



**Министерство образования
Республики Беларусь**

**БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

Кафедра «Электрические системы»

**Калентионок Е.В.
Филипчик Ю.Д.**

**ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
СИСТЕМ НА ЭВМ**

Методическое пособие к курсовой работе

М и н с к 2 0 1 0

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Электрические системы»

Е.В. Калентионюк
Ю.Д. Филипчик

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ЭВМ

Методическое пособие к курсовой работе по дисциплинам
«Устойчивость электроэнергетических систем»,
«Переходные процессы в электроэнергетических системах»
для студентов электроэнергетических специальностей

Под редакцией Е.В. Калентионюка

М и н с к 2 0 1 0

УДК 621.311.0143

ББК 31.27904я73

К17

Р е ц е н з е н т ы:

Т.А. Шиманская-Семенова, А.Л. Старжинский

Калентионок, Е.В.

К 17 Исследование устойчивости электроэнергетических систем на ЭВМ: методическое пособие к курсовой работе по дисциплинам «Устойчивость электроэнергетических систем», «Переходные процессы в электроэнергетических системах» для студентов электроэнергетических специальностей / Е.В. Калентионок, Ю.Д. Филипчик; под ред. Е.В. Калентионка. – Минск: БНТУ, 20010 - 60с.

ISBN 978-985-525-164-5.

Приведены краткие теоретические положения и даны практические рекомендации по расчету устойчивости электроэнергетических систем на ЭВМ. Рассматриваются вопросы статической и динамической устойчивости, а также устойчивости нагрузки при сложной связи генераторов электростанций с приемной системой.

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», а также для инженеров, чья деятельность связана с оценкой и обеспечением устойчивости электроэнергетических систем.

УДК 621.311.0143

ББК 31.27904я73

ISBN 978-985-525-164-5.

© Калентионок Е.В.,

Филипчик Ю.Д., 2010

© БНТУ, 2010

ПРЕДИСЛОВИЕ

Успешная работа энергосистем в значительной степени зависит от их способности обеспечить устойчивое и надежное электроснабжение потребителей. Нарушение устойчивости электроэнергетических систем может привести к обесточиванию большого числа потребителей электроэнергии, повреждению оборудования и остановке электростанций. Поэтому расчеты режимов и устойчивости выполняются всегда:

- при выборе основной схемы энергосистемы и мест размещения электростанций и подстанций;
- формировании требований к основному оборудованию электростанций и сети, релейной защите и автоматике;
- оценке допустимости рабочих режимов энергосистемы;
- выборе мероприятий по повышению устойчивости энергосистемы;
- определении параметров настройки средств противоаварийной автоматики (ПА), систем регулирования и управления, релейной защиты, автоматического поворотного включения (АПВ) и т.д.

Исследования устойчивости электроэнергетических систем выполняются в основном на ЭВМ по специально разработанным программам. Это позволяет повысить точность схемных решений, достичь более высокой надежности и экономичности функционирования энергосистем, приблизить определение областей устойчивости в максимальной степени к действительным. В данном пособии авторы ориентировались на применение студентами учебной программы DIS и промышленной Мустанг-95.

2-й, 3-й, и 4-й разделы пособия содержат краткие теоретические сведения, описание основных решаемых задач и методические рекомендации.

В приложениях приведены описания инструкции рекомендуемых программ. При этом не исключается возможность использования студентом и других вычислительных средств:

MATLAB, Evrostag, Electronics Workbench и т.д. Следует отметить, что методические вопросы исследования устойчивости электроэнергетических систем на ЭВМ рассмотрены настолько подробно, насколько это позволил объем пособия и накопленный практический опыт авторов. Последние выражают искреннюю благодарность доценту Т.А. Шиманской-Семеновой и старшему преподавателю А.Л. Старжинскому за редактирование рукописи, сделанные замечания и данные советы, способствовавшие улучшению издания, а также Е.А. Заборской и Е.Л. Ковенской, которые кропотливо трудились, подготавливая рукопись к изданию.

1. ПОДГОТОВКА СХЕМЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ РАСЧЕТОВ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ И УСТОЙЧИВОСТИ НА ПЭВМ

1.1. Формирование задания

В качестве объекта исследования принимается одна из схем, представленных на рис. 1.1, паспортные данные ее электрооборудования приведены в табл. 1.1–1.8. Варианты задания формируются на основе табл. 1.9. Студенту задается значение параметров i и j (например, для варианта 12 $i=1$ – номер строки, $j=2$ – номер столбца). На пересечении строки и столбца выбирается семизначное число. Первая цифра этого числа указывает на номер варианта в табл. 1.1, вторая в табл. 1.2, и т.д. посредством выбора параметров электрооборудования по таблицам 1.1–1.8 формируется индивидуальный вариант задания.

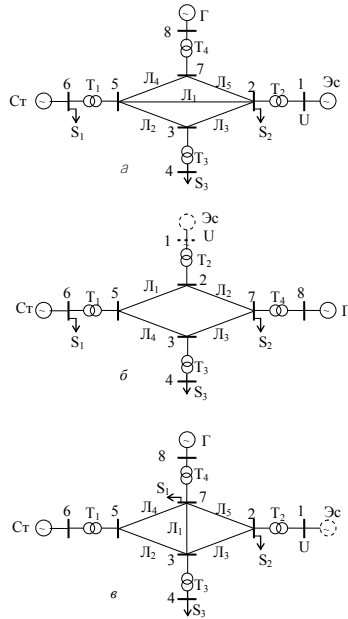
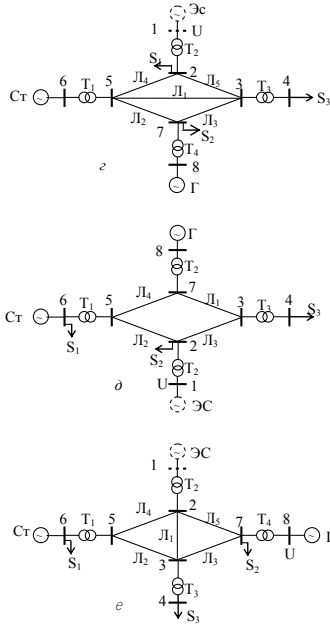


Рисунок 1.1. Принципиальные схемы электроэнергетических систем



Окончание рис. 1.1.

В качестве генератора Г необходимо принять генератор типа ТГВ-300, трансформатора Т4 – ТДЦ-400000/330.

Таблица 1.1

Параметры генераторов станции Ст

Вариант	$P_{нг}$, МВт	$\cos\varphi_n$	$U_{нг}$, кВ	T_n , с	$n_{г}$, шт	$X_{об}$, %	$X'_{об}$, %	X_2 , %
0	100	0,80	10,50	6,5	4	192,0	27,8	23,4
1	160	0,85	18,00	5,0	3	230,0	32,9	26,9
2	200	0,85	15,75	6,8	2	186,2	31,0	24,9
3	300	0,85	20,00	7,0	2	219,5	30,0	23,8
4	500	0,85	20,00	6,3	1	241,3	37,3	29,6
5	200	0,85	15,75	7,0	2	210,6	27,2	22,0
6	500	0,85	20,00	6,9	1	215,8	39,8	32,7
7	220	0,85	15,75	6,4	2	197,0	29,0	24,0
8	320	0,85	20,00	5,9	2	169,8	25,8	21,1
9	500	0,85	20,00	6,6	1	231,0	31,8	27,4

Таблица 1.2

Параметры генераторов приемной энергосистемы ЭС

Вариант	$P_{шт}$, МВт	$\cos\varphi$	U_n , кВ	T_j , с	$X_{дв}$, %
0	6000	0,80	110	8,5	26
1	6500	0,80	110	8,7	27
2	7000	0,85	110	9,0	28
3	7500	0,85	110	9,5	29
4	8000	0,85	110	9,7	31
5	8500	0,85	110	9,3	32
6	9000	0,85	110	8,9	34
7	9500	0,85	110	8,4	30
8	10000	0,90	100	7,9	27
9	10500	0,90	110	7,5	25

Таблица 1.3

Параметры трансформаторов Т1

Вариант	S_n , МВА	$U_{нв}$, кВ	$U_{шт}$, кВ	$n_{т1}$, шт.	ΔP_k , кВт	$\Delta P_{х.х.}$, кВт	U_k , %	$I_{х.х.}$, %
0	250	347	равно номинальному напряжению генераторов	3	605	240	11,0	0,45
1	200	347		4	560	220	11,0	0,45
2	400	347		3	810	365	11,0	0,40
3	630	347		2	1300	405	11,0	0,35
4	250	347		3	610	245	11,0	0,45
5	200	347		4	570	235	11,0	0,45
6	400	347		3	800	335	11,0	0,40
7	630	347		2	1350	415	11,0	0,35
8	250	347		3	615	250	11,0	0,45
9	400	347		3	795	350	11,0	0,40

Таблица 1.4

Параметры трансформаторов Т2

Вариант	S_n , МВА	$U_{нв}$, кВ	$U_{шт}$, кВ	$n_{т2}$, шт.	ΔP_k , кВт	$\Delta P_{х.х.}$, кВт	U_k , %	$I_{х.х.}$, %
0	200	347	115	4	570	235	11,0	0,45
1	400	347	115	3	800	335	11,0	0,40
2	630	347	115	2	1350	415	11,0	0,35
3	250	347	115	3	615	250	11,0	0,45
4	630	347	115	3	1300	405	11,0	0,35
5	250	347	115	4	595	240	11,0	0,45
6	400	347	115	3	810	365	11,0	0,40
7	250	347	115	4	605	240	11,0	0,45
8	630	347	115	2	1250	410	11,0	0,35
9	250	347	115	4	560	220	11,0	0,45

Таблица 1.5

Параметры трансформаторов ТЗ

Вариант	$S_{\text{нз}}$, МВА	$U_{\text{нз}}$, кВ	$U_{\text{шт}}$, кВ	$n_{\text{ТЗ}}$, шт	$\Delta P_{\text{кв}}$, кВт	$\Delta P_{\text{х.х}}$, кВт	$U_{\text{к}}$, %	$I_{\text{х.х}}$, %
0	125	347	10,5	2	350	140	11,0	0,05
1	63	330	10,5	3	265	120	11,0	0,70
2	40	330	10,5	4	175	85	11,0	1,40
3	125	347	10,5	2	360	145	11,0	0,05
4	40	330	10,5	4	170	75	11,0	1,40
5	63	330	10,5	3	250	130	11,0	0,70
6	125	347	10,5	2	355	135	11,0	0,05
7	63	330	10,5	3	270	115	11,0	0,70
8	40	330	10,5	4	180	80	11,0	1,40
9	125	347	10,5	2	365	140	11,0	0,05

Таблица 1.6

Параметры нагрузок

Вариант	Мощность нагрузок $S = P_{\text{нагр}} + jQ_{\text{нагр}}$, МВ*А		
	S_1	S_2	S_3
0	80 + j60	100 + j70	100 + j80
1	90 + j70	95 + j75	105 + j85
2	100 + j80	95 + j85	120 + j60
3	120 + j90	95 + j75	85 + j50
4	140 + j60	85 + j60	90 + j65
5	95 + j75	110 + j85	125 + j65
6	95 + j70	120 + j90	90 + j70
7	135 + j55	90 + j70	125 + j50
8	115 + j95	100 + j85	115 + j75
9	150 + j70	115 + j95	95 + j65

Таблица 1.7

Параметры линий

Вариант	Номер линии	Номер маркипровода	Длина линии, км
1	2	3	4
0	1	1	150
	2	2	90
	3	3	120
	4	4	90
	5	2	120
1	1	4	135
	2	1	110
	3	2	95
	4	3	110
	5	4	95

Окончание таблицы 1.7

1	2	3	4
2	1	3	140
	2	4	80
	3	2	120
	4	1	80
	5	3	120
3	1	1	135
	2	3	105
	3	2	85
	4	4	105
	5	1	85
4	1	2	125
	2	1	115
	3	4	100
	4	2	115
	5	3	100
5	1	2	145
	2	3	95
	3	1	115
	4	4	95
	5	1	115
6	1	4	130
	2	1	125
	3	2	80
	4	3	125
	5	2	80
7	1	2	150
	2	3	80
	3	4	125
	4	1	80
	5	3	125
8	1	3	140
	2	2	100
	3	1	95
	4	4	100
	5	1	95
9	1	4	145
	2	2	100
	3	1	85
	4	3	100
	5	4	85

Таблица 1.8

Параметры проводов воздушных линий

Номер провода	Марка провода	R_0 , Ом/км	X_0 , Ом/км	$G_0 \cdot 10^4$, См/км	$B_0 \cdot 10^6$, См/км
1	2 АС-240/32	0,060	0,331	0,0345	3,38
2	2АС-300/39	0,048	0,328	0,0271	3,41
3	2 АС-400/51	0,038	0,323	0,0202	3,46
4	2 АС-500/64	0,030	0,320	0,0152	3,50

Таблица 1.9

Варианты задания

При i , равном	При j /равном				
	0	1	2	3	4
0	0000000	1020102	1030103	1040104	1050105
1	2949055	1111111	2435415	1824854	7435415
2	7413574	5453412	2222222	2121212	1525345
3	1231234	3456765	2312514	3333333	1122112
4	5432123	2418524	1213453	2312516	4444444
5	5563262	1234551	6234556	5842615	1521324
6	1221354	2244569	2154451	5321231	1234321
7	2212445	2343155	3481718	3355222	3214321
8	5432123	5326236	2244553	2514532	2123454
9	5543212	3432414	2485415	2345442	5347615

При i , равном	При j /равном				
	5	6	7	8	9
0	1060106	1070107	1080108	1090109	1000100
1	1525365	5459402	7514537	3451715	2555420
2	4154321	1333245	1624353	8321231	4321123
3	2162663	2514582	5626543	2123455	8121843
4	2142243	5121543	1324354	4321234	2211221
5	5555555	8863212	3355622	4411552	1234881
6	1234543	6666666	3212345	1212121	3524154
7	5342315	2134213	7777777	4532241	3632616
8	2413354	5432123	1374354	8888888	2555421
9	1231234	4400552	2125542	2413524	9999999

1.2. Последовательность определения параметров электроэнергетической системы

Для определения параметров электроэнергетической системы необходимо сделать следующее.

1. Вычертить принципиальную однолинейную схему электроэнергетической системы в соответствии с заданным количеством генераторов и трансформаторов и номером схемы (см. рис. 1.1, *a–e*). Генераторам трансформаторам и нагрузкам присваиваются номера в виде цифр натурального ряда. К схеме прилагаются расчетные данные ее элементов в виде табл. 1.10–1.13.

2. При подготовке исходных данных для расчета по программе DIS выбираются базисные условия. Принимается единая для всей сети базисная мощность, в которой мощности рекомендуется принимать число, кратное 10. В этом случае упрощается пересчет мощностей в относительные единицы и обратно. Принимаются индивидуальные для сетей каждого номинального напряжения базисные напряжения. В качестве базисного напряжения рекомендуется принять на каждой ступени трансформации номинальные напряжения средних ответвлений трансформаторов: 10,5; 38,5; 115; 230; 330; 500; 750; 1150 кВ.

Вычисляются базисные сопротивления и проводимости на каждом номинальном напряжении сети:

$$Z_{\text{бi}} = \frac{U_{\text{бi}}^2}{S_{\text{б}}}$$

$$Y_{\text{бi}} = \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{бi}}^2}$$

3. По данным таблиц выбранных элементов вычисляются в именованных единицах сопротивления и проводимости гене-

раторов, трансформаторов, линий электропередач. Генераторы в расчетах представляются синхронным сопротивлением (при отсутствии автоматического регулятора возбуждения (АРВ) $X_r = X_d$), переходным сопротивлением – при АРВ пропорционального действия ($X_2 = X'_d$), нулевым сопротивлением – при АРВ сильного действия ($X_r = 0$).

Индуктивные сопротивления генератора в именованных единицах вычисляется по формулам

$$X_d = \frac{X_d \%}{100} \frac{U_{\text{нг}}^2 \cos \varphi_{\text{н}}}{P_{\text{нг}}};$$

$$X'_d = \frac{X'_d \%}{100} \frac{U_{\text{нг}}^2 \cos \varphi_{\text{н}}}{P_{\text{нг}}};$$

$$X_2 = \frac{X_2 \%}{100} \frac{U_{\text{нг}}^2 \cos \varphi_{\text{н}}}{P_{\text{нг}}},$$

где $U_{\text{нг}}$ – номинальное напряжение генератора, кВ;

$P_{\text{нг}}$ – номинальная активная мощность генератора, МВт;

$\cos \varphi_{\text{н}}$ – номинальный коэффициент мощности генератора.

4. Трансформаторы вводятся в расчетную схему Г-образной схемой замещения. В таблицах исходных данных сопротивления обмоток трансформаторов даются приведенными к номинальному напряжению высшей обмотки.

Параметры Г-образной схемы следующие:

$$R_T = \Delta P_K \cdot \frac{U_H^2}{S_H};$$

$$X_T = \frac{U_K}{100} \cdot \frac{U_H^2}{S_H};$$

$$g_T = \frac{\Delta P_{XX}}{U_H^2};$$

$$b_T = \frac{I_{XX}}{100} \cdot \frac{S_H}{U_H^2},$$

где ΔP_K – потери мощности короткого замыкания, кВт;

U_K – напряжение короткого замыкания, %;

$\Delta P_{X.X}$ – потери мощности холостого хода, кВт;

$I_{X.X}$ – ток холостого хода, %.

Линия электропередачи представляется П-образной схемой замещения. Сопротивления и проводимости линии вычисляются по их удельным параметрам по формулам

$$Z_L = R_L + jX_L;$$

$$Y_L = g_L + jb_L;$$

$$R_L = R_{0L} L;$$

$$X_L = X_{0L} L;$$

$$g_L = g_{0L} L;$$

$$b_L = b_{0L} L,$$

где R_{0L} , X_{0L} – активное и индуктивное сопротивления линии, Ом/км;

g_{0L} , b_{0L} – активная (потери на корону) и емкостная (зарядная мощность) проводимости линии, См/км;

L – длина линии, км.

5. Для программы DIS все параметры расчетной схемы: напряжения, мощности, сопротивления и проводимости – переводятся в относительные единицы по формулам:

$$U_i^* = \frac{U_i}{U_{6i}} ;$$

$$S_i^* = \frac{S_i}{S_6} ;$$

$$Z_i^* = \frac{Z_i}{Z_{6i}} ;$$

$$Y_i^* = \frac{Y_i}{Y_{6i}} .$$

Необходимо отметить, что для силовых трансформаторов выбранное базисное напряжение может не соответствовать номинальному напряжению высшей обмотки. Параметры расчетной схемы замещения трансформаторов в этом случае в относительные единицы переводится по формулам

$$Z_{Ti}^* = \frac{Z_{Ti}}{Z_{6i}} \cdot \left(\frac{U_6}{U_{НВ}} \right)^2 ;$$

$$Y_{Ti}^* = \frac{Y_{Ti}}{Y_{6i}} \cdot \left(\frac{U_6}{U_{НВ}} \right)^2 .$$

6. Постоянная механической инерции генератора (станции, системы) в программе Мустанг-95 определяется по выражению

$$T_j = (T_j [c] \cdot P_{нг} [МВт])$$

При расчете по программе DIS постоянная механической инерции генератора приводится к базовым условиям по выражению

$$T_j^* = \frac{T_j[\text{с}] \cdot P_{\text{нг}}[\text{МВт}]}{S_0[\text{МВ} \cdot \text{А}]}$$

7. По заданному числу генераторов n_T или трансформаторов n_{Tj} определяются эквивалентные сопротивления и проводимости.

Контрольный пример

Рассмотрим методику подготовки информации электроэнергетической системы для расчетов ее режимов работы на ЭВМ по программам DIS, Мустанг-95 на конкретном примере по варианту задания 00 ($i = 0, j = 0$), и принципиальной схеме электроэнергетической системы – (см. рис. 1.1, а).

В соответствии с этим вариантов задания сформируем исходные данные для энергосистемы в виде табл. 1.10–1.13, принципиальной и расчетной схемы с нанесенными на нее параметрами (рис. 1.2).

Таблица 1.10

Параметры генераторов станции Ст,
приемной системы ЭС, генератора Г

Наименование показателя	Обозначение	Единицы измерения	Величина показателя		
			Ст	ЭС	Г
Номинальная мощность	$P_{\text{нг}}$	МВт	100	6000	300
Номинальный коэффициент мощности	$\cos\varphi_n$	---	0,8	0,8	0,85
Номинальное напряжение	$U_{\text{нг}}$	кВ	10,5	110	20
Постоянная инерции	T_j	с	6,5	8,5	7
Синхронное сопротивление	X_d	%	192	-	-
Переходное сопротивление	X'_d	%	27,8	26	30
Сопротивление обратной последовательности	X_2	%	23,4	-	23,8
Количество	n_T	шт.	4	-	1

Таблица 1.11

Параметры трансформаторов

Наименование показателя	Обозначение	Единицы измерения	Величина показателя			
			T1	T2	T3	T4
Номинальная мощность	S_n	МВА	250	200	125	400
Номинальное напряжение высшее низшее	$U_{нв}$	кВ	347 10,5	347 115	347 10,5	347 20
Потери мощности к.з	ΔP_k	кВт	605	570	350	810
Напряжение к.з	U_k	%	11	11	11	11
Потери мощности х.х	$\Delta P_{х.х}$	кВт	240	235	140	365
Ток х.х	$I_{х.х}$	%	0,45	0,45	0,5	0,4
Количество	n_{Tj}	шт.	3	4	2	1

Таблица 1.12

Величины нагрузок

Наименование показателя	Обозначение	Единицы измерения	Величина показателя			
			S1	S2	S3	
Нагрузка	$P_{нагр}$	активная	МВт	80	100	100
	$Q_{нагр}$	реактивная	Мвар	60	70	80

Таблица 1.13

Параметры линий электропередач

Наименование показателя	Единицы измерения	Обозначение	Величина показателя				
			Л1	Л2	Л3	Л4	Л5
Марка провода	---	---	2 АС – 240/32	2 АС – 300/39	2 АС – 400/51	2 АС – 500/64	2 АС – 300/39
Длина	км	L	150	90	120	90	120
Активное сопротивление	Ом/км	R_0	0,060	0,048	0,038	0,030	0,048
Реактивное сопротивление	Ом/км	X_0	0,331	0,328	0,323	0,320	0,328
Активная проводимость	10^{-6} См/км	g_0	0,0345	0,0271	0,0202	0,0152	0,0271
Реактивная проводимость	10^{-6} См/км	b_0	3,38	3,41	3,46	3,50	3,41

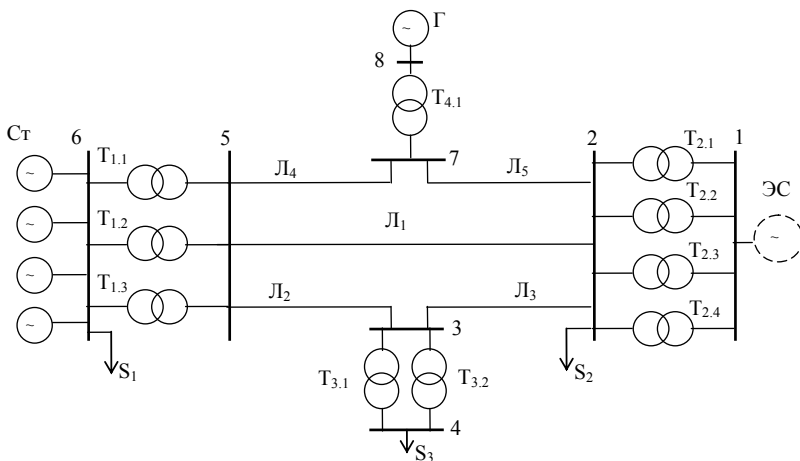


Рисунок 1.2 – Принципиальную схему исследуемой электроэнергетической системы

1. Вычерчиваем заданную принципиальную схему исследуемой электроэнергетической системы. Далее вычерчиваем схему замещения исследуемой электроэнергетической системы с учетом эквивалентизируемых ветвей. Вычисляем параметры элементов схемы замещения электроэнергетической системы в именованных единицах.

а) генератор Ст:

$$x_{dCr} = \frac{x_d \cdot U_{HG}^2 \cdot \cos\varphi_H}{100 \cdot P_{HG} \cdot n_{\Gamma}} = \frac{192 \cdot 10,5^2 \cdot 0,8}{100 \cdot 100 \cdot 4} = 0,42 (\text{Ом});$$

$$x'_{dCr} = \frac{x'_d \cdot U_{HG}^2 \cdot \cos\varphi_H}{100 \cdot P_{HG} \cdot n_{\Gamma}} = \frac{27,8 \cdot 10,5^2 \cdot 0,8}{100 \cdot 100 \cdot 4} = 0,061 (\text{Ом});$$

$$x_{2Cr} = \frac{x_2 \cdot U_{HG}^2 \cdot \cos\varphi_H}{100 \cdot P_{HG} \cdot n_{\Gamma}} = \frac{23,4 \cdot 10,5^2 \cdot 0,8}{100 \cdot 100 \cdot 4} = 0,051 (\text{Ом});$$

б) генераторы ЭС:

$$x'_{дЭС} = \frac{x'_{дЭС} \cdot U_{\text{НГ}}^2 \cdot \cos\varphi_{\text{H}}}{100 \cdot P_{\text{НГ}}} = \frac{26 \cdot 110^2 \cdot 0,8}{100 \cdot 6000} = 0,419 (\text{Ом});$$

в) генератор Г

$$x'_{дГ} = \frac{x'_d \cdot U_{\text{НГ}}^2 \cdot \cos\varphi_{\text{H}}}{100 \cdot P_{\text{НГ}} \cdot n_{\Gamma}} = \frac{30 \cdot 20^2 \cdot 0,85}{100 \cdot 300 \cdot 1} = 0,34 (\text{Ом});$$

$$x_{2Г} = \frac{x_2 \cdot U_{\text{НГ}}^2 \cdot \cos\varphi_{\text{H}}}{100 \cdot P_{\text{НГ}} \cdot n_{\Gamma}} = \frac{23,8 \cdot 20^2 \cdot 0,85}{100 \cdot 300 \cdot 1} = 0,27 (\text{Ом});$$

г) трансформаторы Т1:

$$R_{\text{T1}} = \frac{\Delta P_{\text{КТ1}}}{n_{\text{T1}}} \cdot \left(\frac{U_{\text{НТ1}}}{S_{\text{НТ1}}} \right)^2 = \frac{605 \cdot 10^{-3}}{3} \cdot \left(\frac{347}{250} \right)^2 = 0,388 (\text{Ом});$$

$$X_{\text{T1}} = \frac{U_{\text{КТ1}} \cdot U_{\text{НТ1}}^2}{100 \cdot S_{\text{НТ1}} \cdot n_{\text{T1}}} = \frac{11 \cdot 347^2}{100 \cdot 250 \cdot 3} = 13,245 (\text{Ом});$$

$$g_{\text{T1}} = \frac{\Delta P_{\text{ХХТ1}} \cdot n_{\text{T1}}}{U_{\text{НТ1}}^2} = \frac{240 \cdot 10^{-3} \cdot 3}{347^2} = 5,979 \cdot 10^{-6} (\text{См});$$

$$b_{\text{T1}} = \frac{I_{\text{ХХТ1}} \cdot S_{\text{НТ1}} \cdot n_{\text{T1}}}{100 \cdot U_{\text{НТ1}}^2} = \frac{0,45 \cdot 250 \cdot 3}{100 \cdot 347^2} = 28,029 \cdot 10^{-6} (\text{См});$$

д) трансформаторы Т2:

$$R_{\text{T2}} = \frac{\Delta P_{\text{КТ2}}}{n_{\text{T2}}} \cdot \left(\frac{U_{\text{НТ2}}}{S_{\text{НТ2}}} \right)^2 = \frac{570 \cdot 10^{-3}}{4} \cdot \left(\frac{347}{200} \right)^2 = 0,429 (\text{Ом});$$

$$X_{T2} = \frac{U_{KT2} \cdot U_{HT2}^2}{100 \cdot S_{HT2} \cdot n_{T2}} = \frac{11 \cdot 347^2}{100 \cdot 200 \cdot 4} = 16,556 (\text{Ом});$$

$$g_{T2} = \frac{\Delta P_{XXT2} \cdot n_{T2}}{U_{HT2}^2} = \frac{235 \cdot 10^{-3} \cdot 4}{347^2} = 7,808 \cdot 10^{-6} (\text{См});$$

$$b_{T2} = \frac{I_{XXT2} \cdot S_{HT12} \cdot n_{T2}}{100 \cdot U_{HT2}^2} = \frac{0,45 \cdot 200 \cdot 4}{100 \cdot 347^2} = 29,9 \cdot 10^{-6} (\text{См});$$

е) трансформаторы Т3:

$$R_{T3} = \frac{\Delta P_{KT3}}{n_{T3}} \cdot \left(\frac{U_{HT3}}{S_{HT3}} \right)^2 = \frac{350 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot \left(\frac{347}{125} \right)^2 = 2,697 (\text{Ом});$$

$$X_{T3} = \frac{U_{KT3} \cdot U_{HT3}^2}{100 \cdot S_{HT3} \cdot n_{T3}} = \frac{11 \cdot 347^2}{100 \cdot 125 \cdot 2} = 52,98 (\text{Ом});$$

$$g_{T3} = \frac{\Delta P_{XXT3} \cdot n_{T3}}{U_{HT3}^2} = \frac{140 \cdot 10^{-3} \cdot 2}{347^2} = 2,326 \cdot 10^{-6} (\text{См});$$

$$b_{T3} = \frac{I_{XXT3} \cdot S_{HT3} \cdot n_{T3}}{100 \cdot U_{HT3}^2} = \frac{0,5 \cdot 125 \cdot 2}{100 \cdot 347^2} = 10,382 \cdot 10^{-6} (\text{См});$$

ж) трансформаторы Т4:

$$R_{T4} = \frac{\Delta P_{KT4}}{n_{T4}} \cdot \left(\frac{U_{HT4}}{S_{HT4}} \right)^2 = \frac{810 \cdot 10^{-3}}{1} \cdot \left(\frac{347}{400} \right)^2 = 0,609 (\text{Ом});$$

$$X_{T4} = \frac{U_{KT4} \cdot U_{HT4}^2}{100 \cdot S_{HT4} \cdot n_{T4}} = \frac{11 \cdot 347^2}{100 \cdot 400 \cdot 1} = 33,112 (\text{Ом});$$

$$g_{T4} = \frac{\Delta P_{XXT4} \cdot n_{T3}}{U_{HT4}^2} = \frac{365 \cdot 10^{-3} \cdot 1}{347^2} = 3,03 \cdot 10^{-6} \text{ (См)};$$

$$b_{T4} = \frac{I_{XXT4} \cdot S_{HT4} \cdot n_{T4}}{100 \cdot U_{HT4}^2} = \frac{0,4 \cdot 400 \cdot 1}{100 \cdot 347^2} = 13,288 \cdot 10^{-6} \text{ (См)};$$

з) линия электропередачи Л1:

$$R_{Л1} = R_{0Л1} \cdot L_{Л1} = 0,06 \cdot 150 = 9 \text{ (Ом)};$$

$$X_{Л1} = X_{0Л1} \cdot L_{Л1} = 0,331 \cdot 150 = 51,967 \text{ (Ом)};$$

$$g_{Л1} = g_{0Л1} \cdot L_{Л1} = 0,0345 \cdot 10^{-6} \cdot 150 = 5,175 \cdot 10^{-6} \text{ (См)};$$

$$b_{Л1} = b_{0Л1} \cdot L_{Л1} = 3,38 \cdot 10^{-6} \cdot 150 = 507 \cdot 10^{-6} \text{ (См)};$$

и) линия электропередачи Л2:

$$R_{Л2} = R_{0Л2} \cdot L_{Л2} = 0,048 \cdot 90 = 4,32 \text{ (Ом)};$$

$$X_{Л2} = X_{0Л2} \cdot L_{Л2} = 0,328 \cdot 90 = 29,52 \text{ (Ом)};$$

$$g_{Л2} = g_{0Л2} \cdot L_{Л2} = 0,0271 \cdot 10^{-6} \cdot 90 = 2,439 \cdot 10^{-6} \text{ (См)};$$

$$b_{Л2} = b_{0Л2} \cdot L_{Л2} = 3,41 \cdot 10^{-6} \cdot 90 = 306,9 \cdot 10^{-6} \text{ (См)};$$

к) линия электропередачи Л3:

$$R_{Л3} = R_{0Л3} \cdot L_{Л3} = 0,038 \cdot 120 = 4,56 \text{ (Ом)};$$

$$X_{Л3} = X_{0Л3} \cdot L_{Л3} = 0,323 \cdot 120 = 38,76 \text{ (Ом)};$$

$$g_{Л3} = g_{0Л3} \cdot L_{Л3} = 0,0202 \cdot 10^{-6} \cdot 120 = 2,424 \cdot 10^{-6} \text{ (См)};$$

$$b_{Л3} = b_{0Л3} \cdot L_{Л3} = 3,46 \cdot 10^{-6} \cdot 120 = 415,2 \cdot 10^{-6} \text{ (См)};$$

л) линия электропередачи Л4:

$$R_{Л4} = R_{0Л4} \cdot L_{Л4} = 0,03 \cdot 90 = 2,7 \text{ (Ом)};$$

$$X_{Л4} = X_{0Л4} \cdot L_{Л4} = 0,32 \cdot 90 = 28,8 \text{ (Ом)};$$

$$g_{Л4} = g_{0Л4} \cdot L_{Л4} = 0,0152 \cdot 10^{-6} \cdot 90 = 1,368 \cdot 10^{-6} \text{ (См)};$$

$$b_{Л4} = b_{0Л4} \cdot L_{Л4} = 3,5 \cdot 10^{-6} \cdot 90 = 315 \cdot 10^{-6} \text{ (См)};$$

м) линия электропередачи Л5:

$$R_{Л5} = R_{0Л5} \cdot L_{Л5} = 0,048 \cdot 120 = 5,76 \text{ (Ом)};$$

$$X_{Л5} = X_{0Л5} \cdot L_{Л5} = 0,328 \cdot 120 = 39,36 \text{ (Ом)};$$

$$g_{Л5} = g_{0Л5} \cdot L_{Л5} = 0,0271 \cdot 10^{-6} \cdot 120 = 3,252 \cdot 10^{-6} \text{ (См)};$$

$$b_{Л5} = b_{0Л5} \cdot L_{Л5} = 3,41 \cdot 10^{-6} \cdot 120 = 409,2 \cdot 10^{-6} \text{ (См)};$$

н) исходная активная нагрузка:
станции Ст

$$P_{0Ст} = (P_{нГ} \cdot n_{Г}) = (100 \cdot 4) = 400 \text{ (МВт)};$$

генератора Г:

$$P_{0Г} = (P_{нГ} \cdot n_{Г}) = (300 \cdot 1) = 300 \text{ (МВт)};$$

о) постоянная механической инерции:
станции Ст

$$T_{j_{\text{Ст}}} = (T_j \cdot P_{\text{нг}} \cdot n_{\Gamma}) = (6,5 \cdot 100 \cdot 4) = 2600(\text{МВт} \cdot \text{с});$$

генератора Г

$$T_{j_{\Gamma}} = (T_j \cdot P_{\text{нг}} \cdot n_{\Gamma}) = (7 \cdot 300 \cdot 1) = 2100(\text{МВт} \cdot \text{с}).$$

2. Для выполнения расчетов по программе DIS необходимо рассчитанные значения параметров схемы замещения в именованных единицах привести к базисным условиям и выразить в относительных единицах. В качестве базисных параметров примем напряжение и мощность. Базисное напряжение на каждом номинальном напряжении примем свое: для генераторов станций Ст $U_{\text{б}} = 10,5$ кВ, а для линий Л1 - Л5 и для трансформаторов $U_{\text{б}} = 330$ кВ, для приемной системы $U_{\text{б}} = 110$ кВ. За базисную мощность примем величину $S_{\text{б}} = 100$ МВА.

При этих условиях базисные сопротивления будут равны:

При напряжении 10,5 кВ:

$$Z_{\text{б}} = \frac{10,5^2}{100} = 1,1025(\text{Ом}).$$

При напряжении 20 кВ:

$$Z_{\text{б}} = \frac{20^2}{100} = 4(\text{Ом}).$$

При напряжении 110 кВ:

$$Z_{\text{б}} = \frac{110^2}{100} = 121(\text{Ом}).$$

При напряжении 330 кВ:

$$Z_6 = \frac{330^2}{100} = 1089 \text{ (Ом)}.$$

Приведем сопротивления и проводимости системы к базисным условиям.

а) генератор СТ, ЭС и Г:

$$X_{dCT}^* = \frac{X_{dCT}}{Z_6} = \frac{0,42}{1,1025} = 0,38;$$

$$X_{dCT}'^* = \frac{X_{dCT}'}{Z_6} = \frac{0,061}{1,1025} = 0,055;$$

$$X_{2CT}^* = \frac{X_{2CT}}{Z_6} = \frac{0,051}{1,1025} = 0,046;$$

$$X_{dЭС}'^* = \frac{X_{dЭС}'}{Z_6} = \frac{0,419}{121} = 0,0035;$$

$$X_{dГ}'^* = \frac{X_{dГ}'}{Z_6} = \frac{0,34}{4} = 0,085;$$

$$X_{2Г}^* = \frac{X_{2Г}}{Z_6} = \frac{0,27}{4} = 0,068;$$

б) трансформатор Т1:

$$R_{Т1}^* = \frac{R_{Т1}}{Z_6} \cdot \left(\frac{U_6}{U_H} \right)^2 = \frac{0,388}{1089} \cdot \left(\frac{330}{347} \right)^2 = 0,0003;$$

$$X_{T1}^* = \frac{X_{T1}}{Z_6} \cdot \left(\frac{U_6}{U_{HB}} \right)^2 = \frac{13,245}{1089} \cdot \left(\frac{330}{347} \right)^2 = 0,011;$$

$$g_{T1}^* = g_{T1} \cdot Z_6 \cdot \left(\frac{U_6}{U_{HB}} \right)^2 = 5,979 \cdot 10^{-6} \cdot 1089 \cdot \left(\frac{330}{347} \right)^2 = 0,0058;$$

$$b_{T1}^* = b_{T1} \cdot Z_6 \cdot \left(\frac{U_6}{U_{HB}} \right)^2 = 28,029 \cdot 10^{-6} \cdot 1089 \cdot \left(\frac{330}{347} \right)^2 = 0,0276;$$

в) трансформатор Т2:

$$R_{T2}^* = \frac{R_{T2}}{Z_6} \cdot \left(\frac{U_6}{U_{HB}} \right)^2 = \frac{0,429}{1089} \cdot \left(\frac{330}{347} \right)^2 = 0,0003;$$

$$X_{T2}^* = \frac{X_{T2}}{Z_6} \cdot \left(\frac{U_6}{U_{HB}} \right)^2 = \frac{16,556}{1089} \cdot \left(\frac{330}{347} \right)^2 = 0,0137;$$

$$g_{T2}^* = g_{T2} \cdot Z_6 \cdot \left(\frac{U_6}{U_{HB}} \right)^2 = 7,808 \cdot 10^{-6} \cdot 1089 \cdot \left(\frac{330}{347} \right)^2 = 0,0077;$$

$$b_{T2}^* = b_{T2} \cdot Z_6 \cdot \left(\frac{U_6}{U_{HB}} \right)^2 = 29,9 \cdot 10^{-6} \cdot 1089 \cdot \left(\frac{330}{347} \right)^2 = 0,0294;$$

г) трансформатор Т3:

$$R_{T3}^* = \frac{R_{T3}}{Z_6} \cdot \left(\frac{U_6}{U_{HB}} \right)^2 = \frac{1,348}{1089} \cdot \left(\frac{330}{347} \right)^2 = 0,0011;$$

$$X_{T3}^* = \frac{X_{T3}}{Z_6} \cdot \left(\frac{U_6}{U_{HB}} \right)^2 = \frac{52,98}{1089} \cdot \left(\frac{330}{347} \right)^2 = 0,044;$$

$$g_{T3}^* = g_{T3} \cdot Z_6 \cdot \left(\frac{U_6}{U_{HB}} \right)^2 = 2,326 \cdot 10^{-6} \cdot 1089 \cdot \left(\frac{330}{347} \right)^2 = 0,0022;$$

$$b_{T3}^* = b_{T3} \cdot Z_6 \cdot \left(\frac{U_6}{U_{HB}} \right)^2 = 10,328 \cdot 10^{-6} \cdot 1089 \cdot \left(\frac{330}{347} \right)^2 = 0,0102;$$

д) трансформатор Т4:

$$R_{T4}^* = \frac{R_{T4}}{Z_6} \cdot \left(\frac{U_6}{U_{HB}} \right)^2 = \frac{0,609}{1089} \cdot \left(\frac{330}{347} \right)^2 = 0,0005;$$

$$X_{T4}^* = \frac{X_{T4}}{Z_6} \cdot \left(\frac{U_6}{U_{HB}} \right)^2 = \frac{33,112}{1089} \cdot \left(\frac{330}{347} \right)^2 = 0,0275;$$

$$g_{T4}^* = g_{T4} \cdot Z_6 \cdot \left(\frac{U_6}{U_{HB}} \right)^2 = 3,03 \cdot 10^{-6} \cdot 1089 \cdot \left(\frac{330}{347} \right)^2 = 0,0033;$$

$$b_{T4}^* = b_{T4} \cdot Z_6 \cdot \left(\frac{U_6}{U_{HB}} \right)^2 = 13,288 \cdot 10^{-6} \cdot 1089 \cdot \left(\frac{330}{347} \right)^2 = 0,0131;$$

е) линия электропередачи Л1:

$$R_{Л1}^* = \frac{R_{Л1}}{Z_6} = \frac{9}{1089} = 0,0083;$$

$$X_{Л1}^* = \frac{X_{Л1}}{Z_6} = \frac{51,967}{1089} = 0,0477;$$

$$g_{Л1}^* = g_{Л1} \cdot Z_6 = 5,175 \cdot 10^{-6} \cdot 1089 = 0,0056;$$

$$b_{Л1}^* = b_{Л1} \cdot Z_6 = 507 \cdot 10^{-6} \cdot 1089 = 0,5521;$$

ж) линия электропередачи Л2:

$$R_{Л2}^* = \frac{R_{Л2}}{Z_6} = \frac{4,32}{1089} = 0,0039;$$

$$X_{Л2}^* = \frac{X_{Л2}}{Z_6} = \frac{29,52}{1089} = 0,0271;$$

$$g_{Л2}^* = g_{Л2} \cdot Z_6 = 2,439 \cdot 10^{-6} \cdot 1089 = 0,0027;$$

$$b_{Л2}^* = b_{Л2} \cdot Z_6 = 306,9 \cdot 10^{-6} \cdot 1089 = 0,3342;$$

з) линия электропередачи Л3:

$$R_{Л3}^* = \frac{R_{Л3}}{Z_6} = \frac{4,56}{1089} = 0,0042;$$

$$X_{Л3}^* = \frac{X_{Л3}}{Z_6} = \frac{38,76}{1089} = 0,0356;$$

$$g_{Л3}^* = g_{Л3} \cdot Z_6 = 2,424 \cdot 10^{-6} \cdot 1089 = 0,0026;$$

$$b_{Л3}^* = b_{Л3} \cdot Z_6 = 415,2 \cdot 10^{-6} \cdot 1089 = 0,4522;$$

и) линия электропередачи Л4:

$$R_{Л4}^* = \frac{R_{Л4}}{Z_6} = \frac{2,7}{1089} = 0,0025;$$

$$X_{Л4}^* = \frac{X_{Л4}}{Z_6} = \frac{28,8}{1089} = 0,0264;$$

$$g_{Л4}^* = g_{Л4} \cdot Z_6 = 1,368 \cdot 10^{-6} \cdot 1089 = 0,0015;$$

$$b_{Л4}^* = b_{Л4} \cdot Z_6 = 315 \cdot 10^{-6} \cdot 1089 = 0,3431;$$

к) линия электропередачи Л5:

$$R_{Л5}^* = \frac{R_{Л5}}{Z_6} = \frac{5,76}{1089} = 0,0053;$$

$$X_{Л5}^* = \frac{X_{Л5}}{Z_6} = \frac{39,36}{1089} = 0,0361;$$

$$g_{Л5}^* = g_{Л5} \cdot Z_6 = 3,252 \cdot 10^{-6} \cdot 1089 = 0,0035;$$

$$b_{Л5}^* = b_{Л5} \cdot Z_6 = 409,2 \cdot 10^{-6} \cdot 1089 = 0,4456;$$

л) исходная активная нагрузка:
станции Ст

$$P_{0Ст}^* = \frac{P_{0Ст}}{S_6} = \frac{400}{100} = 4;$$

генератора Г:

$$P_{0Г}^* = \frac{P_{0Г}}{S_6} = \frac{300}{100} = 3;$$

м) постоянная механической инерции генератора:
станции Ст:

$$T_{jСт} = \frac{T_j \cdot P_{НГ}}{S_6} = \frac{6,5 \cdot 400}{100} = 26(\text{с});$$

генератора Г:

$$T_{jГ} = \frac{T_j \cdot P_{НГ}}{S_6} = \frac{7 \cdot 300}{100} = 21(\text{с}).$$

энергосистемы ЭС:

$$T_{jЭС} = \frac{T_j \cdot P_{НГ}}{S_6} = \frac{8,5 \cdot 6000}{100} = 510(\text{с});$$

н) нагрузки в узлах приведем к базисным значениям по выражению (1.17):

$$P_{НАГР1}^* = \frac{P_{НАГР1}}{S_6} = \frac{80}{100} = 0,8;$$

$$Q_{НАГР1}^* = \frac{Q_{НАГР1}}{S_6} = \frac{60}{100} = 0,6;$$

$$P_{НАГР2}^* = \frac{P_{НАГР2}}{S_6} = \frac{100}{100} = 1;$$

$$Q_{\text{НАГР2}}^* = \frac{Q_{\text{НАГР2}}}{S_6} = \frac{70}{100} = 0,7;$$

$$P_{\text{НАГР3}}^* = \frac{P_{\text{НАГР3}}}{S_6} = \frac{100}{100} = 1;$$

$$Q_{\text{НАГР3}}^* = \frac{Q_{\text{НАГР3}}}{S_6} = \frac{80}{100} = 0,8.$$

Рассчитанные значения в именованных (при расчете оп программе Мустанг-95) или относительных (при расчете по программе DIS) заносим в программу расчета (рис. 1.3).

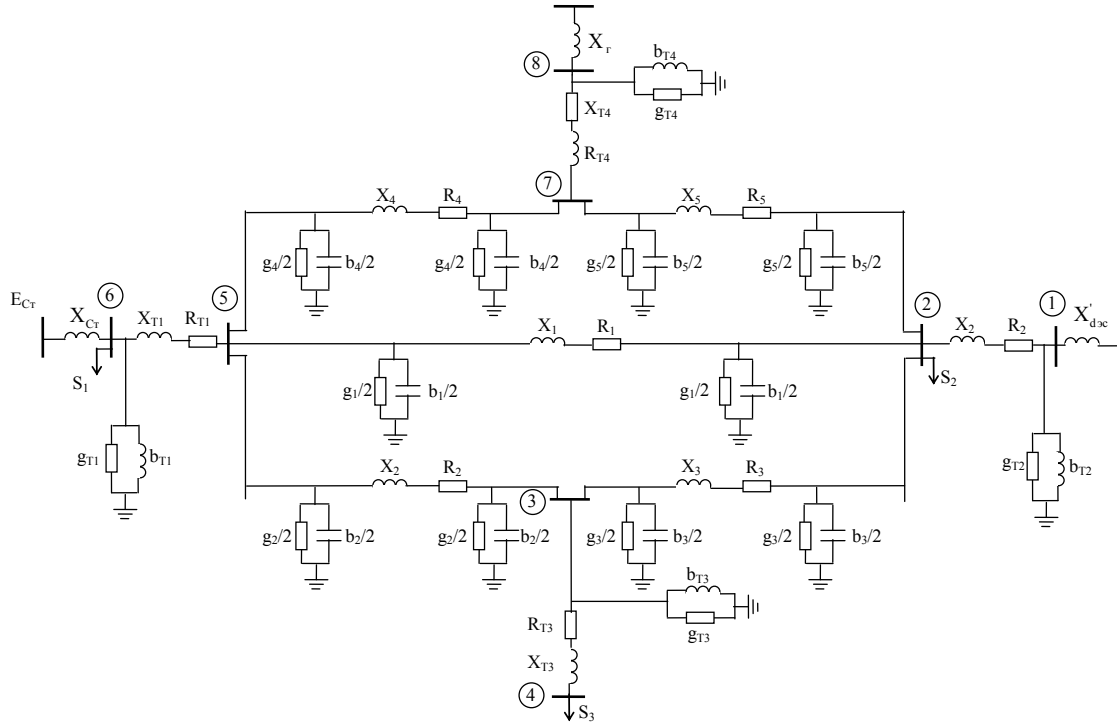


Рис. 1.3. Комплексная схема замещения энергосистемы

2. ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

2.1. Краткие теоретические сведения

Под статической устойчивостью электроэнергетической системы понимается ее способность самостоятельно восстанавливать исходный установившийся режим при малых возмущениях или режим весьма близкий к исходному, если возмущение не снято. Определение предельного по статической устойчивости режима энергосистемы может осуществляться:

- 1) с использованием методов анализа характеристического уравнения, описывающего рассматриваемую систему;
- 2) по практическим критериям устойчивости;
- 3) по сходимости итерационного процесса расчета режима работы энергосистемы.

При этом часто предполагается, что устройства автоматического регулирования обеспечивают отсутствие самораскачивания и самовозбуждения в электроэнергетической системе. Тогда исследование статической устойчивости сводится к анализу апериодической устойчивости указанными выше методами.

Определение коэффициентов характеристического уравнения сложной системы является весьма сложным и трудоемким процессом [1–3]. При этом исследования статической устойчивости усложняют громоздкие математические выражения, которыми приходится оперировать и которые не могут раскрыть физическую сущность происходящих процессов. Поэтому многие задачи, преследующие практические и учебные цели, могут быть решены с использованием практического критерия статической устойчивости:

$$\frac{dP_i}{d\delta_{ij}} > 0$$

где P_i – активная мощность исследуемой i -й станции (генератора);

δ_{ij} – угол сдвига векторов ЭДС i -й и j -й станции (генератора).

Известно, что мощность i -й станции (генератора) можно записать в виде

$$P_i = E_i^2 y_i \sin \alpha_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_i E_j y_{ij} \sin(\delta_{ij} - \alpha_{ij})$$

где E_i, E_j – ЭДС i -й и j -й станций;

y_{ii} – собственная проводимость i -й станции;

y_{ij} – взаимная проводимость i -й станции относительно j -й станции;

α_{ii}, α_{ij} – углы собственной и взаимной проводимостей i -й станции;

n – количество станций рассматриваемой системы.

На рис. 2.1 представлена характеристика активной мощности электростанции, работающей в сложной системе. Из этого рисунка и уравнения (2.1) видно, что при угле $\alpha_{ij} = 0$ мощность станции, как правило, не равна нулю. Максимум характеристики P_M достигается при углах δ_M , больших или меньших 90° , в зависимости от знаков углов α_{ij} .

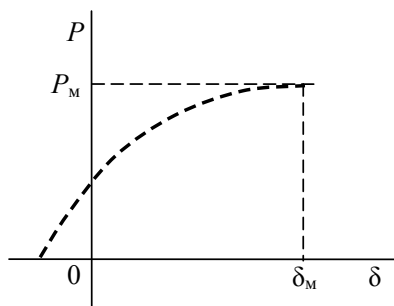


Рис. 2.1. Характеристика мощности электростанции электроэнергетической системы

Для построения данной угловой характеристики мощности необходимо произвести серию расчетов установившихся режимов. При этом расчеты следует начинать с заведомо устой-

чивого режима и лишь затем производить его утяжеление. Вопрос о том, какой должен быть путь утяжеления режима сложной энергосистемы, решается в каждом конкретном случае, исходя из требований [4] и инженерных соображений. Чаще всего это увеличение активной мощности электростанции и одновременно разгрузка балансирующего узла.

При утяжелении режима электроэнергетической системы предельным считается такой режим, в котором нарушается по крайней мере одно из следующих условий.

1. Критерии статической устойчивости.

2. Условия существования режима, т.е. сходимость итерационного процесса.

3. Дополнительные условия: $U > U_{пр}$, $I > I_{доп}$ и пр.

Следует отметить, что понятие о пределе существования режима и о пределе по апериодической устойчивости близки, но не идентичны, так как эти пределы не обязательно совпадают [3, 5]. При этом полезно знать, что сам предельный режим не может быть рассчитан (итерационный процесс не сходится, т.к. якобиан решаемой системы равен нулю), но приблизиться к нему с точностью до единиц мегаватт возможно.

Надежная и устойчивая работа электроэнергетической системы в режимах, близких к границе области устойчивости, невозможна. В этих режимах любые, даже малые возмущения или незначительные утяжеления режима будут приводить к нарушению устойчивости. Коэффициент запаса K_p вычисляется по формуле

$$K_p = \frac{P_{пр} - P_0}{P_0},$$

где $P_{пр}$ – предельная передаваемая мощность в системе по условию статической устойчивости, в рассматриваемом случае такой величиной является $P_m = P_{пр}$;

P_0 – действительная передаваемая мощность в систему.

Коэффициент K_p в нормальных режимах должен быть больше нормативного K_{pn} , значение которого составляет 0,2 в послеаварийном режиме – не менее 0,08 [4].

При определении запасов устойчивости в большинстве случаев допускается отказаться от учета АРВ в явном виде, выполняя расчет при постоянстве ЭДС, значения и расчетные точки их приложения зависят от типа АРВ.

2.2. Методические рекомендации к построению угловых характеристик мощности и определению коэффициентов запаса статической устойчивости по активной мощности

Составляется комплексная схема замещения рассматриваемой системы с учетом электростанций, трансформаторов, линий электропередачи и нагрузок. При этом генераторы без АРВ представляются ЭДС E_q , приложенной за сопротивлением X_d , генераторы с АРВ пропорционального действия – ЭДС E' и X'_d ; генераторы с АРВ сильного действия – U_r (сопротивления генераторов не учитываются, $X_r = 0$).

Рассчитывается исходный режим рассматриваемой системы при номинальной активной мощности станции. Особенностью такого расчета является заранее не определенное значение ЭДС генераторов, которое необходимо, чтобы обеспечить требуемые по условиям эксплуатации напряжения на шинах генератора, станции и нагрузок ($U_r \approx (1,1 \dots 1,0)U_{нr}$). Поэтому на первом этапе произвольно, с учетом инженерной интуиции, задается какое-либо фиксированное значение ЭДС и выполняется расчет режима.

Следует обратить внимание, что активная нагрузка задается за сопротивлениями генератора, а ЭДС генератора фиксируется как напряжение в узле (например, узел 9 на рис. 2.2) при задании реактивной мощности в определенном диапазоне ($Q_{\min} - Q_{\max}$).

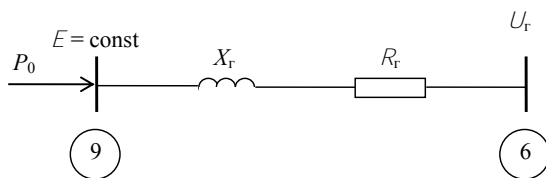


Рис. 2.2. Упрощенная схема замещения генераторов станции

Если в результате расчета получили напряжения в узлах, недопустимые по условиям эксплуатации, то расчет режима следует повторить с измененным значением ЭДС. При низких значениях напряжения ЭДС станции необходимо увеличить, при больших напряжениях, наоборот, уменьшить. Регулирование напряжения в узлах нагрузки можно осуществлять также изменением коэффициентов трансформации трансформаторов (K_T). Изменение значений ЭДС и K_T необходимо продолжать до тех пор, пока напряжения не окажутся в допустимых пределах.

При расчете исходного режима следует учитывать, что итерационный процесс расчета не всегда сходится. Это может быть из-за неправильного задания значения ЭДС или в случае, если заданная исходная мощность P_0 больше максимальной, т.е. $P_0 > P_M$. В последнем случае следует уменьшить исходную величину передаваемой активной мощности.

Далее необходимо провести серию расчетов режимов при изменении мощности станции в сторону ее увеличения и уменьшения при постоянной ЭДС. Для более точного определения максимальной мощности при приближении к предельному значению (о чем свидетельствует значение угла) ее величину следует увеличивать незначительно. Ориентировочно значение максимальной мощности для нерегулируемой системы можно оценить по данным исходного режима:

$$P_M \approx \frac{P_0}{\sin \delta_0}$$

Если при увеличении передаваемой мощности итерационный процесс расчета не сходится, то в большинстве случаев это свидетельствует о том, что заданная мощность больше предела системы и режима не существует.

При отсутствии АРВ в результате расчета режима на ЭВМ получаем модуль ЭДС E_q и угол δ (на распечатке это напряжение узла и его угол относительно балансирующего узла). Здесь уместно еще раз заметить, что при отсутствии АРВ может оказаться, что система не обладает статической устойчивостью при номинальной нагрузке (итерационный процесс расчета режима не сходится). В таких случаях при определении предела системы необходимо делать нагрузку генератора ниже заданной (номинальной).

При АРВ пропорционального действия фиксируется переходная ЭДС E' за сопротивлением X'_d . Поэтому в результате расчета в этом узле получаем угол δ' , а не угол δ .

Фактический угол

$$\delta = \delta' + \Delta\delta'$$

где δ' - угол сдвига вектора ЭДС \underline{E}' относительно вектора напряжения системы \underline{U} , а дополняющий угол

$$\Delta\delta' = \arctg \frac{(P_T(X_d - X'_d))}{(E')^2 + Q_T'(X_d - X'_d)}$$

Здесь P_T и Q' - мощности станции, замеренные в узле E' .

Эту коррекцию угла δ , к сожалению, приходится вычислять с помощью калькулятора или просто пренебречь величиной угла $\Delta\delta'$. В остальном процедура расчетов идентична рассмотренной.

В случае АРВ сильного действия в расчетах поддерживается постоянным напряжение на шинах генератора, а угол δ корректируется по формулам

$$\delta = \delta_c + \Delta\delta_r ;$$
$$\Delta\delta_r = \arctg \frac{P_r X_d}{U_r^2 + Q_r X_d}$$

где U_r – напряжение на выводах генераторов станции.

5. По результатам вычислений строятся угловые характеристики мощности по типу рис. 2.1, по которым определяются максимальные мощности P_m , углы δ_m и коэффициенты запаса статической устойчивости, которые сравниваются с нормативными.

3. РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ГЕНЕРАТОРОВ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

3.1. Краткие теоретические сведения

Для оценки динамической устойчивости электроэнергетической системы необходимо рассчитать изменение углов δ генераторов от времени переходного процесса. Признаком нарушения динамической устойчивости является увеличение разности между углами δ_{ij} (взаимный угол) любых двух синхронных машин на 360° и более. В простой схеме, содержащей только один эквивалентный генератор, имеется только один взаимный угол ротора относительно шин бесконечной мощности. В сложной электроэнергетической системе, где много генераторов и соответственно будет много взаимных углов. В этом и состоит основная трудность расчетов динамической устойчивости. Поэтому качественная и количественная оценка динамической устойчивости современных энергосистем выполняется по специальным программам на ЭВМ. Для

этого вначале, как правило, рассчитывается исходный установившийся режим. Методы, алгоритмы и программы таких расчетов изложены, например, в [5, 8] и освоены студентами в предыдущем разделе.

Задача исследования динамической устойчивости системы формулируется в одном из следующих вариантов.

Определить:

- предельное время отключения КЗ по условиям динамической устойчивости;
- динамическую устойчивость системы при заданной длительности отключения КЗ;
- динамическую устойчивость системы при отключении какого-либо элемента.

В зависимости от поставленной перед исследователем задачи для расчета электромеханического переходного процесса элементы энергосистемы могут представляться различными математическими моделями [1, 3, 7].

В качестве расчетных моделей синхронных машин могут использоваться:

- уравнения Парка–Горева;
- Лебедева–Жданова;
- упрощенная модель в виде постоянной переходной ЭДС, приложенной за переходным сопротивлением.

Следует отметить, что упрощенное моделирование синхронных машин в виде неизменной ЭДС E' за сопротивлением \tilde{O}'_d допустимо в учебных и ориентировочных расчетах, а также в тех случаях, когда они значительно удалены от места возмущения.

Система возбуждения при расчетах динамической устойчивости моделируется всегда, кроме случаев, когда синхронная машина представляется постоянной ЭДС E' . При этом модель системы возбуждения, включая АРВ, должна быть такой, чтобы в ней были представлены основные каналы регулирования,

характерные для различных существующих систем возбуждения [1, 3, 7].

Нагрузку при расчетах динамической устойчивости можно учитывать:

- статическими характеристиками по напряжению и частоте;
- динамической моделью в виде уравнений асинхронных и синхронных двигателей.

Модель автоматики и защиты, как правило, состоит :

- из условий работы, например, $I > I_{\max}$, $t = t_{\text{возн.КЗ}}$ и т.д.;
- модели действий, например, отключение линии электропередачи генератора и т.п.

Правильность расчетов динамической устойчивости во многом зависит не только от используемых моделей, но и от эффективного метода, которым осуществляется в программе интегрирование дифференциальных уравнений. Это прежде всего методы Эйлера, Рунге–Кутта, Адамса и др. Однако при любом методе численного интегрирования дифференциальных уравнений точность решения зависит от шага интегрирования (Δt). С уменьшением Δt точность на шаге возрастает, но одновременно увеличивается погрешность округления и время расчета. Выбор шага интегрирования зависит от метода интегрирования и от самого решения уравнений: чем быстрее изменяются во времени интегрируемые переменные, тем меньшим приходится выбрать шаг интегрирования.

Длительность расчета переходного процесса выбирается исходя из условий достоверности оценки устойчивости или неустойчивости системы. Расчет переходного процесса без нарушения устойчивости будет достоверным только тогда, когда его результаты ясно указывают, что амплитуда колебаний углов синхронных машин уменьшается, а их средние значения не возрастают, скольжение асинхронных двигателей с течением времени уменьшается, напряжение во всех узлах не выходит за допустимые значения. Длительность переходного процесса для оценки динамической устойчивости обычно составляет 2–4 с. Она может быть и больше, однако при этом значительно возрастает

тает погрешность расчетов в основном из-за неточности моделирования систем регулирования возбуждения и скорости.

3.2. Методические рекомендации по расчетам динамической устойчивости

1. Выполнить расчет установившегося режима рассматриваемой схемы. При этом мощности электростанции или генератора присоединяются к шинам низкого напряжения трансформатора (шины генераторного напряжения U_T). Таким образом, в программах DIS-1 и Мустанг-95 исключается генераторная ветвь, а узлам генераторного напряжения придается статус узлов с фиксацией напряжения, задается значение активной мощности и диапазон реактивной мощности (Q_{\min} , Q_{\max}). По результатам расчета судят о правильности задания исходных данных.

2. Переходят к расчету динамической устойчивости [программа DIS-2 или Мустанг-95 – ввода данных для расчета (Дина – данные)]. Прежде всего генерирующие узлы, в том числе и балансирующий, представляются генераторами, каждый в виде значений переходного сопротивления \tilde{O}'_d и постоянной механической инерции T_j (в программе Мустанг-95 дополнительно U_n , P_n и $\cos\varphi_n$).

3. Изучается постановка задачи расчета динамической устойчивости и формируется задание для расчета по программе на ЭВМ. Правила формирования заданий приведены в инструкциях (см. прил. 2 или 3). Как правило, рекомендуется моделировать возмущение на шинах высокого напряжения в виде трехфазного КЗ с последующим отключением одной из линий электропередачи.

4. Подготавливается информация для вывода результатов расчета. Прежде всего это активная мощность исследуемого генерирующего узла, собственные и взаимные углы генераторов, необходимые для оценки устойчивости, напряжения на шинах станции и в узлах нагрузки и т.д.

5. Выполняется расчет переходного электромеханического процесса. Определяется изменение взаимных углов ЭДС всех генераторов δ_{ij} в функции времени, и по динамике этого угла судят о динамической устойчивости. Методика определения предельного времени отключения КЗ заключается в следующем: вначале задаются каким-то одним временем отключения КЗ $t_{\text{отк}}^{(1)}$ и для его длительности рассчитывается зависимость $\delta^{(1)} = f(t)$. Следующим шагом расчета является выбор другого времени отключения КЗ $t_{\text{отк}}^{(2)}$. Если на основе предыдущего расчета переходного режима установлено, что устойчивость сохраняется, то время $t_{\text{отк}}^{(2)}$ берется больше $t_{\text{отк}}^{(1)}$. Если же расчет показал, что устойчивость при $t_{\text{отк}}^{(1)}$ не сохраняется (рис. 3.1), то принимается $t_{\text{отк}}^{(2)} < t_{\text{отк}}^{(1)}$. Далее опять рассчитывается зависимость $\delta^{(2)} = f(t)$ для принятого $t_{\text{отк}}^{(2)}$. Расчеты переходных процессов выполняются до тех пор, пока не удастся найти с достаточной (заданной преподавателем) точностью два близких значения величины отключения КЗ $t_{\text{отк}}^{(i)}$ и $t_{\text{отк}}^{(i+1)}$, для которых устойчивость сохраняется и нарушается. На основании этих расчетов с определенной достоверностью можно принять, что $t_{\text{отк}}^{(\text{пр})} = t_{\text{отк}}^{(i)}$.

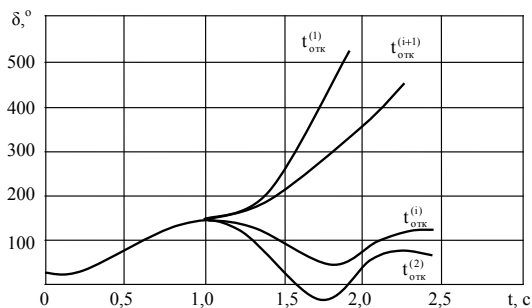


Рис. 3.1. К определению предельного времени отключения КЗ

Для двух исследуемых режимов с близкими значениями времени отключения КЗ, для которых устойчивость сохраняется и нарушается, строятся графические зависимости изменения характерных параметров режима: изменения взаимных углов генераторов, активной мощности исследуемой электростанции, напряжения на ее шинах, в узлах нагрузки и т.д. Выполняется анализ построенных зависимостей.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ УЗЛОВ НАГРУЗКИ

4.1. Краткие теоретические сведения

Расчеты и анализ устойчивости и переходных процессов в узлах нагрузки весьма важны как для обеспечения бесперебойной работы предприятий, так и для оценки влияния переходных процессов в нагрузке на режимы энергосистемы. В системах электроснабжения потребителей возникают как большие возмущения, вызывающие существенные и резкие изменения режима работы, так и малые. К большим возмущениям относятся отключения отдельных элементов электрической сети, возникновение коротких замыканий, резкое изменение механического момента на валу двигателя. Исследование переходных процессов в этих случаях сводится к оценке динамической устойчивости двигателей.

При малых возмущениях возникает необходимость проверки статической устойчивости как отдельных, так и группы синхронных и асинхронных двигателей или узла нагрузки в целом. Неустойчивость узла нагрузки проявляется в виде специфического явления, называемого лавиной напряжения, когда напряжение становится ниже допустимых критических значений.

Для оценки статической устойчивости узлов, наиболее часто используются практические критерии устойчивости нагрузки [1]:

$$dE/dU > 0 \text{ и } d\Delta Q/dU < 0,$$

где ΔQ – небаланс мощностей в узле нагрузки.

Для их применения необходимо располагать статическими характеристиками активной и реактивной мощностей по напряжению, а также схемой замещения системы электроснабжения и ее параметрами.

При отсутствии реальных статических характеристик узла можно воспользоваться типовыми [8]. Для активной мощности

$$P_{H*} = P_H(0,83 - 0,3U_* + 0,47U_*^2).$$

Для реактивной мощности:

узлов 110–220 кВ

$$Q_{H*} = Q_H(3,7 - 7U_* + 4,3U_*^2),$$

узлов 6–10 кВ

$$Q_{H*} = Q_H(4,9 - 10,1U_* + 6,2U_*^2),$$

где P_H , Q_H – активная и реактивная нагрузка в исходном режиме при $U = U_H$;

$$U_* = U/U_H.$$

Для проверки устойчивости комплексной нагрузки по критерию систему электроснабжения необходимо представить схемой замещения, показанной на рис. 4.1, а. При этом генераторы без АРВ замещаются ЭДС E_q , а генераторы с АРВ – в зависимости от типа регулятора (см. параграф 2). Для данной схемы эквивалентная ЭДС определяется из уравнения

$$E = \sqrt{\left(U + \frac{P_{H*}R_3 + Q_H X_3}{U} \right)^2 + \left(\frac{P_{H*} X_3 - Q_H R_3}{U} \right)^2},$$

где R_3 , X_3 – эквивалентные сопротивления питающей сети и генераторов.

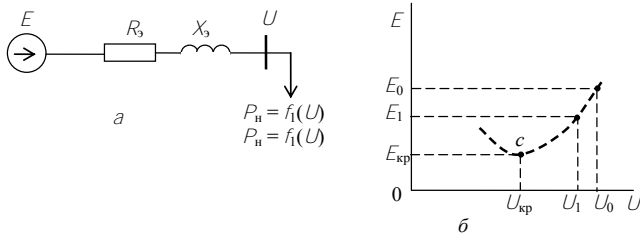


Рис. 4.1. Оценка устойчивости нагрузки по критерию $dE/dU > 0$:
a – схема замещения;
б – зависимость ЭДС системы от напряжения на нагрузке

Для оценки устойчивости нагрузки по критерию ($dE/dU > 0$) необходимо построить зависимость $E_3 = f(U)$, которая приведена на рис. 4.1, *б*. Предельный режим определяется критическими значениями ЭДС $E_{кр}$ и напряжения $U_{кр}$ в точке *c*, где $dE/dU = 0$.

При расчетах устойчивости нагрузки, получающей питание от нескольких электростанций, удобно пользоваться практическим критерием $d\Delta Q/dU < 0$. В данном случае $\Delta Q = Q_{Г\Sigma} - Q_H$ – небаланс мощностей, а $Q_{Г\Sigma}$ – суммарная генерируемая в узел реактивная мощность.

Для оценки устойчивости по данному критерию необходимо построить зависимость $\Delta Q = f(U)$, которая приведена на рис. 4.2. Предельный режим определяется критическим напряжением $U_{кр}$ в точке *c*, где $d\Delta Q/dU = 0$.

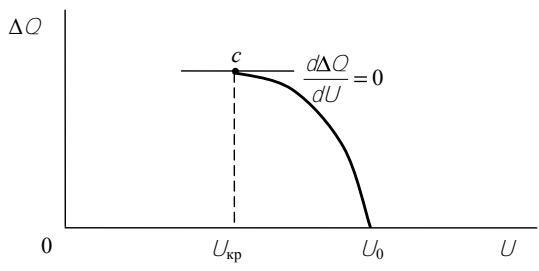


Рис. 4.2. Оценка устойчивости нагрузки по критерию $d\Delta Q/dU < 0$

Уровень статической устойчивости узлов нагрузки оценивают путем расчета коэффициента запаса по напряжению:

$$K_U = \frac{U_0 - U_{кр}}{U_0}. \quad (4.2)$$

Для обеспечения устойчивости нагрузки коэффициент запаса по напряжению должен быть не менее 0,15 в нормальных и 0,1 в аварийных режимах электроэнергетических систем [4].

4.2. Методические рекомендации к определению критического напряжения и запаса устойчивости узла нагрузки по напряжению

1. Для построения зависимости $E = f(U)$ необходимо задаться рядом значений напряжения U , например, сначала принимая $U = U_0$. 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 подставляются в формулу (4.1), по которой рассчитываются 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 характеристикам 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 снижаться E . Предельный режим с точки зрения устойчивости достигается тем, что производная dE/dU равна нулю, что соответствует критическим значениям ЭДС и напряжения ($E_{кр}$ и $U_{кр}$). Масштаб построения зависимости $E = f(U)$ необходимо выбирать таким, чтобы был явно виден ее экстремум, а значения $U_{кр}$ определялось с точностью не менее 1 %. Подробнее о расчетах по определению критического напряжения с использованием критерия $dE/dU > 0$ смотри в [6].

2. Для построения зависимости $\Delta Q = f(U)$ могут быть использованы любые программы расчета установившегося режима (например, RASTR, Мустанг-95), в которых нагрузка может быть представлена статическими характеристиками. Поскольку программа DIS не учитывает статические характеристики, то ее нельзя использовать для исследования устойчивости нагрузки.

Вначале необходимо подготовить расчетную схему исследуемой системы (нормальную или ремонтную) с представлением генераторов электростанций в соответствии с типом АРВ (см. раздел 2).

Все нагрузки представляются статическими характеристиками. Выполняется расчет исходного режима с вводом его в допустимую область.

Для данной схемы выбирается узел нагрузки (самостоятельно или в соответствии с заданием), для которого необходимо провести исследование. Далее следует выбрать один из двух путей расчетного построения $\Delta Q = f(U)$.

П у т ь 1. В выбранном узле нагрузки утяжеление режима, т.е. снижение напряжения, осуществляется пошагово путем увеличения потребления реактивной мощности фиктивным генерирующим источником (условно, $-Q_{ген}$ в узле). Таким образом, на каждом i -м шаге утяжеления получим значение напряжения в исследуемом узле U_i соответствующее $-Q_{ген}$. По своему физическому смыслу $Q_{ген}$ в узле и есть искомая разность реактивных мощностей $\Delta Q_i = Q_{ген}$, которая вызвала посадку напряжения от исходного значения до уровня U_i . По полученным значениям ΔQ_i и U_i строится зависимость $\Delta Q = f(U)$. Увеличение потребления реактивной мощности генерирующим источником $Q_{ген}$ осуществляется до тех пор, пока итерационный процесс сходится или кривая $\Delta Q = f(U)$ будет иметь явный экстремум. Предельный режим с точки зрения устойчивости достигается там, где производная $d\Delta Q/dU$ равна нулю, что соответствует критическому напряжению $U_{кр}$.

П у т ь 2. В выбранном узле нагрузки пошагово фиксируется напряжение U_i с заданием диапазона генерирующей реактивной мощности ($Q_{ген\ min} - 0$). С данными фиксированными напряжениями U_i рассчитываются установившиеся режимы, в результате которых получаем ряд значений $Q_{ген}$ в исследуемом узле, по которым строится зависимость $\Delta Q = f(U)$. Напряжение с его фиксацией задается до тех пор, пока режим системы осуществим или кривая $\Delta Q = f(U)$ будет иметь явный экстремум. Предельный режим по устойчивости определяется аналогично пути 1.

3. По формуле (4.2) рассчитываются коэффициенты запаса по напряжению. Полученные значения сравниваются с нормативными, затем делаются выводы о степени устойчивости исследуемого узла нагрузки.

5. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОДГОТОВКЕ К ЗАЩИТЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Для успешной защиты курсовой работы студент должен знать:

- терминологию по устойчивости электроэнергетических систем;
- схемы замещения элементов электроэнергетической системы для оценки устойчивости;
- методы расчета и оценки устойчивости электроэнергетических систем;
- основные математические выражения, описывающие характеристики и параметры электроэнергетической системы для оценки устойчивости;
- назначение и принцип действия различных типов автоматических регуляторов возбуждения;
- критерии и виды устойчивости электроэнергетических систем;
- основные нормативы в области устойчивости;
- мероприятия по повышению устойчивости рассматриваемой системы.

Кроме того студент должен уметь:

- правильно выбирать математические модели элементов электроэнергетической системы для расчета устойчивости;
- рассчитывать параметры элементов электроэнергетических систем;
- выполнять расчеты установившихся и переходных режимов электроэнергетических систем;
- анализировать полученные в результате расчетов установившиеся и переходные режимы электроэнергетических систем;
- использовать программные средства для оценки устойчивости;
- оценивать полученные результаты расчетов устойчивости электроэнергетической системы;
- определять коэффициенты запаса устойчивости электроэнергетической системы;
- давать физическую оценку процессам, происходящим в переходных режимах электроэнергетических систем;
- выбирать мероприятия по повышению устойчивости рассматриваемой электроэнергетической системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Калентионюк, Е.В. Устойчивость электроэнергетических систем /Е.В. Калентионюк. – Минск: Техноперспектива, 2008. – 375 с.
2. Веников, В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах / В.А. Веников. – М.: Высшая школа, 1985. – 536 с.
3. Гуревич, Ю.Е. Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах / Ю.Е. Гуревич, Л.Е. Либова, А.А. Окин. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 390 с.
4. Руководящие указания по устойчивости энергосистем. – Минск.: Белэнерго, 2005. – 19 с.
5. Идельчик, В.И. Расчеты установившихся режимов электроэнергетических систем / В.И. Идельчик. – М.: Энергия, 1977. – 192 с.
6. Устойчивость электроэнергетических систем: сборник задач и примеры их решения / Е.В. Калентионюк [и др.] – Минск: БНТУ, 2007. – 131 с.
7. Совершенствование средств анализа переходных процессов для повышения эффективности противоаварийного управления режимами энергосистем / Ю.П. Первушин [и др.] – Рига: ЛатвНИИТИ, 1985. – 56 с.
8. Герасименко, А.А. Передача и распределение электрической энергии / А.А. Герасименко, В.Т. Федин. – Ростов на Дону: Феникс, 2006. – 720 с.
9. Справочник по проектированию электроэнергетических систем / под ред. С.С. Рокотяна и И.М. Шапиро. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 380 с.

**ПРОГРАММА DIS-1.
ОПИСАНИЕ И ИНСТРУКЦИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЮ**

Назначение программы

DIS-1 – это многопрофильная учебная программа, призванная решить следующие задачи:

- расчет установившихся режимов электрических систем и сетей;
- контроль допустимости режима по потокам мощности и уровням напряжения;
- выбор регулировочных ответвлений трансформаторов.

Характеристика программы

Максимальный объем исследуемой сети: узлов – 100, линий электропередачи – 100, трансформаторов – 100. При этом объем оперативной памяти ЭВМ должен составлять не менее 1 мегабайта. Электрическая схема с 30 узлами может быть рассчитана на компьютере с объемом оперативной памяти 256 килобайт.

Входная информация включает данные об узлах и трансформаторах и может храниться в одном из трех независимых друг от друга массивов памяти. Следовательно, в программе можно одновременно хранить и использовать три схемы или варианта. При большем количестве схем сформированные входные и выходные массивы данных можно переписать и хранить на переносных носителях информации. Входные файлы 1-го массива названы в программе соответственно: для узлов – PFB1.DAT, для линий – PFL1.DAT и трансформаторов – PFT1.DAT. Входные данные 2-го и 3-го массивов имеют аналогичные названия, только они сопровождаются цифрами 2 и 3 соответственно (PFB2.DAT, PFB3.DAT и т.д.).

Входные данные об узлах включают:

- номер узла;
- тип узла (0 – для балансирующего, 1 – для нагрузочного, 2 – для контролируемого по напряжению, в котором имеется регулируемая генерируемая реактивная мощность, 3 – для контролируемого по напряжению с регулируемыми ответвлениями трансформаторов);
- величину напряжения (в отн. ед.) для балансирующего и контролируемых по напряжению узлов;
- фазовый угол (в град.) для балансирующего узла, если он нам известен (в противном случае эту информацию игнорируем);
- генерируемую активную мощность (в отн. ед.);
- генерируемую реактивную мощность (в отн. ед.);
- активную нагрузку (в отн. ед.);
- реактивную нагрузку (в отн. ед.);
- ограничения по генерируемой максимальной и минимальной реактивной мощности (в отн. ед.) для контролируемых по напряжению узлов типа 2. Балансирующему узлу в обязательном порядке присваивается номер 1.

Входные данные линии включают:

- номер линии;
- номера двух узлов, к которым линия присоединена;
- активное сопротивление, отн. ед.;
- реактивное сопротивление, отн. ед.;
- активную проводимость, отн. ед.;
- реактивную проводимость, отн. ед.;
- допустимую нагрузку линии (допустимую мощность), отн. ед.

Входные данные трансформатора содержат:

- номер трансформатора;
- номера двух узлов, между которыми трансформатор присоединен;
- активное сопротивление обмотки, отн. ед.;
- реактивное сопротивление рассеивания, отн. ед.;
- активную проводимость от потерь в сердечнике, отн. ед.,

- реактивную проводимость от потерь на перемагничивание, отн.ед.;
- максимальную нагрузку трансформатора (допустимую мощность), отн. ед.
- максимальный диапазон регулирования ответвлениями, отн. ед. (от 1 до 1,25).

Пользователь имеет следующие опции для каждого файла входных данных:

- обновлять (вытирать) файл, когда пересматриваются все хранимые данные;
- вводить или изменять данные для выбранных узлов, линий электропередачи или трансформаторов;
- удалять узел, линию или трансформатор;
- выводить данные одного узла, линии или трансформатора;
- выводить данные всех узлов, линий или трансформаторов, следующих за указанным узлом, линией или трансформатором.

Разъясняем, что узлы типа 3 – это узлы с контролем напряжения, куда присоединяются генераторы или трансформаторы с регулируемыми ответвлениями. Если пользователь присвоил узлу тип 3 во входной информации об узлах, к которым присоединен трансформатор с РПН, то в массиве входных данных о трансформаторах к этому узлу должен быть присоединен трансформатор. При этом узел типа 3 (узел с контролем напряжения) должен стоять на втором месте. Программа будет предупреждать пользователя, когда имеется тип 3 и нет трансформатора, чей второй номер узла имеет тип 3. Программа также предполагает, что регулировочное ответвление находится на противоположной стороне трансформатора от узла 3.

Программа изменяет ответвления каждого регулировочного трансформатора, присоединенного к узлу 3, до тех пор, пока не выполнится одно из условий:

- 1) вычисленное напряжение узла отличается на 0,4 % от желаемого, заданного в исходных данных;
- 2) достигнуто минимальное или максимальное регулировочное ответвление. Пользователь вводит величину этого

максимального ответвления из паспортных данных РПН в диапазоне от 1 до 1,25 (такой диапазон предусмотрен программой) для каждого трансформатора во входном файле данных о трансформаторах. Программа принимает минимальное регулировочное ответвление $\text{MINTAP} = (2,0 - \text{MAXTAP})$.

Пользователь также может задавать регулировочному ответвлению регулируемых трансформаторов фиксированную величину. Программа спрашивает пользователя, имеются ли некоторые трансформаторы с фиксированными ответвлениями. Если ответвление задается, отвечаем Y (да). Тогда пользователь задает желаемые ответвления (величины от 0,75 до 1,25) трансформаторов через опции программы. Программа предполагает, что РПН находится на стороне трансформатора, противоположной узлу, которому мы присвоили тип 3.

Примечание. При отсутствии в вашей схеме линий или трансформаторов не забудьте почистить эти массивы, т.к. там может находиться информация от предыдущих расчетов, которая автоматически подключится к вашей схеме.

Программа использует итерационный метод Ньютона–Рафсона для расчета потокораспределения. Пользователь может выбрать максимальное число итераций (не более 20) и точность расчета (необходимая величина есть 0,0001 отн. ед).

Ввод данных, выполнение расчетов и вывод результатов производится через дисплей согласно опроснику (опциям). Выбирается соответствующий вопрос и дается требуемый ответ по заданию. Опции составлены грамотно и не вызывают двоямыслия. Достаточно один раз их просмотреть и можно свободно овладеть правилами пользования программой.

Порядок выполнения расчетов следующий. Пользователь имеет возможность выбора стартовых (начальных) условий в первой итерации): 1 – прямой старт; 2 – использование в качестве стартовых величин для первой итерации выходных данных с предыдущего расчета. Если пользователь выбирает опцию 1, то начальные величины напряжений и их фазовых углов в узлах типа 1 принимаются равными данным балансиру-

ющего узла. Начальные ответвления варьируемых ответвлений трансформаторов также выбираются равными 1,0. Если же пользователь выбирает опцию 2, то начальные значения напряжений и их фазовых углов в узлах, так же как и начальные регулировочные ответвления трансформаторов, выбираются равными этим величинам из выходных данных предыдущего расчета (этого или подобного ему режима). Когда готовится базовый вариант на первом этапе расчета и не имеется еще никаких промежуточных результатов, тогда выбирается опция 1 – прямой старт. После выполнения расчета по программе для базового варианта с успешно завершенным потокораспределением и формированием файлов выходных данных может выбираться уже опция 2. Программа обычно работает быстрее, когда вы стартуете с начальными величинами, взятыми из предыдущего (успешного) расчета.

Выходные данные включают информацию об узлах, линиях и трансформаторах, которые сохраняются (формируются) в трех обособленных файлах. Для массива 1 файлы выходных данных называются PFBO1.DAT, PFLO1.DAT и PFTO1.DAT. Аналогичные имена используются для массивов 2 и 3, заменяя соответственно индексы. Программа выдает пользователю опцию для вывода данных на дисплей или принтер.

Выходные данные об узлах включают:

- номер узла;
- величину напряжения, отн. ед.;
- угол фазы напряжения (в град.);
- генерируемую активную мощность, отн. ед.;
- генерируемую реактивную мощность, отн. ед.;
- активную нагрузку, отн. ед.;
- реактивную нагрузку, отн. ед.

Те узлы, для которых величины напряжений на 5 % выше или ниже напряжения балансирующего узла, программой распознаются и выделяются.

Выходные данные линий включают:

- номер линии;

- номера двух узлов, которые линия соединяет;
- активную, реактивную и полную мощности, подтекающие к концу линии (в отн. ед.).

Те линии, нагрузка которых превышает их максимально допустимые нагрузки, программой идентифицируется (выделяются на дисплее и на печати звездочками).

Выходные данные о трансформаторах включают:

- номер трансформатора;
- номера двух узлов, к которым трансформатор подсоединен;
- активную, реактивную и полную мощности, протекающие по обмотке, отн. ед.;
- регулировочные ответвления, отн. ед.

Те трансформаторы, нагрузка которых превышает допустимую максимальную (полную мощность), также распознаются программой и идентифицируются.

Подготовка исходной информации для расчета

1. Вычерчивается принципиальная однолинейная схема заданной электроэнергетической системы к каждому генератору, линии присваивается свой номер.

2. Составляется расчетная схема замещения. Параметры элементов схемы замещения определяются в соответствии с методическими рекомендациями подраздела 1.2.

3. На схеме выбирается балансирующий узел, этому узлу присваивается номер 1 (обязательно). Остальные узлы нумеруются произвольно цифрами натурального ряда чисел. Не допускается пропуск или повторение цифр натурального ряда в процессе нумерации узлов. Все узлы, кроме балансирующего, подразделяются на три типа: 1 – нагрузочный (этот тип узла присваивается всем узлам, где не фиксируется напряжение), 2 – генераторный (к этому типу относятся узлы подсоединения электростанций, где фиксируется напряжение), 3 – трансформаторный (тип узлов подсоединения обмотки среднего или низшего напряжения трансформатора, где фиксиру-

ется желаемое напряжение с целью выбора коэффициента трансформации). Таким образом, узел типа 1 – это узел без контроля напряжения; узел типа 2 – узел с фиксированным (заданным напряжением, это напряжение обеспечивается за счет заданного) диапазона генерируемой реактивной мощности. Узел типа 3 – узел, с фиксированным напряжением, которое обеспечивается за счет РПН трансформаторов.

Если в процессе электрического расчета режима не требуется фиксировать напряжения на шинах генераторов и не требуется выбирать ответвления трансформаторов, то всем узлам схемы, кроме балансирующего, присваивается тип 1.

4. Входная информация (параметры элементов системы) представляется в относительных единицах (значения взять из расчета в первом разделе).

Руководство пользователю

Запуск программы осуществляется файлом DIS-1.EXE. После двух представленных советов необходимо нажать ВВОД, для продолжения вам предложат выбрать один из трех массивов ввода/вывода данных.

Какой массив выбираете (введите его номер: 1, 2 или 3)?

Укажите номер массива и нажмите ВВОД, после этого введите имя массива (любое), нажмите ВВОД.

На экране появится основное меню программы:

- 1) ФОРМИРОВАНИЕ ФАЙЛА ДАННЫХ;
- 2) ЗАПУСК ПРОГРАММЫ;
- 3) ВЫВОД ДАННЫХ;
- 4 СТОП (выход из программы).

Для работы с программой необходимо создать файл данных. Для этого нажмите 1 и ВВОД, появится подменю:

- 1)УЗЛЫ;
- 2)ЛИНИИ;
- 3) ТРАНСФОРМАТОРЫ;
- 4) ВОЗВРАТ (выход в основное меню).

В зависимости от того, какие данные вы хотите ввести, выберите нужный вам номер (не забывайте про ВВОД).

Затем вам будет предложено следующее

1. СОЗДАТЬ ФАЙЛ – обновить (очистить) файл, когда пересматриваются все хранимые данные.

2. ДОБАВЛЕНИЕ НОВОГО ИЛИ ИЗМЕНИТЬ ДАННЫЕ – ввод и изменение данных для выбранных узлов, линий и трансформаторов.

3. УДАЛЕНИЕ – удалить узел, линию или трансформатор.

4. ВЫВОД ОДНОГО... – вывести данные одного узла, одной линии или одного трансформатора.

5. ВЫВОД ВСЕХ (узлов, линий, трансформаторов)ПОСЛЕ УКАЗАННОГО НОМЕРА.

6. ВОЗВРАТ – выход в предыдущее меню.

Итак, вы ввели или изменили необходимые вам данные, теперь вернитесь в основное меню с помощью опций ВОЗВРАТ.

Для запуска программы на исполнение выберите пункт 2 основного меню и нажмите ВВОД.

Ответьте на предложенные вам вопросы (не забывайте для подтверждения нажимать ВВОД). Вы можете выбрать:

1) НАЧ.СТАРТ – прямой старт;

2) ВЫБОР НАЧ. УСЛ. ИЗ ПРЕДЫДУЩЕГО РАСЧЕТА – использование входных данных из предыдущего расчета.

ПРОГРАММА DIS-2. ОПИСАНИЕ И ИНСТРУКЦИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЮ

Назначение программы

Данная программа предназначена для решения задач по оценке динамической устойчивости электроэнергетических систем. Программа вычисляет углы электрических машин, их частоты вращения, угловые ускорения, генерируемую мощность станций и величины напряжений в узлах электрической системы при больших конечных возмущениях.

Характеристика программы

Перед запуском программы необходимо вначале запустить программу DIS-1 «Электрический расчет режимов» для рассматриваемой энергосистемы. DIS-2 открывает и затем читает данные из массивов ввода/вывода DIS-1.

Входные данные для DIS-2 также дополняются данными о синхронных машинах, которые формируются в специальном файле. Пользователь имеет возможность создавать три отдельных массива входной информации. Массив 11 файла данных синхронных машин называется TSM1. DATI Файлы данных в массивах 2(3) имеют то же имя, для различия используются соответствующие индексы (2, 3). Максимальное число синхронных машин – 25.

Исходные данные синхронных машин (электростанций) включают:

- порядковый номер;
- номер узла системы, к которому подсоединена машина;
- переходное реактивное сопротивление X'_d отн. ед.;

– постоянную инерции (T_{j*}) турбогенератора, приведенную к относительным единицам, с.

Пользователь имеет в своем распоряжении следующие опции при работе с программой:

- 1 – ввод исходных данных параметров синхронной машины;
- 2 – задание возмущения и запуск программы;
- 3 – стоп.

Когда пользователь вводит входные данные синхронной машины, он имеет в своем распоряжении следующие опции:

- 1 – организация файла данных (очистка соответствующего поля под вводимые данные);
- 2 – добавление данных новой машины или изменение данных у существующей;
- 3 – удаление данных о машине;
- 4 – ввод данных одной машины;
- 5 – ввод данных всех машин;
- 6 – стоп.

Когда пользователь задает возмущение и запускает программу, необходимо прежде всего задать интервал интегрирования Δt (с) и конечное время расчета $t_{\text{кон}}$ (с). Величина Δt должна быть на порядок меньше точности получаемого результата. Типичной величиной является $\Delta t = 0,01$ с.

Затем пользователь выбирает количество возмущений (1, 2, 3 или 4) и моменты их приложения. Например, пользователь при выборе 3 имеет возможность задать следующие виды возмущений: в интервале действия 1 – без возмущения (исходный режим); 2 – трехфазное КЗ в узле; 3 – отключение одного или более поврежденных элементов (синхронных машин, линий или трансформаторов).

При выборе 4 возмущений пользователь имеет следующие опции видов возмущения: 1 – трехфазное КЗ в узле; 2 – отключение существующего КЗ, заданного в интервале действия 1-го возмущения; 3 – отключение одной или более поврежденных синхронных машин, линий электропередачи или трансформа-

торов; 4 – включение одной или более поврежденных синхронных машин, линий электропередачи или трансформаторов.

Программа поочередно, шаг за шагом решает алгебраические уравнения потокораспределения представленных электрических сетей и дифференциальные уравнения исследуемых синхронных машин. Для решения уравнений потокораспределения используется итерационный метод Гаусса–Зейделя, а для решения дифференциальных уравнений – модифицированный метод Эйлера.

Пользователь может выбрать следующие выходные данные: 1) углы электрических машин; 2) частоты вращения электрических машин (относительные скорости); 3) выдаваемые электрическими машинами активные мощности; 4) напряжения в узлах. До пяти выходных параметров может быть выведено за один заход. Пользователь также формирует шаг выдачи информации на дисплей числом K (целое число). При этом выходная информация будет выдаваться с интервалом $K \Delta t$ (с). Выходная информация может выдаваться в экспоненциальной форме (научная система записи) или форматам с фиксируемой точкой (числа с десятичной точкой).

Балансирующий узел должен представляться генератором с большой постоянной инерции (400–800 с) и малым переходным сопротивлением (около 0,01).

Вывод об устойчивости можно сделать по изменению относительного угла:

$$\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j,$$

где δ_i – угол исследуемого генератора (или станции);

δ_j – угол шин бесконечной мощности (балансирующего узла) или другой станции.

Суждения об устойчивости по абсолютным значениям этих углов могут оказаться ошибочными.

Инструкции пользователю

Запуск программы осуществляется файлом DIS-2.EXE. После появления на экране заставки последует предложение нажать «ВВОД», затем на экране появится краткий комментарий по назначению программы и поступит еще одно предложение нажать «ВВОД» для продолжения работы. Далее последуют запросы ЭВМ.

1. Назовите номер используемого массива данных (1,2 или 3).

-Указать номер массива.

2. Введите имя массива.

-Указать имя массива.

3. На экране высвечивается следующее меню.

Что вы желаете?

1. Ввести параметры синхронного генератора.

2. Задать возмущение и запустить программу.

3. Выход.

Выбрать номер нужной опции и «ВВОД».

При выборе опции № 3 работа по программе DIS-2 прекращается и происходит выход из программы.

О п ц я № 1 (Ввести параметры синхронных генераторов (СГ)).

При выборе этой опции на экране высвечивается меню:

1. Очистка файла.

2. Ввод нового или изменение данных существующего генератора.

3. Удаление генератора.

4. Вывод одного генератора.

5. Вывод всех генераторов после указанного.

6. Выход.

Действия пользователя в рамках этого меню аналогичны действиям при формировании файлов данных по узлам, линиям и трансформаторам при работе по программе DIS-1. Следует учесть, что балансирующий узел в расчетах по программе DIS-2 представляется как генератор бесконечной мощно-

сти с достаточно большой постоянной инерции и малым переходным сопротивлением.

О п ц и я № 2 (Задать возмущение и запустить программу).

При выборе данной опции по экрану пробегают исходные данные по узлам, линиям и трансформаторам, набранные в DIS-1, и по синхронным генераторам, далее следуют запросы ЭВМ:

- а) введите интервал времени интегрирования (с);
- ввести необходимый интервал (обычно 0,01 с);
- б) введите конечное время (с);
- ввести конечное время расчета переходного процесса;
- в) введите число интервалов времени возмущений (1–4),
- указать число интервалов;
- г) 1-е возмущение.

Введите интервал действия 1-го возмущения (с);

- ввести время начала действия 1-го возмущения.

Далее ЭВМ задает пользователю ряд вопросов, касающихся каждого из заданного числа возмущений, на которые пользователь должен дать ответ. Задаваемые вопросы конкретны, и на них несложно ответить. Рассмотрим несколько примеров задания возмущения.

З а д а н и е 1. Необходимо найти предельное время отключения КЗ на линии. При этом можно ограничиться и взять 3 интервала времени возмущения:

- 1) $t_1 = t_n - 0$ – нормальный режим;
- 2) $t_2 = t_{\text{откл}} - t_n$ – время действия возмущения (КЗ);
- 3) $t_3 = t_{\text{кон}} - t_{\text{от}}$ – переходный послеаварийный режим после отключения линии с КЗ.

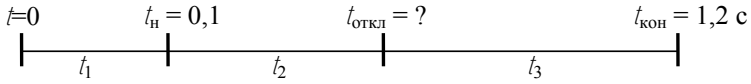
Значения переменных следующие:

t_n – время существования нормального доаварийного режима, с, с момента его окончания начинает действовать возмущение (КЗ);

$t_{\text{откл}}$ – время отключения КЗ, с, это наша искомая величина, задается в пределах $t = 0,1 + t_{\text{откл}}$;

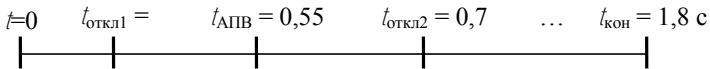
$t_{\text{кон}}$ – конечное время расчета ($t_{\text{кон}} \approx 1-4$ с).

Диаграмма времени наблюдения переходного процесса будет выглядеть следующим образом:



З а д а н и е 2. Необходимо оценить динамическую устойчивость при возникновении КЗ на линии, которое через 0,15 с отключается. Устройство АПВ линию через 0,3 с включает. АПВ – неуспешное, и линия опять отключается через 0,15 с.

Диаграмма времени наблюдения за переходным процессом будет следующей:



д) по окончании ввода данных по возмущениям последует запрос о выводимых параметрах и их количестве

Вы можете напечатать от 1 до 5 параметров.

Введите число параметров (1–5);

- ввести желаемое число выводимых параметров.

Предлагаемые параметры

1. Угол генератора.
2. Частота вращения генератора.
3. Активная мощность генератора.
4. Напряжение в узле.

е) по окончании выбора желаемых выводимых параметров следуют запросы.

Результаты выводятся на печать с интервалом времени K . Введите действительное число K (через сколько интервалов расчета результаты выдавать на печать);

- ввести K .

Вы желаете результаты в экспоненциальном формате (Y или N)?

- указать Y или N .

Продолжить (Y) или прервать возмущение (N)?;

- указать Y или N .

При ответе пользователя N на последний поставленный вопрос происходит возврат к пункту а). При ответе Y производятся расчеты по введенным исходным данным, результаты выводятся на печать в табличной форме. На основе разности углов δ_{ij} исследуемого генератора и системы (балансирующего узла) можно судить о динамической устойчивости при заданном возмущении.

ПРОГРАММА МУСТАНГ-95. ИНСТРУКЦИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Введение

Комплекс MUSTANG-95 предназначен для оперативного выполнения на ЭВМ расчетов установившихся и переходных электромеханических режимов энергосистем.

Вывод всех результатов расчета осуществляется в табличном виде на экран, в файл либо принтер. В комплекс Мустанг-95 включены также программные средства для вывода результатов расчета динамической устойчивости в виде графиков на экран, в файл либо принтер.

Расчет установившегося режима. Общая информация

Расчет установившихся режимов с различными электрическими схемами и не связанных друг с другом можно осуществить при помощи директивы ДИСК–ЧТЕНИЕ РЕЖИМА из библиотеки уже сохраненных режимов в оперативную память ЭВМ вызывается требуемый установившийся режим, в него также могут вноситься изменения. Если же параметры электрической схемы вводятся непосредственно с экрана дисплея по директивам УЗЛЫ – ВЕТВИ, то перед этим необходимо сначала ввести директиву НОВАЯ СХЕМА и затем сделать расчет установившегося режима (УР). При желании результаты расчета нового установившегося режима можно записать в библиотеку режимов (или в режим с тем же названием, тем самым удаляя предыдущую информацию, хранящуюся там [ДИСК–СОХРАНЕНИЕ РЕЖИМА]). Затем снова или вызывается другой режим из библиотеки режимов, или вводится новая схема с экрана дисплея (после обязательной в этом случае директивы НОВАЯ СХЕМА) и т.д.

Изменение параметров схемы сети осуществляется при помощи директивы УЗЛЫ–ВЕТВИ (рис. П 3.1).

строк с поясняющей информацией – окно пустое) следует нажать клавишу <INS>, вследствие чего появится первый пустой элемент редактирования, в поле которого следует ввести вручную требуемую текстовую информацию.

Константы – окно для задания ограничений для расчета установившегося режима. В данном окне задаются следующие константы.

Точн – точность расчета установившегося режима [МВт] в сети напряжением 110 кВ и выше. По умолчанию принимается $Точн = 1$ МВт.

Точ1 – точность расчета сети ниже 110 кВ, [МВт]. Эта точность используется во всех узлах сети с напряжением этих классов, за исключением станции. По умолчанию принимается $Точ1 = 0,01$ МВт.

Каппа – коэффициент, влияющий на сходимость итерационного процесса. По умолчанию принимается Каппа = 2. Если задать Каппа = 0, то деформация уравнений по методу Матвева блокируется, и расчет УР ведется по методу Ньютона.

Точн U – точность обработки модулей напряжений в узлах со свободными источниками реактивной мощности по отношению к $U_{исх}$ [%].

Китер – целое число, представляющее собой номер итерации по методу Ньютона–Рафсона, после которого требуется остановить расчет УР. Если значение параметра *Китер* меньше числа итераций, необходимых для завершения расчета УР, то на экране выдается сообщение «Режим не балансируется».

Управление процессом УР – > окно позволяющее задать начальные условия старта УР в соответствующем поле ([X] или []). Данные поля являются логической информацией ([X] соответствует «ДА», [] соответствует «НЕТ»), поэтому корректировать данные можно нажатием левой клавиши манипулятора «мышь» на соответствующий логический символ.

Возможность определения начальных условий старта УР:

[X] – перед началом расчета УР производится перенос $U_{исх} \rightarrow U_{рас}$ и обнуляется вектор фазовых углов напряжений,

таким образом производится восстановление исходных напряжений. Замечание: вносить изменения (в случае необходимости) в вектор напряжения $U_{исх}$:

[] – расчет УР производится без восстановления исходных напряжений (от предыдущего режима, вносить изменения в вектор напряжений $U_{исх}$).

Использование стартового алгоритма методом Гаусса–Зейделя:

[X] – использовать;

[] – не использовать.

Учет ограничений на старте УР:

[X] – учитывать;

[] – не учитывать.

Описание параметров узлов

После выполнения директивы «Новая схема» для начала ввода данных необходимо нажать клавишу <INS>, после чего появится активная строка для ввода информации (рис. П3.3).

Название	N	Код	Uисх	Uрас	Угол	Pн0	Qн0	Unорн	Nсхн
bu	1	1100	110.00	110.000				110.0	
	2	11	330.00	341.201	-0.7	80.000	60.00	330.0	
	3	11	330.00	337.686	-1.4			330.0	
	4	11	10.50	9.983	-22.6	400.000	100.00	10.5	
	5	11	330.00	353.512	2.1			330.0	
gen	6	1010	18.00	18.000	5.0	100.000	80.00	18.0	
	7	11	110.00	107.116	-5.1			110.0	
	8	11	330.00	323.169	-5.1			330.0	

Рис. П 3.3. Внешний вид окна для ввода параметров узлов схемы

Название – название узла (до 8 символов),

N – номер данного узла, где N – любое целое число. Каждая сотня номеров условно относится к своей энергосистеме, например: номера узлов с 1 по 99 – к 1-й энергосистеме, номера узлов с 100 по 199 – ко 2-й и так далее;

Код – признаки фиксации напряжения, угла напряжения, активной и реактивной генерируемой мощности в узле. Задается одним числом, в котором «1» означает фиксацию данного параметра, «0» – данный параметр «свободен» (он определяется при решении уравнений стационарного режима. Например:

1100 – в узле зафиксированы модуль и угол напряжения, а величины $P_{нг}$ и $Q_{нг}$ определяются в результате решения уравнений установившегося режима. Таким образом, задается параметр КОД для «балансирующего» узла;

1010 – в узле зафиксированы модуль напряжения и P_G . Это наиболее типичное представление генераторного узла, причем, если во время расчета Q_G выйдет за заданные пределы $Q_{Г-мин}$ или $Q_{Гмакс}$, то модуль напряжения в узле будет изменен таким образом, чтобы Q_G осталось на ближайшем пределе;

0 – таким образом, задается параметр КОД для «чисто» нагрузочного узла;

11 – признаки фиксации P_G и Q_G в данном узле.

Примечание: параметр КОД может принимать и другие, требуемые для конкретного расчета значения, но необходимо отметить, что количество единиц в нем не должно превышать двух.

Примечание: в ходе расчета в генераторных узлах при нарушении пределов генерации реактивной мощности значение параметра КОД меняется автоматически следующим образом:

22 – значение $Q_{нг}$ фиксировано на $Q_{Гmin}$;

44 – значение $Q_{нг}$ фиксировано на $Q_{Гмакс}$.

$U_{исх}$ – модуль исходного напряжения в узле [кВ];

$U_{рас}$ – модуль расчетного напряжения в узле [кВ];

D – угол напряжения [град.];

$P_{но}$ и $Q_{но}$ – активная и реактивная нагрузки узла [МВт и Мвар, соответственно];

$U_{норм}$ – модуль нормального напряжения в узле [кВ];

$N_{сxn}$ – номера статических характеристик активной и реактивной нагрузки в узле, задаются одним числом, например: 1526 – означает характеристику номер 15 по $P_{наг}$ и номер 26 по $Q_{наг}$;

P_G и Q_G – активная и реактивная мощности генерации в узле [МВт и Мвар, соответственно];

$Q_{Гmin}$ и $Q_{Гмакс}$ – ограничения на реактивную мощность, генерируемую в узле [Мвар].

Описание параметров связей

Переход от параметров узлов к параметрам ветвей и обратно осуществляется при помощи клавиши < F3 > (рис. ПЗ.4).

bu
1	2		0.291	13.2450	8.0	-37.4	0.33500		2	5		3.000	66.4000	2.2	700.0
2	3		0.960	13.1200	0.8	136.4									
3	5		1.520	25.8400	0.9	276.8									
3	8		0.241	17.6600	4.1	-31.1									
4	8		0.093	69.0340			0.03170								
7	8		0.183	0.0000			0.33500								
9	5		0.389	17.6600	6.0	-28.0	0.05180								
6	9			0.2700											
gen															

Рис. П 3.4.– Внешний вид окна для ввода параметров ветвей схемы

I и J – номера узлов, ограничивающих ветвь. Если ветвь содержит трансформатор, то его параметры должны быть приведены к напряжению узла I , а коэффициент трансформации задается отношением U_i/U_j ;

N_n – номер параллельности для линий: если в схеме имеются параллельные линии, то им следует задавать номер, например:

< I >	< J >	< N_n >
1	2	1
1	2	2

Иначе значение N_n должно равняться 0;

R и X – продольные активное и реактивное сопротивления связи [Ом];

B и G – полные поперечные емкостная и активная проводимости связи [мкСм];

$K_{та}$ и $K_{тр}$ – продольная и поперечная составляющие комплексного коэффициента трансформации: $K = K_{та} + jK_{тр}$. Необходимо отметить, что трансформаторную ветвь необходимо записывать таким образом, чтобы $K < 0$.

Ввод вышеописанной информации об узле и связи осуществляется построчно при занесении необходимой числовой информации в соответствующие поля.

Описание параметров коэффициентов статических характеристик нагрузки (СХН) представлено на рис. П 3.5.

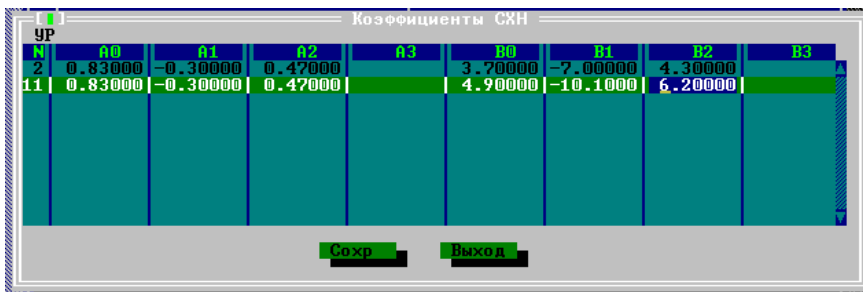


Рис. П 3.5. Внешний вид окна для ввода параметров СХН

При помощи данной директивы осуществляется ввод коэффициентов СХН для установившегося режима (УР).

Описание параметров:

N – номер статической характеристики изменения активной или реактивной мощности нагрузки, $N = 1, 2, 3, \dots, 30$;

$a_0, a_1, a_2, a_3, b_0, b_1, b_2, b_3$ – коэффициенты, используемые в выражениях

$$P_{\text{наг}} = P_{\text{норм}} [a_0 + a_1(U/U_{\text{норм}}) + a_2(U/U_{\text{норм}})^2]; \quad (\text{П } 3.1)$$

$$Q_{\text{наг}} = Q_{\text{норм}} [b_0 + b_1(U/U_{\text{норм}}) + b_2(U/U_{\text{норм}})^2]. \quad (\text{П } 3.2)$$

Примечание: параметры a_3 и b_3 не используются.

Ввод вышеописанной информации о СХН осуществляется построчно соответственно по активной и реактивной мощностям нагрузки при занесении необходимой числовой информации в соответствующие поля.

ВНИМАНИЕ! Следует иметь в виду, что номер СХН узла в таблице узлов задается одним числом, но состоящим из двух частей – для $P_{\text{н}}$ и для $Q_{\text{н}}$. Алгоритм составления номера СХН узла следующий:

$$\text{НОМЕР_СХН_УЗЛА} = \text{НОМЕР_СХН_}P_{\text{н}} * 100 + \text{НОМЕР_СХН_}Q_{\text{н}}.$$

Пример: возможные комбинации представления номера СХН узла для заданных характеристик СХН исходя из данных рис. П 3.4: 202, 211, 1111, 1102.

Для добавления новых элементов следует также использовать клавишу <INS>. При этом если маркер находится на последнем элементе, то после нажатия клавиши <INS> новый элемент ввода добавляется в конец списка.

Расчет установившегося режима

Расчет установившегося режима производится после ввода исходных данных по узлам и ветвям схемы сети. Данная директория размещена в окне УР-данные и УР-рез. После окончания расчета УР появляется информационное окно, в котором показано количество проведенных итераций, максимальный небаланс в узлах, напряжения в узлах, угол между векторами напряжения базисного и расчетного узла.

Отображение результатов расчета УР представлено на рис П 3.6, П 3.7

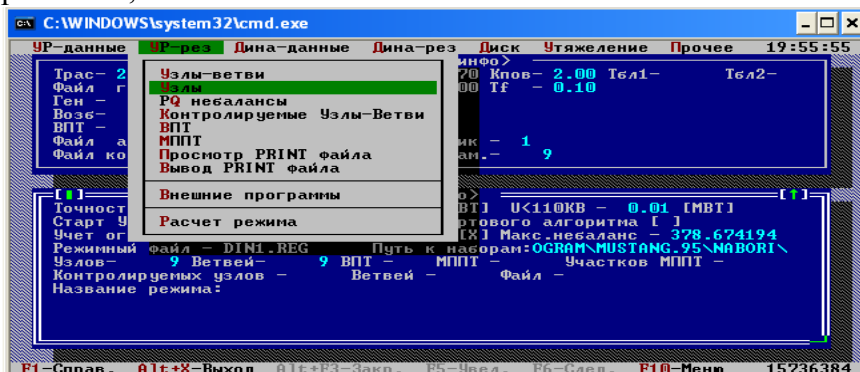


Рис. П 3.6 Внешний вид окна для вывода результатов расчета УР

Просмотр результатов расчета УР осуществляется при помощи директивы «Узлы–Ветви» или «Узлы»,

I	Название	Код J	Nn	Uрасj	Unори	Pi	Qi	Pг dP	Qг dQ	Pш + Ток
2	бу	11		328.28	330.0	80.00	60.00			
		1		110.00	110.0	-0.30	0.01	0.1	0.0	0.00
		5		328.29	330.0	-0.20	-37.74	0.2	0.0	0.07
		3		328.27	330.0	0.43	-7.19	0.1	0.0	0.01

Рис. П 3.7 Внешний вид окна вывода результатов расчета «Узлы–Ветви»

где / – номер рассматриваемого узла;

J – номер узла, ограничивающего ветвь;
 $U_{расч\ i}$ – напряжение в рассматриваемом узле;
 $U_{расч\ j}$ – напряжение в j м узле ограничивающем ветвь;
 P_n – активная нагрузка рассматриваемого узла;
 P_{ij} – активная нагрузка протекаемая по ветви;
 Q_n – реактивная нагрузка рассматриваемого узла;
 Q_{ij} – реактивная нагрузка протекаемая по ветви;
 P_r – генерируемая активная мощность рассматриваемого узла;
 dP_{ij} – потери активной мощности в ветви;
 P_r – генерируемая реактивная мощность рассматриваемого узла;
 dP_{ij} – потери реактивной мощности в ветви;
 Ток – ток, протекаемый по ветви.

Расчет динамической устойчивости

Расчет динамической устойчивости проводят после расчета УР (рис. П 3.8).

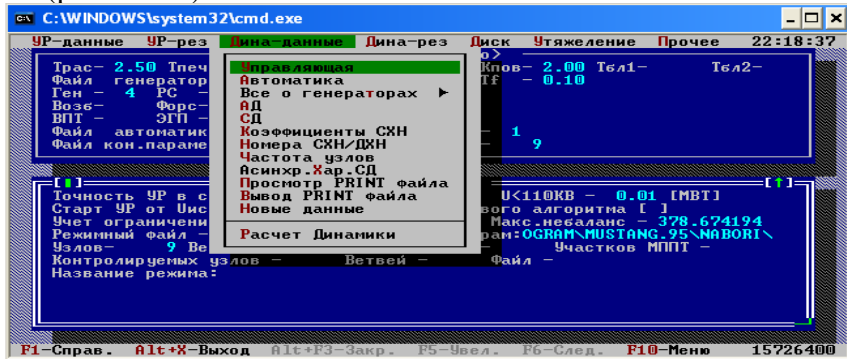


Рис. П 3.8. Внешний вид окна ввода данных для расчета динамической устойчивости

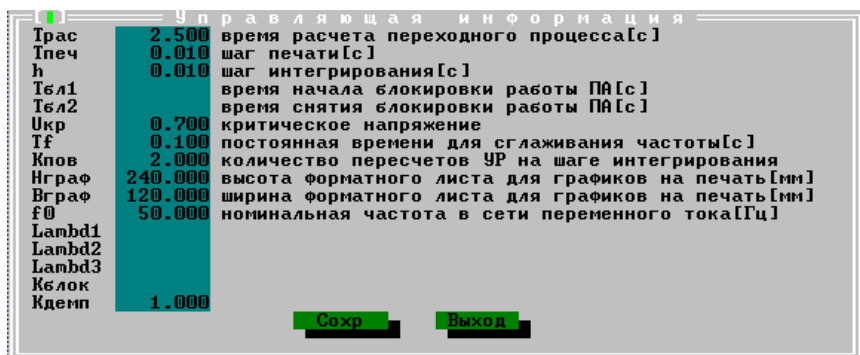


Рис. П 3.9. Внешний вид окна ввода управляющей информации

В окне директории УПРАВЛЯЮЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ предоставляется возможность редактировать некоторые параметры управления процесса расчета переходных процессов, а также получить информацию о наборах исходных данных, участвующих в расчетах.

$T_{рас}$ – время расчета переходного процесса [с];

$T_{печ}$ – интервал времени, представляющий собой частоту выдачи результатов расчета переходных процессов [с];

h – шаг интегрирования [с]. Минимальный шаг интегрирования 0,001 с, максимальный – 0,1 с. Оптимальный шаг интегрирования – 0,01 с.

Автоматика

Данная директива служит для ввода, коррекции и просмотра информации об автоматике для расчета переходных процессов.

Предлагаемая модель автоматике служит для моделирования требуемых возмущений в схеме во время расчета переходного процесса, а также для моделирования работы комплектов устройств противоаварийной автоматике.

Вся информация об автоматиках представляет из себя набор отдельных конкретных автоматик, каждая из которых содержит собственный номер, последовательно записанный набор факторов запуска, блокировки и контроля предшествующего режима (КПР) с логическими связями между ними, а

также последовательно записанный набор действий данной автоматики. Ограничений на количество автоматик, а также на количество факторов и действий в них нет, но в каждой конкретной автоматике должен присутствовать минимум один фактор запуска и одно действие.

Для ввода, коррекции и просмотра информации об автоматике предлагается универсальный табличный редактор. Ввод информации о каждой конкретной автоматике осуществляется построчно. Каждая строка информации представляет собой либо фактор запуска, блокировки или КПП, либо действие и поэтому содержит как минимум соответствующее ключевое слово (фактора или действия).

Вызова меню «факторы» осуществляется при помощи клавиши <INS>, а переход от «Факторов» к «Действию» при помощи клавиши <F10>.

На рис. П 3.10 рассмотрен алгоритм действия автоматики при возникновении и отключении короткого замыкания. Так в момент времени $T_2 = 0,2$ с на линии 2–5 со стороны узла 5 происходит возмущение в виде короткого замыкания (появляется сопротивление шунта $Z_{ш} = 0,001$ кОм). Для рассматриваемого трехфазного короткого замыкания (КЗ) сопротивление шунта незначительно. При исследовании других видов КЗ необходимо производить предварительный расчет сопротивления шунта.



Рис. П 3.10. Внешний вид окна ввода информации по действию автоматики

В момент времени $T_2 = 0,4$ с поврежденная линия отключается, и в узле 5 включается шунт с отрицательным сопротивлением $Z_{ш} = -0,001$ кОм, тем самым моделируется отключение КЗ.

На рис. П 3.11 рассмотрен алгоритм действия автоматики при возникновении и отключении короткого замыкания с успешным автоматическим повторным включением (АПВ). После отключения линии электропередач большая часть коротких замыканий самоустраняется. Спустя выдержку времени 0,25 с (в момент времени 0,65 с после начала расчета переходного процесса) АПВ включает линию.

Навт	Логика	T2	Код фактора Код действия	I	J	Nп	Уставка Парам1	T1 Парам2	Квоэвр Парам3	Zk1 +
1			ВРЕМЯ							
		0.20	ШУНТ	5				0.0010		
		0.40	ОТКЛ СВЯЗЬ	5	2					
		0.40	ШУНТ	5				-0.0010		
		0.65	ВКЛ СВЯЗЬ	5	2					

Рис. П 3.11. Внешний вид окна ввода информации по действию автоматики с успешным АПВ

Для моделирования неуспешного АПВ необходимо в автоматику приведенную на рис. П 3.11 добавить действие «отключение связи» (в момент включения линии действием АПВ, либо спустя интервал времени отключения короткого замыкания).

Генераторы

Данная директива служит для ввода, коррекции и просмотра информации о генераторах для расчета переходных процессов (рис. П3.12).

Ng	Блок	Uген	Rном	cosφ	D	Mj	Xd'	Xd	Xq	Xd' +
6		18.00	480	0.85	20.00	2400	0.142			
1		110.00					0.437			

Рис. П 3.12. Внешний вид окна ввода информации о генераторах схемы

N_r – номер генератора. N_r – любое целое число от – 1000000000 до 1000000000 (кроме нуля).

Примечание: для логического отключения информации о генераторе с номером N_r необходимо установить курсор (либо «мышкой», либо клавишами управления курсором) в любое поле строки требуемого генератора и нажать одновременно клавиши *Ctrl* и букву *D*. При этом вся строка будет выделена другим цветом. Для обратного включения генератора N снова нажать указанные выше клавиши.

Для физического удаления информации о генераторе с номером N_r необходимо установить курсор в любое поле строки требуемого генератора и нажать клавишу *Delete*. При этом вся строка будет выделена другим цветом. Для обратного включения генератора N снова нажать клавишу *Delete*.

Блок – количество работающих блоков (для блочных станций). Блок – любое целое положительное число, включая ноль. Вся последующая информация ($P_{\text{ном}}$, M_j и все сопротивления генератора) задается для одного блока.

Примечание: блок = 0 – означает то же самое, что блок = 1.

$U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение генератора [кВ];

$P_{\text{ном}}$ – номинальная мощность генератора (или одного блока, если блок > 1) [МВт]. В случае синхронного двигателя необходимо задавать $P_{\text{ном}} < 0$. В случае синхронного компенсатора (СК) на месте $P_{\text{ном}}$ ставится $S_{\text{ном}} = Q_{\text{ном}}$, здесь необходимо в качестве признака (СК) задать параметр $\cos\varphi = 0$ (т.е. номинальный коэффициент мощности равный нулю);

$\cos\varphi$ – номинальный коэффициент мощности;

D – коэффициент демпфирования [о.е.], принимается в пределах от 2 до 18;

M_j – механическая постоянная инерции генератора вместе с турбиной [МВтс]. $M_j = T_j [c] P_{\text{ном}} [МВт]$. В случае синхронного компенсатора – $M_j [МВAc]$;

$X'd$ – переходное реактивное сопротивление по продольной оси [Ом];

X_d – синхронное реактивное сопротивление по продольной оси [Ом];

X_q – синхронное реактивное сопротивление по поперечной оси [Ом];

X''_d – сверхпереходное реактивное сопротивление по продольной оси [Ом].

В комплексе «Мустанг-95» реализованы две модели синхронной машины:

1) синхронная машина моделируется постоянством ЭДС E за сопротивлением X (в случае, если $X = X'_d$, то $E = E'$);

2) синхронная машина моделируется по упрощенным уравнениям Парка–Горева.

В первом случае необходимый набор параметров реализуется следующей записью:

$$N_T \ P_{ном} \ \cos\varphi \ D \ M_j \ X'_d.$$

Во втором случае (уравнения Парка–Горева) используется весь набор параметров генератора. Запись с минимумом информации в этом случае выглядит следующим образом:

$$N_T \ P_{ном} \ \cos\varphi \ 0 \ M_j \ X'_d \ X_d \ X_q \ X''_d \ 0 \ T'd0,$$

т.е. все остальные параметры заданы нулями. В этом случае программно будут приняты следующие значения незадаваемых параметров:

если $X''_q = 0$, то принимается $X''_q = X''_d$;

если $T''d0 = 0$, то принимается $T''d0 = 0,2$ [с];

если $T''q0 = 0$, то принимается $T''q0 = 0,5$ [с];

принимается $T'd = T'd0 \ X'_d / X_d$;

принимается $T''d = T''d0 \ X''_d / X'_d$.

Отметим, что в данном случае значение коэффициента демпфирования D не играет никакой роли, т.к. этот параметр не используется в упрощенной системе уравнений Парка–Горева.

Для задания шин бесконечной мощности необходимо задать следующую информацию:

$$N_T \ X'_d.$$

Отображение результатов расчета динамической устойчивости представлено на рис. П 3.13.

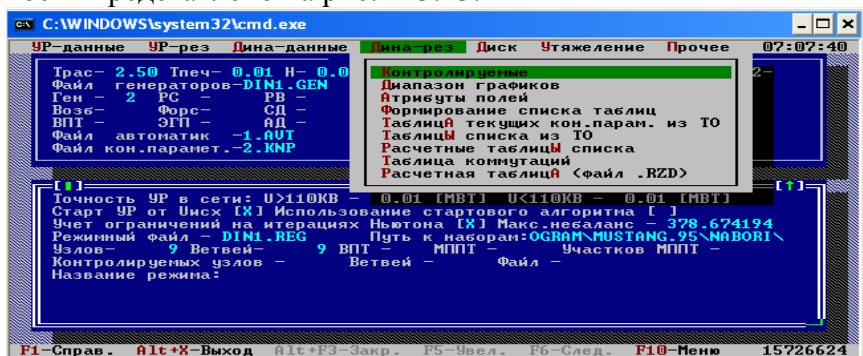


Рис. П 3.13 Внешний вид окна вывода результатов расчета динамики

Набор директив меню позволяет настроить необходимое пользователю количество выводимой информации на экран в виде таблиц или графиков.

Контролируемые параметры

Данное окно (панель диалога) служит для формирования информации о контролируемых параметрах для последующего формирования в табличном виде результатов расчета динамики, а также для отображения результатов расчета динамики в окне «Динамика–расчет» (рис. П 3.14).

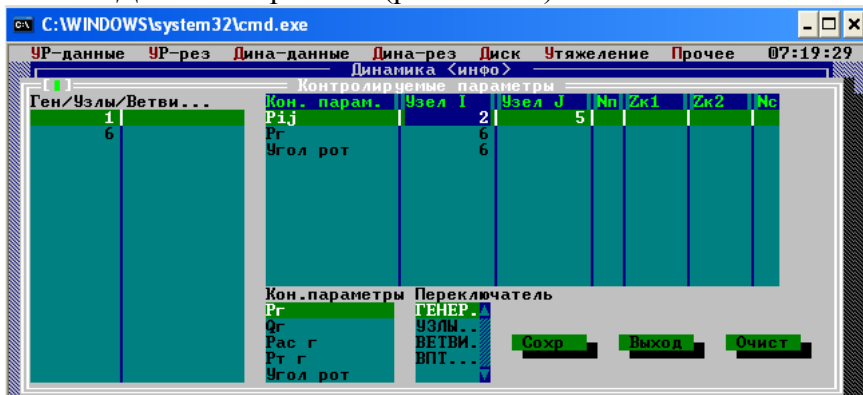


Рис. П 3.14. Внешний вид окна формирования таблицы контролируемых параметров

Количество параметров не лимитировано, но рекомендуется формировать не более 10 – 12 параметров (при выводе таблицы на принтер удобно иметь отдельную таблицу на листе).

Данное окно состоит из следующих частей: 1) в левой части находится многостраничный табличный редактор, имеющий 4 закладки: узлы (исходные данные), ветви (исходные данные), генераторы, ВПТ; 2) в правой верхней части окна находится табличный редактор, в котором формируются контролируемые параметры; 3) справа внизу имеется окно, в котором перечислены возможные типы контролируемых параметров, в зависимости от того, какая закладка (1) многостраничного табличного редактора активна: узлы (исходные данные), ветви (исходные данные), генераторы.

Один из способов формирования таблицы контролируемых параметров следующий

1. Из меню «Переключатель» выбирается необходимый элемент (генератор, узел, ветвь). При этом слева отображаются доступные контролируемые параметры.

2. После выбора нужного параметра необходимо перейти в область «ген/узлы/ветви» и выбрать номер интересующего элемента.

3. При переходе в область формируемой таблицы контролируемых параметров и нажатии клавиши <INS> новый контролируемый параметр автоматически добавится в список.

Ниже приводится перечень ключевых слов контролируемых параметров по группам – для генераторов, для узлов, для ветвей

ГЕНЕРАТОРЫ

</> <J> – номера узлов, для которых выводится информация;

P_{Γ} </> – активная мощность генератора [МВт];

Q_{Γ} </> – реактивная мощность генератора [Мвар] ;

$P_{ac\Gamma}$ <I> – асинхронная мощность генератора [МВт].

$P_{ac} = D(S_{\Gamma} - S_u)$;

$P_{T\Gamma}$ </> – механическая мощность на валу генератора [МВт];

Угол рот </>—угол ротора генератора [град];
 E_q </>—ЭДС E_q генератора [кВ];
 $E'_{q \text{ рас}}$ </>—расчетная ЭДС генератора [кВ];
 E''_d </>—ЭДС E''_d генератора [кВ];
 E''_q </>—ЭДС E''_q генератора [кВ];
 E_r </>—модуль ЭДС E' или E'' [кВ] (E' для генераторов, у которых принято $E'=\text{const}$; E'' для генераторов, у которых учитываются электромагнитные переходные процессы);
 U_p </>—напряжение на выходе регулятора возбуждения генератора [кВ];
 I_r </>—модуль тока статора генератора [кА];
 S_r </>—скольжения ротора генератора [%];
 E_{qe} </>—напряжение на выходе возбудителя генератора E_{qe} [кВ];
 Угол E_r </>—угол ЭДС E' или E'' [град.] (в зависимости от способа задания генератора);
 Угол I_r </>—угол тока статора генератора [град.];
 $W_{\text{к рот}}$ </>—кинетическая энергия относительного движения ротора [МВтс1000];
 $U_{\text{рв}}$ </>—напряжение на входе регулятора возбуждения генератора [кВ];
 I_d </>—составляющая тока статора генератора [кА];
 I_q </>—составляющая тока статора генератора I_q [кА];
 $A_{\text{рот}}$ </>—ускорение ротора генератора [Гц/с];
 Отн угол рот </> </>—относительный угол ротора генератора [град.];
 $F_{\text{рв}}$ </>—Частота в канале частоты регулятора возбуждения [Гц].

УЗЛЫ

P_n </>—активная мощность нагрузки [МВт];
 Q_n </>—реактивная мощность нагрузки [Мвар];
 $P_{\text{ш}}$ </>—активная мощность шунта [МВт];
 $Q_{\text{ш}}$ </>—реактивная мощность шунта [Мвар];
 Угол U </>—угол напряжения [град.];

Отн угол U $\langle l \rangle \langle j \rangle$ —относительный угол напряжения [град.], т.е. разность между углом напряжения в узле $\langle l \rangle$ и углом ротора генератора $\langle j \rangle$;

Разн углов U $\langle l \rangle \langle j \rangle$ —разность углов напряжений узлах $\langle l \rangle \langle j \rangle$ [град.];

U $\langle l \rangle$ —модуль напряжения в узле [кВ];

Частота $\langle l \rangle$ —расчетная частота в узле [Гц];

$S_{p ад}$ $\langle l \rangle$ —скольжение ротора асинхронного двигателя относительно синхронно вращающейся оси [%];

$S_{дв}$ $\langle l \rangle$ —скольжение ротора асинхронного двигателя относительно вектора напряжения своего узла [%];

S_U $\langle l \rangle$ —скольжение вектора напряжения [%];

$M_{тор ад}$ $\langle l \rangle$ —тормозной момент (момент сопротивления) асинхронного двигателя [о.е.];

$M_{эл ад}$ $\langle l \rangle$ —электромагнитный момент асинхронного двигателя [о.е.]

Примечание: в отн. ед. в номинальном режиме АД момент равен $\cos\varphi_{ном}$;

$I_{ша}$ $\langle l \rangle$ —активная составляющая тока шунта [КА];

$I_{шг}$ $\langle l \rangle$ —реактивная составляющая тока шунта [КА].

ВЕТВИ

P_{ij} $\langle l \rangle \langle j \rangle \langle N_p \rangle$ —переток активной мощности [МВт];

Q_{ij} $\langle l \rangle \langle j \rangle \langle N_p \rangle$ —переток реактивной мощности [Мвар];

$I_{лин}$ $\langle l \rangle \langle j \rangle \langle N_p \rangle$ —модуль токов по связи [кА];

Угол $I_{лин}$ $\langle l \rangle \langle j \rangle \langle N_p \rangle$ угол тока по связи [град.];

$Z_{лин}$ $\langle l \rangle \langle j \rangle \langle N_p \rangle$ модуль расчетного полного сопротивления от узла l в направлении связи $l-j$ [Ом];

Угол Z $\langle l \rangle \langle j \rangle \langle N_p \rangle$ угол сопротивления на связи $l-j$ [град.];

Угол реле $\langle l \rangle \langle j \rangle \langle N_p \rangle \langle Z_{к1} \rangle \langle Z_{к2} \rangle$ —угол реле [град.];

$R_{лин}$ $\langle l \rangle \langle j \rangle \langle N_p \rangle$ —активное сопротивление линии [Ом];

$X_{лин}$ $\langle l \rangle \langle j \rangle \langle N_p \rangle$ —реактивное сопротивление линии [Ом];

<Zk1> <Zk2>—минимальное и максимальное сопротивления реле.

Таблицы текущих контролируемых параметров

После формирования таблицы контролируемых параметров и расчета динамики на экране отображаются результаты расчета в виде таблиц. Для вывода результатов в файл «Colist.txt», который размещен в папке «WRK». К примеру, для добавление исходной информации по узлам схемы в текстовый файл необходимо находясь в директиве *Узлы-ветви* нажать клавишу <F8>.

Для построения графиков после «Расчета динамики» и формирования списка контролируемых параметров выбирают директиву «Диапазон графиков» (рис. П 3.15).

После выбора интересующего типа параметра и задания его диапазона изменения выбирают функциональную клавишу сохранить. Графическая зависимость изменения выбранного параметра от времени выводится на экран.

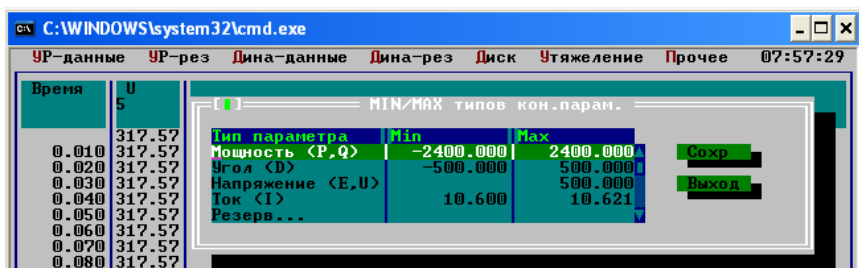


Рис. П 3.15 Внешний вид окна построения графиков

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.		3
1.	ПОДГОТОВКА СХЕМЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ РАСЧЕТОВ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ И УСТОЙЧИВОСТИ НА ПЭВМ.	5
	1.1. Формирование задания.	5
	1.2. Последовательность определения параметров электроэнергетической системы.	11
2.	ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ.	31
	2.1. Краткие теоретические сведения.	31
	2.2. Методические рекомендации к построению угловых характеристик мощности и определению коэффициентов запаса статической устойчивости по активной мощности.	34
3.	РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ.	37
	3.1. Краткие теоретические сведения.	37
	3.2. Методические рекомендации по расчетам динамической устойчивости.	40
4.	ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ УЗЛОВ НАГРУЗКИ. . .	42
	4.1. Краткие теоретические сведения.	42
	4.2. Методические рекомендации к определению критического напряжения и запаса устойчивости узла нагрузки по напряжению.	45
5.	МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОДГОТОВКЕ К ЗАЩИТЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ. . .	47
ЛИТЕРАТУРА.		49
ПРИЛОЖЕНИЯ.		50
Приложение 1. ПРОГРАММА DIS-1. ОПИСАНИЕ И ИНСТРУКЦИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЮ.		50
Приложение 2. ПРОГРАММА DIS-2. ОПИСАНИЕ И ИНСТРУКЦИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЮ.		58
Приложение 3. ПРОГРАММА Мустанг-95. ИНСТРУКЦИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ.		65

Учебное издание

КАЛЕНТИОНОК Евгений Васильевич
ФИЛИПЧИК Юрий Дмитриевич

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ЭВМ

Методическое пособие к курсовой работе по дисциплинам
«Устойчивость электроэнергетических систем»
«Переходные процессы в электроэнергетических системах»
для студентов электроэнергетических специальностей

Редактор И.Ю. Никитенко
Компьютерная верстка С.В. Бондаренко

Подписано в печать 29.03.2010.

Формат 60×84¹/₁₆. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 2,2. Уч.-изд. л. 1,7. Тираж 300. Заказ 622.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Белорусский национальный технический университет.

ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009.

Проспект Независимости, 65. 220013, Минск