\text{л}} - jx_{\text{св}})(-jx_{\text{св}})}{r_{\text{л}} + jx_{\text{л}} - jx_{\text{св}} - jx_{\text{св}}}, \quad (2.30)$$

где  $r_{\text{л}}, x_{\text{л}}$  – активное и реактивное сопротивления линии;  
 $x_{\text{св}}$  – сопротивление емкостной ветви линии.

**Пример к задаче 2.5.** Гидрогенератор номинальной мощностью  $S_{\text{нг}} = 353$  МВ·А в блоке с трансформатором мощностью  $S_{\text{нт}} = 417$  МВ·А предполагается включить на линию электропередачи длиной 500 км, напряжением 500 кВ. Параметры элементов:

генератор:  $U_{\text{н}} = 15,75$  кВ,  $x_d = 1,67$ ,  $x_q = 1,01$ ,  $x'_d = 0,47$ ;

трансформатор:  $x_{\text{т}} = 28,7$  Ом,  $K_{\text{т}} = 525/15,75$ ;

линия:  $x_0 = 0,29$  Ом/км,  $r_0 = 0,02$  Ом/км,  $b_0 = 3,93 \cdot 10^{-6}$  См/км.

Требуется проверить допустимость включения линии электропередачи по условию самовозбуждения.

**Решение.** Определяем индуктивные сопротивления гидрогенератора в именованных единицах, приведенных к напряжению линии:

$$x_d = x_d \frac{U_{\text{н}}^2}{S_{\text{нг}}} K_{\text{т}}^2 = 1,67 \frac{15,75^2}{353} \left( \frac{525}{15,75} \right)^2 = 1304 \text{ Ом};$$

$$x_q = x_q \frac{U_{\text{н}}^2}{S_{\text{нг}}} K_{\text{т}}^2 = 1,01 \frac{15,75^2}{353} \left( \frac{525}{15,75} \right)^2 = 788,6 \text{ Ом};$$

$$x'_d = x'_d \frac{U_{\text{н}}^2}{S_{\text{нг}}} K_{\text{т}}^2 = 0,47 \frac{15,75^2}{353} \left( \frac{525}{15,75} \right)^2 = 367 \text{ Ом}.$$

Суммарные сопротивления генератора и трансформатора:

$$x_{d\Sigma} = x_d + x_T = 1304 + 28,7 = 1332,7 \text{ Ом};$$

$$x_{q\Sigma} = x_q + x_T = 788,6 + 28,7 = 817,3 \text{ Ом};$$

$$x'_{d\Sigma} = x'_d + x_T = 367 + 28,7 = 395,7 \text{ Ом}.$$

Определяем параметры линии электропередачи, представив ее П-образной схемой замещения:

$$x_{\text{л}} = x_0 \cdot \ell = 0,29 \cdot 500 = 145 \text{ Ом};$$

$$r_{\text{л}} = r_0 \cdot \ell = 0,02 \cdot 500 = 10 \text{ Ом};$$

$$b_{\text{л}}/2 = b_0 \cdot \ell/2 = 3,93 \cdot 10^{-6} \cdot 500/2 = 9,8 \cdot 10^{-4} \text{ См}.$$

Сопротивление емкостной ветви схемы замещения линии

$$x_{\text{св}} = \left( \frac{b_{\text{л}}}{2} \right)^{-1} = \frac{1}{9,8 \cdot 10^{-4}} = 1020,4 \text{ Ом}.$$

Входное сопротивление линии электропередачи

$$\begin{aligned} r - jx_{\text{с}} &= \frac{(r_{\text{л}} + jx_{\text{л}} - jx_{\text{св}})(-jx_{\text{св}})}{r_{\text{л}} + jx_{\text{л}} - jx_{\text{св}} - jx_{\text{св}}} = \\ &= \frac{(10 + j145 - j1020,4)(-j1020,4)}{10 + j145 - j1020,4 - j1020,4} = (2,9 - j471) \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Таким образом, реактивная составляющая входного сопротивления линии электропередачи имеет емкостный характер.

В рассматриваемом случае синхронное самовозбуждение исключается, поскольку не выполняется условие (2.28), однако гидрогенератор нельзя включать на линию электропередачи, так как возможно асинхронное самовозбуждение, поскольку выполняется неравенство (2.29)

$$(x_d'_{\Sigma} = 395,7) < (x_c = 471) < (x_q'_{\Sigma} = 817,3).$$

Для избежания самовозбуждения необходима установка реакторов на линии электропередачи.

### Задача 2.6

Характеристическое уравнение простейшей электрической системы при отсутствии регулирования возбуждения имеет вид

$$a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3 = 0. \quad (2.31)$$

Значения коэффициентов данного уравнения приведены в табл. 2.3. Требуется проверить устойчивость рассматриваемой системы с помощью критериев Михайлова, Гурвица и Рауса.

Таблица 2.3

Значения коэффициентов характеристического уравнения

| № варианта | $a_0$ | $a_1$ | $a_2$ | $a_3$ |
|------------|-------|-------|-------|-------|
| 1          | 0,2   | 1,55  | 4,0   | 0,52  |
| 2          | 0,3   | 1,45  | 3,8   | 0,53  |
| 3          | 0,4   | 1,35  | 3,6   | 0,55  |
| 4          | 0,5   | 1,25  | 3,4   | 0,58  |
| 5          | 0,6   | 1,15  | 3,3   | 0,59  |
| 6          | 0,7   | 1,05  | 3,2   | 0,6   |
| 7          | 0,8   | 1,0   | 3,1   | 0,62  |
| 8          | 0,9   | 0,95  | 3,0   | 0,64  |
| 9          | 1,0   | 0,85  | 2,8   | 0,66  |
| 10         | 1,1   | 0,75  | 2,6   | 0,68  |
| 11         | 1,2   | 0,65  | 2,4   | 0,70  |
| 12         | 1,3   | 0,55  | 2,2   | 0,71  |
| 13         | 1,4   | 0,45  | 1,78  | 0,72  |
| 14         | 1,5   | 0,35  | 1,61  | 0,74  |
| 15         | 1,6   | 0,25  | 1,56  | 0,75  |
| 16         | 0,1   | 1,72  | 6,0   | 0,76  |
| 17         | 0,2   | 1,62  | 5,7   | 0,78  |

| № варианта | $a_0$ | $a_1$ | $a_2$ | $a_3$ |
|------------|-------|-------|-------|-------|
| 18         | 0,3   | 1,52  | 5,3   | 0,80  |
| 19         | 0,4   | 1,42  | 5,1   | 0,82  |
| 20         | 0,5   | 1,32  | 4,7   | 0,84  |
| 21         | 0,6   | 1,22  | 4,3   | 0,86  |
| 22         | 0,7   | 1,12  | 4,1   | 0,88  |
| 23         | 0,8   | 0,91  | 3,9   | 0,9   |
| 24         | 0,9   | 0,81  | 3,7   | 0,91  |
| 25         | 1,0   | 0,71  | 3,4   | 0,93  |
| 26         | 1,1   | 0,63  | 3,1   | 0,94  |
| 27         | 1,2   | 0,53  | 2,9   | 0,95  |
| 28         | 1,3   | 0,43  | 2,8   | 0,96  |
| 29         | 1,4   | 0,21  | 2,6   | 0,97  |
| 30         | 1,5   | 0,15  | 2,3   | 0,98  |
| 31         | 0,8   | 1,22  | 3,8   | 0,66  |
| 32         | 0,9   | 1,12  | 3,6   | 0,68  |
| 33         | 1,0   | 0,91  | 3,4   | 0,70  |
| 34         | 1,1   | 0,81  | 3,3   | 0,71  |

**Решение.** Для оценки статической устойчивости системы необходимо в характеристическое уравнение подставить значение  $p = j\omega$  и получить комплексный полином

$$D(j\omega) = a_0(j\omega)^n + a_1(j\omega)^{n-1} + \dots + a_n = X(\omega) + jY(\omega), \quad (2.32)$$

где  $X(\omega) = a_n - a_{n-2}\omega^2 + a_{n-4}\omega^4 + \dots$ ;

$$Y(\omega) = a_{n-1}\omega - a_{n-3}\omega^3 + a_{n-5}\omega^5 + \dots$$

Если задаться серией значений  $\omega$  в пределах от 0 до  $+\infty$ , то каждому из них будет соответствовать некоторое значение полинома (2.32), которое на комплексной плоскости определяет точку. Геометрическое место этих точек образует кривую, которая называется годографом характеристического многочлена или кривой Михайлова, по которой можно судить об устойчивости системы.

Критерий устойчивости Михайлова можно записать в следующей формулировке: для того чтобы система была устойчива, необходимо и достаточно, чтобы вектор кривой Михайлова  $D(j\omega)$  при изменении  $\omega$  от 0 до  $+\infty$  монотонно поворачивался против часовой стрелки на угол  $n\pi/2$ , где  $n$  – степень характеристического уравнения, или то же самое, чтобы кривая Михайлова обходила только против часовой стрелки последовательно  $n$  квадрантов координатной плоскости.

Для оценки устойчивости системы по данному критерию составляется специальная таблица Рауса (табл. 2.4). Элементами первой строки этой таблицы служат коэффициенты характеристического уравнения (2.31) с четными индексами, начиная с  $a_0$ , а элементами второй строки – с нечетными индексами. Элементы каждой последующей строки находятся по формуле

$$c_{ki} = c_{k+1,i-2} - \lambda_{i-2}c_{k+1,i-1}, \quad (2.33)$$

где  $k$  – номер столбца;  $i$  – номер строки,  $i \geq 3$ ;  $\lambda_{i-2} = c_{1,i-2}/c_{1,i-1}$  – коэффициент.

Таблица Рауса

| Номер $i$ -й строки | Номер $k$ -го столбца             |                                   |                                   |                                   |     | Коэффициент $\lambda_{i-2}$ |
|---------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----|-----------------------------|
|                     | 1                                 | 2                                 | 3                                 | 4                                 | ... |                             |
| 1                   | $c_{11} = a_0$                    | $c_{21} = a_2$                    | $c_{31} = a_4$                    | $c_{41} = a_6$                    | ... | —                           |
| 2                   | $c_{12} = a_1$                    | $c_{22} = a_3$                    | $c_{32} = a_5$                    | $c_{42} = a_7$                    | ... | —                           |
| 3                   | $c_{13} = a_2 - \lambda_1 a_3$    | $c_{23} = a_4 - \lambda_1 a_5$    | $c_{33} = a_6 - \lambda_1 a_7$    | $c_{43} = a_8 - \lambda_1 a_9$    | ... | $\lambda_1 = a_0/a_1$       |
| 4                   | $c_{14} = a_3 - \lambda_2 c_{23}$ | $c_{24} = a_5 - \lambda_2 c_{33}$ | $c_{34} = a_7 - \lambda_2 c_{43}$ | $c_{44} = a_9 - \lambda_2 c_{53}$ | ... | $\lambda_2 = a_1/c_{13}$    |
| ...                 | ...                               | ...                               | ...                               | ...                               | ... | ...                         |

Критерий устойчивости Рауса формулируется следующим образом: для того, чтобы система была устойчива, необходимо и достаточно, чтобы все элементы первого столбца были положительными:

$$c_{11} > 0, c_{12} > 0, c_{13} > 0, \dots, c_{1, n+1} > 0. \quad (2.34)$$

Для оценки устойчивости по критерию Гурвица для характеристического уравнения (2.31) необходимо составить определитель

$$\Delta_n = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & 0 \\ a_0 & a_2 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix}.$$

Согласно критерию Гурвица эта система будет устойчива, если  $a_0 > 0$ ;  $\Delta_1 = a_1 > 0$ ;  $a_2 > 0$ ;  $a_3 > 0$ ;  $\Delta_2 = (a_1 a_2 - a_0 a_3) > 0$ ;  $\Delta_3 = a_3 \Delta_2 > 0$ .

**Пример к задаче 2.6.** Характеристическое уравнение простейшей электрической системы при отсутствии регулирования возбуждения имеет вид

$$0,12p^3 + 0,1p^2 + 1,72p + 0,5 = 0.$$

Требуется проверить устойчивость системы с помощью:

- 1) критерия Михайлова;
- 2) критерия Гурвица;
- 3) критерия Рауса.

**Решение.** 1. Для определения устойчивости по критерию Михайлова запишем уравнение характеристической кривой

$$D(j\omega) = 0,12(j\omega)^3 + 0,1(j\omega)^2 + 1,72j\omega + 0,5 = X(\omega) + jY(\omega),$$

где  $X(\omega) = 0,5 - 0,1\omega^2$ ;  $Y(\omega) = 1,72\omega - 0,12\omega^3$ .

Задавая  $\omega = 0, 1, \dots, \infty$ , получим значения  $X(\omega)$  и  $Y(\omega)$ . Результаты вычислений сведены в табл. 2.5. При изменении  $\omega$  от 0 до  $\infty$  конец вектора в комплексной плоскости  $D(j\omega)$  прочертит годограф или характеристическую кривую, приведенную на рис. 2.5.

Таблица 2.5

Результаты расчетов  
составляющих характеристического  
полинома

| $\omega$ | $X(\omega)$ | $Y(\omega)$ |
|----------|-------------|-------------|
| 0        | 0,5         | 0           |
| 1        | 0,4         | 1,6         |
| 2        | 0,1         | 2,48        |
| 3        | -0,4        | 2           |
| 4        | -1,1        | -0,82       |
| 5        | -2          | -6,4        |
| $\infty$ | $-\infty$   | $-\infty$   |

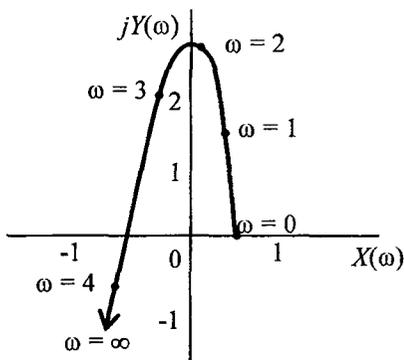


Рис. 2.5. Кривая Михайлова

Данная кривая показывает, что рассматриваемая система устойчива, поскольку вектор  $D(j\omega)$  при возрастании  $\omega$  от 0 до  $\infty$  поворачивается на угол  $n \frac{\pi}{2}$ , где  $n$  – степень характеристического уравнения.

2. Для проверки устойчивости системы с помощью критерия Гурвица составляем матрицу

$$\begin{vmatrix} 0,1 & 0,5 & 0 \\ 0,12 & 1,72 & 0 \\ 0 & 0,1 & 0,5 \end{vmatrix}$$

и вычисляем определители Гурвица:

$$\Delta_1 = 0,1; \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} 0,1 & 0,5 \\ 0,12 & 1,72 \end{vmatrix} = 0,112; \quad \Delta_3 = \begin{vmatrix} 0,1 & 0,5 & 0 \\ 0,12 & 1,72 & 0 \\ 0 & 0,1 & 0,5 \end{vmatrix} = 0,056.$$

Рассматриваемая система устойчива, поскольку все коэффициенты характеристического уравнения и все определители Гурвица положительны.

3. Для определения устойчивости системы с помощью критерия Рауса составляем таблицу Рауса

$$\begin{vmatrix} 0,12 & 1,72 \\ 0,1 & 0,5 \\ 1,12 & 0 \\ 0,5 & 0 \end{vmatrix}$$

Таким образом, рассматриваемая система устойчива, так как все элементы первого столбца Рауса положительны.

### Задача 2.7

Для электрической системы, принципиальная схема которой приведена на рис. 1.1, требуется исследовать зависимости коэффициента запаса статической устойчивости от коэффициента мощности нагрузки, длины линии электропередачи, числа проводов в фазе. Исходные данные принять в соответствии с заданным вариантом по табл. 1.1 и 1.2. Расчеты выполнить при условии, что на генераторах станции установлены АРВ пропорционального действия. Принять  $P_0 = P_n$ ,  $Q_0 = Q_n$ .

При исследовании влияния на коэффициент запаса числа проводов в фазе принять для линий номинальным напряжением 110 кВ марку провода АС 150/24, радиус провода  $r_{\text{пр}} = 7,9$  мм, среднегеометрическое расстояние между фазами  $D_{\text{ср}} = 5$  м; для линий номинальным напряжением 220 кВ – АС 300/39,  $r_{\text{пр}} = 12$  мм,  $D_{\text{ср}} = 8$  м; для линий номинальным напряжением 330 кВ – АС 400/51,  $r_{\text{пр}} = 13,75$  мм,  $D_{\text{ср}} = 11$  м. Для линий всех напряжений шаг расщепления в одной фазе  $a_{\text{ср}} = 400$  мм.

**Решение.** Реактивная мощность нагрузки определяется по формуле

$$Q_{\text{н}} = P_{\text{н}} \cdot \text{tg}\varphi_{\text{н}}. \quad (2.35)$$

Эквивалентный радиус расщепленной фазы

$$r_{\text{прэ}} = \sqrt[N]{r_{\text{пр}} a_{\text{ср}}^{N-1}}, \quad (2.36)$$

где  $N$  – число проводов в расщепленной фазе;

$r_{\text{пр}}$  – радиус провода;

$a_{\text{ср}}$  – среднегеометрическое расстояние между проводами одной фазы.

Удельное индуктивное сопротивление линии электропередачи

$$x_0 = 0,1441g \frac{D_{\text{ср}}}{r_{\text{прэ}}} + \frac{0,0157}{N}, \quad (2.37)$$

где  $D_{\text{ср}}$  – среднегеометрическое расстояние между фазами.

**Пример к задаче 2.7.** Для электрической системы (рис. 1.1), параметры элементов которой приведены в примере 1.1, требуется исследовать влияние на коэффициент запаса статической устойчивости коэффициента мощности нагрузки, длины линии электропередачи и числа проводов в фазе.

**Решение.** Проведем серию расчетов, изменяя коэффициент мощности нагрузки  $\cos\varphi_n$  от  $-0,7$  до  $0,7$ . При  $\cos\varphi_n = -0,7$  имеем:

$$Q_n = P_n \cdot \operatorname{tg}\varphi_n = 1 \cdot \operatorname{tg}\varphi_n(\arccos(-0,7)) = -1,02;$$

$$E' = \sqrt{\left( U + \frac{Q_n X'_{d\Sigma}}{U} \right)^2 + \left( \frac{P_0 X'_{d\Sigma}}{U} \right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left( 1 + \frac{-1,02 \cdot 0,37}{1} \right)^2 + \left( \frac{1 \cdot 0,37}{1} \right)^2} = 0,72;$$

$$P_{\text{пр}} = \frac{E' U}{X'_{d\Sigma}} = \frac{0,72 \cdot 1}{0,37} = 1,95;$$

$$K_p = \frac{P_{\text{пр}} - P_0}{P_0} = \frac{1,95 - 1}{1} = 0,95.$$

Результаты расчетов сведены в табл. 2.6, а на рис. 2.6 представлена зависимость  $K_p = f(\cos\varphi_n)$ .

Таблица 2.6

Результаты расчетов для определения зависимости  $K_p = f(\cos\varphi_n)$

| $\cos\varphi_n$ | $Q_n$ | $E'$ | $P_{\text{пр}}$ | $K_p$ |
|-----------------|-------|------|-----------------|-------|
| -0,7            | -1,02 | 0,72 | 1,95            | 0,95  |
| -0,8            | -0,75 | 0,81 | 2,19            | 1,19  |
| -0,9            | -0,48 | 0,9  | 2,43            | 1,43  |
| 1               | 0     | 1,07 | 2,88            | 1,88  |
| 0,9             | 0,48  | 1,24 | 3,34            | 2,34  |
| 0,8             | 0,75  | 1,33 | 3,59            | 2,59  |
| 0,7             | 1,02  | 1,43 | 3,85            | 2,85  |

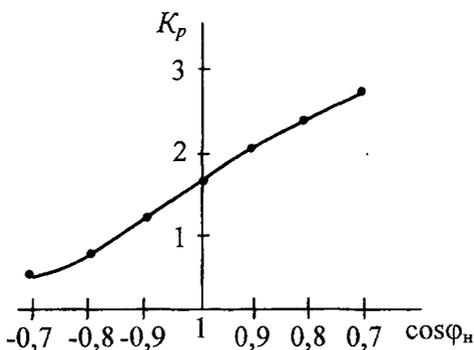


Рис. 2.6. Зависимость  $K_p = f(\cos \varphi_n)$

Для оценки влияния длины проведем серию расчетов, изменяя длину линии  $\ell$  от  $\ell_0/2$  до  $3\ell_0$ . При  $\ell = \ell_0/2$  имеем:

$$x_{\text{л}} = \frac{1}{2} x_0 \frac{\ell_0}{2} \cdot \frac{S_6}{U_6^2} \cdot K_{\text{АТ}}^2 = \frac{1}{2} \cdot 0,43 \cdot \frac{120}{2} \cdot \frac{140}{330^2} \cdot \left( \frac{347}{242} \right)^2 = 0,034;$$

$$X'_{d\Sigma} = x'_d + x_{\text{T}} + x_{\text{л}} + x_{\text{АТ}} = 0,16 + 0,09 + 0,034 + 0,05 = 0,334;$$

$$\begin{aligned} E' &= \sqrt{\left( U + \frac{Q_0 X'_{d\Sigma}}{U} \right)^2 + \left( \frac{P_0 X'_{d\Sigma}}{U} \right)^2} = \\ &= \sqrt{\left( 1 + \frac{0,5 \cdot 0,334}{1} \right)^2 + \left( \frac{1 \cdot 0,334}{1} \right)^2} = 1,21; \end{aligned}$$

$$P_{\text{нр}} = \frac{E'U}{X'_{d\Sigma}} = \frac{1,21 \cdot 1}{0,334} = 3,63;$$

$$K_p = \frac{P_{\text{нр}} - P_0}{P_0} = \frac{3,63 - 1}{1} = 2,63.$$

Результаты расчетов сведены в табл. 2.7, а на рис. 2.7 представлена зависимость  $K_p = f(\ell)$ .

Таблица 2.7

Результаты расчетов для определения зависимости  $K_p = f(\ell)$

| $\ell$ , км | $x_{\text{л}}$ | $X'_{d\Sigma}$ | $E'$ | $P_{\text{пр}}$ | $K_3$ |
|-------------|----------------|----------------|------|-----------------|-------|
| 60          | 0,034          | 0,334          | 1,21 | 3,63            | 2,63  |
| 120         | 0,068          | 0,368          | 1,24 | 3,37            | 2,37  |
| 240         | 0,136          | 0,436          | 1,29 | 2,97            | 1,97  |
| 360         | 0,204          | 0,504          | 1,35 | 2,68            | 1,68  |

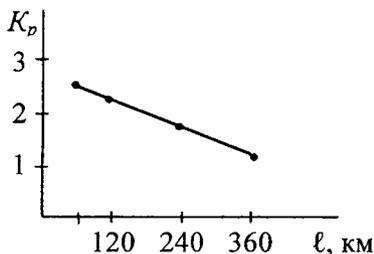


Рис. 2.7. Зависимость  $K_p = f(\ell)$

Для оценки влияния числа проводов в фазе проведем серию расчетов, изменяя число проводов от 1 до 4. При двух проводах в фазе: — эквивалентный радиус провода

$$r_{\text{прэ}} = N \sqrt[r_{\text{пр}} a_{\text{ср}}^{N-1}] = \sqrt[2]{12 \cdot 400^{2-1}} = 69,3 \text{ мм};$$

— удельное индуктивное сопротивление линии:

$$x_0 = 0,1441 \lg \frac{D_{\text{ср}}}{r_{\text{прэ}}} + \frac{0,0157}{N} = 0,1441 \lg \frac{8000}{69,3} + \frac{0,0157}{2} = 0,3 \text{ Ом/км};$$

$$x_{\text{л}} = \frac{1}{2} x_0 \ell \cdot \frac{S_6}{U^2} \cdot K_{\text{АТ}}^2 = \frac{1}{2} \cdot 0,3 \cdot 120 \cdot \frac{140}{330^2} \cdot \left( \frac{347}{242} \right)^2 = 0,047;$$

$$X'_{d\Sigma} = x'_d + x_{\text{T}} + x_{\text{л}} + x_{\text{АТ}} = 0,16 + 0,094 + 0,047 + 0,05 = 0,351;$$

$$E' = \sqrt{\left( U + \frac{Q_0 X'_{d\Sigma}}{U} \right)^2 + \left( \frac{P_0 X'_{d\Sigma}}{U} \right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left( 1 + \frac{0,5 \cdot 0,351}{1} \right)^2 + \left( \frac{1 \cdot 0,351}{1} \right)^2} = 1,23;$$

$$P_{\text{пр}} = \frac{E' U}{X'_{d\Sigma}} = \frac{1,23 \cdot 1}{0,351} = 3,48;$$

$$K_p = \frac{P_{\text{пр}} - P_0}{P_0} = \frac{3,48 - 1}{1} = 2,48.$$

Результаты расчетов сведены в табл. 2.8, а на рис. 2.8 представлена зависимость  $K_p = f(N)$ .

Таблица 2.8

Результаты расчетов для определения зависимости  $K_p = f(N)$

| $N$ | $r_{\text{прэ}},$<br>мм | $x_0,$<br>Ом/км | $x_{\text{л}}$ | $X'_{d\Sigma}$ | $E'$ | $P_{\text{пр}}$ | $K_p$ |
|-----|-------------------------|-----------------|----------------|----------------|------|-----------------|-------|
| 1   | 12                      | 0,42            | 0,07           | 0,37           | 1,24 | 3,35            | 2,35  |
| 2   | 69,3                    | 0,3             | 0,047          | 0,351          | 1,23 | 3,48            | 2,48  |
| 3   | 124,3                   | 0,26            | 0,042          | 0,346          | 1,22 | 3,53            | 2,53  |
| 4   | 166,5                   | 0,25            | 0,039          | 0,343          | 1,22 | 3,56            | 2,56  |

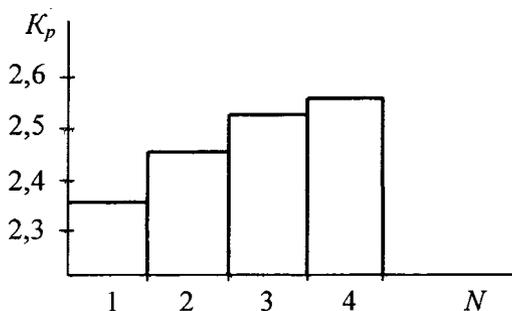


Рис. 2.8. Зависимость  $K_p = f(N)$

### Задача 2.8

Для электрической системы, принципиальная схема которой приведена на рис. 1.1, требуется исследовать влияние шунтирующего реактора, включаемого в начале линии, на статическую устойчивость системы. Исходные данные принять в соответствии с заданным вариантом по табл. 1.1 и 1.2. Сопротивление шунтирующего реактора принять  $x_p = 500$  Ом. Рассмотреть следующие случаи:

- без АРВ на генераторах станции и отсутствии шунтирующего реактора;
- при неизменной ЭДС генераторов станции без АРВ и включении шунтирующего реактора;
- при увеличении ЭДС генераторов станции для поддержания напряжения на шинах генераторов и наличии шунтирующего реактора.

Построить угловые характеристики мощности для каждого случая.

**Решение.** Сопротивление системы при включении шунтирующего реактора в начале линии

$$X_{d\Sigma}^p = x_d + x_T + x_L + x_{AT} + \frac{(x_d + x_T)(x_L + x_{AT})}{x_p}, \quad (2.38)$$

где  $x_p$  – сопротивление шунтирующего реактора.

ЭДС генераторов станции без АРВ при отсутствии шунтирующего реактора в начале линии определяется по формуле (2.2).

Напряжение на шинах генераторов при отсутствии шунтирующего реактора находится по формуле (2.13).

Уравнение мощности при неизменной ЭДС и включении шунтирующего реактора

$$P_{E_q}^p = \frac{E_q U}{X_{d\Sigma}^p} \sin \delta. \quad (2.39)$$

Уравнение мощности при увеличении ЭДС

$$P_{U_T}^p = \frac{U_T U}{x_c + \frac{x_T(x_L + x_{AT})}{x_p}} \sin \delta. \quad (2.40)$$

**Пример к задаче 2.8.** Для электрической системы (рис. 1.1), параметры элементов которой приведены в примере 1.1, требуется исследовать влияние шунтирующего реактора, включаемого в начале линии, на статическую устойчивость системы.

**Решение.** Определяем ЭДС генераторов станции без АРВ при отсутствии реактора:

$$\begin{aligned} E_q &= \sqrt{\left(U + \frac{Q_0 X_{d\Sigma}}{U}\right)^2 + \left(\frac{P_0 X_{d\Sigma}}{U}\right)^2} = \\ &= \sqrt{\left(1 + \frac{0,5 \cdot 1,51}{1}\right)^2 + \left(\frac{1 \cdot 1,51}{1}\right)^2} = 2,4. \end{aligned}$$

Определяем амплитуду мощности при отсутствии реактора:

$$P_{E_q} = \frac{E_q U}{X_{d\Sigma}} = \frac{2,4 \cdot 1}{1,51} = 1,59.$$

Приводим сопротивление реактора к базисным условиям:

$$x_p = x_p \frac{S_6}{U_6^2} K_{AT}^2 = 500 \frac{140}{330^2} \left( \frac{347}{242} \right)^2 = 1,32.$$

Находим сопротивление системы при включении реактора в начале линии:

$$\begin{aligned} X_{d\Sigma}^p &= x_d + x_T + x_{л} + x_{AT} + \frac{(x_d + x_T)(x_{л} + x_{AT})}{x_p} = \\ &= 1,3 + 0,09 + 0,07 + 0,05 + \frac{(1,3 + 0,09)(0,07 + 0,05)}{1,32} = 1,64. \end{aligned}$$

Определяем амплитуду характеристики мощности при неизменной ЭДС и включении реактора:

$$P_{Eq}^p = \frac{E_q U}{x_{d\Sigma}^p} = \frac{2,4 \cdot 1}{1,64} = 1,46.$$

Находим сопротивление передающей сети при включении реактора:

$$x_c^p = x_c + \frac{x_T(x_{л} + x_{AT})}{x_p} = 0,21 + \frac{0,09(0,07 + 0,05)}{1,32} = 0,218.$$

Находим напряжение на шинах генератора при отсутствии реактора:

$$U_r = \sqrt{\left( U + \frac{Q_0 x_c}{U} \right)^2 + \left( \frac{P_0 x_c}{U} \right)^2} = \sqrt{\left( 1 + \frac{0,5 \cdot 0,21}{1} \right)^2 + \left( \frac{1 \cdot 0,21}{1} \right)^2} = 1,12.$$

Определяем амплитуду характеристики мощности при увеличении ЭДС генераторов станции:

$$P_{U_T}^p = \frac{U_T U}{x_c^p} = \frac{1,12 \cdot 1}{0,218} = 5,14.$$

Угловые характеристики мощности представлены на рис. 2.9. Коэффициенты запаса статической устойчивости равны соответственно 0,59, 0,46 и 4,14.

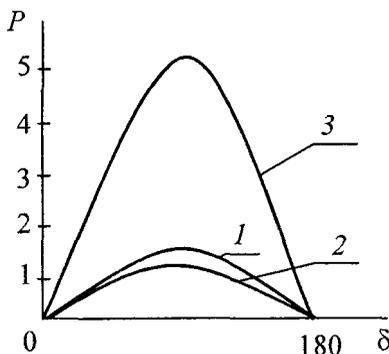


Рис. 2.9. Влияние шунтирующего реактора на характеристики мощности:  
1 – при неизменной ЭДС; 2 – при отсутствии реактора;  
3 – при увеличении ЭДС

### Задача 2.9

Для электрической системы, схема замещения которой представлена на рис. 2.4, требуется определить предел мощности и предел устойчивости. Необходимые исходные данные взять из решения задачи 2.3. Принять номинальную мощность системы 7800 МВт, постоянную инерции 10 с.

**Решение.** Предельная мощность станции определяется по формуле

$$P = E_q^2 Y_{11} \sin \alpha_{11} + E_q U Y_{12}. \quad (2.41)$$

Предельный по условию устойчивости угол

$$\delta_{12} = \arctg \left( 2E_q U Y_{12} \frac{1 + \frac{T_j}{T_{jc}}}{1 - \frac{T_j}{T_{jc}}} \right), \quad (2.42)$$

где  $T_j$  – постоянная инерции генераторов станции;

$T_{jc}$  – постоянная инерции генераторов системы.

**Пример к задаче 2.9.** Для электрической системы, схема замещения которой представлена на рис. 2.4, требуется определить значения предельной мощности и мощности, соответствующей пределу устойчивости, а также углы, при которых достигаются эти значения. Исходные данные принимаем из примера 2.3.

**Решение.** Угол, при котором имеет место предел мощности:

$$\delta_{12} = 90 + \alpha_{12} = 90 - 1,4 = 88,6^\circ.$$

Предельная мощность

$$\begin{aligned} P &= E_q^2 Y_{11} \sin \alpha_{11} + E_q U Y_{12} = 1,75^2 \cdot 0,7 \sin 0,2 + 1,75 \cdot 1 \cdot 0,63 = \\ &= 0,007 + 1,103 = 1,11. \end{aligned}$$

Постоянная инерции генераторов системы

$$T_{jc} = T_{jc} \frac{S_c}{S_6} = 10 \frac{7800}{140} = 557,14 \text{ с.}$$

Предельный по условию устойчивости угол

$$\delta_{12} = \arctg \left( 2E_q U Y_{12} \cdot \frac{1 + \frac{T_j}{T_{jc}}}{1 - \frac{T_j}{T_{jc}}} \right) =$$

$$= \arctg \left( 2 \cdot 1,75 \cdot 1 \cdot 0,63 \cdot \frac{1 + \frac{10,08}{557,14}}{1 - \frac{10,08}{557,14}} \right) = 66,38^\circ.$$

Мощность, соответствующая пределу устойчивости:

$$P = E_q^2 Y_{11} \sin \alpha_{11} + E_q U Y_{12} \sin(\delta_{12} - \alpha_{12}) = 1,75^2 \cdot 0,7 \sin 0,2 +$$

$$+ 1,75 \cdot 1 \cdot 0,63 \sin(66,38 + 1,4) = 0,007 + 1,021 = 1,028.$$

### Задача 2.10

Для электрической системы, принципиальная схема которой представлена на рис. 1.1 с установленными на электростанции явнополюсными генераторами без АРВ, с АРВ ПД и АРВ СД, требуется построить векторную диаграмму и угловые характеристики мощности. Параметры элементов системы взять из решения задачи 1.1. Принять  $x_q = x_d/1,5$ .

**Решение.** ЭДС явнополюсного генератора и напряжение на шинах станции находятся по формулам:

$$E_q = \sqrt{\left( U + \frac{Q_0 X_{q\Sigma}}{U} \right)^2 + \left( \frac{P_0 X_{q\Sigma}}{U} \right)^2},$$

$$E' = \sqrt{\left( U + \frac{Q_0 X'_{d\Sigma}}{U} \right)^2 + \left( \frac{P_0 X'_{d\Sigma}}{U} \right)^2}, \quad (2.43)$$

$$U_r = \sqrt{\left(U + \frac{Q_0 x_c}{U}\right)^2 + \left(\frac{P_0 x_c}{U}\right)^2},$$

где  $X_{q\Sigma} = x_q + x_c$ .

Углы между векторами  $E_q, E', U_r, U$ :

$$\begin{aligned}\delta &= \operatorname{arctg} \frac{P_0 X_{q\Sigma}}{U + Q_0 X_{q\Sigma}}; \\ \delta' &= \operatorname{arctg} \frac{P_0 X_{d\Sigma}'}{U + Q_0 X_{d\Sigma}'}; \\ \delta_c &= \operatorname{arctg} \frac{P_0 x_c}{U + Q_0 x_c}.\end{aligned}\tag{2.44}$$

ЭДС холостого хода

$$E_d = E_q \frac{x_d - x_d'}{x_q - x_d'} - E_d' \frac{x_d - x_q}{x_q - x_d'},\tag{2.45}$$

где  $E_d' = E' \cos(\delta - \delta')$ .

Характеристики мощности

$$P_{Ed} = \frac{E_d U}{X_{d\Sigma}} \sin \delta + \frac{U^2}{2} \cdot \frac{x_d - x_q}{X_{d\Sigma} X_{q\Sigma}} \sin 2\delta\tag{2.46}$$

или ориентировочно

$$P_{Eq} = \frac{E_q U}{X_{q\Sigma}} \sin \delta;\tag{2.47}$$

$$P_{E'd} = \frac{E_d' U}{X_{d\Sigma}} \sin \delta - \frac{U^2}{2} \cdot \frac{x_q - x_d'}{X_{q\Sigma} X_{d\Sigma}} \sin 2\delta; \quad (2.48)$$

$$P_{Urd} = \frac{U_{rd} U}{x_c} \sin \delta - \frac{U^2}{2} \cdot \frac{x_q - x_c}{X_{q\Sigma} x_c} \sin 2\delta. \quad (2.49)$$

**Пример к задаче 2.10.** Для электрической системы (рис. 1.1) с установленными на электростанции явнополюсными генераторами без АРВ, с АРВ ПД и АРВ СД требуется построить векторную диаграмму и угловые характеристики мощности. Исходные данные принимаем из примера 1.1. Принять  $x_q = x_d/1,5$ .

**Решение.** Определяем ЭДС  $E_q$ :

$$\begin{aligned} E_q &= \sqrt{\left( U + \frac{Q_0 X_{q\Sigma}}{U} \right)^2 + \left( \frac{P_0 X_{q\Sigma}}{U} \right)^2} = \\ &= \sqrt{\left( 1 + \frac{0,5 \cdot 1,08}{1} \right)^2 + \left( \frac{1 \cdot 1,08}{1} \right)^2} = 1,88, \end{aligned}$$

где  $x_{q\Sigma} = x_q + x_c = 0,87 + 0,21 = 1,08$ ;

$$x_q = x_d/1,5 = 1,3/1,5 = 0,87.$$

$$\delta = \arctg \frac{P_0 X_{q\Sigma}}{U + Q_0 X_{q\Sigma}} = \arctg \frac{1 \cdot 1,08}{1 + 0,5 \cdot 1,08} = 35,0^\circ.$$

Определяем ЭДС  $E'$ :

$$\begin{aligned} E' &= \sqrt{\left( U + \frac{Q_0 X_{d\Sigma}'}{U} \right)^2 + \left( \frac{P_0 X_{d\Sigma}'}{U} \right)^2} = \\ &= \sqrt{\left( 1 + \frac{0,5 \cdot 0,37}{1} \right)^2 + \left( \frac{1 \cdot 0,37}{1} \right)^2} = 1,24. \end{aligned}$$

$$\delta' = \arctg \frac{P_0 X'_d \Sigma}{U + Q_0 X'_d \Sigma} = \arctg \frac{1 \cdot 0,37}{1 + 0,5 \cdot 0,37} = 17,3^\circ.$$

$$E'_d = E' \cos(\delta - \delta') = 1,24 \cdot \cos(35,0 - 17,3) = 1,18.$$

Напряжение на шинах генератора  $U_r$  и угол  $\delta_c$  принимаем из решения примера 2.1:

$$U_r = 1,13; \quad \delta_c = 10,7^\circ.$$

Тогда

$$U_{rd} = U_r \cos(\delta - \delta_c) = 1,13 \cos(35,0 - 10,7) = 1,02.$$

ЭДС холостого хода

$$E_d = E_q \frac{x_d - x'_d}{x_q - x'_d} - E'_d \frac{x_d - x'_q}{x_q - x'_d} = 1,88 \cdot \frac{1,3 - 0,16}{0,87 - 0,16} - 1,18 \cdot \frac{1,3 - 0,87}{0,87 - 0,16} = 2,30.$$

По результатам расчетов строим векторную диаграмму (рис. 2.10).

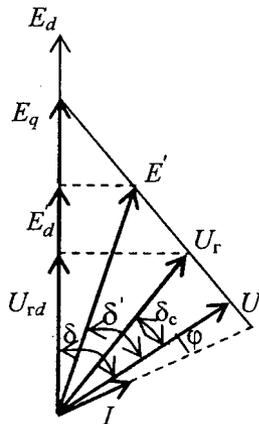


Рис. 2.10. Векторная диаграмма явнополюсного генератора

### Активная мощность генератора без АРВ

$$P_{Ed} = \frac{E_d U}{X_{d\Sigma}} \sin \delta + \frac{U^2}{2} \cdot \frac{x_d - x_q}{X_{d\Sigma} X_{q\Sigma}} \sin 2\delta = \frac{2,30 \cdot 1}{1,51} \sin \delta +$$

$$+ \frac{1^2}{2} \cdot \frac{1,3 - 0,87}{1,51 \cdot 1,08} \sin 2\delta = 1,52 \sin \delta + 0,13 \sin 2\delta.$$

Изменяя угол  $\delta$  от 0 до 180°, строим угловую характеристику мощности системы (рис. 2.11, зависимость 1).

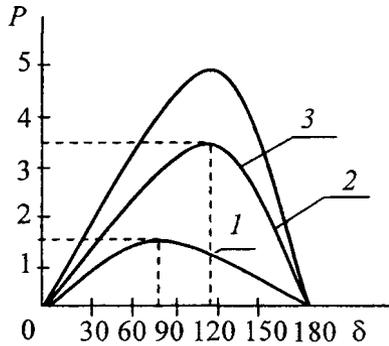


Рис. 2.11. Угловые характеристики мощности системы:  
1 – генератор без АРВ; 2 – генератор с АРВ ПД;  
3 – генератор с АРВ СД

### Активная мощность генератора с АРВ ПД

$$P_{E'd} = \frac{E'_d U}{X'_{d\Sigma}} \sin \delta - \frac{U^2}{2} \cdot \frac{x_q - x'_d}{X_{q\Sigma} X'_{d\Sigma}} \sin 2\delta = \frac{1,18 \cdot 1}{0,37} \sin \delta -$$

$$- \frac{1^2}{2} \cdot \frac{0,87 - 0,16}{1,08 \cdot 0,37} \sin 2\delta = 3,19 \sin \delta - 0,89 \sin 2\delta.$$

По данному выражению построена угловая характеристика мощности системы с генератором с АРВ ПД (рис. 2.11, зависимость 2).

Активная мощность генератора с АРВ СД

$$P_{Urd} = \frac{U_{rd}U}{x_c} \sin \delta - \frac{U^2}{2} \cdot \frac{x_q - x_c}{X_q \Sigma x_c} \sin 2\delta = \frac{1,02 \cdot 1}{0,21} \sin \delta -$$

$$- \frac{1^2}{2} \cdot \frac{0,87 - 0,21}{1,08 \cdot 0,21} \sin 2\delta = 4,86 \sin \delta - 1,46 \sin 2\delta.$$

По данному выражению построена угловая характеристика мощности системы с генератором с АРВ СД (рис. 2.11, зависимость 3).

### Задача 2.11

Для системы, схема которой представлена на рис. 1.1, требуется исследовать статическую устойчивость без учета и с учетом демпфирования, найти частоту и период собственных колебаний, а также построить зависимость изменения угла  $\delta$  ( $\Delta\delta$ ) от времени при отклонении ротора на 1 градус от положения установившегося режима при  $0^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$  и  $100^\circ$ .

Параметры элементов схемы замещения принять из решения задачи 1.1. Демпфирующую мощность для вариантов 1–5 принять 50, для 6–10 – 60, для 11–15 – 70, для 16–20 – 80, для 21 – 100.

**Решение.** Корни уравнения свободного движения для малых возмущений определяются по выражению

$$p_{1,2} = \pm \sqrt{\frac{P_d^2}{4T_j^2} - \frac{P_c}{T_j} - \frac{P_d}{2T_j}}, \quad (2.50)$$

где  $P_d$  – демпфирующая мощность;

$P_c$  – синхронизирующая мощность.

Синхронизирующая мощность

$$P_c = \frac{E_q U}{x_d + x_c} \cos \delta_0. \quad (2.51)$$

Без учета демпферного момента ( $P_d = 0$ ) угловая частота  $\gamma$  и период собственных колебаний  $T$  ротора при  $P_c > 0$ :

$$\gamma = \sqrt{\frac{P_c}{T_j \omega_0}}, \quad (2.52)$$

$$T = \frac{2\pi}{\gamma}. \quad (2.53)$$

Уравнение движения ротора генератора при  $P_c > 0$

$$\Delta\delta = \Delta\delta_0 \cos 2\pi\gamma ft. \quad (2.54)$$

Уравнение движения ротора генератора при  $P_c < 0$

$$\Delta\delta = \frac{\Delta\delta_0}{2} (e^{p_1 t} + e^{p_2 t}). \quad (2.55)$$

С учетом демпферного момента угол, при котором характер затухания  $\Delta\delta$  становится аperiodическим:

$$\delta_0 = \arccos \left( \frac{P_d^2}{4T_j} \cdot \frac{x_d + x_c}{E_q U} \right). \quad (2.56)$$

Для периодического процесса уравнение движения ротора

$$\Delta\delta = \frac{\Delta\delta_0}{\gamma} e^{-\beta t} \sqrt{\alpha} \sin(\gamma t + \psi_0), \quad (2.57)$$

где  $\psi_0 = \arctg \frac{\gamma}{\beta}$ ;  $\alpha = \frac{P_c}{T_j}$ ;  $\beta = \frac{P_d}{2T_j}$ ;  $\gamma = \sqrt{\frac{P_d^2}{4T_j^2} - \frac{P_c}{T_j}} = \sqrt{\beta^2 - \alpha}$ .

Для аperiodического процесса уравнение движения ротора

$$\Delta\delta = \Delta\delta_0 e^{-\beta t}. \quad (2.58)$$

При  $P_c < 0$  уравнение движения ротора

$$\Delta\delta = \Delta\delta_0 \frac{p_1 e^{p_2 t} - p_2 e^{p_1 t}}{p_1 - p_2}, \quad (2.59)$$

где  $p_{1,2} = -\beta \pm \gamma$ .

**Пример к задаче 2.11.** Для системы, схема которой представлена на рис. 1.1, требуется исследовать статическую устойчивость без учета и с учетом демпфирования методом малых колебаний. Параметры элементов схемы замещения принять из примера 1.1. Демпфирующая мощность равна 50.

**Решение.** Без учета демпфирования при  $\delta_0 = 0^\circ$

$$P_c = \frac{2,4 \cdot 1}{1,59} \cos 0 = 1,51;$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{1,51}{10,08 \cdot 314}} = 0,0218 \frac{1}{\text{рад}};$$

$$T = \frac{2 \cdot 3,14}{0,0218} = 288 \text{ рад} = 0,917 \text{ с};$$

$$\Delta\delta = 1 \cdot \cos 360 \cdot 0,0218 \cdot 50t = \cos 392t.$$

На рис. 2.12 построена зависимость  $\Delta\delta = f(t)$  при  $t = 0 \dots 2 \text{ с}$ .

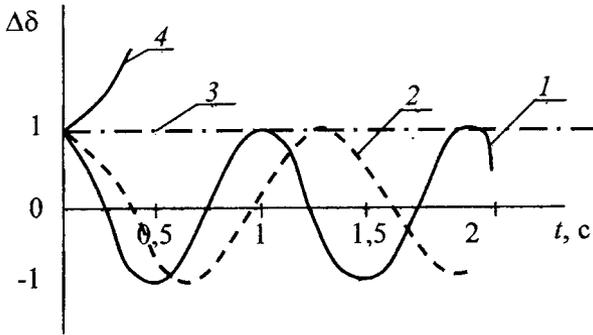


Рис. 2.12. Зависимости  $\Delta\delta = f(t)$  без учета демпфирования:  
 1 –  $\delta_0 = 0^\circ$ ; 2 –  $\delta_0 = 60^\circ$ ; 3 –  $\delta_0 = 90^\circ$ ; 4 –  $\delta_0 = 100^\circ$

Без учета демпфирования при  $\delta_0 = 60^\circ$ :

$$P_c = \frac{2,4 \cdot 1}{1,59} \cos 60 = 0,755;$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{0,755}{10,08 \cdot 314}} = 0,0154 \frac{1}{\text{рад}};$$

$$T = \frac{2 \cdot 3,14}{0,0154} = 407 \text{ рад} = 1,3 \text{ с};$$

$$\Delta\delta = 1 \cdot \cos 360 \cdot 0,0154 \cdot 50t = \cos 277t.$$

Без учета демпфирования при  $\delta_0 = 90^\circ$   $P_c = 0$ ,  $\gamma = 0$ ,  $T = \infty$ ,  $p_{1,2} = 0$ .

Без учета демпфирования при  $\delta_0 = 100^\circ$

$$P_c = \frac{2,4 \cdot 1}{1,59} \cos 100 = -0,262;$$

$$p_{1,2} = \pm \sqrt{\frac{0,262}{10,08 \cdot 314}} = \pm 0,0091;$$

$$\Delta\delta = \frac{1}{2}(e^{2 \cdot 3,14 \cdot 50 - 0,0091t} + e^{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot (-0,0091)t}) = \frac{1}{2}(e^{2,86t} + e^{-2,86t}).$$

С учетом демпфирования при  $\delta_0 = 0^\circ$

$$\alpha = \frac{1,51}{10,08 \cdot 314} = 0,00048;$$

$$\beta = \frac{50}{2 \cdot 10,08 \cdot 314} = 0,0079;$$

$$\gamma = \sqrt{0,0079^2 - 0,00048} = 0,0204;$$

$$\psi_0 = \operatorname{arctg} \frac{0,0204}{0,0079} = 68^\circ;$$

$$\begin{aligned} \Delta\delta &= \frac{1}{0,0204} e^{-0,0079 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 50t} \sqrt{0,00048} \sin(0,0204 \cdot 360 \cdot 50t + 68^\circ) = \\ &= 1,07 e^{-2,48t} \sin(367t + 68). \end{aligned}$$

Угол, при котором характер затухания  $\Delta\delta$  становится аperiodическим:

$$\delta_0 = \arccos \left( \frac{50^2}{4 \cdot 10,08 \cdot 314} \cdot \frac{1,59}{2,4 \cdot 1} \right) = 82^\circ.$$

С учетом демпфирования при  $\delta_0 = 60^\circ$

$$\alpha = \frac{0,755}{10,08 \cdot 314} = 0,00024;$$

$$\beta = \frac{50}{2 \cdot 10,08 \cdot 314} = 0,0079;$$

$$\gamma = \sqrt{0,0079^2 - 0,00024} = 0,0133;$$

$$\psi_0 = \operatorname{arctg} \frac{0,0133}{0,0079} = 59^\circ;$$

$$\begin{aligned} \Delta\delta &= \frac{1}{0,0133} e^{-0,0079 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 50t} \sqrt{0,00024} \sin(0,0133 \cdot 360 \cdot 50t + 59^\circ) = \\ &= 1,16 e^{-2,48t} \sin(239t + 59). \end{aligned}$$

С учетом демпфирования при  $\delta_0 = 90^\circ$   $p_1 = 0$ ,  $p_2 = -2\beta$  – угол неизменный.

С учетом демпфирования при  $\delta_0 = 100^\circ$

$$\alpha = \frac{0,262}{10,08 \cdot 314} = -0,000083;$$

$$\beta = \frac{50}{2 \cdot 10,08 \cdot 314} = 0,0079;$$

$$\gamma = \sqrt{0,0079^2 + 0,000083} = 0,012;$$

$p_{1,2} = 0,0079 \pm 0,012$  (оба корня действительны и один из них положительный);

$$\begin{aligned} \Delta\delta &= 1 \frac{0,0199 e^{-0,0041 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 50t} + 0,0041 e^{0,0199 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 50t}}{0,0199 + 0,0041} = \\ &= \frac{0,0199 e^{-1,287t} + 0,0041 e^{6,248t}}{0,024}. \end{aligned}$$

На рис. 2.13 построены зависимости  $\Delta\delta = f(t)$  при учете демпфирования для рассмотренных случаев.

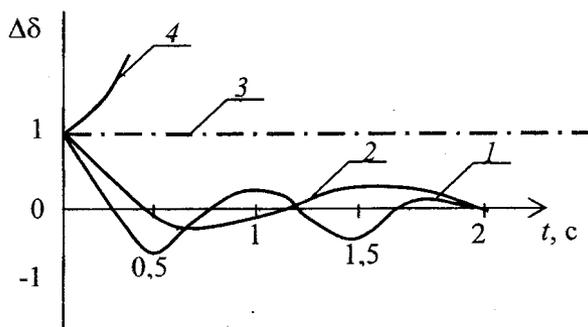


Рис. 2.13. Зависимости  $\Delta\delta = f(t)$  с учетом демпфирования:  
 $1 - \delta_0 = 0^\circ$ ;  $2 - \delta_0 = 60^\circ$ ;  $3 - \delta_0 = 90^\circ$ ;  $4 - \delta_0 = 100^\circ$

### 3. ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

#### Задача 3.1

В электрической системе (рис. 1.1) возникает КЗ вблизи шин на линии Л-2 в точке 1 или 2. Релейной защитой данная линия отключается. Требуется:

1. Определить параметры схемы замещения системы в аварийном и послеаварийном режимах.
2. Построить динамические характеристики мощности системы.
3. Рассчитать максимально допустимые угол и время отключения КЗ.

Параметры элементов и режимы системы взять из задач 1.1. и 2.1.

**Решение.** Упрощенные расчеты динамической устойчивости электрических систем выполняются при представлении синхронных машин переходными ЭДС  $E'$ , приложенными за переходными сопротивлениями  $X'_d$ . Для определения предельного угла отключения КЗ построим динамические характеристики системы для трех режимов, которые нами рассматриваются:

- исходного;
- аварийного, при КЗ;
- послеаварийного, при отключении поврежденной линии электропередачи.

Для исходного режима схема замещения данной системы имеет вид, представленный на рис. 3.1, а. Активную мощность можно найти по формуле

$$P_I = \frac{E'U}{X'_{d\Sigma}} \sin \delta' = P_M^I \sin \delta', \quad (3.1)$$

где  $P_M^I = E' \cdot U / X'_{d\Sigma}$  – амплитуда характеристики мощности исходного нормального режима.

Угол  $\delta'$ , как отмечалось ранее, характеризует сдвиг вектора ЭДС  $E'$  относительно вектора  $U$ , но далее для упрощения знак «'» опускается. Поэтому исходный режим будет характеризоваться углом  $\delta_0 = \delta'_0$ .

Схема замещения системы в аварийном режиме отличается от схемы в нормальном режиме тем, что в месте КЗ дополнительно подключается сопротивление аварийного шунта  $x_{ш}$  (рис. 3.1, б) для случая, когда КЗ возникает в точке 1 системы, которая нами рассматривается. Величина  $x_{ш}$  в значительной степени зависит от вида КЗ (табл. 3.1).

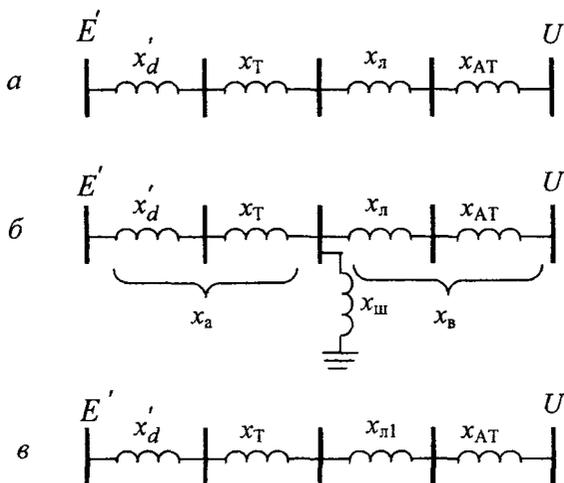
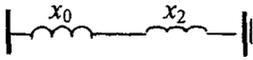
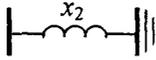
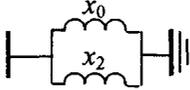
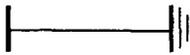


Рис. 3.1. Схемы замещения системы:  
 а – исходный режим; б – аварийный режим;  
 в – послеаварийный режим

## Зависимость сопротивления шунта от вида КЗ

| Вид КЗ              | Схема шунта   | Сопротивление шунта                 |
|---------------------|---|-------------------------------------|
| Однофазное          |  | $x_{ш} = x_0 + x_2$                 |
| Двухфазное          |  | $x_{ш} = x_2$                       |
| Двухфазное на землю |  | $x_{ш} = \frac{x_2 x_0}{x_2 + x_0}$ |
| Трёхфазное          |  | $x_{ш} = 0$                         |

Для выявления сопротивления нулевой последовательности  $x_0$  и обратной последовательности  $x_2$  последовательно составляются соответствующие схемы замещения (рис. 3.2).

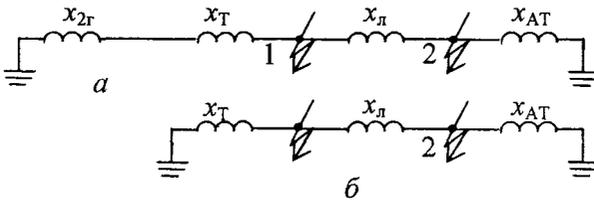


Рис. 3.2. Схемы замещения системы:  
а – обратной последовательности; б – нулевой последовательности

Искомые величины сопротивлений находятся путем свертывания схем относительно точки КЗ. Так, например, при КЗ в точке 1 значения сопротивлений находятся по формулам:

$$x_2 = \frac{(x_{2Г} + x_T)(x_{Л} + x_{АТ})}{x_{2Г} + x_T + x_{Л} + x_{АТ}}; \quad (3.2)$$

$$x_0 = \frac{x_T(x_{Л0} + x_{АТ})}{x_T + x_{Л0} + x_{АТ}}.$$

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

$$X_{ав} = x_a + x_b + \frac{x_a x_b}{x_{ш}}, \quad (3.3)$$

где  $x_a$  – суммарное сопротивление элементов системы от ЭДС  $E'$  до точки КЗ;

$x_b$  – суммарное сопротивление элементов системы от точки КЗ до шин приемной системы (вектор  $U$ ).

Для случая КЗ в точке 2 системы

$$x_a = x_d' + x_T + x_{Л}; \quad x_b = x_{АТ}.$$

Активная мощность в аварийном режиме находится по формуле

$$P_{II} = \frac{E'U}{X_{ав}} \cdot \sin \delta = P_M^{II} \sin \delta, \quad (3.4)$$

где  $P_M^{II} = E'U / X_{ав}$  – амплитуда характеристики мощности в аварийном режиме при КЗ.

В системе КЗ устраняется путем отключения поврежденного элемента. В данном случае это отключение одной линии Л-2, где возникло КЗ. Таким образом, схема замещения системы в послеаварийном режиме имеет вид, приведенный на рис. 3.1, в. Активную мощность можно найти из уравнения

$$P_{III} = \frac{E'U}{X_{па}} \cdot \sin \delta = P_M^{III} \sin \delta, \quad (3.5)$$

где  $P_M^{III} = E'U / X_{па}$  – амплитуда характеристики мощности в послеаварийном режиме;

$X_{па} = x'_d + x_T + x_{л1} + x_{AT}$  – результирующее сопротивление системы в послеаварийном режиме при отключении КЗ.

Подставляя неизменные значения амплитуд мощности в формулы (3.1), (3.4), (3.5) и изменяя угол  $\delta$  от  $0^\circ$  до  $180^\circ$ , можно построить динамические угловые характеристики системы, приведенные на рис. 3.3.

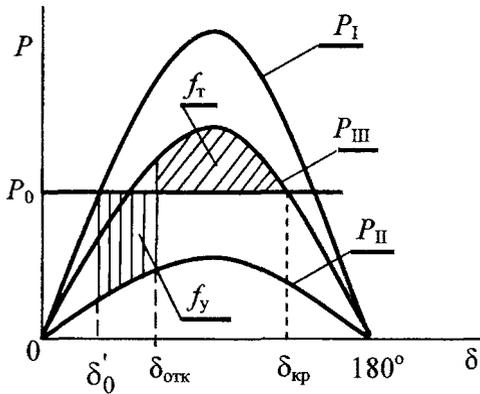


Рис. 3.3. Динамические характеристики системы в различных режимах:  
 $P_I$  – исходный;  $P_{II}$  – аварийный;  $P_{III}$  – послеаварийный

Из условия равенства площадей ускорения  $f_y$  и торможения  $f_T$  (см. рис. 3.3) найдем предельный угол отключения КЗ

$$\cos \delta_{отк}^{пр} = \frac{(\pi/180) \cdot P_0 (\delta_{кр} - \delta_0') - P_M^{II} \cos \delta_0' + P_M^{III} \cos \delta_{кр}}{P_M^{III} - P_M^{II}}. \quad (3.6)$$

В этом выражении углы измеряются в градусах.

Критический угол (см. рис. 3.3) рассчитывается по формуле

$$\delta_{\text{кр}} = 180^\circ - \arcsin \frac{P_0}{P_{\text{М}}^{\text{III}}}. \quad (3.7)$$

Для изображения площадок ускорения и торможения необходимо выполнять штриховку от механической мощности  $P_0$  до характеристик электрической мощности соответствующего режима при изменении угла  $\delta$ .

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

$$T_j \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_0 - P, \quad (3.8)$$

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

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

*Первый интервал (0 – 0,05 с)*

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

$$P_{(1)} = P_{\text{М}}^{\text{II}} \sin \delta'_0.$$

Избыток мощности в начале первого интервала

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

Приращение угла за первый интервал:

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

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

где  $K$  – постоянный коэффициент;  $f$  – частота.

Угол в конце первого интервала

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

*Второй интервал (0,05 – 0,1 с)*

$$P_{(2)} = P_M^{\text{II}} \sin \delta_1;$$

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

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

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

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

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

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

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

$$\delta_{(n)} = \delta_{(n-1)} + \Delta\delta_{(n)}. \quad (3.9)$$

По результатам расчетов строится кривая  $\delta = f(t)$  (рис. 3.4). Зная значения  $\delta_{\text{отк}}^{\text{пр}}$ , на данной кривой находим  $t_{\text{отк}}^{\text{пр}}$  (см. рис. 3.4). Если  $t_{\text{отк}}^{\text{пр}} > t_{\text{отк}}$ , то динамическая устойчивость системы обеспечивается, в противном случае необходимо принимать дополнительные меры для сохранения устойчивости при данном КЗ.

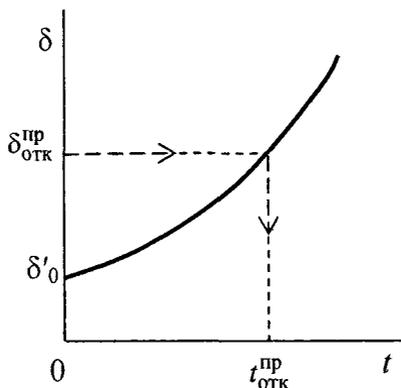


Рис. 3.4. Определение максимально допустимого времени отключения короткого замыкания

**Пример к задаче 3.1.** В электрической системе (см. рис. 1.1) на линии Л2 вблизи электростанции возникает двухфазное КЗ на землю. Релейной защитой данная линия отключается.

Требуется:

1. Определить параметры схемы замещения системы в аварийном и послеаварийном режимах.
2. Построить динамические характеристики мощности системы.
3. Рассчитать максимально допустимые угол и время отключения КЗ.

Параметры элементов системы:

Сопротивление нулевой последовательности линий электропередачи  $x_{\text{л}}^{(0)} = 4,0x_{\text{л}}$ .

Схема соединений обмоток: Т –  $\Delta/\text{т}$ , АТ –  $\text{т}/\text{т}$ .

Остальные недостающие параметры взять из примеров 1.1 и 2.1.

**Решение.** Схемы замещения системы для токов обратной и нулевой последовательности имеют вид, приведенный на рис. 3.2.

Эквивалентные сопротивления схем обратной последовательности:

$$x_2 = \frac{(x_{2Г} + x_T)(x_{Л} + x_{АГ})}{x_{2Г} + x_T + x_{Л} + x_{АГ}} = \frac{(0,13 + 0,09)(0,07 + 0,05)}{0,13 + 0,09 + 0,07 + 0,05} = 0,08,$$

нулевой последовательности:

$$x_0 = \frac{x_T(x_{Л}^{(0)} + x_{АГ})}{x_T + x_{Л}^{(0)} + x_{АГ}} = \frac{0,09(4 \cdot 0,07 + 0,05)}{0,09 + 4 \cdot 0,07 + 0,05} = 0,07.$$

Значение сопротивления аварийного шунта

$$x_{Ш} = \frac{x_2 x_0}{x_2 + x_0} = \frac{0,08 \cdot 0,07}{0,08 + 0,07} = 0,037.$$

Результирующее сопротивление системы в аварийном режиме

$$\begin{aligned} X_{ав} &= X'_{d\Sigma} + \frac{(x'_d + x_T)(x_{Л} + x_{АГ})}{x_{Ш}} = \\ &= 0,37 + \frac{(0,16 + 0,09)(0,07 + 0,05)}{0,037} = 1,18. \end{aligned}$$

Общее сопротивление системы при отключении одной линии

$$X_{па} = x'_d + x_T + x_{Л1} + x_{АГ} = 0,16 + 0,09 + 0,14 + 0,05 = 0,44.$$

Угловая характеристика мощности в исходном режиме

$$P_1 = \frac{E'U}{X'_{d\Sigma}} \sin \delta = \frac{1,24 \cdot 1}{0,37} \sin \delta = 3,35 \sin \delta, \quad P_M^I = 3,35.$$

Угловая характеристика мощности в аварийном режиме

$$P_{II} = \frac{E' \cdot U}{X_{ав}} \sin \delta = \frac{1,24 \cdot 1}{1,18} \sin \delta = 1,05 \sin \delta, \quad P_M^{II} = 1,05.$$

Угловая характеристика мощности в послеаварийном режиме

$$P_{III} = \frac{E' \cdot U}{X_{па}} \sin \delta = \frac{1,24 \cdot 1}{0,44} \sin \delta = 2,82 \sin \delta, \quad P_M^{III} = 2,82.$$

По данным выражениям, изменяя угол  $\delta$  от  $0$  до  $180^\circ$ , на рис. 3.5 построены динамические характеристики мощности системы для трех рассматриваемых режимов.

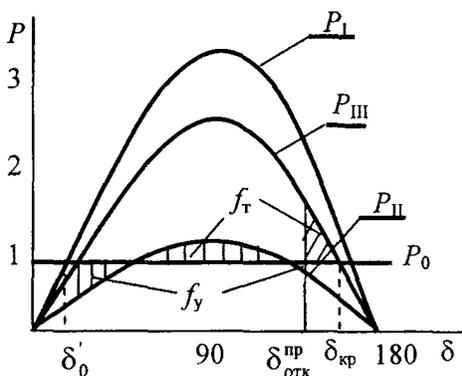


Рис. 3.5. Динамические характеристики мощности системы в режимах:  $P_I$  – исходном;  $P_{II}$  – аварийном;  $P_{III}$  – послеаварийном

Критический угол

$$\delta_{кр} = 180^\circ - \arcsin \frac{P_0}{P_M^{III}} = 180^\circ - \arcsin \frac{1}{2,82} = 159,2^\circ.$$

### Предельный угол отклонения КЗ

$$\begin{aligned}\delta_{\text{отк}}^{\text{пр}} &= \arccos \frac{(\pi/180)P_0(\delta_{\text{кр}} - \delta'_0) - P_{\text{М}}^{\text{II}} \cos \delta'_0 + P_{\text{М}}^{\text{III}} \cos \delta_{\text{кр}}}{P_{\text{М}}^{\text{III}} - P_{\text{М}}^{\text{II}}} = \\ &= \arccos \frac{(3,14/180) \cdot 1 \cdot (159,2^\circ - 17,3^\circ) - 1,05 \cos 17,3^\circ + 2,82 \cos 159,2^\circ}{2,82 - 1,05} = 131,0^\circ.\end{aligned}$$

По результатам расчетов заштрихуем площадку торможения и ускорения (см. рис. 3.5). Поскольку геометрически  $f_y = f_t$ , следовательно, расчет  $\delta_{\text{отк}}^{\text{пр}}$  выполнен правильно.

Уравнение движения ротора генератора решим методом последовательных интервалов. Длительность расчетного интервала примем  $\Delta t = 0,05$  с.

Значение постоянного коэффициента

$$K = \frac{360 \cdot f \cdot \Delta t^2}{T_j} = \frac{360 \cdot 50 \cdot 0,05^2}{10,08} = 4,46^\circ.$$

Значение электрической мощности в первый момент возникновения КЗ

$$P_{(1)} = P_{\text{М}}^{\text{II}} \sin \delta'_0 = 1,05 \sin 17,3^\circ = 0,31.$$

Избыток мощности в начале первого интервала

$$\Delta P_{(1)} = P_0 - P_{(1)} = 1 - 0,31 = 0,69.$$

Изменение угла за первый интервал

$$\Delta \delta_{(1)} = 0,5 K \Delta P_{(1)} = 0,5 \cdot 4,46 \cdot 0,69 = 1,54^\circ.$$

Угол к концу первого интервала

$$\delta_{(1)} = \delta'_0 + \Delta \delta_{(1)} = 17,3 + 1,54 = 18,84^\circ.$$

Второй интервал (0,05...0,1 с):

$$P_{(2)} = P_M^{\text{II}} \sin \delta_{(1)} = 1,05 \sin 18,84^\circ = 0,34;$$

$$\Delta P_{(2)} = P_0 - P_{(2)} = 1 - 0,34 = 0,66;$$

$$\Delta \delta_{(2)} = \Delta \delta_{(1)} + K \Delta P_{(2)} = 1,54 + 4,46 \cdot 0,66 = 4,48^\circ;$$

$$\delta_{(2)} = \delta_{(1)} + \Delta \delta_{(2)} = 18,84 + 4,48 = 23,32^\circ.$$

По результатам дальнейших расчетов на рис. 3.6 построена кривая  $\delta = f(t)$ . По ней, исходя из значения  $\delta_{\text{отк}}^{\text{пр}} = 131,0^\circ$ , определяем  $t_{\text{отк}}^{\text{пр}} = 0,61$  с. Таким образом, если действительное время отключения КЗ меньше 0,61 с, то динамическая устойчивость рассматриваемой системы при данном виде повреждения обеспечивается.

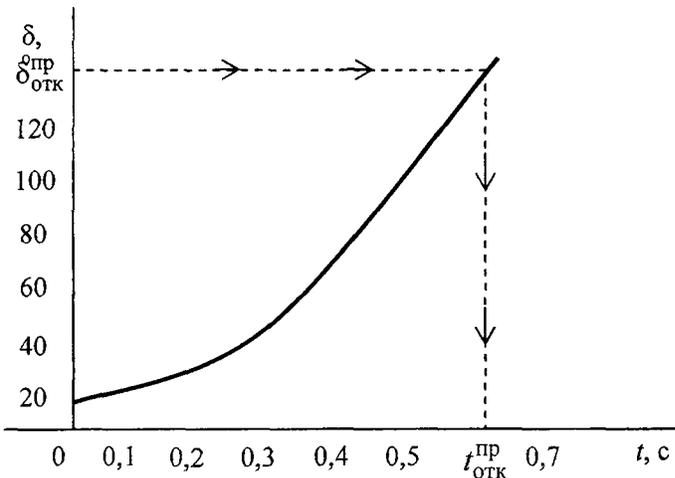


Рис. 3.6. Определение предельного времени отключения КЗ

### Задача 3.2

В схеме, приведенной на рис. 1.1, отключаются и затем вновь включаются обе линии электропередачи. Требуется определить предельное время включения линий для сохранения динамической устойчивости и графически изобразить площадки торможения и ускорения в рассматриваемом переходном режиме.

Параметры схемы и исходного режима взять из задачи 3.1.

**Решение.** При отключении линий передаваемая мощность ОЭС равна нулю, т. е.  $P_M^{\text{II}} = 0$ .

Критический угол определяется выражением

$$\delta_{\text{кр}} = 180^\circ - \arcsin \frac{P_0}{P_M^{\text{I}}}. \quad (3.10)$$

Предельный угол включения линий электропередачи

$$\delta_{\text{вкл}}^{\text{пр}} = \arccos \frac{(\pi/180)P_0(\delta_{\text{кр}} - \delta'_0) - P_M^{\text{II}} \cos \delta'_0 + P_M^{\text{I}} \cos \delta_{\text{кр}}}{P_M^{\text{I}} - P_M^{\text{II}}}. \quad (3.11)$$

Предельное время включения линий находится из уравнения

$$t_{\text{вкл}}^{\text{пр}} = \sqrt{T_j (\delta_{\text{вкл}}^{\text{пр}} - \delta'_0) / (\pi/P_0)}. \quad (3.12)$$

**Пример к задаче 3.2.** В схеме, приведенной на рис. 1.1, отключаются и затем вновь включаются обе линии электропередачи. Параметры схемы и исходного режима аналогичны примеру 3.1.

Требуется определить предельное время включения линий для сохранения динамической устойчивости.

**Решение.** При отключении линий передаваемая мощность в ОЭС равна нулю, т. е.  $P_M^{\text{II}} = 0$ .

Критический угол

$$\delta_{кр} = 180^\circ - \arcsin \frac{P_0}{P_M^I} = 180^\circ - \arcsin \frac{1}{3,35} = 162,7^\circ.$$

Предельный угол включения линий электропередачи

$$\begin{aligned} \delta_{вкл}^{пр} &= \arccos \frac{(\pi/180)P_0(\delta_{кр} - \delta_0') - P_M^{II} \cos \delta_0' + P_M^I \cos \delta_{кр}}{P_M^I - P_M^{II}} = \\ &= \arccos \frac{(3,14/180^\circ) \cdot 1 \cdot (162,7^\circ - 17,3^\circ) - 0 \cdot \cos 17,3^\circ + 3,35 \cos 162,7^\circ}{3,35 - 0} = 102^\circ. \end{aligned}$$

Определим предельное время включения линий:

$$\begin{aligned} t_{вкл}^{пр} &= \sqrt{T_j (\delta_{вкл}^{пр} - \delta_0') / (P_0 \pi f)} = \\ &= \sqrt{10,08 (102^\circ - 17,3^\circ) / (1 \cdot 180^\circ \cdot 50)} = 0,31 \text{ с.} \end{aligned}$$

Характер процесса при отключении и включении линий показан на рис. 3.7.

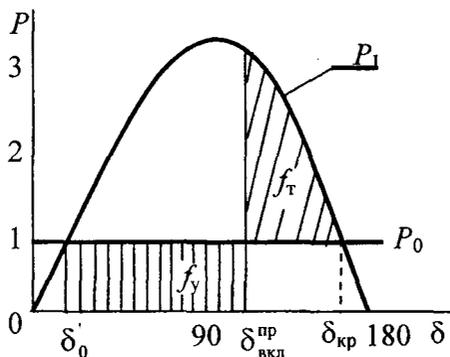


Рис. 3.7. Характеристики мощности и площадки торможения и ускорения в режиме отключения и предельно допустимого включения линий

### Задача 3.3

В схеме, приведенной на рис. 1.1, отключаются обе линии электропередачи. После отключения включается только одна из линий. Требуется определить предельное время включения линии для сохранения динамической устойчивости и графически изобразить площадки ускорения и торможения в рассматриваемом переходном режиме. Сопоставить полученные результаты с результатами задачи 3.2.

Параметры схемы и исходного режима взять из задачи 3.1.

**Решение.** При отключении линий передаваемая мощность ОЭС равна нулю, т. е.  $P_M^{\text{II}} = 0$ . В послеаварийном режиме активная мощность находится из выражения

$$P_{\text{III}} = \frac{E'U}{X_{\text{па}}} \sin \delta = P_M^{\text{III}} \sin \delta. \quad (3.13)$$

Критический угол определяется выражением

$$\delta_{\text{кр}} = 180^\circ - \arcsin \frac{P_0}{P_M^{\text{III}}}. \quad (3.14)$$

Предельный угол включения линий электропередачи

$$\delta_{\text{вкл}}^{\text{пр}} = \arccos \frac{(\pi/180)P_0(\delta_{\text{кр}} - \delta'_0) - P_M^{\text{II}} \cos \delta'_0 + P_M^{\text{III}} \cos \delta_{\text{кр}}}{P_M^{\text{III}} - P_M^{\text{II}}}. \quad (3.15)$$

Предельное время включения линии электропередачи находится по формуле (3.12).

**Пример к задаче 3.3.** В схеме, приведенной на рис. 1.1, отключаются обе линии электропередачи. После отключения включается только одна из линий. Параметры схемы и исходного режима аналогичны примеру 3.1.

Требуется определить предельное время включения линии для сохранения динамической устойчивости.

**Решение.** При отключении линий передаваемая мощность в ОЭС равна нулю, т. е.  $P_M^{\text{II}} = 0$ .

Критический угол

$$\delta_{\text{кр}} = 180^\circ - \arcsin \frac{P_0}{P_M^{\text{III}}} = 180^\circ - \arcsin \frac{1}{2,82} = 159,2^\circ.$$

Предельный угол включения линии электропередачи

$$\begin{aligned} \delta_{\text{пр}} &= \arccos \frac{(\pi/180)P_0(\delta_{\text{кр}} - \delta_0') - P_M^{\text{II}} \cos \delta_0' + P_M^{\text{III}} \cos \delta_{\text{кр}}}{P_M^{\text{III}} - P_M^{\text{II}}} = \\ &= \arccos \frac{(3,14/180^\circ) \cdot 1 \cdot (159,2^\circ - 17,3^\circ) - 0 \cdot \cos 17,3^\circ + 2,82 \cos 159,2^\circ}{2,82 - 0} = 93^\circ. \end{aligned}$$

Предельное время включения линий

$$\begin{aligned} t_{\text{вкл}}^{\text{пр}} &= \sqrt{T_j (\delta_{\text{вкл}}^{\text{пр}} - \delta_0') / (P_0 180^\circ f)} = \\ &= \sqrt{10,08(93^\circ - 17,3^\circ) / (1 \cdot 180^\circ \cdot 50)} = 0,29 \text{ с.} \end{aligned}$$

Характер процесса при отключении двух линий и включении только одной линии показан на рис. 3.8.

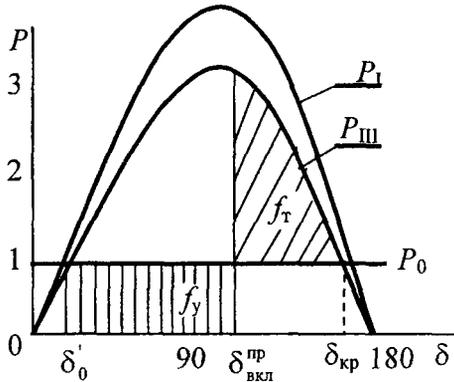


Рис. 3.8. Характеристики мощности и площадки ускорения и торможения при отключении двух линий и предельно допустимом угле включения одной линии

### Задача 3.4

В схеме сети, приведенной на рис. 3.9, в начале линии включается нагрузка, равная  $P_H$  (см. табл. 1.1). Определить максимальный размах качаний угла генератора после включения нагрузки, принимая для нее коэффициент мощности, равный единице.

Параметры схемы сети и исходного режима взять из задачи 3.1.

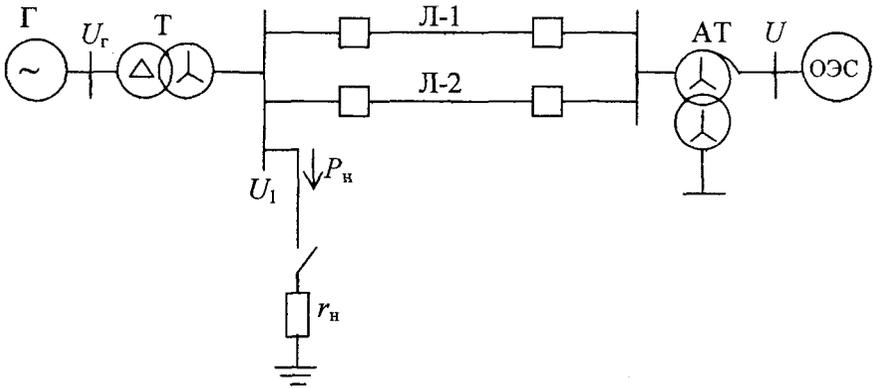


Рис. 3.9. Схема исследуемой сети

**Решение.** Для определения искомого размаха качания угла генератора используется метод площадей. Для этого в схеме замещения нагрузка представляется постоянным сопротивлением  $r_H$ . Напряжение  $U_1$  в начале линии, при невключенной нагрузке, в исходном режиме

$$U_1 = \sqrt{\left( U + \frac{Q_0(x_L + x_{AT})}{U} \right)^2 + \left( \frac{P_0(x_L + x_{AT})}{U} \right)^2}. \quad (3.16)$$

Сопротивление нагрузки

$$r_H = \frac{U_1^2}{P_H}. \quad (3.17)$$

В исходном режиме угловая характеристика мощности

$$P_I = \frac{E'U}{X'_{d\Sigma}} \sin \delta'.$$

При включении активной нагрузки характеристика будет иметь вид

$$P_{II} = E'^2 y_{11} \sin \alpha_{11} + E'U y_{12} \sin(\delta' - \alpha_{12}).$$

Методика нахождения  $y_{11}$ ,  $\alpha_{11}$ ,  $y_{12}$ ,  $\alpha_{12}$  аналогична задаче 2.3.

В первый момент после включения нагрузки на валу генератора будет действовать избыточная мощность тормозящего характера, что приведет к уменьшению скорости и угла  $\delta'$ . Угол будет изменяться от начального значения  $\delta'_0$  до какого-то значения  $\delta'_1$ . После затухания колебаний установившийся режим при включенной нагрузке определится углом

$$\delta'_2 = \arcsin \frac{P_0 - E'^2 y_{11} \sin \alpha_{11}}{E'U y_{12}} + \alpha_{12}.$$

Заменив восходящую ветвь характеристики мощности отрезком прямой линии, получим:

$$\delta'_0 - \delta'_2 = \delta'_2 - \delta'_1.$$

Отсюда найдем угол  $\delta'_1$  и размах колебаний  $\Delta\delta = \delta'_0 - \delta'_1 = (\delta'_0 - \delta'_2) \cdot 2$ .

**Пример к задаче 3.4.** В схеме, приведенной на рис. 3.9, в начале линии включается нагрузка  $P_H = 1$ .

Требуется определить максимальный размах качаний угла генератора после включения нагрузки, принимая для нее коэффициент мощности равным единице. Параметры схемы и исходного режима взяты из примера 3.1.

**Решение.** Напряжение  $U_1$  в месте подключения нагрузки

$$U_1 = \sqrt{\left(U + \frac{Q_0(x_{\text{Л}} + x_{\text{АТ}})}{U}\right)^2 + \left(\frac{P_0(x_{\text{Л}} + x_{\text{АТ}})}{U}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(1 + \frac{0,5(0,07 + 0,05)}{1}\right)^2 + \left(\frac{1(0,07 + 0,05)}{1}\right)^2} = 1,07.$$

Сопротивление нагрузки

$$r_{\text{H}} = \frac{U_1^2}{P_{\text{H}}} = \frac{1,07^2}{1} = 1,14.$$

Угловая характеристика в исходном режиме

$$P_1 = \frac{E'U}{X_{d\Sigma}} \sin \delta' = \frac{1,24 \cdot 1}{0,37} \sin \delta' = 3,35 \sin \delta'.$$

Определим собственные и взаимные сопротивления и проводимости:

$$Z_{11} = j(x'_d + x_{\text{T}}) + \frac{j(x_{\text{Л}} + x_{\text{АТ}})r_{\text{H}}}{j(x_{\text{Л}} + x_{\text{АТ}}) + r_{\text{H}}} =$$

$$= j(0,16 + 0,09) + \frac{j(0,07 + 0,05)1,14}{j(0,07 + 0,05) + 1,14} = 0,013 + j0,37;$$

$$Z_{12} = j(x'_d + x_{\text{T}} + x_{\text{Л}} + x_{\text{АТ}}) + \frac{j(x'_d + x_{\text{T}})j(x_{\text{Л}} + x_{\text{АТ}})}{r_{\text{H}}} =$$

$$= j(0,16 + 0,09 + 0,07 + 0,05) + \frac{j(0,16 + 0,09)j(0,07 + 0,05)}{1,14} =$$

$$= j0,37 - 0,026;$$

$$Y_{11} = \frac{1}{z_{11}} = \frac{1}{0,013 + j0,37} = 0,095 - j2,70 = 2,70e^{j88,0};$$

$$Y_{12} = \frac{1}{z_{12}} = \frac{1}{-0,026 + j0,37} = -0,189 - j2,70 = 2,70e^{j94,0}.$$

Углы  $\alpha_{11}$  и  $\alpha_{12}$ :

$$\alpha_{11} = 90^\circ - 88,0^\circ = 2^\circ;$$

$$\alpha_{12} = 90^\circ - 94,0^\circ = -4^\circ.$$

Характеристика мощности при подключении активной нагрузки

$$P_{II} = E'^2 y_{11} \sin \alpha_{11} + E' U y_{12} \sin(\delta' - \alpha_{12}) = 1,24^2 \cdot 2,70 \cdot \sin 2^\circ + \\ + 1,24 \cdot 1 \cdot 2,7 \cdot \sin(\delta' + 4^\circ) = 0,14 + 3,35 \cdot \sin(\delta' + 4^\circ).$$

Установившийся режим при включенной нагрузке определяется углом

$$\delta'_2 = \arcsin \frac{P_0 - E'^2 y_{11} \sin \alpha_{11}}{E' U y_{12}} + \alpha_{12} = \arcsin \frac{1 - 0,14}{3,35} - 4,0^\circ = 10,9^\circ.$$

Размах колебаний

$$\Delta \delta = 2(\delta'_0 - \delta'_2) = 2(17,3^\circ - 10,9^\circ) = 12,8^\circ.$$

Переходный процесс приведен на рис. 3.10.

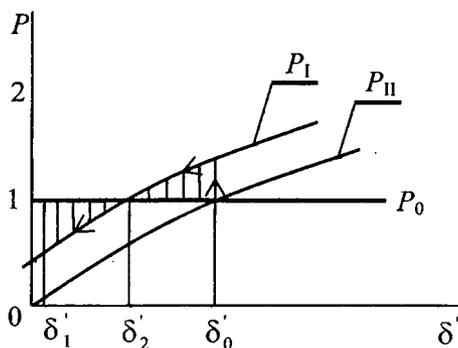


Рис. 3.10. Характеристики мощности до и после подключения нагрузки

### Задача 3.5

В схеме, приведенной на рис. 1.1, на линии Л-2 в точке 1 или 2 возникает двухфазное КЗ. В момент времени  $t_1$  оно переходит в трехфазное, а затем, в момент времени  $t_2$ , поврежденная линия отключается.

Требуется определить, сохранится ли динамическая устойчивость, если моменту времени  $t_1$  соответствует угол  $50^\circ$ ,  $t_2$  — угол  $70^\circ$ .

Параметры элементов и режимы системы взять из задач 1.1, 2.1, 3.1.

**Решение.** Схемы замещения системы обратной и нулевой последовательности имеют вид, приведенный на рис. 3.2.

Методика построения характеристик мощности в исходном ( $P_I$ ), аварийном ( $P_{II}$ ) и послеаварийном ( $P_{III}$ ) режимах приведена в задаче 3.1.

По этим характеристикам, зная мощность турбины генератора  $P_T = P_0$  и углы, соответствующие изменению режимов, строят площадки ускорения ( $f_y$ ) и торможения ( $f_T$ ). Если  $f_T > f_y$ , динамическая устойчивость сохраняется.

**Пример к задаче 3.5.** В схеме, приведенной на рис. 1.1, на линии Л-2 вблизи электростанции возникает двухфазное КЗ. В момент времени  $t_1$  оно переходит в трехфазное, а затем, в момент времени  $t_2$ , поврежденная линия отключается.

Требуется определить, сохранится ли динамическая устойчивость, если моменту времени  $t_1$  соответствует угол  $45^\circ$ ,  $t_2$  – угол  $60^\circ$ .

Параметры схемы и исходного режима аналогичны примеру 3.1.

**Решение.** Значение сопротивления аварийного шунта  $x_{ш} = x_2 = 0,08$ .  
Общее сопротивление системы при двухфазном КЗ

$$\begin{aligned}x_{ав} &= X'_{d\Sigma} + \frac{(x'_d + x_T)(x_L + x_{AT})}{x_{ш}} = \\ &= 0,37 + \frac{(0,16 + 0,09)(0,07 + 0,05)}{0,08} = 0,75.\end{aligned}$$

Угловая характеристика мощности в аварийном режиме

$$P_{II} = \frac{E'U}{x_{ав}} \sin \delta = \frac{1,24 \cdot 1}{0,75} \sin \delta = 1,65 \sin \delta, \quad P_M^{II} = 1,65.$$

Угловая характеристика мощности в исходном режиме

$$P_I = 3,35 \sin \delta, \quad P_M^I = 3,35.$$

Угловая характеристика мощности в послеаварийном режиме

$$P_{III} = 2,82 \sin \delta, \quad P_M^{III} = 2,82.$$

При трехфазном КЗ передаваемая мощность равна нулю.

По данным выражениям, изменяя угол  $\delta$  от  $0^\circ$  до  $180^\circ$ , на рис. 3.11 построены динамические характеристики мощности системы для рассматриваемых режимов. Определим площадки торможения  $f_T$  и ускорения  $f_y$ . Так как возможная величина площадки ускорения оказалась меньше, чем площадка торможения, динамическая устойчивость сохраняется.

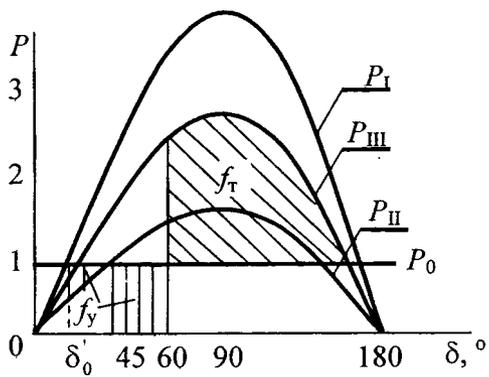


Рис. 3.11. Динамические характеристики мощности системы

## 4. УСТОЙЧИВОСТЬ НАГРУЗКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

### Задача 4.1

При отключении выключателя  $B$  в электрической системе (см. рис. 1.1) требуется определить критическое напряжение на шинах нагрузки и коэффициент запаса устойчивости по напряжению при условиях:

1. Две линии находятся в работе, генераторы оснащены АРВ ПД.
2. Одна линия отключена, генераторы оснащены АРВ ПД.
3. Одна линия отключена, генераторы не имеют АРВ.

**Решение.** Расчет устойчивости данного узла нагрузки при отключении выключателя  $B$  (см. рис. 1.1) наиболее удобно производить по практическим критериям, например

$$\frac{dE}{dU} > 0, \quad (4.1)$$

где  $E$  – эквивалентная ЭДС системы;

$U$  – напряжение на шинах нагрузки.

Проверку устойчивости комплексной нагрузки по данному критерию начинают с составления схемы замещения системы (рис. 4.1, а) и построения зависимости  $E_3 = f(U)$  (рис. 4.1, б) с использованием известной формулы

$$E = \sqrt{\left(U + \frac{QX_{\Sigma}}{U}\right)^2 + \left(\frac{PX_{\Sigma}}{U}\right)^2}, \quad (4.2)$$

где  $X_{\Sigma}$  – эквивалентное сопротивление системы;

$P, Q$  – активная и реактивная мощности нагрузки, значения которых зависят от уровня напряжения  $U$ .

Зависимости  $P = f(U), Q = f(U)$  называются статическими характеристиками нагрузки по напряжению.

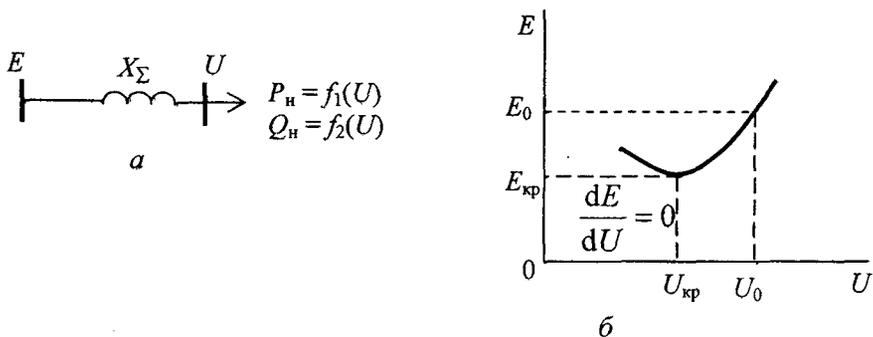


Рис. 4.1. Определение критического напряжения нагрузки с использованием вторичного критерия устойчивости:  
 а – схема замещения; б – зависимость эквивалентной ЭДС от напряжения на шинах нагрузки

Значение эквивалентного сопротивления системы зависит от конфигурации схемы сетей и типа АРВ на генераторах. Например, для системы, которую мы рассматриваем, имеем:

а) при двух линиях и АРВ ПД

$$X_{\Sigma} = x'_d + x_c;$$

б) при одной линии и АРВ ПД

$$X_{\Sigma} = x'_d + x_{c1};$$

в) при одной линии и отсутствии АРВ на генераторах

$$X_{\Sigma} = x_d + x_{c1}.$$

Для построения зависимости  $E = f(U)$  необходимо задаться рядом значений напряжения  $U$ , например, сначала принимая  $U = U_0 = 1$ . Затем, исходя из этой величины напряжения, по зависимостям  $P = f(U)$  и  $Q = f(U)$  определяют значения нагрузки, например  $P_0, Q_0$ . Полученные значения  $U, P, Q$  и  $X_{\Sigma}$  выбираются в зависимости от режи-

ма, подставляются в формулу (4.2), по которой рассчитывают  $E$  (в данном случае первую величину  $E_0$ ; см. рис. 4.1, б). Затем задаются новым значением  $U$ , например  $U_1 < U_0$ , по статическим характери-стикам опять определяют значения  $P_1, Q_1$  при этом напряжении и рассчитывают  $E_1$  и т. д. Зависимость  $E = f(U)$  строится до тех пор, пока при снижении напряжения  $U$  начинает увеличиваться  $E$ . Пре-дельный режим с точки зрения устойчивости достигается там, где производная  $dE/dU$  равна нулю, что соответствует минимальному значению  $E$  (см. рис. 4.1, б).

Запас устойчивости нагрузки по напряжению в исходном режиме можно характеризовать соотношением

$$K_U = \frac{U_0 - U_{кр}}{U_0}, \quad (4.3)$$

где  $U_0$  – напряжение на нагрузке в исходном режиме;

$U_{кр}$  – критическое напряжение в точке минимума графика  $E = f(U)$ .

Коэффициент запаса по напряжению в нормальном режиме должен быть не меньше 0,15, а в аварийном – не меньше 0,1.

**Пример к задаче 4.1.** При отключении выключателя  $B$  в электрической системе (см. рис. 1.1) с генераторами, оснащенными АРВ ПД, требуется определить критическое напряжение на шинах нагрузки и коэффициент запаса устойчивости по напряжению.

Параметры системы взять из примера 1.1.

**Решение.** Для определения критического напряжения узла нагрузки используем практический критерий устойчивости в виде неравенства (4.1). Схемы замещения системы электроснабжения потребителей в рассматриваемом режиме показаны на рис. 4.2.

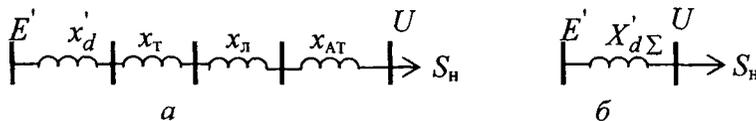


Рис. 4.2. Схемы замещения системы электроснабжения:  
а – полная; б – эквивалентная

При напряжении  $U_0 = 1,0$ :

активная мощность нагрузки  $P_0 = 1(0,83 - 0,3 \cdot 1 + 0,47 \cdot 1^2) = 1$ ;

реактивная мощность нагрузки  $Q_0 = 0,5(4,9 - 10,1 \cdot 1 + 6,2 \cdot 1^2) = 0,5$ ;

$$\begin{aligned} \text{ЭДС } E'_0 &= \sqrt{\left(U_0 + \frac{Q_0 X'_{d\Sigma}}{U_0}\right)^2 + \left(\frac{P_0 X'_{d\Sigma}}{U_0}\right)^2} = \\ &= \sqrt{\left(1 + \frac{0,5 \cdot 0,37}{1}\right)^2 + \left(\frac{1 \cdot 0,37}{1}\right)^2} = 1,24. \end{aligned}$$

При снижении напряжения  $U_1 = 0,9$ :

$$P_1 = 1 \cdot (0,83 - 0,3 \cdot 0,9 + 0,47 \cdot 0,9^2) = 0,94;$$

$$Q_1 = 0,5 \cdot (4,9 - 10,1 \cdot 0,9 + 6,2 \cdot 0,9^2) = 0,42;$$

$$E'_1 = \sqrt{\left(0,9 + \frac{0,42 \cdot 0,37}{0,9}\right)^2 + \left(\frac{0,94 \cdot 0,37^2}{0,9}\right)^2} = 1,14.$$

Далее на основе расчетов ЭДС  $E'$  при  $U = 0,8 \dots 0,5$  построена кривая  $E = f(U)$ , приведенная на рис. 4.3. Критическому значению напряжения соответствует точка перегиба кривой, где  $U_{\text{кр}} = 0,69$ .

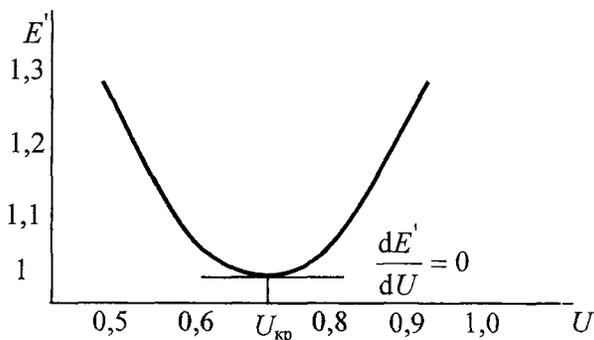


Рис. 4.3. Зависимость переходной ЭДС от напряжения на шинах нагрузки

Запас устойчивости нагрузки по напряжению

$$K_u = \frac{U_0 - U_{кр}}{U_0} = \frac{1 - 0,69}{1} = 0,31.$$

Таким образом, запас устойчивости нагрузки больше нормативного, что позволит нагрузке устойчиво работать.

### Задача 4.2

К шинам мощной электроэнергетической системы с номинальным напряжением 110 кВ через трансформатор и линию подключены  $n$  однотипных асинхронных двигателей (рис. 4.4, а).

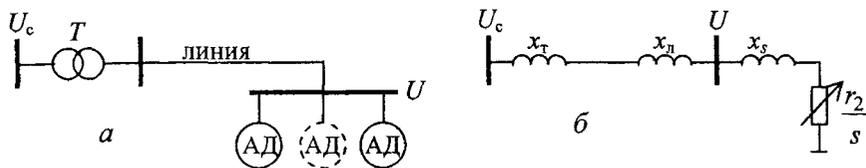


Рис. 4.4. Схемы системы электроснабжения:  
а – принципиальная; б – расчетная

Параметры элементов системы электроснабжения приведены в табл. 4.1. Номинальное напряжение на шинах двигателей 6 кВ. Требуется определить:

1. Критическое напряжение на шинах питающей системы.
2. Коэффициент запаса по напряжению.

Таблица 4.1

### Параметры системы электроснабжения

| № варианта | Двигатели       |               |                 |       |             | Линия           |               | Трансформатор     |                |
|------------|-----------------|---------------|-----------------|-------|-------------|-----------------|---------------|-------------------|----------------|
|            | $P_{н},$<br>МВт | $P_0,$<br>МВт | $\cos\varphi_0$ | $b_m$ | $n,$<br>шт. | $x_0,$<br>Ом/км | $\ell,$<br>км | $S_{нт},$<br>МВ·А | $U_{кз},$<br>% |
| 1          | 2               | 3             | 4               | 5     | 6           | 7               | 8             | 9                 | 10             |
| 1          | 0,4             | 0,4           | 0,8             | 1,6   | 14          | 0,38            | 2             | 6,3               | 8,0            |
| 2          | 0,4             | 0,35          | 0,82            | 1,7   | 12          | 0,39            | 2,5           | 10                | 18,5           |

|    |     |      |      |     |    |      |     |     |      |
|----|-----|------|------|-----|----|------|-----|-----|------|
| 1  |     |      |      |     |    |      |     |     |      |
| 3  | 0,6 | 0,6  | 0,84 | 1,8 | 10 | 0,40 | 3,0 | 16  | 9,0  |
| 4  | 0,6 | 0,55 | 0,86 | 1,9 | 8  | 0,41 | 3,5 | 25  | 9,5  |
| 5  | 0,8 | 0,8  | 0,88 | 2,0 | 6  | 0,42 | 4,0 | 32  | 10,0 |
| 6  | 0,8 | 0,7  | 0,9  | 2,1 | 4  | 0,43 | 5,0 | 4,0 | 10,5 |
| 7  | 0,5 | 0,5  | 0,81 | 2,2 | 13 | 0,44 | 2,2 | 32  | 11,0 |
| 8  | 0,5 | 0,45 | 0,83 | 2,3 | 11 | 0,45 | 2,6 | 25  | 8,0  |
| 9  | 0,7 | 0,65 | 0,85 | 2,4 | 9  | 0,46 | 3,2 | 16  | 8,5  |
| 10 | 0,7 | 0,7  | 0,87 | 2,5 | 7  | 0,47 | 3,7 | 10  | 9,0  |
| 11 | 0,9 | 0,8  | 0,89 | 2,4 | 5  | 0,38 | 4,8 | 6,3 | 9,5  |
| 12 | 0,3 | 0,3  | 0,91 | 2,3 | 14 | 0,39 | 2,3 | 32  | 10,0 |
| 13 | 0,4 | 0,45 | 0,92 | 2,2 | 13 | 0,40 | 2,7 | 25  | 10,5 |
| 14 | 0,5 | 0,5  | 0,91 | 2,1 | 12 | 0,41 | 2,9 | 16  | 11,0 |
| 15 | 0,6 | 0,55 | 0,9  | 2,0 | 11 | 0,42 | 3,3 | 10  | 9,0  |
| 16 | 0,7 | 0,7  | 0,89 | 1,9 | 10 | 0,43 | 3,7 | 6,3 | 9,5  |
| 17 | 0,8 | 0,75 | 0,88 | 1,8 | 9  | 0,44 | 4,1 | 32  | 10,0 |
| 18 | 0,8 | 0,8  | 0,87 | 1,7 | 8  | 0,45 | 4,3 | 25  | 10,5 |
| 19 | 0,9 | 0,85 | 0,86 | 1,6 | 7  | 0,46 | 4,5 | 16  | 11,0 |
| 20 | 1,0 | 0,9  | 0,85 | 1,5 | 6  | 0,47 | 4,7 | 10  | 8,0  |
| 21 | 1,0 | 1,0  | 0,84 | 1,6 | 5  | 0,38 | 5,1 | 6,3 | 8,5  |
| 22 | 1,2 | 1,1  | 0,83 | 1,7 | 4  | 0,39 | 5,5 | 32  | 9,0  |
| 23 | 0,9 | 0,85 | 0,82 | 1,8 | 5  | 0,40 | 5,3 | 25  | 9,5  |
| 24 | 0,8 | 0,8  | 0,81 | 1,9 | 7  | 0,41 | 4,9 | 16  | 10,0 |
| 25 | 0,7 | 0,7  | 0,8  | 2,0 | 8  | 0,42 | 4,7 | 10  | 10,5 |
| 26 | 0,7 | 0,65 | 0,82 | 2,1 | 9  | 0,43 | 4,2 | 6,3 | 11,0 |
| 27 | 0,6 | 0,6  | 0,84 | 2,2 | 10 | 0,44 | 3,9 | 32  | 8,0  |
| 28 | 0,6 | 0,5  | 0,86 | 2,3 | 11 | 0,45 | 3,8 | 25  | 8,5  |
| 29 | 0,5 | 0,5  | 0,88 | 2,4 | 12 | 0,46 | 3,1 | 16  | 9,0  |
| 30 | 0,5 | 0,45 | 0,9  | 2,5 | 13 | 0,47 | 2,4 | 10  | 9,5  |
| 31 | 0,6 | 0,58 | 0,88 | 2,4 | 8  | 0,33 | 3,7 | 6,3 | 8,5  |
| 32 | 0,4 | 0,4  | 0,87 | 2,3 | 9  | 0,35 | 4,1 | 6,3 | 9,1  |
| 33 | 0,3 | 0,29 | 0,86 | 2,2 | 10 | 0,36 | 4,3 | 4,0 | 9,5  |
| 34 | 0,8 | 0,76 | 0,85 | 2,1 | 11 | 0,38 | 4,5 | 10  | 9,3  |

**Решение.** Напряжение на шинах системы в исходном режиме

$$U_{c0} = \sqrt{\left(U + \frac{Q_{0д} X_c}{U}\right)^2 + \left(\frac{P_{0д} X_c}{U}\right)^2}, \quad (4.4)$$

где  $P_{0д}$ ,  $Q_{0д}$  – активная и реактивная мощности, потребляемые двигателями;

$x_c = x_T + x_L$  – индуктивное сопротивление питающей системы;

$U$  – напряжение на шинах двигателей в исходном режиме.

Индуктивное сопротивление рассеяния двигателей

$$x_s = \frac{U^2}{2b_M}, \quad (4.5)$$

где  $b_M$  – кратность максимального момента.

Критическое напряжение на шинах системы

$$U_{с.кр} = \sqrt{2P_{0д}(x_s + x_c)}. \quad (4.6)$$

Запас устойчивости по напряжению

$$K_U = \frac{U_{с0} - U_{с.кр}}{U_{с0}}. \quad (4.7)$$

**Пример к задаче 4.2.** Пять однотипных асинхронных двигателей насосной станции через линию электропередачи номинальным напряжением 6 кВ подключены к трансформатору главной понижительной подстанции (см. рис. 4.4). Параметры элементов системы электроснабжения:

– двигатель АД:  $P_H = 0,8$  МВт,  $P_0 = 0,7$  МВт,  $\cos\varphi_0 = 0,9$ , кратность максимального момента  $b_M = 2,0$ ;

– линия:  $x_0 = 0,38$  Ом/км,  $\ell = 5$  км;

– трансформатор Т:  $S_{HT} = 25$  МВ·А,  $U_K = 11$  %;

– напряжение на шинах двигателей:  $U = 6$  кВ.

Требуется определить:

1. Критическое напряжение на шинах питающей системы.
2. Коэффициент запаса устойчивости по напряжению.

**Решение.** Суммарная установленная мощность асинхронных двигателей

$$P_{нд} = 5 \cdot P_H = 5 \cdot 0,8 = 4,0 \text{ МВт.}$$

В качестве базисных величин примем:  $U_6 = U = 6$  кВ и  $S_6 = P_{нд} = 4$  МВ·А.

Тогда сопротивление трансформатора

$$x_T = \frac{U_K}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{HT}} = \frac{11 \cdot 4}{100 \cdot 25} = 0,02.$$

Сопротивление линии электропередачи

$$x_L = \frac{x_0 \ell S_6}{U_6^2} = \frac{0,38 \cdot 5 \cdot 4}{6^2} = 0,21.$$

Индуктивное сопротивление рассеяния двигателей

$$x_s = \frac{U^2}{2b_M} = \frac{1}{2 \cdot 2,0} = 0,25.$$

Активная и реактивная мощности, потребляемые двигателями:

$$P_{0д} = \frac{5P_0}{S_6} = \frac{5 \cdot 0,7}{4,0} = 0,87;$$

$$Q_{0д} = P_{0д} \operatorname{tg} \varphi_0 = 0,87 \operatorname{tg} 26^\circ = 0,42.$$

Суммарное сопротивление питающей сети

$$x_c = x_T + x_L = 0,02 + 0,21 = 0,23.$$

Напряжение на шинах системы в исходном режиме

$$U_{c0} = \sqrt{\left( U + \frac{Q_{0д} x_c}{U} \right)^2 + \left( \frac{P_{0д} x_c}{U} \right)^2} = \sqrt{\left( 1 + \frac{0,42 \cdot 0,23}{1} \right)^2 + \left( \frac{0,87 \cdot 0,23}{1} \right)^2} = 1,11.$$

Критическое напряжение на шинах системы

$$U_{скр} = \sqrt{2P_{0д}(x_s + x_c)} = \sqrt{2 \cdot 0,87(0,25 + 0,23)} = 0,91.$$

Запас устойчивости по напряжению

$$K_U = \frac{U_{c0} - U_{скр}}{U_{c0}} = \frac{1,11 - 0,91}{1,11} = 0,18.$$

### Задача 4.3

Асинхронный двигатель подключен к шинам, напряжение которых может медленно снижаться. Параметры схемы замещения двигателя приведены в табл. 4.2. Для данного двигателя и исходных мощностей  $P_0 = 1$  и  $P_0 = 0,5$  требуется:

1. Построить зависимости реактивных мощностей намагничивания  $Q_\mu$ , рассеивания  $Q_s$  и потребляемой двигателем  $Q_{Ad}$  при изменении напряжения от номинального значения до нуля.

2. Сопоставить  $Q_{Ad}$ , построенные при различных исходных активных мощностях.

Таблица 4.2

Параметры асинхронного двигателя

| № варианта | $x_\mu$ | $x_s$ | $r_2$ |
|------------|---------|-------|-------|
| 1          | 1,0     | 0,20  | 0,02  |
| 2          | 1,1     | 0,21  | 0,03  |
| 3          | 1,2     | 0,22  | 0,04  |
| 4          | 1,3     | 0,23  | 0,05  |
| 5          | 1,4     | 0,24  | 0,06  |
| 6          | 1,5     | 0,25  | 0,02  |
| 7          | 1,6     | 0,26  | 0,03  |
| 8          | 1,7     | 0,27  | 0,04  |
| 9          | 1,8     | 0,28  | 0,05  |
| 10         | 1,9     | 0,29  | 0,06  |
| 11         | 2,0     | 0,30  | 0,02  |
| 12         | 2,1     | 0,31  | 0,03  |
| 13         | 2,2     | 0,32  | 0,04  |
| 14         | 2,3     | 0,33  | 0,05  |
| 15         | 2,4     | 0,34  | 0,06  |
| 16         | 2,5     | 0,35  | 0,02  |
| 17         | 2,6     | 0,36  | 0,03  |

| № варианта | $x_\mu$ | $x_s$ | $r_2$ |
|------------|---------|-------|-------|
| 18         | 2,7     | 0,37  | 0,04  |
| 19         | 2,8     | 0,38  | 0,05  |
| 20         | 2,9     | 0,39  | 0,06  |
| 21         | 3,0     | 0,4   | 0,02  |
| 22         | 3,1     | 0,41  | 0,03  |
| 23         | 3,2     | 0,42  | 0,04  |
| 24         | 3,3     | 0,43  | 0,05  |
| 25         | 3,4     | 0,44  | 0,06  |
| 26         | 3,5     | 0,45  | 0,02  |
| 27         | 3,6     | 0,46  | 0,03  |
| 28         | 3,7     | 0,47  | 0,04  |
| 29         | 3,8     | 0,48  | 0,05  |
| 30         | 4,0     | 0,49  | 0,06  |
| 31         | 3,9     | 0,50  | 0,04  |
| 32         | 4,1     | 0,51  | 0,05  |
| 33         | 4,2     | 0,52  | 0,06  |
| 34         | 4,3     | 0,53  | 0,02  |

**Решение.** Реактивная мощность, потребляемая асинхронным двигателем, определяется двумя составляющими:

$$Q_{\text{АД}} = Q_{\mu} + Q_s. \quad (4.8)$$

Реактивная мощность ветви намагничивания находится из уравнения

$$Q_{\mu} = \frac{U^2}{x_{\mu}}. \quad (4.9)$$

Реактивная мощность рассеяния от исходного до критического напряжения находится по уравнению

$$Q_s = \frac{2P_0x_s}{U^2 + \sqrt{U^4 - (2P_0x_s)^2}}. \quad (4.10)$$

При снижении напряжения ниже критического

$$Q_s = \frac{U^2}{x_s}. \quad (4.11)$$

Критическое значение напряжения определяется по формуле

$$U_{\text{кр}} = \sqrt{2P_0x_s}. \quad (4.12)$$

**Пример к задаче 4.3.** Асинхронный двигатель подключен к шинам, напряжение которых может медленно снижаться. Параметры схемы замещения двигателя:

$$x_{\mu} = 2,0, x_s = 0,25, r_2 = 0,05, P_{\text{мех}} = P_0 = 1 = \text{const}.$$

Требуется построить зависимость потребляемой реактивной мощности при изменении напряжения от 1 до 0.

**Решение.** Находим значение критического напряжения:

$$U_{\text{кр}} = \sqrt{2P_0x_s} = \sqrt{2 \cdot 1 \cdot 0,25} = 0,71.$$

Реактивная мощность, потребляемая ветвью намагничивания  $Q_\mu$ , находится из уравнения (4.9) при изменении напряжения от 1 до 0. Реактивная мощность рассеивания  $Q_s$  при изменении напряжения от 1 до 0,71 находится по уравнению (4.10), а при  $U = 0,71 \dots 0$  – по уравнению (4.11). Результаты расчета  $Q_\mu$  и  $Q_s$  представлены графически на рис. 4.5.

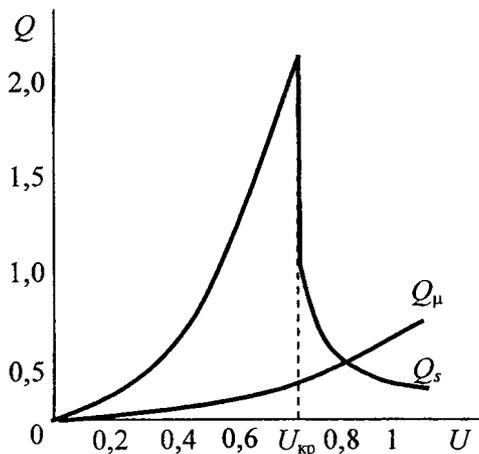


Рис. 4.5. Характеристики реактивной мощности асинхронного двигателя:  
 $Q_\mu$  – намагничивания,  $Q_s$  – рассеивания

#### Задача 4.4

Синхронный двигатель через трансформатор и линию электропередачи подключен к шинам мощной энергосистемы. Параметры системы электроснабжения в относительных единицах приведены в табл. 4.3. В расчетах принять:

- напряжения на шинах системы  $U = 1,0$ ;
- потребляемая активная мощность из энергосистемы  $P_0 = 1,0$ ;
- потребляемая реактивная мощность из энергосистемы  $Q_0 = 0,5$ ;
- угловая частота  $\omega = 1$ .

Требуется:

1. Определить предельный угол снятия наброса нагрузки при периодически меняющейся нагрузке от исходной до максимальной.

2. Изобразить графически процесс наброса и снятия нагрузки, заштриховать площадки торможения и ускорения.

Наброс нагрузки составляет:

1.  $M_{\text{мх2}} = 1,5M_{\text{м}}$ ; 2.  $M_{\text{мх2}} = 3M_{\text{м}}$ .

Таблица 4.3

Исходные данные к задаче 4.4

| № варианта | $x_{\text{л}}$ | $x_{\text{т}}$ | $x_d$ |
|------------|----------------|----------------|-------|
| 1          | 0,1            | 0,6            | 0,16  |
| 2          | 0,12           | 0,65           | 0,17  |
| 3          | 0,14           | 0,55           | 0,18  |
| 4          | 0,16           | 0,50           | 0,19  |
| 5          | 0,18           | 0,45           | 0,20  |
| 6          | 0,20           | 0,40           | 0,19  |
| 7          | 0,22           | 0,35           | 0,18  |
| 8          | 0,24           | 0,3            | 0,17  |
| 9          | 0,26           | 0,25           | 0,16  |
| 10         | 0,28           | 0,2            | 0,15  |
| 11         | 0,3            | 0,15           | 0,14  |
| 12         | 0,32           | 0,1            | 0,13  |
| 13         | 0,34           | 0,12           | 0,12  |
| 14         | 0,36           | 0,14           | 0,11  |
| 15         | 0,38           | 0,16           | 0,1   |
| 16         | 0,4            | 0,2            | 0,11  |
| 17         | 0,11           | 0,23           | 0,12  |

| № варианта | $x_{\text{л}}$ | $x_{\text{т}}$ | $x_d$ |
|------------|----------------|----------------|-------|
| 18         | 0,13           | 0,26           | 0,13  |
| 19         | 0,15           | 0,3            | 0,14  |
| 20         | 0,17           | 0,32           | 0,15  |
| 21         | 0,19           | 0,36           | 0,16  |
| 22         | 0,21           | 0,41           | 0,17  |
| 23         | 0,23           | 0,43           | 0,18  |
| 24         | 0,25           | 0,47           | 0,2   |
| 25         | 0,27           | 0,51           | 0,21  |
| 26         | 0,29           | 0,53           | 0,19  |
| 27         | 0,31           | 0,57           | 0,18  |
| 28         | 0,33           | 0,22           | 0,16  |
| 29         | 0,35           | 0,33           | 0,15  |
| 30         | 0,37           | 0,13           | 0,14  |
| 31         | 0,39           | 0,65           | 0,19  |
| 32         | 0,41           | 0,55           | 0,18  |
| 33         | 0,42           | 0,50           | 0,17  |
| 34         | 0,43           | 0,45           | 0,16  |

**Решение.** Переходный процесс при набросе нагрузки на синхронный двигатель показан на рис. 4.6.

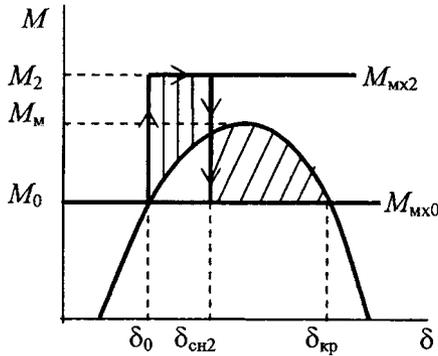


Рис. 4.6. Наброс нагрузки на синхронный двигатель

Для обеспечения устойчивости режима работы агрегата необходимо снизить момент сопротивления рабочего механизма, например с  $M_{\text{мх}2}$  до  $M_{\text{мх}0}$ . Предельный угол снятия наброса  $\delta_{\text{сн}}$  в данном случае при неизменном значении питающего напряжения можно определить по выражению

$$\delta_{\text{сн}} = \frac{M_{\text{мх}2}\delta_0 - M_{\text{мх}0}\delta_{\text{кр}} - M_{\text{м}}(\cos \delta_{\text{кр}} - \cos \delta_0)}{M_{\text{мх}2} - M_{\text{мх}0}}. \quad (4.13)$$

Общее сопротивление системы электроснабжения

$$X'_{d\Sigma} = x'_d + x_T + x_{\text{л}}. \quad (4.14)$$

Переходная ЭДС двигателя

$$E' = \sqrt{\left(U - \frac{Q_0 X'_{d\Sigma}}{U}\right)^2 + \left(\frac{P_0 X'_{d\Sigma}}{U}\right)^2}. \quad (4.15)$$

Максимальный электромагнитный момент

$$M_{\text{м}} = \frac{E'U}{\omega X'_{d\Sigma}}. \quad (4.16)$$

Исходный электромагнитный момент

$$M_{\text{мх}0} = \frac{P_0}{\omega}. \quad (4.17)$$

Угловая характеристика электромагнитного момента

$$M = M_{\text{м}} \cdot \sin \delta. \quad (4.18)$$

Исходный и критический углы находятся по формулам (2.4) и (3.7) соответственно.

### З а д а ч а 4.5

Определить критическое напряжение и запас устойчивости нагрузки по напряжению для схемы, приведенной на рис. 1.1, при отключении выключателя  $B$  по критерию  $\frac{d\Delta Q}{dU} \leq 0$ . Параметры схе-

мы и режима взять из задач 1.1, 2.1.

Расчеты произвести для случаев:

1. Генераторы без АРВ.
2. Генераторы оснащены АРВ ПД.
3. Генераторы оснащены АРВ СД.

Построить зависимости  $Q_{\text{н}} = f(U)$ ,  $Q_{\text{г}} = f(U)$ ,  $\Delta Q = f(U)$ .

#### Решение.

1. Определяются суммарные сопротивления электропередачи для генераторов без АРВ ( $X_{d\Sigma}$ ), с АРВ ПД ( $X'_{d\Sigma}$ ), с АРВ СД ( $x_c$ ) (см. задачу 2.1).

2. Напряжение на шинах потребителя принимается равным единице  $U = 1$ . При этом определяются: для генераторов без АРВ  $E_q$ ; для генераторов с АРВ ПД  $E'_q$ ; для генераторов с АРВ СД  $U_{\text{г}}$  (см. задачу 2.1).

3. Задаваясь рядом значений напряжения на шинах нагрузки  $U = 0,1 \dots 1,0$ , для каждого из них определяют:

– мощности нагрузок по типовым статическим характеристикам:

$$P_H = P_0(0,83 - 0,3U + 0,47U^2), \quad (4.19)$$

$$Q_H = Q_0(3,7 - 7U + 4,3U^2); \quad (4.20)$$

– реактивную мощность, поступающую от генераторов станции к узлу нагрузки, принимая в расчетах  $P_G = P_H$ , получим

$$Q_G = \sqrt{\left(\frac{EU}{X}\right)^2 - P_H^2} - \frac{U^2}{X}; \quad (4.21)$$

– разность реактивных мощностей генерации и нагрузки

$$\Delta Q = Q_G - Q_H.$$

По результатам расчетов строятся характеристики по типу рис. 4.7 для каждого вида АРВ на генераторах и режима без АРВ. По характеристикам определяется напряжение  $U$ , соответствующее наибольшему значению мощности  $\Delta Q$ . Это и будет критическое напряжение  $U_{кр}$ .

Далее по формуле (4.3) определяются коэффициенты запаса для каждого вида АРВ на генераторах.

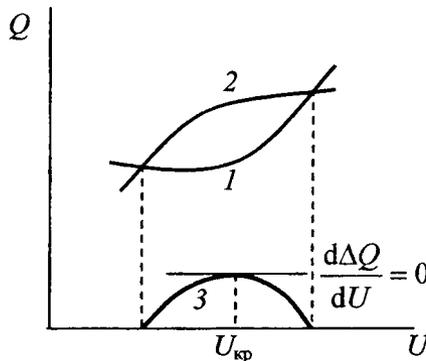


Рис. 4.7. Статические характеристики реактивной мощности:  
1 – нагрузки; 2 – генерации; 3 – разность реактивных мощностей  
генерации и нагрузки

**Пример к задаче 4.5.** Определить критическое напряжение и запас устойчивости нагрузки по напряжению для схемы, приведенной на рис. 1.1, при отключении выключателя  $B$  по критерию  $\frac{d\Delta Q}{dU} \leq 0$ .

Параметры схемы приведены на рис. 4.8. Расчеты произвести для случаев:

1. Генераторы без АРВ.
2. Генераторы с АРВ ПД.
3. Генераторы с АРВ СД.

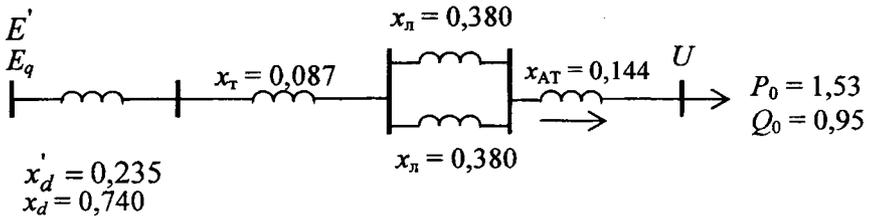


Рис. 4.8. Схема замещения электрической системы

**Решение.**

1. Определим суммарное сопротивление электропередачи:

а) генераторы без АРВ:

$$X_{d\Sigma} = x_d + x_T + x_L/2 + x_{AT} = 0,740 + 0,087 + 0,38/2 + 0,144 = 1,161;$$

б) генераторы с АРВ ПД:

$$X'_{d\Sigma} = x'_d + x_T + x_L/2 + x_{AT} = 0,232 + 0,087 + 0,380/2 + 0,144 = 0,656;$$

в) генераторы с АРВ СД:

$$x_c = x_T + x_L/2 + x_{AT} = 0,087 + 0,38/2 + 0,144 = 0,421.$$

2. Принимаем напряжение на шинах потребителя равным единице. При этом:

а) генераторы без АРВ:

$$E_q = \sqrt{\left(U + \frac{Q_0 X_{d\Sigma}}{U}\right)^2 + \left(\frac{P_0 X_{d\Sigma}}{U}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(1 + \frac{0,95 \cdot 1,161}{1}\right)^2 + \left(\frac{1,53 \cdot 1,161}{1}\right)^2} = 2,753;$$

б) генераторы с АРВ ПД:

$$E' = \sqrt{\left(U + \frac{Q_0 X'_{d\Sigma}}{U}\right)^2 + \left(\frac{P_0 X'_{d\Sigma}}{U}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(1 + \frac{0,95 \cdot 0,656}{1}\right)^2 + \left(\frac{1,53 \cdot 0,656}{1}\right)^2} = 1,908;$$

в) генераторы с ПРВ СД:

$$E_{\Gamma} = \sqrt{\left(U + \frac{Q_0 x_c}{U}\right)^2 + \left(\frac{P_0 x_c}{U}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(1 + \frac{0,95 \cdot 0,421}{1}\right)^2 + \left(\frac{1,53 \cdot 0,421}{1}\right)^2} = 1,541.$$

3. Задаемся рядом значений напряжения на шинах нагрузки  $U = 0,1 \dots 1$  и определяем  $P_{\text{н}}$ ,  $Q_{\text{н}}$ ,  $Q_{\Gamma}$ ,  $\Delta Q$ .

Для  $U = 1$ :  $P_{\text{н}} = P_0$ ,  $Q_{\text{н}} = Q_0$ ,  $Q_{\Gamma} = Q_0$ ,  $\Delta Q = 0$ .

Для  $U = 0,95$  по типовым статическим характеристикам нагрузки:

$$P_{\text{н}} = P_0(0,83 - 0,3U + 0,47U^2) =$$

$$= 1,53(0,83 - 0,3 \cdot 0,95 + 0,47 \cdot 0,95^2) = 1,483;$$

$$Q_{\text{н}} = Q_0(3,7 - 7U + 4,3U^2) = 0,95(3,7 - 7 \cdot 0,95 + 4,7 \cdot 0,95^2) = 0,884.$$

Мощность, поступающая от генераторов станции к узлу нагрузки:  
 – генераторы без АРВ:

$$Q_{\Gamma} = \sqrt{\left(\frac{E_q U}{X_{d\Sigma}}\right)^2 - P_{\text{H}}^2} - \frac{U^2}{X_{d\Sigma}} = \sqrt{\left(\frac{2,753 \cdot 0,95}{1,161}\right)^2 - 1,483^2} - \frac{0,95^2}{1,161} = 0,918;$$

– генераторы с АРВ ПД:

$$Q_{\Gamma} = \sqrt{\left(\frac{E' U}{X'_{d\Sigma}}\right)^2 - P_{\text{H}}^2} - \frac{U^2}{X'_{d\Sigma}} = \sqrt{\left(\frac{1,908 \cdot 0,95}{0,656}\right)^2 - 1,483^2} - \frac{0,95^2}{0,656} = 0,957;$$

– генераторы с АРВ СД:

$$Q_{\Gamma} = \sqrt{\left(\frac{U_{\Gamma} U}{x_c}\right)^2 - P_{\text{H}}^2} - \frac{U^2}{x_c} = \sqrt{\left(\frac{1,541 \cdot 0,95}{0,421}\right)^2 - 1,483^2} - \frac{0,95^2}{0,421} = 1,002.$$

Разность мощностей генерации и нагрузки  $\Delta Q = Q_{\Gamma} - Q_{\text{H}}$ :

– генератор без АРВ  $\Delta Q = 0,918 - 0,884 = 0,034$ ;

– генератор с АРВ ПД  $\Delta Q = 0,957 - 0,884 = 0,073$ ;

– генератор с АРВ СД  $\Delta Q = 1,002 - 0,884 = 0,117$ .

Аналогичные расчеты проводятся для других значений  $U$ . Сведем результаты расчетов в табл. 4.4.

Таблица 4.4

Результаты расчета

| $U$            | 1,0     | 0,95  | 0,90  | 0,85  | 0,80  | 0,75   | 0,70   |        |
|----------------|---------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| $P_{\text{H}}$ | 1,530   | 1,483 | 1,439 | 1,399 | 1,363 | 1,330  | 1,301  |        |
| $Q_{\text{H}}$ | 0,950   | 0,884 | 0,839 | 0,814 | 0,809 | 0,825  | 0,862  |        |
| $Q_{\Gamma}$   | без АРВ | 0,950 | 0,918 | 0,878 | 0,828 | 0,868  | 0,696  | 0,609  |
|                | АРВ ПД  | 0,950 | 0,957 | 0,952 | 0,937 | 0,911  | 0,872  | 0,820  |
|                | АРВ СД  | 0,950 | 1,002 | 1,039 | 1,063 | 1,072  | 1,065  | 1,044  |
| $\Delta Q$     | без АРВ | 0     | 0,034 | 0,039 | 0,014 | -0,041 | -0,130 | -0,253 |
|                | АРВ ПД  | 0     | 0,072 | 0,114 | 0,124 | 0,102  | 0,047  | -0,042 |
|                | АРВ СД  | 0     | 0,117 | 0,200 | 0,249 | 0,262  | 0,240  | 0,182  |

По результатам расчетов строятся характеристики по типу рис. 4.7. По ним определяется напряжение  $U$ , соответствующее наибольшему значению мощности  $\Delta Q$ . Это и будет критическое напряжение.

Генераторы без АРВ  $U_{кр} = 0,90$ , коэффициент запаса

$$K_U = \frac{U_0 - U_{кр}}{U_0} 100 \% = \frac{1 - 0,9}{1} \cdot 100 \% = 10 \% .$$

Генераторы с АРВ ПД  $U_{кр} = 0,85$ , коэффициент запаса

$$K_U = \frac{U_0 - U_{кр}}{U_0} 100 \% = \frac{1 - 0,85}{1} \cdot 100 \% = 15 \% .$$

Генераторы с АРВ СД  $U_{кр} = 0,80$ , коэффициент запаса

$$K_U = \frac{U_0 - U_{кр}}{U_0} 100 \% = \frac{1 - 0,80}{1} \cdot 100 \% = 20 \% .$$

#### Задача 4.6

Для схемы замещения электрической системы задачи 4.5 определить влияние установки компенсирующего устройства в виде батареи статических конденсаторов на устойчивость нагрузки по критерию

$\frac{d\Delta Q}{dU} \leq 0$ . Расчет произвести при условии, что на станции

установлены генераторы с АРВ ПД для случаев:

1) при номинальном напряжении на шинах нагрузки ( $U_n = 1$ ) конденсаторная батарея повышает коэффициент мощности до  $\cos\varphi_n = 1$ ;

2) то же при  $\cos\varphi_n = 0,9$ .

#### Решение.

1. Производится расчет при отсутствии компенсирующих устройств (аналогично задаче 4.5, генераторы с АРВ ПД).

2. Исходя из заданного  $\cos\varphi_n$  определяется мощность, выдаваемая конденсаторной батареей, при напряжении на шинах потребителя, равном единице ( $Q_{кун}$ ), и ее сопротивление ( $X_{ку}$ ):

$$Q_{кун} = Q_0 - P_0 \operatorname{tg}\varphi_n; \quad (4.22)$$

$$X_{кун} = U^2 / Q_{кун} = 1^2 / Q_{кун}. \quad (4.23)$$

3. Определяется ЭДС генератора:

$$E' = \sqrt{\left( U + \frac{P_0 \operatorname{tg}\varphi_n X'_{d\Sigma}}{U} \right)^2 + \left( \frac{P_0 X'_{d\Sigma}}{U} \right)^2}. \quad (4.24)$$

4. При изменении напряжения на шинах нагрузки в диапазоне  $U = 0,1 \dots 1,0$  определяется мощность, выдаваемая в сеть конденсаторной батареей  $Q_{ку} = U^2 / X_{ку}$ .

5. Производится расчет, аналогичный задаче 4.5, при условии, что

$$\Delta Q_{ку} = Q_{Гку} - Q_n + Q_{ку}.$$

**Пример к задаче 4.6.** Для схемы примера к задаче 4.5 оценить влияние установки компенсирующего устройства в виде батареи статических конденсаторов по критерию  $\frac{d\Delta Q}{dU} \leq 0$ . Расчет произ-

вести при условии, что на станции установлены генераторы с АРВ ПД, при номинальном напряжении на шинах нагрузки  $U = 1$  конденсаторная батарея повышает коэффициент мощности до  $\cos\varphi_n = 1$ .

**Решение.**

1. Определим мощность, выдаваемую конденсаторной батареей при напряжении на шинах потребителя, равном единице, и ее сопротивление:

$$\varphi_n = \arccos 1 = 0^\circ;$$

$$Q_{кун} = Q_0 - P_0 \operatorname{tg}\varphi_n = 0,95 - 1,53 \cdot 0 = 0,95;$$

$$X_{ку} = \frac{U^2}{Q_{кун}} = \frac{1^2}{0,95} = 1,05.$$

Суммарное сопротивление электропередачи  $X'_{d\Sigma} = 0,656$ , ЭДС генератора с АРВ ПД при отсутствии компенсирующего устройства  $E' = 1,908$  (из примера 4.5). При наличии компенсирующего устройства

$$E'_{\text{ку}} = \sqrt{\left( U + \frac{P_0 \operatorname{tg} \varphi_{\text{H}} X'_{d\Sigma}}{U} \right)^2 + \left( \frac{P_0 X'_{d\Sigma}}{U} \right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left( 1 + \frac{1,53 \cdot 0 \cdot 0,656}{1} \right)^2 + \left( \frac{1,53 \cdot 0,656}{1} \right)^2} = 1,417.$$

Задаемся рядом значений напряжения на шинах нагрузки  $U = 0, 1, \dots, 1$  и определяем  $P_{\text{H}}$ ,  $Q_{\text{H}}$ ,  $Q_{\text{Г}}$ ,  $\Delta Q$  (берутся из примера 4.5),  $Q_{\text{ку}}$ ,  $Q_{\text{Г ку}}$ ,  $\Delta Q_{\text{ку}}$ .

При наличии компенсирующего устройства мощность, поступающая от генераторов станции к узлу нагрузки:

$$Q_{\text{Г ку}} = \sqrt{\left( \frac{E'_{\text{ку}} U}{X'_{d\Sigma}} \right)^2 - P_{\text{H}}^2} - \frac{U^2}{X'_{d\Sigma}};$$

мощность, выдаваемая компенсирующим устройством:

$$Q_{\text{ку}} = \frac{U^2}{X_{\text{ку}}};$$

разность мощностей генерации и нагрузки

$$\Delta Q_{\text{ку}} = Q_{\text{H}} + Q_{\text{ку}}.$$

Для  $U = 1$ :  $P_{\text{H}} = P_0$ ,  $Q_{\text{H}} = Q_0$ ,  $Q_{\text{Г}} = Q_0$ ,  $\Delta Q = 0$ ,  $Q_{\text{ку}} = Q_0$ ,  $Q_{\text{Г ку}} = 0$ ,  $\Delta Q_{\text{ку}} = 0$ .

Для  $U = 0,95$ :  $P_H = 1,483$ ,  $Q_H = 0,884$ ,  $Q_G = 0,957$ ,  $\Delta Q = 0,073$  (см. пример к задаче 4.5).

Тогда

$$Q_{Г\text{ку}} = \sqrt{\left(\frac{1,417 \cdot 0,95}{0,656}\right)^2 - 1,483^2} - \frac{0,95^2}{0,656} = 0,042;$$

$$Q_{ку} = \frac{0,95^2}{1,05} = 0,857;$$

$$\Delta Q_{ку} = 0,042 - 0,884 + 0,857 = 0,015.$$

Аналогичные расчеты проводятся для других значений и их результаты приведены в табл. 4.5.

Таблица 4.5

Результаты расчета

|                 |       |       |       |        |        |        |        |
|-----------------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| $U$             | 1,0   | 0,95  | 0,90  | 0,85   | 0,80   | 0,75   | 0,70   |
| $P_H$           | 1,530 | 1,483 | 1,439 | 1,399  | 1,363  | 1,330  | 1,301  |
| $Q_H$           | 0,950 | 0,884 | 0,839 | 0,814  | 0,809  | 0,825  | 0,862  |
| $Q_G$           | 0,950 | 0,957 | 0,952 | 0,937  | 0,911  | 0,872  | 0,820  |
| $\Delta Q$      | 0     | 0,072 | 0,114 | 0,124  | 0,102  | 0,047  | -0,042 |
| $Q_{ку}$        | 0,950 | 0,857 | 0,770 | 0,686  | 0,608  | 0,534  | 0,466  |
| $Q_{Гку}$       | 0     | 0,042 | 0,072 | 0,087  | 0,086  | 0,067  | 0,023  |
| $\Delta Q_{ку}$ | 0     | 0,015 | 0,02  | -0,041 | -0,115 | -0,224 | -0,373 |

По результатам расчетов строятся характеристики по типу рис. 4.7 и определяются критические напряжения. Без компенсирующего устройства  $U_{кр} = 0,85$ ,

$$K_U = \frac{U_0 - U_{кр}}{U_0} \cdot 100\% = \frac{1 - 0,85}{1} \cdot 100\% = 15\%.$$

$$\text{С батареей конденсаторов } U_{кр} = 0,95, K_U = \frac{1 - 0,95}{1} \cdot 100\% = 5\%.$$

Можно сделать вывод, что батарея конденсаторов снижает устойчивость нагрузки.

### Задача 4.7

К шинам заводской подстанции подключен асинхронный двигатель (рис. 4.9). Параметры двигателя относительно номинального напряжения и мощности принять из табл. 4.6 в соответствии с заданным вариантом. Требуется определить критическое скольжение и критическое напряжение, при которых произойдет опрокидывание двигателя, а также построить характеристики потребляемой мощности при следующих напряжениях на шинах подстанции:  $U = 1,1$ ;  $U = 1$ ;  $U = 0,9$ ;  $U = U_{кр}$ .

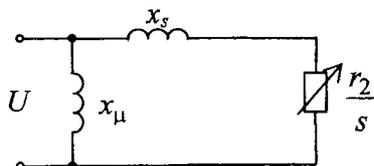


Рис. 4.9. Схема замещения асинхронного двигателя

Таблица 4.6

Параметры схемы замещения асинхронного двигателя

| Номер варианта | $x_s$ | $r_2$ |
|----------------|-------|-------|
| 1              | 0,10  | 0,03  |
| 2              | 0,11  | 0,04  |
| 3              | 0,13  | 0,05  |
| 4              | 0,14  | 0,03  |
| 5              | 0,15  | 0,04  |
| 6              | 0,16  | 0,05  |
| 7              | 0,17  | 0,03  |
| 8              | 0,18  | 0,04  |
| 9              | 0,19  | 0,05  |
| 10             | 0,20  | 0,06  |
| 11             | 0,21  | 0,05  |
| 12             | 0,22  | 0,06  |
| 13             | 0,23  | 0,07  |
| 14             | 0,24  | 0,08  |
| 15             | 0,25  | 0,06  |
| 16             | 0,26  | 0,07  |
| 17             | 0,27  | 0,08  |

| Номер варианта | $x_s$ | $r_2$ |
|----------------|-------|-------|
| 18             | 0,28  | 0,09  |
| 19             | 0,29  | 0,06  |
| 20             | 0,30  | 0,07  |
| 21             | 0,31  | 0,08  |
| 22             | 0,32  | 0,09  |
| 23             | 0,33  | 0,10  |
| 24             | 0,34  | 0,06  |
| 25             | 0,35  | 0,07  |
| 26             | 0,36  | 0,08  |
| 27             | 0,37  | 0,09  |
| 28             | 0,38  | 0,10  |
| 29             | 0,39  | 0,11  |
| 30             | 0,40  | 0,12  |
| 31             | 0,41  | 0,08  |
| 32             | 0,42  | 0,09  |
| 33             | 0,43  | 0,10  |
| 34             | 0,44  | 0,11  |

**Решение.** Критическое скольжение определяется по формуле

$$s_{\text{кр}} = \frac{r_2}{x_s}. \quad (4.25)$$

Критическое напряжение находится по выражению (4.12).

Активную мощность, потребляемую двигателем, можно найти по формуле

$$P = \frac{U^2 r_2 s}{r_2^2 + x_s^2 s^2}. \quad (4.26)$$

**Пример к задаче 4.7.** К шинам заводской подстанции подключен асинхронный двигатель с параметрами схемы замещения  $x_s = 0,12$ ,  $r_2 = 0,03$ . Требуется определить критическое скольжение и критическое напряжение, а также построить характеристики потребляемой мощности при следующих напряжениях на шинах подстанции:  $U = 1,1$ ;  $U = 1$ ;  $U = 0,9$ ;  $U = U_{\text{кр}}$ .

**Решение.**

Определим критическое скольжение:

$$s_{\text{кр}} = \frac{r_2}{x_s} = \frac{0,03}{0,12} = 0,25.$$

Находим критическое напряжение:

$$U_{\text{кр}} = \sqrt{2P_0 x_s} = \sqrt{2 \cdot 1 \cdot 0,12} = 0,49.$$

Зависимость активной мощности

$$P = \frac{U^2 r_2 s}{r_2^2 + x_s^2 s^2} = \frac{U^2 s \cdot 0,03}{0,03^2 + 0,12^2 s^2} = \frac{0,03 U^2 s}{0,0009 + 0,0144 s^2}.$$

По данному выражению на рис. 4.10 построены характеристики  $P = f(s)$  при требуемых значениях напряжения на шинах подстанции.

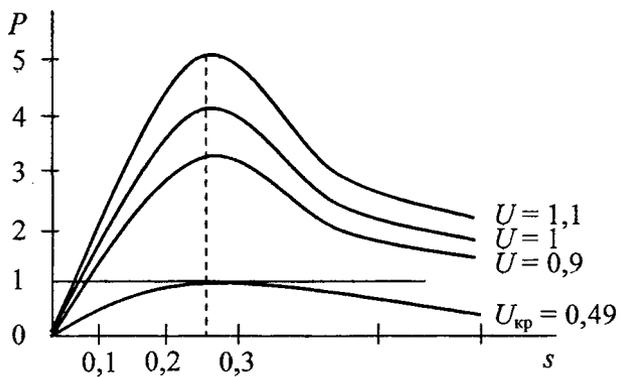


Рис. 4.10. Зависимости потребляемой асинхронным двигателем активной мощности от скольжения и напряжения на шинах

## 5. ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

### Задача 5.1

Для увеличения пропускной способности системы электропередачи (см. рис. 1.1) включается устройство продольной компенсации (УПК) в середине линии (рис. 5.1). Параметры элементов системы с генераторами, оснащенными АРВ ПД, взять из задачи 2.1. Сопротивление УПК  $x_{\text{УПК}}$  принять равным 0,2. Требуется определить:

1. Изменение предельной передаваемой мощности системы электропередачи по условию статической устойчивости при включении УПК.

2. Степень компенсации индуктивного сопротивления линии электропередачи.

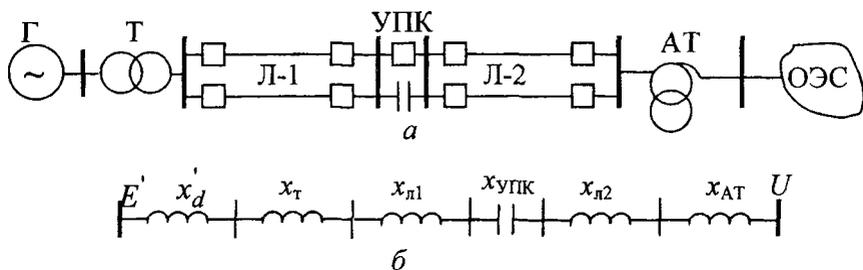


Рис. 5.1. Схемы системы электропередачи с УПК:  
а – принципиальная; б – замещения

**Решение.** Предельная передаваемая мощность системы без УПК находится по формуле (2.11). При включении УПК предельная мощность определяется по выражению

$$P_{\text{пр}}^{\text{УПК}} = \frac{E'U}{X_{d\text{УПК}}'}, \quad (5.1)$$

где  $X_{d\text{УПК}}'$  – общее индуктивное сопротивление системы электропередачи с УПК.

Степень компенсации сопротивления линии

$$K_c = \frac{x_{\text{УПК}}}{x_{\text{л}}}. \quad (5.2)$$

**Пример к задаче 5.1.** Для увеличения пропускной способности системы электропередачи, показанной на рис. 1.1, включается устройство продольной компенсации (см. рис. 5.1).

Параметры элементов системы в относительных единицах:

$$x'_d = 0,18, \quad x_{\text{т}} = 0,12, \quad x_{\text{л1}} = 0,325, \quad x_{\text{упк}} = 0,2, \quad x_{\text{л2}} = 0,325,$$

$$x_{\text{АТ}} = 0,14, \quad E' = 1,2, \quad U = 1.$$

Требуется определить:

1. Изменение предельной передаваемой мощности системы электропередачи по условию статической устойчивости при включении УПК.

2. Степень компенсации индуктивного сопротивления линии электропередачи.

**Решение.** Найдем общее индуктивное сопротивление системы электропередачи без УПК:

$$\begin{aligned} X'_{d\Sigma} &= x'_d + x_{\text{т}} + x_{\text{л1}} + x_{\text{л2}} + x_{\text{АТ}} = \\ &= 0,18 + 0,12 + 0,325 + 0,325 + 0,14 = 1,09. \end{aligned}$$

Предельная передаваемая мощность системы электропередачи без УПК

$$P_{\text{пр}} = \frac{E'U}{X'_{d\Sigma}} = \frac{1,2 \cdot 1}{1,09} = 1,1.$$

Общее сопротивление системы электропередачи с УПК

$$X'_{d\text{УПК}} = X'_{d\Sigma} - x_{\text{УПК}} = 1,09 - 0,2 = 0,89.$$

Предельная передаваемая мощность системы электропередачи с УПК

$$P_{\text{пр}}^{\text{УПК}} = \frac{E'U}{X'_{d\text{УПК}}} = \frac{1,2 \cdot 1}{0,89} = 1,35.$$

Изменение предельной передаваемой мощности системы электропередачи при включении УПК

$$\Delta P_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{пр}}^{\text{УПК}} - P_{\text{пр}}}{P_{\text{пр}}} \cdot 100\% = \frac{1,35 - 1,1}{1,1} \cdot 100\% = 22,7\%.$$

Степень компенсации

$$k_c = \frac{x_{\text{УПК}}}{x_{\text{л}}} = \frac{0,2}{0,325 + 0,325} = 0,31.$$

Таким образом, при включении УПК, обеспечивающей степень компенсации  $k_c = 0,31$ , предельная передаваемая мощность по условию статической устойчивости увеличивается на 22,7 %.

### Задача 5.2

Электроснабжение энергорайона осуществляется от электростанции по двум линиям электропередачи напряжением 110 кВ. Генераторы электростанции работают с номинальной мощностью  $P_{\text{Г0}}$ , вращающегося резерва нет. Нагрузка энергорайона  $P_{\text{н0}}$ , с регулирующим эффектом нагрузки по частоте  $k_{\text{н}}$ . В установившемся режиме частота  $f_0 = 50$  Гц. Данные по мощностям электростанции и нагрузки приведены в табл. 5.1.

Требуется определить:

1. Аварийное значение частоты  $f_{\text{ав}}$  при отключении электропередачи и отсутствии АЧР.

2. Необходимый объем отключаемой нагрузки устройствами АЧР для восстановления частоты до  $f_{\text{мин}} = 49,0$  Гц.

**Решение.** При отключении линий электропередачи рассматриваемый энергорайон выделяется на изолированную работу от энергосистемы с дефицитом мощности

$$\Delta P_{\Gamma} = P_{\text{н0}} - P_{\Gamma0}. \quad (5.3)$$

При отсутствии отключения нагрузки установившееся значение частоты в таком режиме составит

$$f_{\text{ав}} = f_0 - \frac{\Delta P_{\Gamma} f_0}{P_{\text{н0}} k_{\text{н}}}. \quad (5.4)$$

Таблица 5.1

Исходные данные к задаче 5.2

| № варианта | $P_{\Gamma0}$ , МВт | $P_{\text{н0}}$ , МВт | $k_{\text{н}}$ , о.е. |
|------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1          | 20                  | 35                    | 1,5                   |
| 2          | 30                  | 45                    | 1,6                   |
| 3          | 40                  | 55                    | 1,7                   |
| 4          | 50                  | 65                    | 1,8                   |
| 5          | 60                  | 85                    | 1,9                   |
| 6          | 70                  | 95                    | 2,0                   |
| 7          | 80                  | 125                   | 2,1                   |
| 8          | 90                  | 135                   | 2,2                   |
| 9          | 100                 | 145                   | 2,3                   |
| 10         | 110                 | 175                   | 2,4                   |
| 11         | 120                 | 165                   | 2,5                   |
| 12         | 130                 | 195                   | 2,6                   |
| 13         | 140                 | 205                   | 2,7                   |
| 14         | 150                 | 215                   | 2,8                   |
| 15         | 160                 | 225                   | 2,9                   |
| 16         | 25                  | 40                    | 3,0                   |
| 17         | 35                  | 45                    | 2,9                   |

| № варианта | $P_{\Gamma0}$ , МВт | $P_{\text{н0}}$ , МВт | $k_{\text{н}}$ , о.е. |
|------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|
| 18         | 45                  | 60                    | 2,8                   |
| 19         | 55                  | 80                    | 2,7                   |
| 20         | 65                  | 90                    | 2,6                   |
| 21         | 75                  | 110                   | 2,5                   |
| 22         | 85                  | 120                   | 2,4                   |
| 23         | 95                  | 130                   | 2,3                   |
| 24         | 105                 | 140                   | 2,2                   |
| 25         | 115                 | 160                   | 2,1                   |
| 26         | 125                 | 180                   | 2,0                   |
| 27         | 135                 | 200                   | 1,9                   |
| 28         | 145                 | 200                   | 1,8                   |
| 29         | 155                 | 210                   | 1,7                   |
| 30         | 165                 | 210                   | 1,6                   |
| 31         | 170                 | 230                   | 1,5                   |
| 32         | 175                 | 235                   | 1,7                   |
| 33         | 180                 | 240                   | 1,9                   |
| 34         | 185                 | 245                   | 2,2                   |

Необходимый объем отключаемой нагрузки для предотвращения снижения частоты ниже минимального значения  $f_{\text{ав}} = f_{\text{мин}}$ , будет равен

$$\Delta P_{\text{н}} = \frac{\Delta P_{\Gamma} - P_{\text{н0}}(1 - f_{\text{мин}} / f_0) k_{\text{н}}}{1 - (1 - f_{\text{мин}} / f_0) k_{\text{н}}}. \quad (5.5)$$

### Задача 5.3

В схеме, приведенной на рис. 1.1, в точке 1 или 2 возникает двухфазное замыкание на землю. В момент времени  $t$  поврежденная линия отключается.

Параметры элементов и режимы системы необходимо взять из задач 1.1, 2.1, 3.1.

Требуется определить, сохранится ли динамическая устойчивость, если моменту времени  $t$  соответствует угол  $70^\circ$  для двух случаев:

1. На трансформаторах имеет место глухое заземление нейтрали.
2. Нейтрали трансформаторов заземлены через реактивное сопротивление  $x_3 = 0,1$ .

Оценить влияние реактивного сопротивления в нейтрали трансформаторов на динамическую устойчивость системы.

#### Решение.

1. На трансформаторах имеет место глухое заземление нейтрали.

Методика построения характеристик мощности в исходном ( $P_I$ ), аварийном ( $P_{II}$ ) и послеаварийном ( $P_{III}$ ) режимах аналогична задаче 3.1. По этим характеристикам, зная мощность турбины генератора  $P_T = P_0$  и угол, соответствующий отключению КЗ, можно построить площадку ускорения ( $f_y$ ) и торможения ( $f_T$ ). Если  $f_T > f_y$ , динамическая устойчивость системы сохраняется.

2. Нейтрали трансформаторов заземлены через реактивное сопротивление  $x_3 = 0,1$ .

Если нейтрали трансформаторов заземлены через относительно небольшие реактивные сопротивления (рис. 5.2), то условия работы изоляции в нейтрали трансформатора практически не изменяются, а устойчивость систем при несимметричных коротких замыканиях может существенно повышаться. Это связано с тем, что включение в нейтрали трансформатора сопротивлений приводит к увеличению результирующего сопротивления нулевой последовательности, а следовательно, и к увеличению сопротивления аварийного шунта при однофазном или двухфазном КЗ на землю.

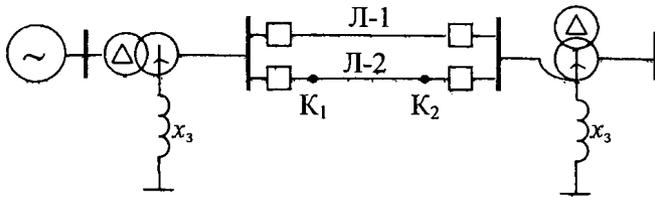


Рис. 5.2. Заземление нейтрали трансформаторов через реактивное сопротивление

Характеристики мощности в исходном режиме  $P_I$  и после отключения одной цепи линии  $P_{II}$  идентичны случаю глухого заземления нейтрали.

Схема замещения нулевой последовательности приведена на рис. 5.3. Схемы замещения для прямой и обратной последовательностей не отличаются от случая с глухим заземлением нейтрали.

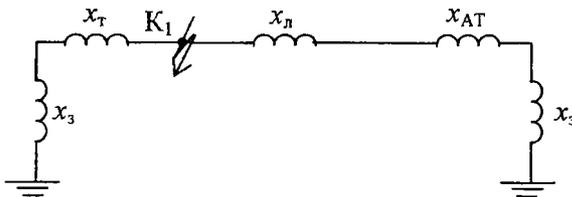


Рис. 5.3. Схема замещения нулевой последовательности при заземлении трансформаторов через реактивное сопротивление при КЗ в точке 1

При КЗ в точке 1 эквивалентное сопротивление нулевой последовательности находится по формуле

$$x_0^3 = \frac{(x_3 + x_T)(x_{\text{л}} + x_{\text{AT}} + x_3)}{x_T + x_{\text{л}} + x_{\text{AT}} + 2x_3}. \quad (5.6)$$

В остальном расчет аналогичен случаю с глухим заземлением нейтрали.

**Пример к задаче 5.3.** В схеме, приведенной на рис. 1.1, возникает двухфазное замыкание на землю. В момент времени  $t$ , соответ-

ствующий углу  $\delta_{\text{отк}} = 70^\circ$ , поврежденная линия отключается. Требуется определить, сохранится ли динамическая устойчивость для случаев глухого заземления нейтралей трансформаторов и заземления через реактивное сопротивление  $x_3 = 0,1$ . Оценить влияние реактивного сопротивления в нейтрали трансформатора на динамическую устойчивость системы.

Параметры схемы и исходного режима необходимо взять из примера 3.1.

### Решение.

1. На трансформаторах имеет место глухое заземление нейтрали.

Расчет приведен в примере 3.1, динамические характеристики мощности – на рис. 5.4, а.

2. На трансформаторах имеет место заземление через реактивное сопротивление.

Эквивалентное сопротивление нулевой последовательности

$$\begin{aligned} x_0^3 &= \frac{(x_3 + x_T)(x_L + x_{AT} + x_3)}{x_T + x_L + x_{AT} + 2x_3} = \\ &= \frac{(0,1 + 0,09)(4 \cdot 0,07 + 0,05 + 0,1)}{0,09 + 4 \cdot 0,07 + 0,05 \cdot 2 \cdot 0,1} = 0,132. \end{aligned}$$

Значение сопротивления аварийного шунта

$$x_{\text{ш}} = \frac{x_2 x_0^3}{x_2 + x_0^3} = \frac{0,08 \cdot 0,132}{0,08 + 0,132} = 0,050.$$

Общее сопротивление системы в аварийном режиме

$$\begin{aligned} x_{\text{ав}} &= X'_{d\Sigma} + \frac{(x'_d + x_T)(x_L + x_{AT})}{x_{\text{ш}}} = \\ &= 0,37 + \frac{(0,16 + 0,09)(0,07 + 0,05)}{0,050} = 0,97. \end{aligned}$$

Угловая характеристика мощности в аварийном режиме

$$P_{II} = \frac{E'U}{x_{ав}} \sin \delta = \frac{1,24 \cdot 1}{0,97} \sin \delta = 1,28 \sin \delta, \quad P_M^{II} = 1,28.$$

Остальные расчеты аналогичны примеру 3.1.

Динамические характеристики мощности приведены на рис. 5.4, б.

Из рис. 5.4 видно, что при угле отключения КЗ  $\delta_{отк} = 70^\circ$  динамическая устойчивость системы сохраняется и для случая с глухим заземлением нейтрали, и при заземлении через реактивное сопротивление. Причем во втором случае площадки ускорения меньше, а возможная площадка торможения больше, чем при глухом заземлении нейтрали.

Таким образом, можно сделать вывод, что заземление нейтрали трансформаторов через реактивное сопротивление повышает динамическую устойчивость системы при двухфазном замыкании.

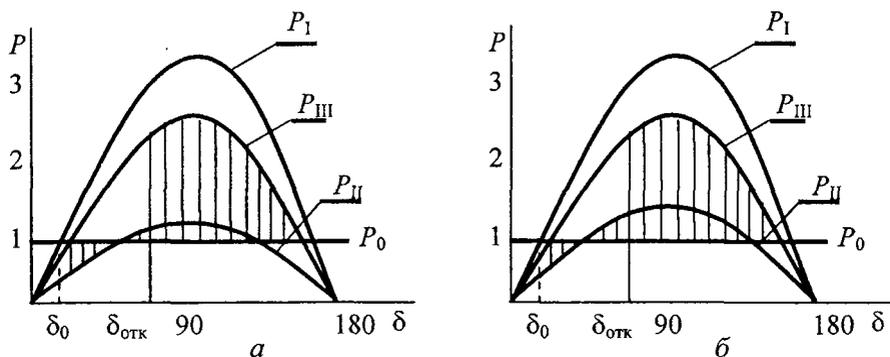


Рис. 5.4. Динамические характеристики мощности системы:  
 а – при глухом заземлении нейтрали;  
 б – при заземлении нейтрали через реактивное сопротивление

### Задача 5.4

В схеме, приведенной на рис. 1.1, в точке 1 или 2 возникает двухфазное КЗ. Через некоторый промежуток времени  $\Delta t_1$ , соответствующий изменению угла  $\Delta \delta_1 = 20^\circ$ , поврежденная линия отключается. Затем через промежуток времени  $\Delta t_2$ , соответствующий изменению угла  $\Delta \delta_2 = 30^\circ$ , срабатывает АПВ и отключенная линия включается в работу.

Параметры элементов и режимы системы необходимо взять из задач 1.1, 2.1, 3.1.

Требуется оценить влияние АПВ на динамическую устойчивость системы для двух случаев:

1. Успешное АПВ.

2. Неуспешное АПВ (повторное отключение линии происходит через промежуток времени  $\Delta t_3$ , соответствующий изменению угла  $\Delta\delta_1$ ).

### Решение.

1. Оценим динамическую устойчивость системы при отсутствии АПВ на линии.

Методика построения характеристик мощности в исходном ( $P_I$ ), аварийном ( $P_{II}$ ) и послеаварийном ( $P_{III}$ ) режимах аналогична задаче 3.1. По этим характеристикам, зная мощность турбины генератора  $P_T = P_0$  и угол, соответствующий отключению КЗ  $\delta_{отк} = \delta_0 + \Delta\delta_1$ , можно построить площадки ускорения ( $f_y$ ) и торможения ( $f_T$ ). Если  $f_T > f_y$ , динамическая устойчивость системы сохраняется.

2. Оценим динамическую устойчивость системы при успешном АПВ на линии.

При успешном АПВ в момент времени, соответствующий углу  $\delta_{АПВ} = \delta_{отк} + \Delta\delta_2$ , происходит переход с послеаварийной характеристики на характеристику исходного режима, что увеличивает динамическую устойчивость системы. Далее строятся площадки ускорения и торможения и оценивается динамическая устойчивость системы.

3. Неуспешное АПВ.

В этом случае в момент времени, соответствующий углу  $\delta_{АПВ}$ , происходит переход с послеаварийной характеристики на аварийную. Далее через некоторое время  $\Delta t_3$  защита вновь отключает поврежденную линию  $\delta_{отк2} = \delta_{АПВ} + \Delta\delta_1$ . Строятся площадки ускорения и торможения и оценивается динамическая устойчивость системы.

**Пример к задаче 5.4.** В схеме, приведенной на рис. 1.1, в точке 1 возникает двухфазное КЗ. Через некоторый промежуток времени  $\Delta t_1$ , соответствующий изменению угла  $\Delta\delta_1 = 20^\circ$ , поврежденная линия отключается. Затем через промежуток времени  $\Delta t_2$ , соответствующий изменению угла  $\Delta\delta_2 = 30^\circ$ , срабатывает АПВ и отключенная линия включается в работу.

Требуется оценить влияние АПВ на динамическую устойчивость системы для двух случаев:

1. Успешное АПВ.

2. Неуспешное АПВ (линия отключается через промежуток времени  $\Delta t_3$ , соответствующий изменению угла  $\Delta\delta$ ).

Параметры схемы и исходного режима необходимо взять из примера к задаче 3.1.

**Решение.** Расчет угловых характеристик мощности приведен в примере к задаче 3.1. Динамические характеристики мощности для случая без АПВ, при успешном и неуспешном АПВ приведены на рис. 5.5, 5.6, 5.7.

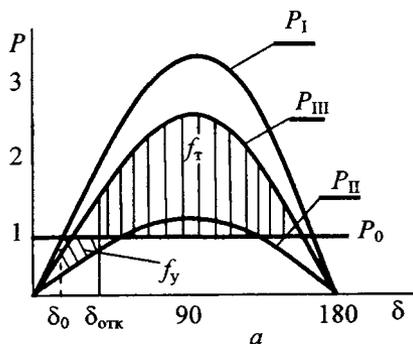


Рис. 5.5. Динамические характеристики мощности при отсутствии АПВ

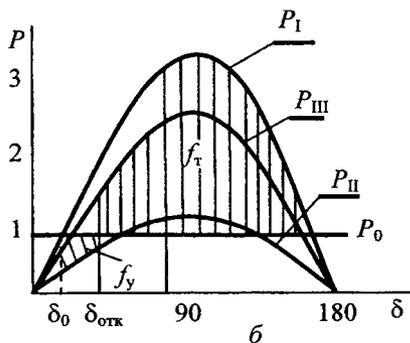


Рис. 5.6. Динамические характеристики

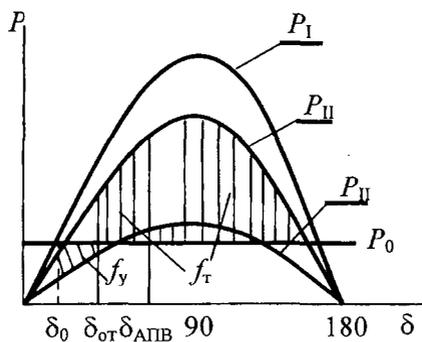


Рис. 5.7. Динамические характеристики при неуспешном АПВ

Исходя из площадок ускорения и торможения можно сделать вывод, что для всех трех случаев динамическая устойчивость сохраняется. Успешное АПВ повышает динамическую устойчивость, а неуспешное – снижает ее.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Переходные процессы электрических систем в примерах и иллюстрациях. – М.: Госэнергоиздат, 1967. – 457 с.
2. Калентионок, Е.В. Устойчивость электроэнергетических систем. – Минск.: Техноперспектива, 2006. – 313 с.
3. Веников, В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. – М.: Высшая школа, 1985. – 536 с.
4. Переходные процессы в системах электроснабжения / Г.Г. Пивняк [и др.]. – М.: Энергоатомиздат; Днепропетровск: Национальный горный университет, 2003. – 548 с.
5. Андерсон, П., Фуад, А. Управление энергосистемой и устойчивость. – М.: Энергия, 1980. – 568 с.
6. Электроэнергетические системы в примерах и иллюстрациях / Под ред. В.А. Веникова. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 504 с.
7. Веников, В.А., Литкенс, И.В. Математические основы теории автоматического управления режимами энергосистем. – М.: Высшая школа, 1964. – 202 с.
8. Примеры анализа и расчетов электропередач, имеющих автоматическое регулирование и управление / Под ред. В.А. Веникова. – М.: Высшая школа, 1967. – 296 с.
9. Куликов, А.Ю. Переходные процессы в электрических системах. – Новосибирск: НГТУ, 2003. – 283 с.
10. Жданов, П.С. Устойчивость электрических систем. – М.: Госэнергоиздат, 1948. – 399 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

|   |     |
|---|-----|
| Предисловие. ....   | 3   |
| 1. Схемы замещения и определение параметров элементов<br>электроэнергетических систем. .... | 4   |
| 2. Статическая устойчивость и характеристики мощности<br>электроэнергетических систем. .... | 24  |
| 3. Динамическая устойчивость электроэнергетических<br>систем. ....                          | 70  |
| 4. Устойчивость нагрузки электроэнергетических<br>систем. ....                              | 93  |
| 5. Повышение устойчивости электроэнергетических<br>систем. ....                             | 118 |
| Литература. ....  | 129 |

Учебное издание

КАЛЕНТИОНОК Евгений Васильевич  
ВОЛКОВ Александр Анатольевич  
МЫШКОВЕЦ Евгений Васильевич  
ЦЫГАНКОВ Валерий Михайлович

## УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

### СБОРНИК ЗАДАЧ И ПРИМЕРЫ ИХ РЕШЕНИЯ

Методическое пособие к практическим занятиям  
по дисциплинам «Устойчивость электроэнергетических систем»,  
«Переходные процессы в электроэнергетических системах»,  
«Надежность и устойчивость работы систем электроснабжения»  
для студентов электроэнергетических специальностей вузов

Редактор Е.Н. Гордейчик  
Компьютерная верстка Н.А. Школьниковой

---

Подписано в печать 20.07.2007.

Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 7,61. Уч.-изд. л. 5,95. Тираж 300. Заказ 225.

---

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусский национальный технический университет.

ЛИ № 02330/0131627 от 01.04.2004.

220013, Минск, проспект Независимости, 65.