

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра электромеханических систем и электроснабжения

УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

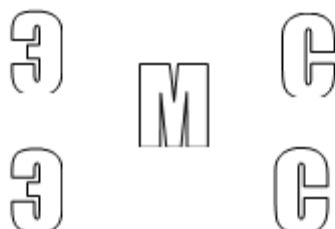
к практическим занятиям

для обучающихся направления 13.04.02

«Электроэнергетика и электротехника»

(профиль магистерской программы «Электроэнергетические системы»)

всех форм обучения



Воронеж 2022

УДК 621.3(07)
ББК 31.2я7

Составители

*канд. техн. наук Н. В. Ситников,
канд. техн. наук С. А. Горемыкин*

Устойчивость электроэнергетических систем: методические указания к практическим занятиям для обучающихся направления 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» (профиль магистерской программы «Электроэнергетические системы») всех форм обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост.: Н. В. Ситников, С. А. Горемыкин. – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2022. – 38 с.

Методические указания содержат материалы, используемые при проведении практических занятий, описывают две темы: схемы замещения и определение параметров элементов электроэнергетических систем, статическая устойчивость и характеристики мощности электроэнергетических систем.

Предназначены для обучающихся по направлению подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» (магистерская программа «Электроэнергетические системы») очной и заочной форм обучения, изучающих дисциплину «Устойчивость электроэнергетических систем».

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле «Практика Устойчивость ЭЭС.pdf».

Ил. 20. Табл. 6. Библ.: 6 назв.

УДК 621.3(07)

ББК 31.2я7

*Рецензент – К. Е. Кононенко, д-р техн. наук, проф.
кафедры электромеханических систем и электроснабжения ВГТУ*

*Издается по решению редакционно-издательского совета
Воронежского государственного технического университета*

ВВЕДЕНИЕ

Нарушение устойчивости параллельной работы электрических станций в электроэнергетической системе (ЭЭС) может привести к системной аварии: разделению объединенной системы на изолированно работающие части, нарушению электроснабжения большого числа потребителей, а в некоторых случаях к полному нарушению работы частей системы и нарушению электроснабжения целых промышленных районов. Поэтому обеспечение устойчивости электроэнергетических систем является одним из важнейших вопросов при проектировании и эксплуатации энергетических объектов, таких как электрические станции и крупные узлы нагрузки. Недостаточное внимание к этой проблеме приводит к развитию системных аварий с полным прекращением электроснабжения больших промышленных и жилых районов.

Надежная работа энергосистемы определяется многими факторами и среди них один из важнейших это ее устойчивость к различным возмущениям.

Различают следующие виды устойчивости ЭЭС:

- статическая устойчивость, когда ЭЭС в результате малого возмущения (случайного колебания нагрузки) выходит из нормального режима, а затем самопроизвольно возвращается в исходный установившийся режим или входит в новый установившийся режим;
- динамическая устойчивость, когда ЭЭС сохраняет синхронный установившийся режим после большого возмущения (например, короткого замыкания);
- результирующая устойчивость, когда ЭЭС сохраняет устойчивость после выпадения из синхронного установившегося режима и кратковременного асинхронного хода.

В данной методической разработке рассмотрены типовые задачи по составлению схем замещения и определению параметров элементов ЭЭС, по анализу статической устойчивости и определению характеристик мощности ЭЭС.

1. СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Типовая 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.

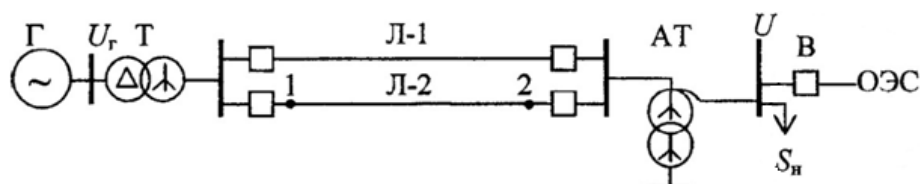


Рис. 1.1. Схема электрической системы

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
$P_{HT}, \text{МВт}$	60	200	300	100	150	200	300	160	100	60
$\cos \varphi_{HT}$	0,8	0,9	0,85	0,85	0,85	0,9	0,9	0,85	0,85	0,85
$U_{HT}, \text{кВ}$	10,5	13,8	20	15,75	10,5	15,75	20	18	10,5	6,3
Кол-во блоков, п	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
$S_{HT}, \text{МВА}$	80	250	400	125	200	250	400	200	125	80
пТ	1	1	1	3	1	2	2	2	2	2
K_T	121/ 10,5	242/ 13,8	330/ 20	242/ 15,75	120/ 10,5	242/ 15,75	330/ 20	242/ 18	120/ 10,5	120/ 6,3
$S_{НАТ}, \text{МВА}$	125	300	400	125	240	300	400	240	125	125
n_{AT}	1	1	1	3	1	2	2	2	2	2
K_{AT}	330/ 115	330/ 242	787/ 330	330/ 242	347/ 115	347/ 242	787/ 330	347/ 242	330/ 121	330/ 121
$U_k, \text{В-с}$	10	11	8	9	10	7	7,6	8	9	10
$U, \text{кВ}$	330	330	750	330	330	330	750	330	330	330
$U_{HL}, \text{кВ}$	110	220	330	220	110	220	330	220	110	110
$x_0, \text{Ом/км}$	0,42	0,41	0,32	0,4	0,41	0,42	0,33	0,41	0,43	0,42
$P_H, \text{МВт}$	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 обучающихся очного отделения - номер по журналу, для обучающихся заочного отделения - индивидуальный номер зачетной книжки.

2. Значение U_k трансформатора рассчитывается в зависимости от α , β , γ - 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 $Q_n = 0,5/P_n$.

7. Статические характеристики нагрузки по напряжению:

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

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

Таблица 1.2

Исходные данные по длинам линий и постоянной механической инерции генераторов

Первая буква фамилии	Последняя цифра номера варианта										$T_{jг}, c$
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
	$l = l_1 = l_2, км$										
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

Рекомендации

Схему замещения данной системы (см. рис. 1.1) можно представить в виде, приведенном на рис. 1.2 [1].

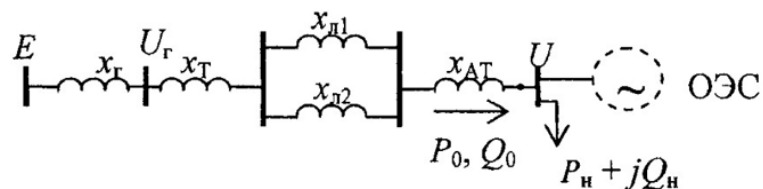


Рис. 1.2. Схема замещения электрической системы

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_o), которая передается генераторами в ОЭС, в данном случае равную мощности нагрузки (P_n) $S_\delta = P_o = P_n$, и значение напряжения на шинах системы $U_\delta = U$. Поскольку в электрической системе имеются, как правило, несколько ступеней напряжения, то все сопротивления системы должны быть приведены к одной ступени напряжения, принятой за базисную

$$X_* = X(\text{Ом}) \frac{S_6}{U_6^2} * K_1^2 * K_2^2 \dots * K_n^2, \quad (1.1)$$

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

K_1, K_2, K_3 - 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:

$$\begin{aligned}x_{d*} &= \frac{x_d\%}{100*n} * \frac{U_{\text{НГ}}^2}{S_{\text{НГ}}} * \frac{S_6}{U_6^2} * K_T^2 * K_{AT}^2; \\x'_{d*} &= \frac{x'_d\%}{100*n} * \frac{U_{\text{НГ}}^2}{S_{\text{НГ}}} * \frac{S_6}{U_6^2} * K_T^2 * K_{AT}^2; \\x_2 &= \frac{x_2\%}{100*n} * \frac{U_{\text{НГ}}^2}{S_{\text{НГ}}} * \frac{S_6}{U_6^2} * K_T^2 * K_{AT}^2,\end{aligned}\tag{1.2}$$

где x_{d*}, x'_{d*}, x_{2*} - синхронное, переходное сопротивления и сопротивление обратной последовательности генераторов станции.

Индуктивные сопротивления трансформатора и автотрансформатора определяются из уравнений:

$$\begin{aligned}x_{T*} &= \frac{U_k\%}{100} * \frac{U_{\text{НГ}}^2}{S_{\text{НГ}}} * \frac{S_6}{U_6^2} * K_{AT}^2; \\x_{AT*} &= \frac{U_{k,B-C}\%}{100} * \frac{U_{\text{НАТ}}^2}{S_{\text{НАТ}}} * \frac{S_6}{U_6^2}.\end{aligned}\tag{1.3}$$

Индуктивное сопротивление одной линии

$$x_{л1*} = x_0 * \iota \frac{S_6}{U_6^2} * K_{AT}^2.\tag{1.4}$$

Индуктивное сопротивление двух параллельных линий

$$x_{л*} = \frac{x_{л1*}}{2}.\tag{1.5}$$

Сопротивление нулевой последовательности

$$x_{л0} \approx 4x_{л*}.\tag{1.6}$$

Постоянная механической инерции генераторов станции

$$T_{j*} = \frac{T_{jГ*} * n * S_{\text{НГ}}}{S_6}.\tag{1.7}$$

Сопротивление внешней сети системы в нормальном режиме

$$x_{с*} = x_{T*} + x_{л*} + x_{AT*}.\tag{1.8}$$

Сопротивление внешней сети системы при отключении одной линии

$$x_{c1*} = x_{T*} + x_{Л1*} + x_{АТ*} . \quad (1.9)$$

Мощности, которые выдаются в приемную систему и потребляются нагрузкой

$$P_{0*} = P_{H*} = \frac{P_H}{S_6} . \quad (1.10)$$

$$Q_{0*} = Q_{H*} = \frac{Q_H}{S_6} .$$

Напряжение на шинах системы

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

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

Решить задачу 1.1

Для электрической системы (см. рис. 1.1) требуется найти параметры схемы замещения (см. рис. 1.2). Параметры элементов системы:

Генератор Г: $P_{H2} = 150$ МВт, $\cos\varphi_{HГ} = 0,85$, $U_{H2} = 18$ кВ, $x_{d2} = 148,7$ %, $x'_d = 18$ %, $x_{2Г} = 14,5$ %, $T_{j2} = 8,0$ с, $n = 1$.

Трансформатор Т: $S_{HT} = 200$ МВ·А, $U_{HT} = 242$ кВ, $K_T = 242/18$, $U_K = 11$ %, $n_T = 1$.

Линии Л1, Л2: $l = 120$ км, $X_0 = 0,43$ Ом/км.

Автотрансформатор АТ: $S_{НАТ} = 240$ МВ·А, $U_{НАТ} = 347$ кВ, $K_{АТ} = 347/242$, $U_{К,В-С} = 7,6$ %, $n_{АТ} = 1$.

Нагрузка: $P_H = 140$ МВт, $Q_H = 70$ Мвар.

Типовая задача 1.2

На рис. 1.3 представлена схема замещения электрической системы. Требуется определить собственные и взаимные сопротивления электростанций методом преобразования схемы сети [2].

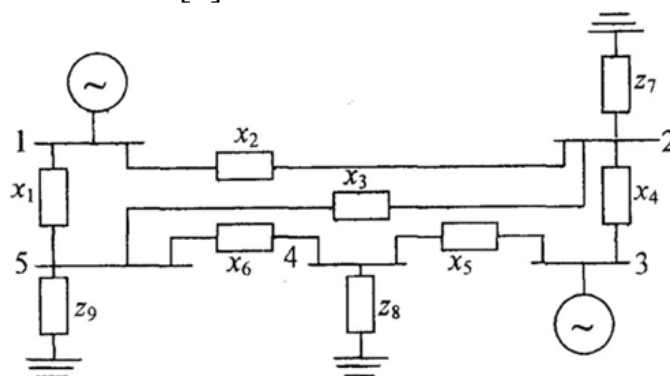


Рис 1.3. Схема замещения электрической системы

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	0.55	0.38	0.4	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	0.0	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
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	4.30+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	0.3	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

Рекомендации.

Преобразуем предлагаемую схему. Заменяем многолучевую звезду полным многоугольником (рис. 1.4). На рис. 1.5 показано исключение узла 4.

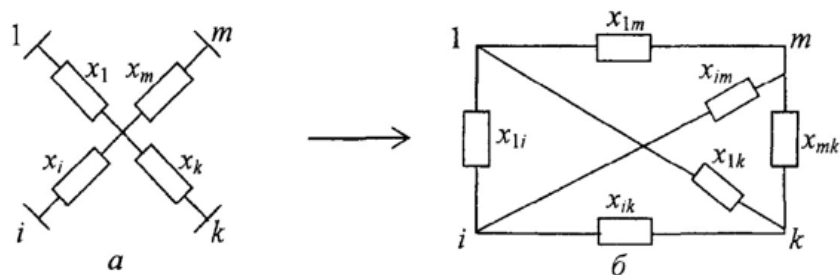


Рис. 1.4. Замена многолучевой звезды полным многоугольником:
a – многолучевая звезда; *б* – полный многоугольник

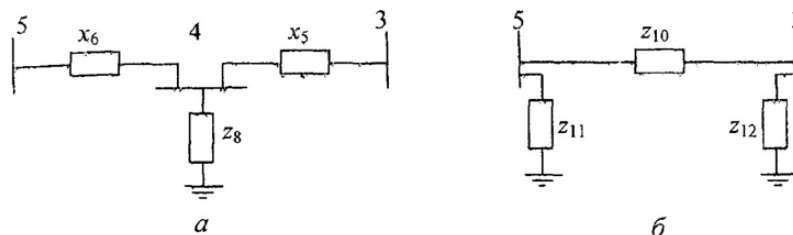


Рис. 1.5. Пример исключения узла 4;
a - схема связей узла 4; *б* - преобразованная схема без узла 4

Используем зависимость:

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

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

$$z_{11} = x_6 * x_8 \left(\frac{1}{x_6} + \frac{1}{x_5} + \frac{1}{z_8} \right);$$

$$z_{12} = x_5 * x_8 \left(\frac{1}{x_6} + \frac{1}{x_5} + \frac{1}{z_8} \right).$$

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):

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

$$z_{11} = x_6 + x_8 + \frac{x_6 x_8}{z_5} ;$$

$$z_{12} = x_5 + x_8 + \frac{x_5 x_8}{z_6} .$$

При этом нетрудно доказать тождество

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

Проделив 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} :

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

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

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

$$z_{16} = x_1 * z_3 \left(\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_3} + \frac{1}{z_{10}} + \frac{1}{z_{13}} \right);$$

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

$$z_{18} = x_{13} * z_3 \left(\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_3} + \frac{1}{z_{10}} + \frac{1}{z_{13}} \right);$$

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

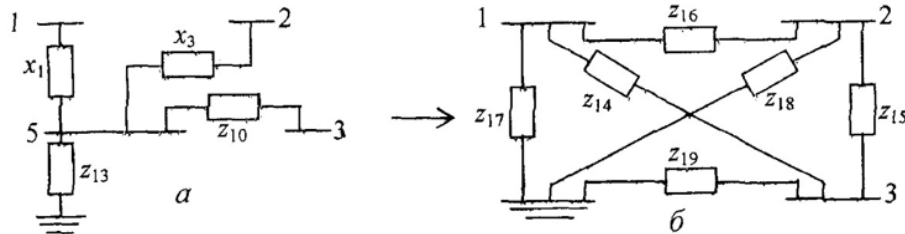


Рис. 1.6. Исключение узла 5:
a - схема связей узла 5; *б* - преобразованная схема без узла 5

На рис. 1.7 представлено исключение узла 2.

$$z_{20} = z_2 || z_{16}, z_{21} = z_7 || z_{18}, z_{22} = x_4 || z_{15}, z_{23} = z_{12} || z_{19};$$

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

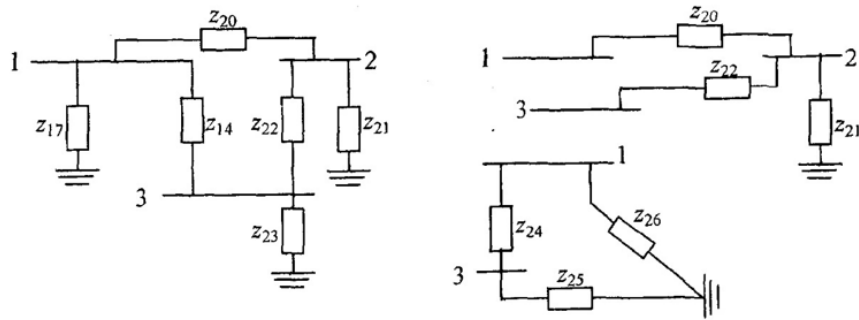


Рис. 1.7. Пример исключения узла 2

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

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

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

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

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

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

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

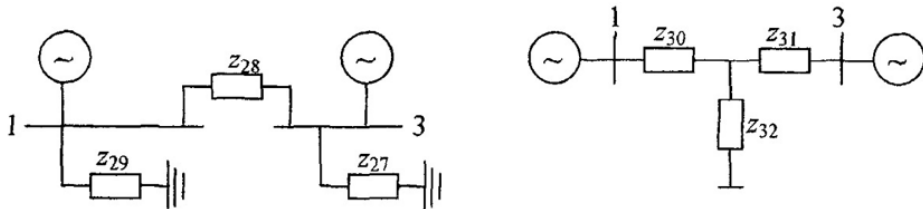


Рис. 1.8. Преобразованные схемы замещения

Собственные и взаимные сопротивления системы составят:

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

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

2. СТАТИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ И ХАРАКТЕРИСТИКИ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Типовая 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.

Рекомендации.

При проведении упрощенных расчетов статической устойчивости синхронные машины представляются по-разному в зависимости от типа автоматического регулирования возбуждения (АРВ) [2],[6]. 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

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

где δ - 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 δ от 0° до 180° , можно построить угловую характеристику мощности системы с генераторами без АРВ (рис. 2.1, зависимость 1).

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:

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

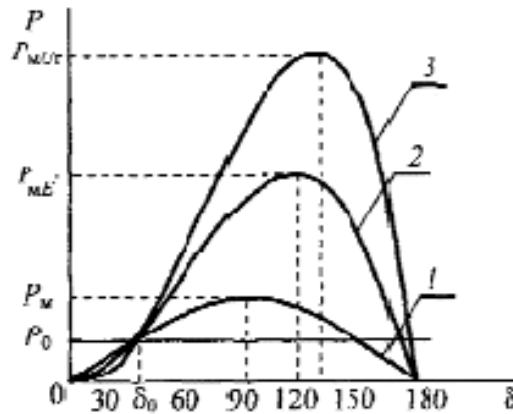


Рис. 2.1. Угловые характеристики мощности системы:

1 - с генераторами без АРВ; 2- с генераторами с АРВ ПД; 3- с генераторами с АРВ СД

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

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

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 % [3].

Синхронная машина с автоматическим регулятором возбуждения пропорционального действия

На автоматические регуляторы возбуждения синхронных машин возлагаются следующие функции:

- обеспечение поддержания требуемого уровня напряжения на зажимах машин или реактивной мощности в установившемся режиме системы;
- повышение статической и динамической устойчивости при возмущениях в электроэнергетической системе;
- увеличение требуемого качества переходных процессов в электроэнергетической системе.

Существующие устройства АРВ обычно подразделяются на 2 типа: пропорционального или сильного действия [2],[6].

Регуляторы пропорционального действия (ПД), изменяют ток возбуждения в зависимости от отклонения какого-либо параметра режима (например, напряжения, тока).

АРВ сильного действия (СД) регулируют возбуждение синхронных машин не только по отклонению параметров режима, но также по скорости и ускорению их изменений. Это позволяет в самом начале переходного процесса оказывать на системы возбуждения машин более интенсивное воздействие, чем АРВ ПД (отсюда термин «сильного действия»).

Упрощенная структурная схема АРВ пропорционального действия приведена на рис. 2.2.

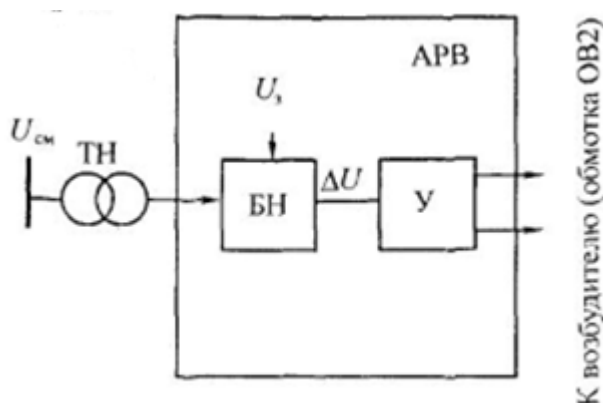


Рис. 2.2. Структурная схема автоматического регулятора возбуждения пропорционального действия

Рассмотрим АРВ ПД, осуществляющий регулирование возбуждения по величине и знаку отклонения напряжения на зажимах синхронной машины от заданного значения. Для этого от трансформатора напряжения (ТН) подается напряжение, пропорциональное напряжению статора СМ ($U_{см}$), на вход блока напряжения (БН). Блок БН, включающий преобразовательный и измерительный элементы, выявляет отклонение напряжения от заданной уставки $\Delta U = U_3 - U_{см}$. Полученная разность ΔU усиливает в усилителе (У) и подается на обмотку возбуждения ОБ2 возбудителя синхронной машины (рис.2.2). Такой регулятор, реагирующий на отклонения напряжения, будет стремиться поддерживать напряжение на зажимах синхронной машины в соответствии с заданным значением U_3 .

Если $U_{см}=U_3$, то напряжение на выходе блока БН равно нулю и АРВ не изменяет напряжение возбудителя. При снижении $U_{см}$ величина ΔU становится положительной, что приводит к изменению тока на выходе усилителя и в ОБ2. При этом суммарный магнитный поток возбуждения возбудителя возрастает, увеличивая тем самым ток в роторе синхронной машины, а следовательно, и напряжение $U_{см}$ на ее зажимах. При увеличении $U_{см}$ выше U_3 величина ΔU становится отрицательной и регулятор уменьшает ток возбудителя, а следова-

тельно, и $U_{см}$. Такое регулирование, называемое статическим, при изменении режима работы синхронной машины не обеспечивает поддержания напряжения $U_{см}$, точно соответствующего заданному U_3 , так как при этом $\Delta U = 0$ и АРВ не действует. Поэтому в синхронных машинах с регуляторами АРВ ПД напряжение поддерживается с определенной точностью, статизмом, которые зависят от коэффициента усиления (k_U) усилителя $У$. Вместе с тем регулирование $U_{см}$ по отклонению напряжения приводит к поддержанию неизменным напряжения внутри обмотки синхронной машины за некоторым его сопротивлением. Обычно у регуляторов пропорционального действия выбирают такой коэффициент усиления k_U , что $E'_q = const$. Поэтому в расчетах электромеханических переходных процессов синхронную машину, имеющую АРВ ПД, можно представить в виде ЭДС E'_q или E' , приложенной за переходным сопротивлением x'_q .

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

$$P_{E'q} = \frac{E'_q U}{X'_{d\Sigma}} \sin \delta - \frac{U^2}{2} \frac{X_d - X'_d}{X_{d\Sigma} X'_{d\Sigma}} \sin 2\delta, \quad (2.7)$$

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

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

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 ; x'_d ; x_d ; $X_{d\Sigma}$; $X'_{d\Sigma}$; U в формулу (2.7) и изменяя угол δ от 0° до 180° , 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*

В АРВ СД различного исполнения используется несколько параметров, характеризующих режим работы системы: отклонение напряжения ΔU и скорость U' его изменения на зажимах синхронной машины; скорость I' и ускорение I'' изменения тока в статоре синхронной машины или в линии электропередачи; отклонение угла $\Delta\delta$ и скорость δ' его изменения; отклонение Δf частоты и скорость f' ее изменения; скорость изменения тока в роторе I'_f синхронной машины.

Рассмотрим АРВ СД (рис.2.3), осуществляющий регулирование по ΔU , U' , Δf и f' .

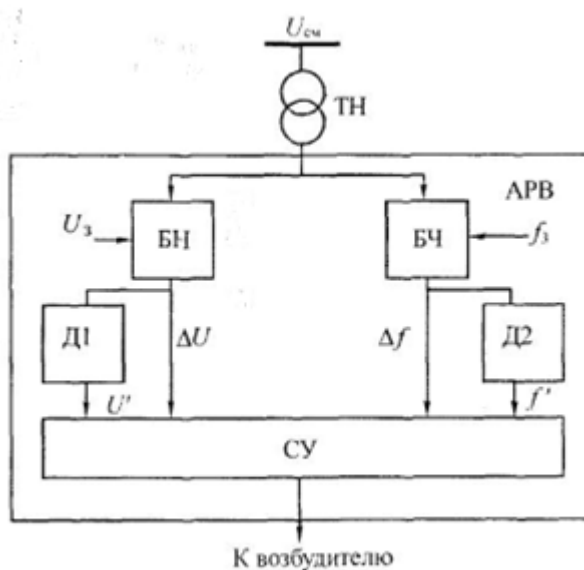


Рис. 2.3. Структурная схема автоматического регулятора
сильного действия

Напряжение статора синхронной машины $U_{см}$ подводится от трансформатора напряжения ТН к блоку напряжения БН и к блоку частоты БЧ. Блок БН, аналогичный соответствующему блоку в АРВ ПД, выявляет отклонение напряжения, а дифференцирующий элемент (Д1) определяет скорость изменения напряжения U' . Блок БЧ выявляет отклонения частоты от нормального значения и формирует сигнал Δf . Одновременно дифференцирующий элемент (Д2) определяет скорость изменения частоты f' . Значение параметров ΔU , U' , Δf и f' подаются на суммирующий усилитель (СУ). Сигнал с выхода СУ АРВ СД поступает, как правило, в схему управления тиристорной или бесщеточной систем возбуждения. Поскольку АРВ СД реагирует не только на отклонения значений регулируемых параметров, но также и на скорость их изменения, то это позволяет с опережением выявлять характер возникшего переходного процесса и оказывать сильное воздействие на систему возбуждения синхронной машины в самом начале изменения режима.

Поэтому системы возбуждения с АРВ СД могут поддерживать практически постоянное напряжение на шинах синхронных машин во всех режимах ее работы при малых возмущениях. Это позволяет в расчетах статической устойчивости синхронные машины с АРВ СД представлять в виде значений $x_{cm} = 0, U_{cm} = const$. При возникновении больших возмущений в энергосистеме возбуждения, оснащенные даже АРВ СД, не могут поддерживать постоянство напряжения на шинах синхронных машин. Поэтому в начале переходного процесса синхронная машина с АРВ СД может быть представлена аналогично машине с АРВ ПД- ЭДС E'_q или E' за переходным сопротивлением x'_d .

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

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

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

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_Γ относительно напряжения системы U и 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_c ; x_d ; $x_{d\Sigma}$ в формулу (2.12) и изменяя угол δ от 0° до 180° , 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 $P_m = P_{MU_\Gamma}$ и сравнивается с нормативным значением.

Решить задачу 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. $P_0 = P_H$, $Q_0 = Q_H$, а напряжение на шинах приемной системы $U = 330$ кВ. Остальные параметры системы взять из примера 1.1.

Решить задачу 2.2

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

Рекомендации. Векторная диаграмма системы строится на основе ранее определенных параметров: ЭДС E_q , E' , напряжений U , U_T и углов δ_0 , δ'_0 и δ_{c0} (рис. 2.4).

При построениях необходимо выбрать и указать масштабы величин.

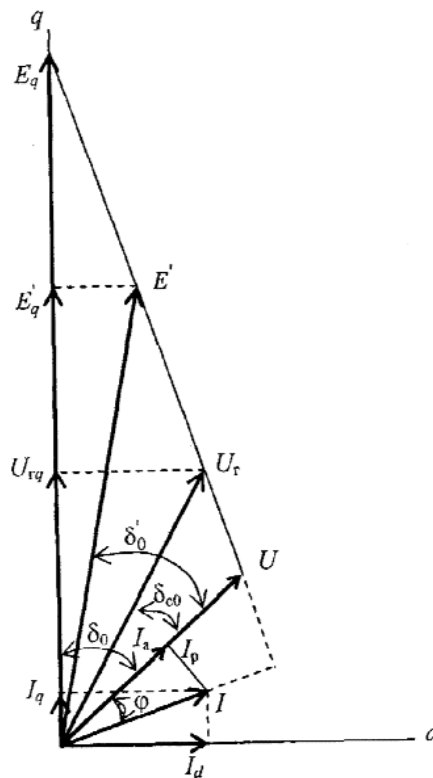


Рис. 2.4. Векторная диаграмма простейшей электрической системы
Величина тока I и его угол φ находятся из уравнений:

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

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

Типовая 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. 2.5. 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.

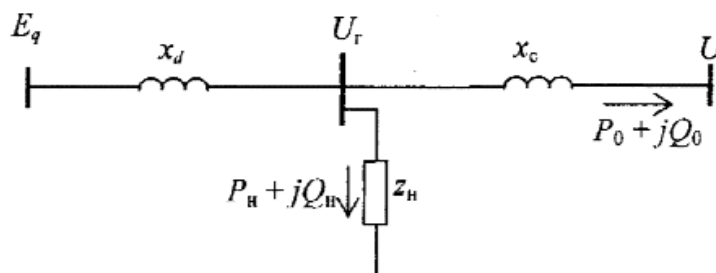


Рис. 2.5. Схема замещения системы

Таблица 2.1

Значения нагрузки системы и мощности, передаваемой в ОЭС

№ варианта	P_H , МВт	Q_H , МВар	P_0 , МВт	Q_0 , МВар	№ варианта	P_H , МВт	Q_H , МВар	P_0 , МВт	Q_0 , МВар
1	160	80	40	20	18	120	60	80	40
2	200	100	100	50	19	60	30	40	20
3	220	110	80	40	20	30	15	30	15
4	100	50	40	20	21	100	50	100	50
5	300	150	100	50	22	160	80	140	70
6	400	200	200	100	23	140	70	160	80
7	180	90	80	40	24	40	20	100	50
8	140	70	60	30	25	200	100	200	100
9	80	40	20	10	26	200	100	400	200
10	40	20	20	10	27	80	40	180	90
11	140	70	60	30	28	100	50	100	50
12	220	110	100	50	29	60	30	40	20
13	180	90	120	60	30	20	10	40	20
14	120	60	20	10	31	190	95	110	55
15	340	170	60	30	32	130	65	70	35
16	500	250	100	50	33	150	75	90	45
17	200	100	60	30	34	170	85	100	50

Рекомендации.

Сопротивление нагрузки находится по выражению

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

Собственные и взаимные сопротивления генераторов станции определяются из уравнений:

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

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

$$E_q = \sqrt{\left(U_\Gamma + \frac{(Q_n + Q_0 + \Delta Q)x_d}{U_\Gamma} \right)^2 + \left(\frac{P_0 x_d}{U_\Gamma} \right)^2}. \quad (2.24)$$

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 δ_{12} от 0 до 180° , по формуле (2.25) можно построить угловую характеристику мощности.

Решить задачу 2.3

На шины генераторного напряжения электрической системы (см. рис. 1.1) подключена нагрузка $P_n = 20,45$ МВт, $Q_n = 40,9$ 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.

Решить задачу 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_Γ из задачи 2.1. Принять значения E_q и U_Γ независимыми от режима работы генераторов.

Рекомендации. 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 δ_Γ от 0° до 360° , 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_Γ и Q_Γ генератора [1].

Типовая задача 2.5

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. 2.2. Требуется проверить устойчивость рассматриваемой системы с помощью критериев Михайлова, Гурвица и Рауса.

Таблица 2.2

Значения коэффициентов характеристического уравнения

№ варианта	a_0	a_1	a_2	a_3	№ варианта	a_0	a_1	a_2	a_3
1	0,2	1,55	4,0	0,52	18	0,3	1,52	5,3	0,80
2	0,3	1,45	3,8	0,53	19	0,4	1,42	5,1	0,82
3	0,4	1,35	3,6	0,55	20	0,5	1,32	4,7	0,84
4	0,5	1,25	3,4	0,58	21	0,6	1,22	4,3	0,86
5	0,6	1,15	3,3	0,59	22	0,7	1,12	4,1	0,88
6	0,7	1,05	3,2	0,6	23	0,8	0,91	3,9	0,9
7	0,8	1,0	3,1	0,62	24	0,9	0,81	3,7	0,91
8	0,9	0,95	3,0	0,64	25	1,0	0,71	3,4	0,93
9	1,0	0,85	2,8	0,66	26	1,1	0,63	3,1	0,94
10	1,1	0,75	2,6	0,68	27	1,2	0,53	2,9	0,95
11	1,2	0,65	2,4	0,70	28	1,3	0,43	2,8	0,96
12	1,3	0,55	2,2	0,71	29	1,4	0,21	2,6	0,97
13	1,4	0,45	1,78	0,72	30	1,5	0,15	2,3	0,98
14	1,5	0,35	1,61	0,74	31	0,8	1,22	3,8	0,66
15	1,6	0,25	1,56	0,75	32	0,9	1,12	3,6	0,68
16	0,1	1,72	6,0	0,76	33	1	0,91	3,4	0,70
17	0,2	1,62	5,7	0,78	34	1,1	0,81	3,3	0,71

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

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

$$\begin{aligned} \text{где } X(\omega) &= a_n - a_{n-2}\omega^2 + a_{n-4}\omega^4 + \dots \\ Y(\omega) &= a_{n-1}\omega - a_{n-3}\omega^3 + a_{n-5}\omega^5 + \dots \end{aligned}$$

Если задаться серией значений ω 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 [1].

Критерий устойчивости Михайлова можно записать в следующей формулировке: для того чтобы система была устойчивой, необходимо и достаточно, чтобы вектор кривой Михайлова $D(j\omega)$ при изменении от 0 до $+\infty$ монотонно поворачивался против часовой стрелки на угол $n\pi/2$, где n – степень характеристического уравнения, или, что то же самое, чтобы кривая Михайлова обходила только против часовой стрелки последовательно n квадратов координатной плоскости [2],[4]. При этом модуль кривой Михайлова при всех значениях ω должен быть отличным от нуля, т.е. $D(j\omega) \neq 0$.

Кривая Михайлова для устойчивых систем всегда имеет плавную спиралевидную форму, проходит последовательно (без пропусков) все n квадратов, причем конец ее уходит в бесконечность в том квадрате координатной плоскости, номер которого равен степени характеристического уравнения.

На рис.2.6 показаны типичные кривые Михайлова для устойчивых систем, описываемых характеристическими уравнениями, начиная от первого ($n=1$) до пятого ($n=5$) порядка. Для удобства сравнения коэффициенты a_n во всех случаях приняты одинаковыми.

Признаками неустойчивости системы является нарушение числа и последовательности пройденных кривой Михайлова квадрантов координатной плоскости, вследствие чего угол поворота вектора $D(j\omega)$ оказывается меньше, чем угол $n\pi/2$.

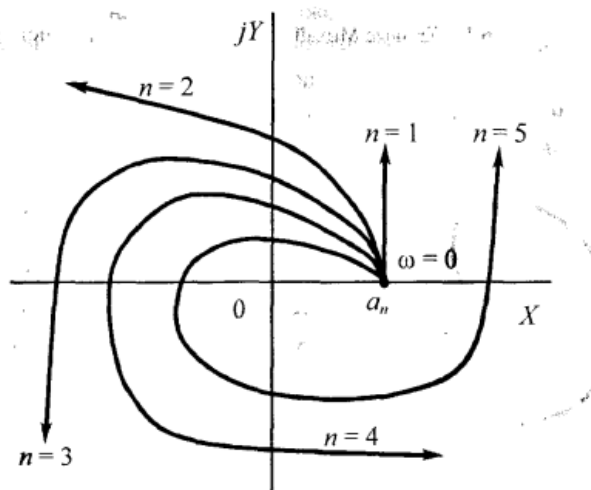


Рис. 2.6. Кривые Михайлова для устойчивых систем

На рис. 2.7 показаны кривые Михайлова для неустойчивых систем. Кривая 1 начинается на отрицательной вещественной полуоси, в кривой 2 нарушена последовательность прохождения квадрантов, а кривая 3 находится вся в одном квадранте при степени уравнения $n=5$.

По виду кривой Михайлова можно судить о нахождении системы на границе устойчивости. При $a_n = 0$, что соответствует границе аperiodической устойчивости, кривая Михайлова выходит из начала координат, свидетельствуя о наличии нулевого корня (рис.2.8, а). При нахождении на границе колебательной устойчивости кривая Михайлова при угловой скорости незатухающих колебаний $\omega = \omega_0$ проходит через начало координат, свидетельствуя о наличии пары мнимых корней $p_{i,i+1} = \pm j\omega_0$ (рис. 2.8, б).

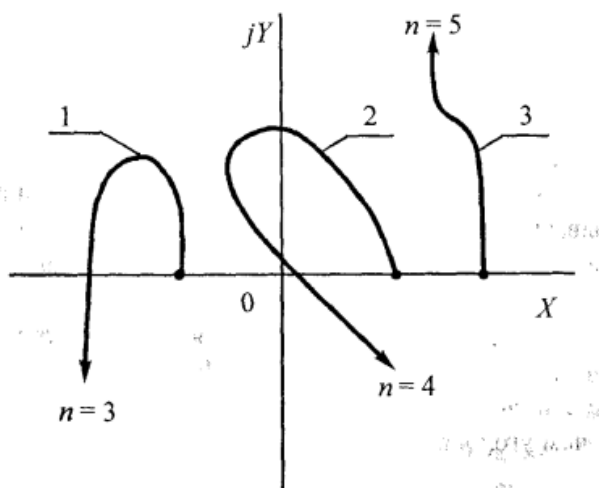


Рис. 2.7. Кривые Михайлова для неустойчивых систем

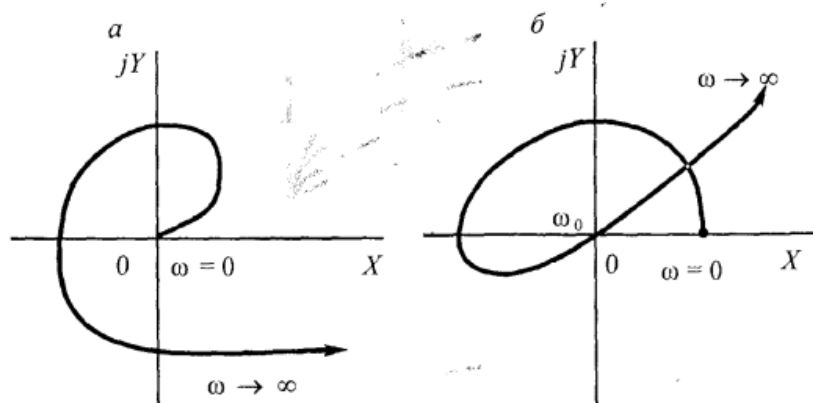


Рис. 2.8. Кривые Михайлова на границе устойчивости:
а- аperiodической; б - колебательной

Критерий Михайлова успешно применяется для оценки устойчивости как простых схем с небольшим порядком характеристического уравнения, так и сложных автоматизированных систем. В первом случае возможен ручной расчет устойчивости. Оценка устойчивости сложных систем выполняется на ЭВМ по специально разработанным программам.

Для оценки устойчивости системы по критерию Рауса составляется специальная таблица Рауса (табл. 2.3) [2], [4].

Таблица 2.3

Таблица Рауса

Номер i-той строки	Номер k-го столбца					Коэффициент λ_{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	$c_{14} = a_3 - \lambda_2 c_{23}$	$c_{24} = a_5 - \lambda_2 c_{23}$	$c_{34} = a_7 - \lambda_2 c_{43}$	$c_{44} = a_9 - \lambda_2 c_{53}$...	$\lambda_2 = a_1/c_{13}$
...

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.

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

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

Алгебраический критерий Гурвица широко используется во многих исследованиях устойчивости и базируется на анализе коэффициентов характеристического уравнения и полученных на их основе соотношений в виде неравенств [2], [4].

Для оценки устойчивости из коэффициентов характеристического уравнения составляется квадратная матрица Гурвица n -го порядка:

$$\begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & \dots & 0 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_{n-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_{n-2} & a_n \end{vmatrix}$$

Правило составления матрицы следующее: по главной диагонали сверху и направо вниз записываются последовательно коэффициенты уравнения (2.31) в порядке их нумерации, начиная с a_1 до a_n . Столбцы вверх от главной диагонали дополняют коэффициентами характеристического уравнения с последовательно возрастающими индексами, а столбцы вниз – с убывающими индексами. Все недостающие коэффициенты, т.е. коэффициенты с индексами больше n или меньше нуля заменяют нулями.

Отчеркивая в матрице диагональные миноры, получаем определители Гурвица:

$$\Delta_1 = a_1, \Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix}, \dots, \Delta_n = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & \dots & 0 \\ a_0 & a_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & a_n \end{vmatrix}.$$

Как видим, последний определитель Δ_n включает в себя всю матрицу Гурвица целиком. Если его раскрыть по элементам последнего столбца, содержащего только коэффициент a_n , называемый обычно свободным членом характеристического уравнения, то можно записать $\Delta_n = a_n \Delta_{n-1}$.

Номер определителя Гурвица соответствует номеру коэффициента по диагонали, для которого составляют данный определитель. Критерий устойчивости Гурвица формулируется следующим образом: для того чтобы система была устойчивой, необходимо и достаточно, чтобы все коэффициенты характеристического уравнения системы и все определители Гурвица были положительными, т.е. $a_0 > 0, a_1 > 0, \dots, a_n > 0$ и $\Delta_1 > 0, \Delta_2 > 0, \dots, \Delta_n > 0$.

Гурвиц также показал, что если неправильно изменять коэффициенты характеристического уравнения, ухудшая устойчивость системы, то при потере

устойчивости в нуль обратиться, прежде всего, определитель Δ_n . Если при этом $\Delta_{n-1} > 0$, то граница устойчивости определяется условием $a_n = 0$. Это – *граница аperiodической устойчивости*, так как один действительный корень находится на мнимой оси плоскости корней. Если $a_n > 0$, то в нуль обращается определитель Δ_{n-1} , что соответствует наличию на границе пары чисто мнимых корней $p_{1,2} = \pm j\omega_1$. Это – *граница колебательной устойчивости*. При переходе через эту границу начинается самораскачивание системы с частотой ω_1 . Если и дальше продолжать изменять коэффициенты, то могут стать отрицательными и другие определители Гурвица, а Δ_{n-1} вновь может стать положительным. Поэтому положительность a_n и Δ_{n-1} , а значит и Δ_n , еще не гарантирует устойчивости системы: должны быть положительными также и остальные определители Гурвица.

Следует отметить, что, строго говоря, признаком устойчивости системы является факт наличия одного знака у коэффициентов характеристического уравнения, однако обычно оговаривают положительный знак коэффициентов, так как в случае их отрицательного знака его легко заменить положительным путем умножения на минус единицу.

В качестве примера рассмотрим систему, описанную линейным дифференциальным уравнением третьего порядка с постоянными коэффициентами (2.31).

Определитель Гурвица для данного уравнения имеет вид

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

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

Следовательно, кроме положительности всех коэффициентов характеристического уравнения, для сохранения устойчивости необходимо выполнение соотношения $a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0$. Нарушение этого соотношения приведет к самораскачиванию системы.

Следует отметить, что в случае положительности всех коэффициентов характеристического уравнения, необходимые и достаточные условия устойчивости сводятся к тому, чтобы среди определителей Гурвица были положительными все определители с четными или нечетными индексами. Такой критерий носит название критерия Лъенара – Шипара; он требует раскрытия меньшего числа определителей, чем обычный критерий Гурвица, а поэтому особенно удобен при исследовании систем по уравнениям высокого порядка.

Решить задачу 2.5

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.

Типовая задача 2.6

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 $P_o = P_n$, $Q_o = Q_n$.

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

Рекомендации.

Реактивная мощность нагрузки определяется по формуле

$$Q_n = P_n \operatorname{tg} \varphi_n \quad (2.35)$$

Эквивалентный радиус расщепленной фазы

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

где N - число проводов в расщепленной фазе;

$r_{пр}$ - радиус провода;

$a_{ср}$ - среднегеометрическое расстояние между проводами одной фазы.

Удельное индуктивное сопротивление линии электропередачи

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

где $D_{ср}$ - среднегеометрическое расстояние между фазами.

Типовая задача 2.7

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.

Рекомендации.

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

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

Уравнение мощности при увеличении ЭДС

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

Типовая задача 2.8

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.

Рекомендации

Предельная мощность станции определяется по формуле

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

Предельный угол по условию устойчивости

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

где T_j - постоянная инерции генераторов станции;

T_{jc} - постоянная инерции генераторов системы.

Типовая задача 2.9

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 $X_q = X_d/1,5$.

Рекомендации.

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

$$\begin{aligned} E_q &= \sqrt{(U + \frac{Q_0 X_{d\Sigma}}{U})^2 + (\frac{P_0 X_{d\Sigma}}{U})^2}; \\ E'_q &= \sqrt{(U + \frac{Q_0 X'_{d\Sigma}}{U})^2 + (\frac{P_0 X'_{d\Sigma}}{U})^2}; \\ U_r &= \sqrt{(U + \frac{Q_0 X_c}{U})^2 + (\frac{P_0 X_c}{U})^2}, \end{aligned} \quad (2.43)$$

где $X_{q\Sigma} = X_q + X_c$.

Углы между векторами E_q , E' , U_r , U

$$\begin{aligned} \delta &= \arctg \frac{P_0 X_{q\Sigma}}{U + Q_0 X_{q\Sigma}}; \\ \delta' &= \arctg \frac{P_0 X'_{q\Sigma}}{U + Q_0 X'_{q\Sigma}}; \\ \delta_c &= \arctg \frac{P_0 X_c}{U + Q_0 X_c}. \end{aligned} \quad (2.44)$$

ЭДС холостого хода

$$E_d = E_q \frac{x_d - x'_d}{x_q - x'_d} - E'_d \frac{x_d - x_q}{x_q - x'_d}, \quad (2.45)$$

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

Характеристики мощности

$$P_{Ed} = \frac{E_d U}{X_{d\Sigma}} \sin \delta + \frac{U^2}{2} * \frac{x_d - x_q}{X_{d\Sigma} X_{q\Sigma}} \sin 2\delta. \quad (2.46)$$

или ориентировочно

$$P_{Eq} = \frac{E_d U}{X_{d\Sigma}} \sin \delta. \quad (2.47)$$

$$P_{E'd} = \frac{E'dU}{X'd\Sigma} \sin \delta - \frac{U^2}{2} * \frac{x_q - x'd}{X_{q\Sigma} X'd\Sigma} \sin 2\delta. \quad (2.48)$$

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

Типовая задача 2.10

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 δ ($\Delta\delta$) от времени при отклонении ротора на 1 градус от положения установившегося режима при 0° , 60° , 90° , 100° .

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.

Под *демпфированием* понимают процесс подавления электромеханических колебаний в системе, либо уменьшение их амплитуды до допустимых пределов с помощью устройств или приспособления, поглощающих энергию колебаний-демпферов [2]. Демпфирование может быть обусловлено как естественными факторами – потерями на трение, так и действием регуляторов, и появлением дополнительного асинхронного момента и соответственно мощности из-за протекания токов в демпферной обмотке и демпферных контурах, вызванных скольжением ротора синхронной машины относительно поля статора.

Демпфирование, проявляющееся во время относительного движения ротора синхронной машины, может существенно изменить характер переходного процесса и соответственно оценку статической устойчивости рассматриваемой системы.

Упрощенно демпфирование синхронной машины учитывается, введением составляющей момента или мощности, пропорциональной скорости изменения угла δ . Таким образом, дифференциальное уравнение движения ротора в мощностях может быть записано в виде

$$T_j \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_0 - P_M \sin \delta - k_D \frac{d\delta}{dt}. \quad (2.50)$$

Следует отметить, что в данном случае можно считать, что демпфированный коэффициент – это фактически производная активной асинхронной мощности синхронной машины по скольжению, т.е.

$$k_D = dP_{ac}/ds.$$

При малых скольжениях упрощенно демпферный коэффициент определяется в виде

$$k_D = U^2/r_{2\Sigma}.$$

Выполнив линеаризацию уравнения (2.50) получим уравнение малых колебаний с учетом демпферной мощности

$$T_j \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} + k_D \frac{d \Delta \delta}{dt} + c_1 \Delta \delta = 0. \quad (2.51)$$

Тогда характеристическое уравнение малых колебаний примет вид

$$T_j p^2 + k_D p + c_1 = 0. \quad (2.52)$$

Его два корня имеют значения

$$p_{1,2} = \frac{-k_D \pm \sqrt{k_D^2 - 4T_j c_1}}{2T_j} = -\frac{k_D}{2T_j} \pm \sqrt{-\left[\frac{c_1}{T_j} - \left(\frac{k_D}{2T_j}\right)^2\right]} = \alpha_D \pm j\omega_D, \quad (2.53)$$

где $\alpha_D = -k_D/2T_j$ - декремент затухания;

$$\omega_D = \sqrt{\frac{c_1}{T_j} - \left(\frac{k_D}{2T_j}\right)^2} - \text{частота колебаний с учетом демпферной обмотки.}$$

Рассмотрим влияние синхронизирующей мощности c_1 на вид корней и характер процесса в системе при малых отклонениях режима:

I. $c_1 > 0$ - система будет всегда устойчива, поскольку:

- при $\frac{c_1}{T_j} < \left(\frac{k_D}{2T_j}\right)^2$ - оба корня будут действительными отрицательными и процесс будет иметь характер, изображенный на рис. 2.9,а;

- при $\frac{c_1}{T_j} > \left(\frac{k_D}{2T_j}\right)^2$ - оба корня будут комплексными с отрицательными вещественными частями, и характер процесса будет иметь вид затухающих колебаний, как показано на рис. 2.9, б.

II. $c_1 < 0$ - система неустойчива, так как оба корня действительные, причем один корень всегда будет положителен, а другой – отрицателен. Процесс протекания в виде апериодического нарушения устойчивости приведено на рис. 2.9,в.

III. $c_1 = 0$ - критический случай, так как появляется один нулевой корень $p_1 = 0$, а второй

$-p_2 = -k_D/T_j$. В этом случае можно грубо считать, что это граница устойчивости, когда при малом возмущении возможно как нарушение устойчивости, так и ее сохранение (см. рис.2.9,г). Для выяснения действительного поведения

системы необходимо проведение дополнительных исследований с учетом уточняющих факторов или отказа от линеаризации исходных уравнений.

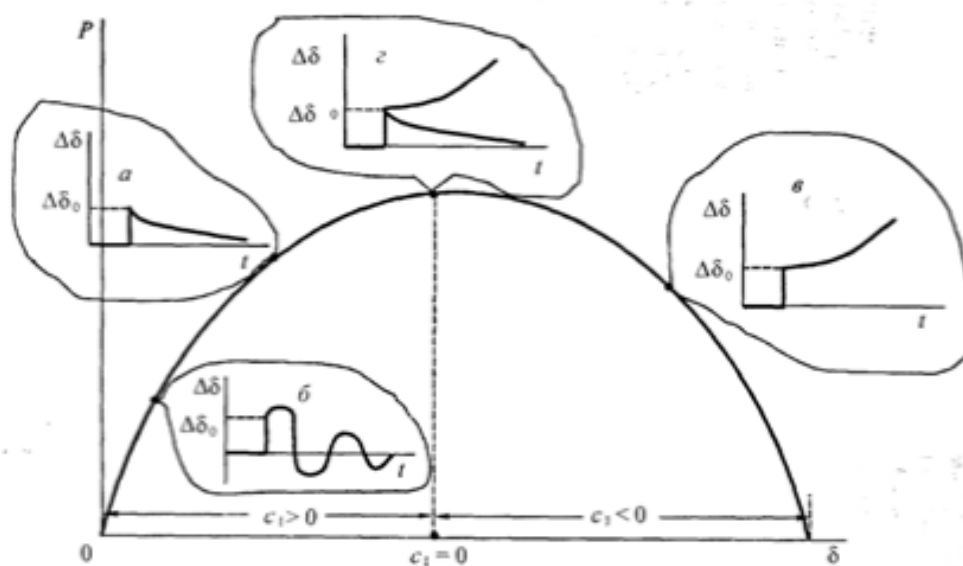


Рис. 2.9. Протекание процесса в системе при учете демпфирования:
 а, б – при $c_1 > 0$; в – при $c_1 < 0$; г – при $c_1 = 0$

Физически положительное воздействие демпфирования, приводящее к затуханию возникших колебаний, объясняется двумя факторами:

1) при скорости выше синхронной и положительном скольжении s демпферная составляющая мощности (P_{ac}) выдается в сеть и добавляется к синхронной P_c ($P = P_c + P_{ac}$). Тем самым уменьшается площадка ускорения и увеличивается площадка торможения;

2) при скорости ротора ниже синхронной и отрицательном скольжении ($-s$) демпферная составляющая мощности потребляется из сети, тем самым уменьшая общую мощность синхронной машины ($P = P_c - P_{ac}$).

Это уменьшают энергию дополнительного торможения и сокращает размах колебаний.

Рассмотрим процесс демпфирования колебаний на примере простейшей системы. Предположим, что из-за возмущения в системе изменилась характеристика синхронной мощности с P_I до P_{II} и режим с точки а перешел в точку б (рис.2.10, а). В этом случае движение будет происходить под действием избыточной мощности ΔP_0 , но точка, характеризующая положение ротора, будет перемещаться не по характеристике P_{II} , представляющей значение синхронной мощности $P_c = (EU/X)\sin\delta$, а по кривой bcd , учитывающей демпферную составляющую мощности ($P_c + k_D s$). Эта кривая будет проходить выше характеристики P_{II} при скорости больше синхронной ($+s$), т.е. при росте угла δ , и ниже – при уменьшении угла ($-s$). Такое изменение движения под действием дополни-

тельной мощности приводит к тому, что площадки ускорения уменьшаются до значения $f_D=abca$, а торможения – до $f_T=cdec$. Это вызывает уменьшение первоначального размаха колебаний от δ_{M2} до δ_{M1} . Изображение движения на фазовой плоскости имеет вид спирали, скручивающейся к точке установившегося режима при δ_1 и P_0 . Изменение угла δ во времени имеет вид затухающих колебаний с переходом к новому установившемуся режиму, характеризуемому углом δ_1 (см. рис. 2.10, б). Таким образом, демпфирование превращает незатухающие колебания в затухающие.

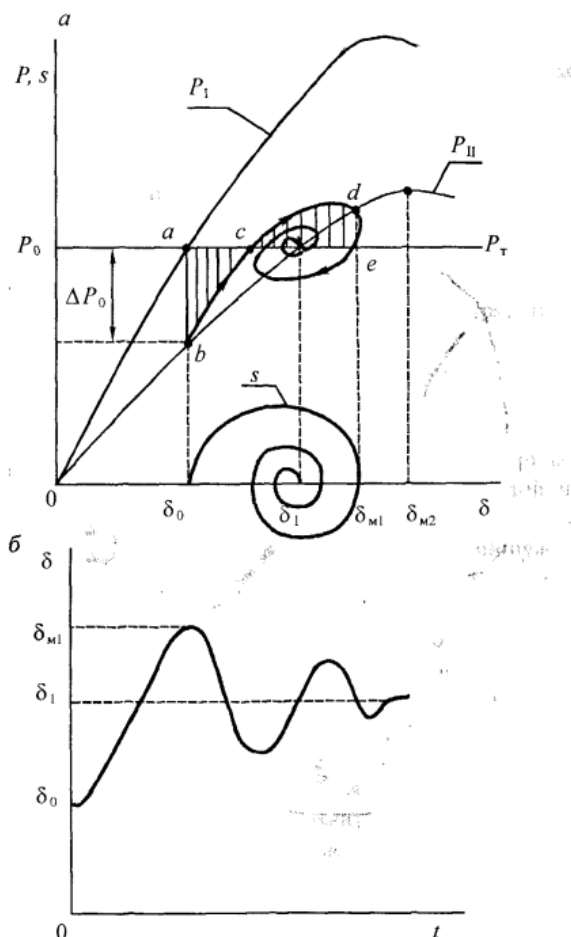


Рис.2.10. Характер процесса демпфирования:
а- на фазовой плоскости; б – во времени

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

$$p_{1,2} = \pm \sqrt{\frac{P_d^2}{4T_j^2} - \frac{P_c}{T_j} - \frac{P_d}{2T_j}}, \quad (2.54)$$

где P_d - демпфирующая мощность;
 P_c - синхронизирующая мощность.
 Синхронизирующая мощность

$$P_c = \frac{E_q U}{x_d + x_c}, \quad (2.55)$$

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

$$\gamma = \sqrt{\frac{P_c}{T_j \omega_0}}, \quad (2.56)$$

$$T = \frac{2\pi}{\gamma}, \quad (2.57)$$

Уравнение движения ротора генератора при $P_c > 0$

$$\Delta\delta = \Delta\delta_0 \cos 2\pi\gamma t. \quad (2.58)$$

Уравнение движения ротора генератора при $P_c < 0$

$$\Delta\delta = \frac{\Delta\delta_0}{2} (e^{p_1 t} + e^{p_2 t}). \quad (2.59)$$

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

$$\delta_0 = \arccos \left(\frac{P_d^2}{4T_j^2} * \frac{x_d + x_c}{E_q U} \right). \quad (2.60)$$

Для периодического процесса уравнение движения ротора

$$\Delta\delta = \frac{\Delta\delta_0}{\gamma} e^{-\beta t} \sqrt{\alpha} \sin(\gamma t + \psi_0), \quad (2.61)$$

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

$$\Delta\delta = \Delta\delta_0 e^{-\beta t}. \quad (2.62)$$

При $P_c < 0$ уравнение движения ротора

$$\Delta\delta = \Delta\delta_0 \frac{P_1 e^{P_2 t} - P_2 e^{P_1 t}}{P_1 - P_2}, \quad (2.63)$$

где $P_{1,2} = -\beta \pm \gamma$.

Пример к задаче 2.10. 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. 2.11 построена зависимость $\Delta\delta = f(t)$ при $t = 0 \dots 2 \text{ с}$.

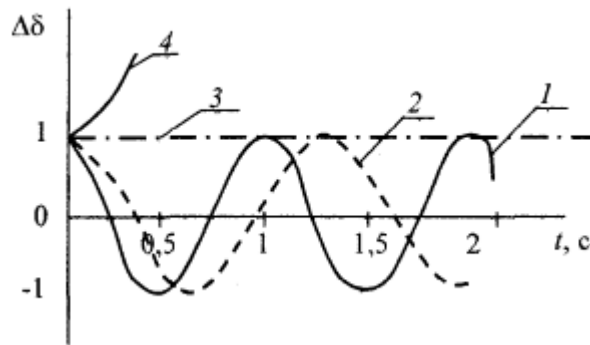


Рис.2.11. Зависимости $\Delta\delta = f(t)$ без учета демпфирования:
1 - $\delta_0 = 0^\circ$; 2 - $\delta_0 = 60^\circ$; 3 - $\delta_0 = 90^\circ$; 4 - $\delta_0 = 100^\circ$

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 $\delta_0 = 100^\circ$

$$P_c = \frac{2.4 \cdot 1}{1.59} \cos 100 = -0,262;$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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 $\delta_0 = 60^\circ$

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

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

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

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

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

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);

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

На рис. 2.12 построены зависимости $\Delta\delta = f(t)$ при учете демпфирования для рассмотренных случаев.

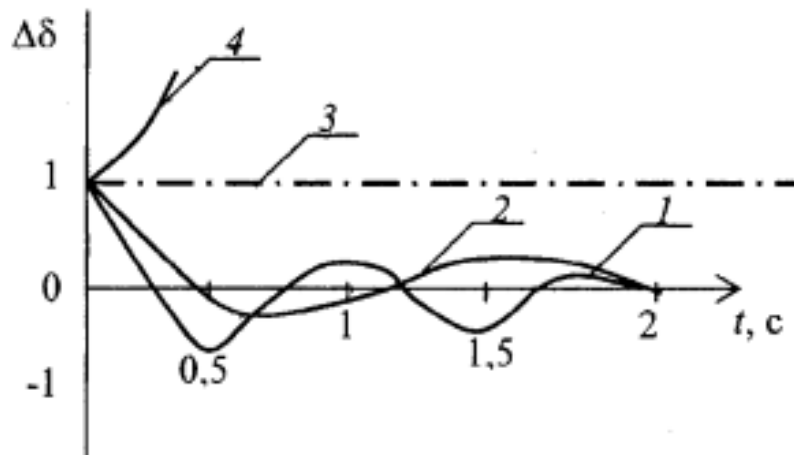


Рис.2.12. Зависимости $\Delta\delta = f(t)$ с учетом демпфирования:

1 - $\delta_0 = 0^\circ$; 2 - $\delta_0 = 60^\circ$; 3 - $\delta_0 = 90^\circ$; 4 - $\delta_0 = 100^\circ$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Калентионок, Е. В. Устойчивость электроэнергетических систем. Сборник задач и примеры их решения. / Е. В. Калентионок, А. В. Волков, Е. В. Мышковец, В. М. Цыганков; под ред. Е. В. Калентионка. – Минск: БНТУ, 2007. – 131 с.
2. Калентионок, Е. В. Устойчивость электроэнергетических систем / Е. В. Калентионок. – Минск: Техноперспектива, 2008. – 375 с.
3. Руководящие указания по устойчивости энергосистем. – РАО «ЕЭС России», 1994. – 9 с.
4. Куликов Ю. А. Переходные процессы в электрических системах / Ю. А. Куликов. - Новосибирск: НГТУ, 2003. - 283 с.
5. Хрущев Ю. В., Заповодников К. И., Юшков А. Ю. Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах: учебное пособие / Ю. В. Хрущев, К. И. Заповодников, А. Ю. Юшков; – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 168 с.
6. Ситников, Н. В. Устойчивость электроэнергетических систем [Электронный ресурс] : учебное пособие / ФГБОУ ВО «Воронеж. гос. техн. ун-т», каф. электромех. систем и электроснабжения. - Воронеж : Воронежский государственный технический университет, 2019. – 100 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
1. Схемы замещения и определения параметров элементов электроэнергетических схем.....	3
2. Статическая устойчивость и характеристики мощности электроэнергетических систем.....	12
Библиографический список.....	37

УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к практическим занятиям
для обучающихся направления 13.04.02
«Электроэнергетика и электротехника»
(профиль магистерской программы «Электроэнергетические системы»)
всех форм обучения

Составители:
Ситников Николай Васильевич
Горемыкин Сергей Александрович

Компьютерный набор Н. В. Ситникова

Издается в авторской редакции

Подписано к изданию 21.01.2022.

Уч.-изд. л. 2,4.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84