

Ястребов С. С.

Методические указания к выполнению курсовой работы

по дисциплине

**«Режимы работы электрооборудования
систем электроснабжения»**

Для студентов, обучающихся по направлению подготовки –

13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Ставрополь 2025

Методические указания к выполнению курсовой работы по дисциплине «Режимы работы электрооборудования систем электроснабжения» для студентов электроэнергетического факультета, обучающихся по направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», профилю подготовки «Системы электроснабжения городов, промышленных предприятий, сельского хозяйства, и их объектов».

В методических указаниях к выполнению курсовой работы даны краткие сведения из теории, порядок выполнения курсовой работы, требуемый порядок оформления и защиты курсовой работы.

Составители: доцент кафедры электроснабжения и эксплуатации электрооборудования, кандидат физико-математических наук, доцент Ястребов С.С.

Содержание

1 Цели и задачи работы	4
2 Рекомендуемые темы курсовых работ	5
3 Требования к структуре работы с описанием требований и рекомендаций к каждому разделу.....	13
4 Список рекомендованных основных и дополнительных источников литературы.	15
5 Требования к защите работы	17
6. Критерии оценки работы.....	18
Приложение 1	19
Приложение 2	20

1 Цели и задачи работы

Цель выполнения курсовой работы по дисциплине «Режимы работы электрооборудования систем электроснабжения» заключается в приобретении навыков расчета режимов работы генераторов и нагрузок системах электроснабжения.

Задачи работы:

- Для заданной схемы системы электроснабжения составить схему замещения и привести параметры этой схемы к базисным условиям с пересчетом в относительные единицы.

- Рассчитать параметры исходного установившегося режима для трех возможных вариантов регулирования возбуждения: нерегулируемый генератор; генератор с АРВ ПД; генератор с АРВ СД и построить векторную диаграмму.

- Рассчитать пределы передаваемой мощности для трех возможных вариантов регулирования возбуждения и соответствующие коэффициенты запаса статической устойчивости.

- Выполнить приближенную оценку устойчивости динамического перехода при $E_q = \text{const}$ для заданного сценария развития аварийной ситуации.

- Выполнить уточненную оценку устойчивости динамического перехода при простейшем учете действия АРВ.

- Выполнить проверку устойчивости комплексной нагрузки, включающей в себя осветительную нагрузку и асинхронные двигатели, с применением практических критериев устойчивости комплексной нагрузки.

- Рассчитать коэффициент запаса устойчивости нагрузки определить предельное время перерыва электроснабжения нагрузки.

2 Рекомендуемые темы курсовых работ

Тема курсовой работы «Расчет режимов работы электрооборудования системы электроснабжения», задание выдается студентам индивидуально, по вариантам

Задание для выполнения курсовой работы.

Для системы электроснабжения (СЭС), приведенной на рисунке, составить схему замещения и привести параметры этой схемы к базисным условиям с пересчетом в относительные единицы. Рассчитать параметры исходного установившегося режима для трех возможных вариантов регулирования возбуждения: нерегулируемый генератор; генератор с АРВ ПД; генератор с АРВ СД и построить векторную диаграмму. Рассчитать пределы передаваемой мощности для трех возможных вариантов регулирования возбуждения и соответствующие коэффициенты запаса статической устойчивости. Выполнить приближенную оценку устойчивости динамического перехода при $E_q = \text{const}$ для заданного сценария развития аварийной ситуации. Выполнить уточненную оценку устойчивости динамического перехода при простейшем учете действия АРВ. Выполнить уточненную оценку устойчивости динамического перехода – с учетом действия АРВ. Для проверки устойчивости комплексной нагрузки, включающей в себя осветительную нагрузку и асинхронные двигатели, построить зависимости $E_{\text{экв}} = f(U)$ и $Q_{\text{экв}} = f(E_{\text{экв}})$, воспользоваться практическими критериями устойчивости комплексной нагрузки. Рассчитать коэффициент запаса устойчивости нагрузки для следующих случаев: 1) выключатель Q3 включен; 2) выключатель Q3 отключен, генератор не имеет АРВ; 3) выключатель Q3 отключен, на генераторе установлено АРВ ПД; 4) выключатель Q3 отключен, на генераторе – АРВ СД. При питании нагрузки только от системы неограниченной мощности определить предельное время перерыва электроснабжения при отключении выключателя Q3.

Задание выполняется по вариантам, которые приведены в таблицах 2-6.

При расчетах принять следующее:

1. Принять в качестве независимых базисных величин $S_{ген.ном}=S_b$ и $U_{ном.линии}=U_b$. Приведение к базисным условиям выполнить приближенное - по средним коэффициентам трансформации.
2. Гидрогенераторы принять явнополюсными.
3. Расчеты динамической устойчивости выполнить с использованием сопротивления шунта в месте КЗ (таблица 1), Кратность форсировки возбуждения принять $k_{форс}=2,5$.

Таблица 1

Вид к.з.	Обозначение к.з.	Формула для определения аварийного шунта
Трехфазное	$K^{(3)}$	$X_{ш}^{(3)} = 0$
Двухфазное	$K^{(2)}$	$X_{ш}^{(2)} = X_{экв.о.п}$
Однофазное	$K^{(1)}$	$X_{ш}^{(1)} = X_{экв.о.п} + X_{экв.н.п.}$
Двухфазное на землю	$K^{(1,1)}$	$X_{ш}^{(1,1)} = (X_{экв.о.п} \cdot X_{экв.н.п.}) / (X_{экв.о.п} + X_{экв.н.п.})$

4. При расчетах устойчивости нагрузки принять $X_{сист}=0,15$ о.е. и характеристику типовой нагрузки (таблица 2)

Таблица 2

U _{нагр} , о.е.	1,0	0,95	0,9	0,85	0,8	0,75	0,7
P _{нагр} , о.е.	1,0	0,969	0,941	0,916	0,893	0,872	0,855
Q _{нагр} , о.е.	1,0	0,93	0,885	0,858	0,844	0,848	0,880



Генератор										
Вариант	Тип	Sном, МВА	nГ	X _d	X _q	X' _d	X ₂	T _J с	T _{do} , с	T _e , с
1	ТГ	40	4	2,45	-	0,24	0,17	6,0	10,4	0,15
2	ТГ	75	4	1,6	-	0,28	0,24	7,4	4,9	0,12
3	ТГ	117,5	3	1,78	-	0,26	0,22	7,0	6,4	0,4
4	ТГ	125	3	1,91	-	0,278	0,234	10,0	6,4	0,25
5	ТГ	188	3	1,7	-	0,3	0,26	5,0	5,4	0,1
6	ТГ	235	3	1,88	-	0,27	0,23	8,0	6,38	0,3
7	ТГ	260	2	2,32	-	0,3	0,25	6,5	5,0	0,15
8	ТГ	350	2	2,2	-	0,3	0,245	9,0	7,0	0,08
9	ТГ	353	2	2,19	-	0,3	0,24	8,5	6,5	0,12
10	ТГ	588	2	2,48	-	0,4	0,33	12,0	6,7	0,2
11	ГГ	71,5	4	0,77	0,46	0,32	0,3	4,0	9,2	0,1
12	ГГ	80,0	4	1,06	0,64	0,26	0,2	4,4	7,6	0,3
13	ГГ	85,0	4	1,23	0,74	0,34	0,26	5,0	5,2	0,22
14	ГГ	100	4	0,87	0,53	0,22	0,25	6,0	6,7	0,37
15	ГГ	130	4	1,05	0,63	0,32	0,3	7,0	8,1	0,12
16	ГГ	190	3	1,1	0,66	0,38	0,35	7,5	6,0	0,4
17	ГГ	180	3	0,73	0,44	0,29	0,3	6,0	5,0	0,2
18	ГГ	206	3	1,02	0,61	0,33	0,2	7,8	4,8	0,4
19	ГГ	306	2	1,65	1,02	0,44	0,28	10,0	5,2	0,15
20	ГГ	590	2	1,57	0,97	0,41	0,19	8,0	4,1	0,25

Трансформаторы								Линия		
Т1				Т2						
Вариант	SNOM, MBA	Uк, %	Группа соед.	MBA	%	Группа соед.	k T2	L, км	и . нам 'кВ	Ом/км
1	40	10,5	Δ/Y ₀	2x125	14,0	Y ₀ /Y ₀	110/220	60	110	0,4
2	80	10,5	Δ/Y ₀	2x125	14,0	Y ₀ /Y ₀	110/220	75	110	0,4

3	125	11,0	Δ/Y_0	2x200	11,5	Y_0/Y_0	110/220	80	110	0,4
4	125	11,0	Δ/Y_0	2x200	11,5	Y_0/Y_0	110/220	100	110	0,4
5	200	11,0	Δ/Y_0	2x250	11,5	Y_0/Y_0	220/500	70	220	0,4
6	250	11,0	Δ/Y_0	3x250	11,5	Y_0/Y_0	220/500	60	220	0,4
7	400	13,0	Δ/Y_0	3x250	11,5	Y_0/Y_0	220/500	150	220	0,4
8	400	13,0	Δ/Y_0	3x250	11,5	Y_0/Y_0	220/500	120	220	0,4
9	400	13,0	Δ/Y_0	3x250	11,5	Y_0/Y_0	330/750	200	330	0,38
10	630	13,0	Δ/Y_0	4x250	11,5	Y_0/Y_0	330/750	225	330	0,38
11	80	10,5	Δ/Y_0	2x200	11,5	Y_0/Y_0	110/220	50	110	0,4
12	80	10,5	Δ/Y_0	2x200	11,5	Y_0/Y_0	110/220	60	110	0,4
13	125	11,0	Δ/Y_0	2x200	11,5	Y_0/Y_0	110/220	40	110	0,4
14	125	11,0	Δ/Y_0	2x200	11,5	Y_0/Y_0	110/220	55	110	0,4
15	160	11,0	Δ/Y_0	3x200	11,5	Y_0/Y_0	220/500	70	220	0,4
16	200	11,0	Δ/Y_0	3x200	11,5	Y_0/Y_0	220/500	120	220	0,4
17	200	11,0	Δ/Y_0	3x200	11,5	Y_0/Y_0	220/500	110	220	0,4
18	250	11,0	Δ/Y_0	3x250	11,5	Y_0/Y_0	220/500	150	220	0,4
19	400	13,0	Δ/Y_0	3x250	11,5	Y_0/Y_0	330/750	180	330	0,38
20	630	13,0	Δ/Y_0	5x250	11,5	Y_0/Y_0	330/750	200	330	0,38

Таблица 5

Мощность, передаваемая в систему					Напряжение системы
Вариант	P_n , МВт	$\cos\varphi$	Скольжение, S_0	T_J , с	U_C , кВ
1	90	0,81	0,035	2	220
2	150	0,83	0,03	6	220
3	160	0,82	0,032	4	220
4	170	0,84	0,025	8	220
5	180	0,85	0,022	7	500
6	200	0,78	0,02	9	500
7	220	0,79	0,018	10	500
8	250	0,80	0,017	6	500
9	400	0,77	0,02	5	750
10	700	0,76	0,021	8	750
11	120	0,81	0,035	2	220
12	150	0,83	0,03	6	220
13	160	0,82	0,032	4	220
14	170	0,84	0,025	8	220
15	180	0,85	0,022	7	500
16	200	0,78	0,02	9	500
17	220	0,79	0,018	10	500
18	250	0,80	0,017	6	500
19	400	0,77	0,02	5	750
20	800	0,76	0,021	8	750

Таблица 6

Вариант	Алгоритм развития аварии
1	2
A1	В точке К2 - трехфазное к.з., сопровождающееся отказом основной защиты – поперечной дифференциальной - с обеих сторон линии. В результате выключатель Q1 (со стороны Т1) отключен первой ступенью дистанционной защиты: $t_{сз}=0$ с, $t_{ов}=0,1$ с выключатель Q2 (со стороны Т2) - второй ступенью дистанционной защиты: $t_{сз}=0,05$ с, $t_{ов}=0,1$ с, АПВ с контролем отсутствия напряжения - на Q2, $t_{АПВ}=0,15$ с, $t_{вв}=0,05$ с. АПВ с контролем наличия напряжения - на Q1, $t_{АПВ}=0,1$ с, $t_{вв}=0,05$ с. АПВ - успешное.
A2	В точке К2 - двухфазное к.з., сопровождающееся отказом основной защиты – поперечной дифференциальной - с обеих сторон линии. В результате выключатель Q1 (со стороны Т1) отключен первой ступенью дистанционной защиты: $t_{сз}=0$ с, $t_{ов}=0,1$ с выключатель Q2 (со стороны Т2) - второй ступенью дистанционной защиты: $t_{сз}=0,05$ с, $t_{ов}=0,1$ с, АПВ с контролем отсутствия напряжения - на Q2, $t_{АПВ}=0,15$ с, $t_{вв}=0,05$ с. АПВ с контролем наличия напряжения - на Q1, $t_{АПВ}=0,1$ с, $t_{вв}=0,05$ с. АПВ - неуспешное.
A3	В точке К4 - трехфазное к.з., сопровождающееся отказом основной защиты – поперечной дифференциальной - с обеих сторон линии. В результате выключатель Q2 (со стороны Т2) отключен первой ступенью дистанционной защиты: $t_{сз}=0$ с, $t_{ов}=0,1$ с выключатель Q1 (со стороны Т1) - второй ступенью дистанционной защиты: $t_{сз}=0,05$ с, $t_{ов}=0,1$ с, АПВ с контролем отсутствия напряжения - на Q2, $t_{АПВ}=0,15$ с, $t_{вв}=0,05$ с. АПВ с контролем наличия напряжения - на Q1, $t_{АПВ}=0,1$ с, $t_{вв}=0,05$ с. АПВ - успешное.
A4	В точке К4 - однофазное к.з., сопровождающееся отказом основной защиты – поперечной дифференциальной - с обеих сторон линии. В результате выключатель Q2 (со стороны Т2) отключен первой ступенью дистанционной защиты: $t_{сз}=0$ с, $t_{ов}=0,1$ с выключатель Q1 (со стороны Т1) - второй ступенью дистанционной защиты: $t_{сз}=0,05$ с, $t_{ов}=0,1$ с, АПВ с контролем отсутствия напряжения - на Q1, $t_{АПВ}=0,15$ с, $t_{вв}=0,05$ с. АПВ с контролем наличия напряжения - на Q2, $t_{АПВ}=0,1$ с, $t_{вв}=0,05$ с. АПВ - неуспешное.
A5	В точке К3 на расстоянии $a=0,5l_2$ работает основная защита – поперечная диффзащита с обеих сторон линии. В результате выключатель Q1 (со стороны Т1) отключен: $t_{сз}=0$ с, $t_{ов}=0,1$ с выключатель Q2 (со стороны Т2): $t_{сз}=0$ с, $t_{ов}=0,1$ с, АПВ с контролем отсутствия напряжения - на Q2, $t_{АПВ}=0,15$ с, $t_{вв}=0,05$ с. АПВ с контролем наличия напряжения - на Q1, $t_{АПВ}=0,1$ с, $t_{вв}=0,05$ с. АПВ - успешное.
A6	В начале линии, находящейся под охранным напряжением, в точке К1 – двухфазное к.з. ($b=0$) Выключатель линии отключен первой ступенью дистанционной защиты: $t_{сз}=0$, $t_{ов}=0,1$ с; Сработало АПВ: $t_{АПВ}=0,15$ с, $t_{вв}=0,05$ с. АПВ – неуспешное.. после АПВ к.з. переросло в трехфазное, работа защит - аналогичная.
A7	В точке К2 – двухфазное к.з., сопровождающееся временным отказом основной защиты – поперечной дифференциальной – на дальнем конце линии (к.з. - в зоне каскадного действия защиты). В результате выключатель Q1 (со стороны Т1) отключен основной защитой: $t_{сз}=0$, $t_{ов}=0,1$ с; выключатель Q2 (со стороны Т2) – также основной защитой, но. только после отключения Q1: $t_{сз}=0$ с, $t_{ов}=0,1$ с. АПВ с контролем отсутствия напряжения - на Q2, $t_{АПВ}=0,1$ с, $t_{вв}=0,05$ с. АПВ с контролем наличия напряжения - на Q1, $t_{АПВ}=0,1$ с, $t_{вв}=0,05$ с. АПВ – успешное.
A8	В точке К4 – двухфазное к.з., сопровождающееся временным отказом основной защиты – поперечной дифференциальной – на ближнем конце линии (к.з. - в зоне каскадного действия защиты). В результате выключатель Q2 (со стороны Т2)

Вариант	Алгоритм развития аварии
1	2
	отключен основной защитой: $t_{сз}=0$, $t_{ов}=0,1с$; выключатель Q1(со стороны Т1) – также основной защитой, но только после отключения Q2: $t_{сз}=0с$, $t_{ов}=0,1с$. АПВ с контролем отсутствия напряжения - на Q1, $t_{АПВ}=0,1с$, $t_{вв}=0,05с$. АПВ с контролем наличия напряжения - на Q2, $t_{АПВ}=0,1с$, $t_{вв}=0,05с$. АПВ – успешное.
A9	В точке К4 – двухфазное к.з., сопровождающееся временным отказом основной защиты – поперечной дифференциальной – на ближнем конце линии (к.з. - в зоне каскадного действия защиты). В результате выключатель Q2 (со стороны Т2) отключен основной защитой: $t_{сз}=0$, $t_{ов}=0,1с$; выключатель Q1 (со стороны Т1) – также основной защитой, но только после отключения Q2: $t_{сз}=0с$, $t_{ов}=0,1с$. АПВ с контролем отсутствия напряжения - на Q2, $t_{АПВ}=0,1с$, $t_{вв}=0,05с$. АПВ с контролем наличия напряжения - на Q1, $t_{АПВ}=0,1с$, $t_{вв}=0,05с$. АПВ – успешное.
A10	В точке К4 – двухфазное к.з., сопровождающееся временным отказом основной защиты – поперечной дифференциальной – на ближнем конце линии (к.з. - в зоне каскадного действия защиты). В результате выключатель Q2 (со стороны Т2) отключен основной защитой: $t_{сз}=0$, $t_{ов}=0,1с$; выключатель Q1 (со стороны Т1) – также основной защитой, но только после отключения Q2: $t_{сз}=0с$, $t_{ов}=0,1с$. АПВ с контролем отсутствия напряжения - на Q2, $t_{АПВ}=0,1с$, $t_{вв}=0,05с$. АПВ с контролем наличия напряжения - на Q1, $t_{АПВ}=0,1с$, $t_{вв}=0,05с$. АПВ – неуспешное.
A11	В точке К3, на расстоянии $a=0,3$ л Л2 от шин станции – двухфазное к.з. Работает основная защита – поперечная дифференциальная – с обеих сторон линии. В результате выключатель Q1 (со стороны Т1) отключен: $t_{сз}=0$, $t_{ов}=0,15с$; выключатель Q2 (со стороны Т2): $t_{сз}=0с$, $t_{ов}=0,1с$. АПВ с контролем отсутствия напряжения - на Q1, $t_{АПВ}=0,15с$, $t_{вв}=0,05с$. АПВ с контролем наличия напряжения - на Q2, $t_{АПВ}=0,1с$, $t_{вв}=0,05с$. АПВ – успешное.
A12	В точке К3, на расстоянии $a=0,7$ л Л2 от шин станции – двухфазное к.з. Работает основная защита – поперечная дифференциальная – с обеих сторон линии. В результате выключатель Q1 (со стороны Т1) отключен: $t_{сз}=0$, $t_{ов}=0,15с$; выключатель Q2 (со стороны Т2): $t_{сз}=0с$, $t_{ов}=0,1с$. АПВ с контролем отсутствия напряжения - на Q1, $t_{АПВ}=0,15с$, $t_{вв}=0,05с$. АПВ с контролем наличия напряжения - на Q2 $t_{АПВ}=0,1с$, $t_{вв}=0,05с$. АПВ – неуспешное.
A13	В точке К1, на расстоянии $b=0,2$ л Л2 от шин станции – однофазное к.з. Выключатель линии отключен первой ступенью ТЗНП: $t_{сз}=0$, $t_{ов}=0,1с$; Сработало АПВ: $t_{АПВ}=0,2с$, $t_{вв}=0,05с$. АПВ – неуспешное, после к.з. переросло в двухфазное на землю, работа защит - аналогичная.
A14	В точке К2 – однофазное к.з. Выключатель Q1 (со стороны Т1) отключен первой ступенью ТЗНП: $t_{сз}=0$, $t_{ов}=0,1с$; выключатель Q2 (со стороны Т2) – второй ступенью ТЗНП: $t_{сз}=0,05с$, $t_{ов}=0,1с$. АПВ с контролем отсутствия напряжения - на Q2, $t_{АПВ}=0,15с$, $t_{вв}=0,05с$. АПВ с контролем наличия напряжения - на Q1, $t_{АПВ}=0,1с$, $t_{вв}=0,05с$. АПВ – успешное.
A15	В точке К4 – однофазное к.з., сопровождающееся отказом основной защиты – поперечной дифференциальной – с обеих сторон линии. В результате выключатель Q2 (со стороны Т2) отключен первой ступенью ТЗНП: $t_{сз}=0$, $t_{ов}=0,1с$; выключатель Q1 (со стороны Т1) – второй ступенью ТЗНП: $t_{сз}=0,05с$, $t_{ов}=0,1с$. АПВ с контролем отсутствия напряжения - на Q1, $t_{АПВ}=0,1с$, $t_{вв}=0,05с$. АПВ с

Вариант	Алгоритм развития аварии
1	2
	контролем наличия напряжения - на Q2, $t_{АПВ} = 0,1с$, $t_{вв} = 0,05с$. АПВ – неуспешное. После АПВ работа защиты – аналогичная.
A16	В точке КЗ, на расстоянии $a = 0,6 \text{ ЛЛ2}$ от шин станции – однофазное к.з. Работает основная защита – поперечная дифференциальная – с обеих сторон линии. В результате выключатель Q1 (со стороны Т1) отключен: $t_{сз} = 0$, $t_{ов} = 0,1с$; выключатель Q2 (со стороны Т2): $t_{сз} = 0с$, $t_{ов} = 0,15с$. АПВ с контролем отсутствия напряжения - на Q2, $t_{АПВ} = 0,15с$, $t_{вв} = 0,05с$. АПВ с контролем наличия напряжения - на Q1, $t_{АПВ} = 0,1с$, $t_{вв} = 0,05с$. АПВ – успешное.
A17	В точке К1, на расстоянии $b = 0,35 \text{ ЛЛ2}$ от шин станции – однофазное к.з. Выключатель линии отключен первой ступенью ТЗНП: $t_{сз} = 0$, $t_{ов} = 0,1с$; Сработало АПВ: $t_{АПВ} = 0,2с$, $t_{вв} = 0,05с$. АПВ – неуспешное, после АПВ к.з. переросло в двухфазное на землю, работа защит - аналогичная.
A18	В точке КЗ, на расстоянии $a = 0,38 \text{ ЛЛ2}$ от шин станции – однофазное к.з. Работает основная защита – поперечная дифференциальная – с обеих сторон линии. В результате выключатель Q1 (со стороны Т1) отключен: $t_{сз} = 0$, $t_{ов} = 0,1с$; выключатель Q2 (со стороны Т2): $t_{сз} = 0с$, $t_{ов} = 0,15с$. АПВ с контролем отсутствия напряжения - на Q2, $t_{АПВ} = 0,15с$, $t_{вв} = 0,05с$. АПВ с контролем наличия напряжения - на Q1, $t_{АПВ} = 0,1с$, $t_{вв} = 0,05с$. АПВ – неуспешное.
A19	В точке К2 – трехфазное к.з., сопровождающееся отказом основной защиты – поперечной дифференциальной – с обеих сторон линии. В результате выключатель Q1 (со стороны Т1) отключен первой ступенью дистанционной защиты: $t_{сз} = 0$, $t_{ов} = 0,1с$; выключатель Q2 (со стороны Т2) – второй ступенью дистанционной защиты: $t_{сз} = 0,05с$, $t_{ов} = 0,1с$. АПВ с контролем отсутствия напряжения - на Q2, $t_{АПВ} = 0,15с$, $t_{вв} = 0,05с$. АПВ с контролем наличия напряжения - на Q1, $t_{АПВ} = 0,1с$, $t_{вв} = 0,05с$. АПВ – успешное.
A20	В точке К2 – двухфазное к.з. на землю, сопровождающееся отказом основной защиты – поперечной дифференциальной – с обеих сторон линии. В результате выключатель Q1 (со стороны Т1) отключен первой ступенью дистанционной защиты: $t_{сз} = 0$, $t_{ов} = 0,1с$; выключатель Q2 (со стороны Т2) – второй ступенью дистанционной защиты: $t_{сз} = 0,05с$, $t_{ов} = 0,1с$. АПВ с контролем отсутствия напряжения - на Q2, $t_{АПВ} = 0,15с$, $t_{вв} = 0,05с$. АПВ с контролем наличия напряжения - на Q1, $t_{АПВ} = 0,1с$, $t_{вв} = 0,05с$. АПВ – неуспешное.
A21	В точке К4 – трехфазное к.з., сопровождающееся отказом основной защиты – поперечной дифференциальной – с обеих сторон линии. В результате выключатель Q2 (со стороны Т2) отключен первой ступенью дистанционной защиты: $t_{сз} = 0$, $t_{ов} = 0,1с$; выключатель Q1 (со стороны Т1) – второй ступенью дистанционной защиты: $t_{сз} = 0,05с$, $t_{ов} = 0,1с$. АПВ с контролем отсутствия напряжения - на Q1, $t_{АПВ} = 0,15с$, $t_{вв} = 0,05с$. АПВ с контролем наличия напряжения - на Q2, $t_{АПВ} = 0,1с$, $t_{вв} = 0,05с$. АПВ – успешное.
A22	В точке К4 – однофазное к.з., сопровождающееся отказом основной защиты – поперечной дифференциальной – с обеих сторон линии. В результате выключатель Q2 (со стороны Т2) отключен первой ступенью ТЗНП: $t_{сз} = 0$, $t_{ов} = 0,1с$; выключатель Q1 (со стороны Т1) – второй ступенью ТЗНП: $t_{сз} = 0,05с$, $t_{ов} = 0,1с$. АПВ с контролем отсутствия напряжения - на Q1, $t_{АПВ} = 0,15с$, $t_{вв} = 0,05с$. АПВ с

Вариант	Алгоритм развития аварии
1	2
	контролем наличия напряжения - на Q2, $t_{АПВ} = 0,1с$, $t_{вв} = 0,05с$. АПВ – неуспешное.
A23	В точке К3, на расстоянии $a = 0,55$ л Л2 от шин станции – трехфазное к.з. Работает основная защита – поперечная дифференциальная – с обеих сторон линии. В результате выключатель Q1 (со стороны Т1) отключен: $t_{сз} = 0$, $t_{ов} = 0,1с$; выключатель Q2 (со стороны Т2): $t_{сз} = 0с$, $t_{ов} = 0,15с$. АПВ с контролем отсутствия напряжения - на Q2 $t_{АПВ} = 0,15с$, $t_{вв} = 0,05с$. АПВ с контролем наличия напряжения - на Q1, $t_{АПВ} = 0,1с$, $t_{вв} = 0,05с$. АПВ – успешное.
A24	В точке К1, на расстоянии $b = 0,25$ л Л2 от шин станции – двухфазное к.з. Выключатель линии отключен первой ступенью дистанционной защиты: $t_{сз} = 0$, $t_{ов} = 0,1с$; Сработало АПВ: $t_{АПВ} = 0,15с$, $t_{вв} = 0,05с$. АПВ – неуспешное, после АПВ к.з. переросло в трехфазное, работа защит - аналогичная. Как изменится развитие переходного процесса, если спустя 0,1с после аварии произойдет отключение части генераторов (25% от активной мощности нагрузки)?
A25	В точке К2 – двухфазное к.з., сопровождающееся временным отказом основной защиты – поперечной дифференциальной – на дальнем конце линии (к.з. - в зоне каскадного действия защиты). В результате выключатель Q1 (со стороны Т1) отключен основной защитой: $t_{сз} = 0$, $t_{ов} = 0,1с$; выключатель Q2 (со стороны Т2) – также основной защитой, но только после отключения Q1: $t_{сз} = 0с$, $t_{ов} = 0,1с$. АПВ с контролем отсутствия напряжения - на Q2, $t_{АПВ} = 0,1с$, $t_{вв} = 0,05с$. АПВ с контролем наличия напряжения - на Q1, $t_{АПВ} = 0,1с$, $t_{вв} = 0,05с$. АПВ – успешное.
A26	В точке К4 – двухфазное к.з., сопровождающееся временным отказом основной защиты – поперечной дифференциальной – на ближнем конце линии (к.з. - в зоне каскадного действия защиты). В результате выключатель Q2 (со стороны Т2) отключен основной защитой: $t_{сз} = 0$, $t_{ов} = 0,1с$; выключатель Q1 (со стороны Т1) – также основной защитой, но только после отключения Q2: $t_{сз} = 0с$, $t_{ов} = 0,1с$. АПВ с контролем отсутствия напряжения - на Q1, $t_{АПВ} = 0,1с$, $t_{вв} = 0,05с$. АПВ с контролем наличия напряжения - на Q2, $t_{АПВ} = 0,1с$, $t_{вв} = 0,05с$. АПВ – успешное.
A27	В точке К4 – двухфазное к.з., сопровождающееся временным отказом основной защиты – поперечной дифференциальной – на ближнем конце линии (к.з. - в зоне каскадного действия защиты). В результате выключатель Q2 (со стороны Т2) отключен основной защитой: $t_{сз} = 0$, $t_{ов} = 0,1с$; выключатель Q1 (со стороны Т1) – также основной защитой, но только после отключения Q2: $t_{сз} = 0с$, $t_{ов} = 0,1с$. АПВ с контролем отсутствия напряжения - на Q2, $t_{АПВ} = 0,1с$, $t_{вв} = 0,05с$. АПВ с контролем наличия напряжения - на Q1, $t_{АПВ} = 0,1с$, $t_{вв} = 0,05с$. АПВ – успешное.
A28	В точке К4 – двухфазное к.з., сопровождающееся временным отказом основной защиты – поперечной дифференциальной – на ближнем конце линии (к.з. - в зоне каскадного действия защиты). В результате выключатель Q2 (со стороны Т2) отключен основной защитой: $t_{сз} = 0$, $t_{ов} = 0,1с$; выключатель Q1 (со стороны Т1) – также основной защитой, но только после отключения Q2: $t_{сз} = 0с$, $t_{ов} = 0,1с$. АПВ с контролем отсутствия напряжения - на Q1, $t_{АПВ} = 0,1с$, $t_{вв} = 0,05с$. АПВ с контролем наличия напряжения - на Q2, $t_{АПВ} = 0,1с$, $t_{вв} = 0,05с$. АПВ – неуспешное.
A29	В точке К3, на расстоянии $a = 0,6$ л Л2 от шин станции – двухфазное к.з. Работает основная защита – поперечная дифференциальная – с обеих сторон линии. В результате выключатель Q1 (со стороны Т1) отключен: $t_{сз} = 0$, $t_{ов} = 0,15с$; выключатель Q2 (со стороны Т2): $t_{сз} = 0с$, $t_{ов} = 0,1с$. АПВ с контролем отсутствия

Вариант	Алгоритм развития аварии
1	2
	напряжения - на Q1. $t_{АПВ} = 0,15с$, $t_{вв} = 0,05с$. АПВ с контролем наличия напряжения - на Q2, $t_{АПВ} = 0,1с$, $t_{вв} = 0,05с$. АПВ – успешное.
A30	В точке К3, на расстоянии $a = 0,4$ л Л2 от шин станции – двухфазное к.з. Работает основная защита – поперечная дифференциальная – с обеих сторон линии. В результате выключатель Q1 (со стороны Т1) отключен: $t_{сз} = 0$, $t_{ов} = 0,15с$; выключатель Q2 (со стороны Т2): $t_{сз} = 0с$, $t_{ов} = 0,1с$. АПВ с контролем отсутствия напряжения - на Q1, $t_{АПВ} = 0,15с$, $t_{вв} = 0,05с$. АПВ с контролем наличия напряжения - на Q2, $t_{АПВ} = 0,1с$, $t_{вв} = 0,05с$. АПВ – успешное.
A31	В точке К1, на расстоянии $b = 0,65$ л Л2 от шин станции – однофазное к.з. Выключатель линии отключен второй ступенью ТЗНП: $t_{сз} = 0,05$, $t_{ов} = 0,1с$; Сработало АПВ: $t_{АПВ} = 0,25с$, $t_{вв} = 0,05с$. АПВ – успешное, после АПВ к.з. переросло в двухфазное на землю, работа защит - аналогичная.
A32	В точке К2 – однофазное к.з. Выключатель Q1 (со стороны Т1) отключен первой ступенью ТЗНП: $t_{сз} = 0$, $t_{ов} = 0,1с$; выключатель Q2 (со стороны Т2) – второй ступенью ТЗНП: $t_{сз} = 0,05с$, $t_{ов} = 0,1с$. АПВ с контролем отсутствия напряжения - на Q2, $t_{АПВ} = 0,15с$, $t_{вв} = 0,05с$. АПВ с контролем наличия напряжения - на Q1, $t_{АПВ} = 0,1с$, $t_{вв} = 0,05с$. АПВ – успешное.
A33	В точке К4 – однофазное к.з., сопровождающееся отказом основной защиты – поперечной дифференциальной – с обеих сторон линии. В результате выключатель Q2 (со стороны Т2) отключен первой ступенью ТЗНП: $t_{сз} = 0$, $t_{ов} = 0,1с$; выключатель Q1 (со стороны Т1) – второй ступенью ТЗНП: $t_{сз} = 0,05с$, $t_{ов} = 0,1с$. АПВ с контролем отсутствия напряжения - на Q1, $t_{АПВ} = 0,1с$, $t_{вв} = 0,05с$. АПВ с контролем наличия напряжения - на Q2, $t_{АПВ} = 0,1с$, $t_{вв} = 0,05с$. АПВ – успешное. После АПВ развитие аварии – аналогичное.
A34	В точке К3, на расстоянии $a = 0,45$ л Л2 от шин станции – однофазное к.з. Работает основная защита – поперечная дифференциальная – с обеих сторон линии. В результате выключатель Q1 (со стороны Т1) отключен: $t_{сз} = 0$, $t_{ов} = 0,1с$; выключатель Q2 (со стороны Т2): $t_{сз} = 0с$, $t_{ов} = 0,15с$. АПВ с контролем отсутствия напряжения - на Q2, $t_{АПВ} = 0,15с$, $t_{вв} = 0,05с$. АПВ с контролем наличия напряжения - на Q1, $t_{АПВ} = 0,1с$, $t_{вв} = 0,05с$. АПВ – успешное.
A35	В точке К1, на расстоянии $b = 0,75$ л Л2 от шин станции – двухфазное к.з. Выключатель линии отключен второй ступенью дистанционной защиты: $t_{сз} = 0,05$, $t_{ов} = 0,1с$; Сработало АПВ: $t_{АПВ} = 0,25с$, $t_{вв} = 0,05с$. АПВ – успешное, после АПВ к.з. переросло в трехфазное, работа защит - аналогичная.
A36	В точке К3, на расстоянии $a = 0,5$ л Л2 от шин станции – однофазное к.з. Работает основная защита – поперечная дифференциальная – с обеих сторон линии. В результате выключатель Q1 (со стороны Т1) отключен: $t_{сз} = 0$, $t_{ов} = 0,1с$; выключатель Q2 (со стороны Т2): $t_{сз} = 0с$, $t_{ов} = 0,15с$. АПВ с контролем отсутствия напряжения - на Q2 $t_{АПВ} = 0,15с$, $t_{вв} = 0,05с$. АПВ с контролем наличия напряжения - на Q1, $t_{АПВ} = 0,15с$, $t_{вв} = 0,05с$. АПВ – успешное.

3 Требования к структуре работы с описанием требований и рекомендаций к каждому разделу

Структура курсового проекта.

Типовое содержание курсовой работы:

Титульный лист (приложение 1)

Задание

Введение

1. Основные теоретические положения, принимаемые допущения.

2. Схемы замещения и применяемые для расчета выражения

3. Результаты расчета, их графическое представление

Заключение.

Приложения:

П1 Расчеты

П2 Графический материал

Оформление: стандартные поля MS Word, шрифт 14, Times new romans, 1,5 интервал, формулы набраны в редакторе формул (equation или mathtype), Все расчеты в программах должны быть в приложении 1 (если использовались). Объем работы от 20 до 40 страниц (10-25 страниц основная часть, от 5 до 15 страниц приложения). Если курсовой проект сдается в электронном виде, то окончательный файл оформляется как PDF документ, отправляется на проверку преподавателю. Страницы должны быть пронумерованы (снизу страницы, справа), на титульном листе и задании нумерация страниц не ставится, перед введением в работе должно быть вставлено содержание (В MS WORD вкладка ссылки – оглавление – автособираемое оглавление¹, при этом название разделов работы задается как «УРОВЕНЬ 1» во вкладке «Абзац»)

Во введении приводятся:

Актуальность темы исследования - обоснование теоретической и практической важности выбранной для исследования проблемы.

Цель и задачи курсовой работы (проекта) - краткая и четкая формулировка цели проведения исследования и нескольких задач, решение которых необходимо для достижения поставленной цели.

Предмет исследования - формулировка конкретного вопроса или анализируемой проблемы.

Объект исследования.

Методы исследования

Заключение - краткое изложение основных, наиболее существенных результатов проведенного анализа, сформулированных в виде выводов, соответствующих цели и поставленным во введении задачам исследования.

В списке использованных источников литературы должны быть представлены основные источники по теме:

- нормативно-правовые документы (ГОСТы, кодексы, стандарты, законы);
- учебники и учебные пособия;
- отраслевые периодические издания;
- научные статьи, монографии и материалы научных конференций;
- интернет-ресурсы (официальные сайты организаций, базы данных и т.д.)
- материалы лабораторных и полевых исследований;
- данные, собранные во время практик;

Список должен содержать не менее 10 современных источников, изученных обучающимися (преимущественно даты издания не более 5 лет относительно года написания курсовой работы, кроме учебников, справочников и другой действующей нормативно-технической документации).

4 Список рекомендованных основных и дополнительных источников литературы.

Основная литература

1 Коган Феликс Лазаревич Развитие конструкций, параметры и режимы мощных турбогенераторов : Учебное пособие; ВО - Бакалавриат. - Москва:ООО "Научно-издательский центр ИНФРА-М", 2019. - 325 с. - URL: <http://new.znaniyum.com/go.php?id=1005637>.

2 Немировский Александр Емельянович Электрооборудование электрических сетей, станций и подстанций : Учебное пособие; ВО - Бакалавриат, Магистратура/Вологодский государственный университет. - Вологда: Инфра-Инженерия, 2020. - 174 с. - URL: <http://znaniyum.com/catalog/document?id=361762>.

3 Привалов, Е. Е. Эксплуатация линий распределительных сетей систем электроснабжения : учеб. пособие/Е. Е. Привалов, А. В. Ефанов, С. С. Ястребов, В. А. Ярош ; под ред. Е. Е. Привалова ; СтГАУ. - Ставрополь: Параграф, 2019. - 3,44 МБ

4 Хорольский В. Я. Эксплуатация электрооборудования : учебник ; ВО - Бакалавриат/Хорольский В. Я., Таранов М. А., Шемякин В. Н.. - Санкт-Петербург:Лань, 2019. - 268 с. - URL: <https://e.lanbook.com/book/106891>. - Издательство Лань..

Дополнительная литература

1. Методика расчетов устойчивости автоматизированных электрических систем / Под ред. Веникова В.А. – М.; Высшая школа, 2024. – 248 с.

2. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. – М.: Высшая школа, 2022. – 415 с.

3. Жданов П.С. Вопросы устойчивости электрических систем. – М.: Энергия, 2019. – 456 с.

4. Пособие к курсовому и дипломному проектированию для электрических специальностей / Под ред. В.М. Блок. – М.: Высшая школа, 2021. – 304 с.

5. Электроэнергетические системы в примерах и иллюстрациях / Под ред. В.А. Веникова. – М.; Энергоатомиздат, 2023. – 504 с.
6. Электрическая часть электростанций и подстанций. Справочные материалы / Под ред. Б.Н. Неклепаева. – М.: Энергия, 2022. – 336 с.
7. Переходные процессы электрических систем в примерах и иллюстрациях: Учеб. пособие для вузов (В.В. Ежков, Н.И. Зеленохат, И.В. Литкенс и др.; Под ред. В.А. Строева). – М.: Знак, 2024 – 224 с.
8. Методические указания по устойчивости энергосистем. Утверждены приказом Минэнерго России № 277 от 30.06.2003. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004.
9. Электромеханические переходные процессы в электрических системах. Учебно-методическое пособие к курсовому проектированию / А.Н. Козлов, В.А. Козлов, А.С. Степанов. – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2013.

5 Требования к защите работы

Курсовая работа допускается к защите при выполнении следующих условиях:

- степень оригинальности текста курсовой работы (проекта) не ниже 25%
- Работа оформлена в соответствии с требованиями методических указаний, действующих документов системы ЕСКД, в работе не содержится грубых ошибок, работа выполнена в полном объеме.

Защита курсовых проходит в форме публичного выступления (5-7 мин.) с представлением результатов работы в виде презентации (5-7 слайдов) и ответов на вопросы преподавателя или комиссии (5 мин).

6. Критерии оценки работы

Выполненная и защищенная курсовая работа оценивается в соответствии с учетом балльно-рейтинговой системы оценивания и критериями оценки (таблица 7).

Таблица 7 - Критерии оценки курсовой работы

Критерий	Максимальное значение в баллах
Оформление курсовой работы/проекта	10
Содержание курсовой работы/проекта	60
Защита курсовой работы/проекта	30
ИТОГО	100

Перевод оценки из 100-балльной в пятибалльную систему оценки знаний:

89-100 - оценка «отлично»,

77 - 88 баллов - оценка «хорошо»,

65 - 76 баллов - оценка «удовлетворительно»,

менее 64 баллов - оценка «неудовлетворительно».

Приложение 1

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

Ставропольский государственный аграрный университет

Институт механики и энергетики

Кафедра Электроснабжения и эксплуатации электрооборудования

Курсовая работа

по дисциплине

Режимы работы электрооборудования систем электроснабжения

На тему «Расчет режимов работы электрооборудования системы
электроснабжения»

Выполнил: студент 3 курса

«__» ____ 202__ года

По направлению подготовки 13.03.02 – «Электроэнергетика и
электротехника»

Профиль: Системы электроснабжения городов, промышленных предприятий,
сельского хозяйства, и их объектов

Проверил: канд. физ-мат. наук,

доцент кафедры

Электроснабжения и эксплуатации

электрооборудования

Ястребов С.С.

Зарегистрирована

«__» ____ 202__ года

Критерий	Максимальное значение в баллах	Набрано баллов
Оформление курсовой работы/проекта	10	
Содержание курсовой работы/проекта	60	
Защита курсовой работы/проекта	30	
ИТОГО	100	

Оценка «_____»

Дата _____

Подпись _____

Ставрополь, 2025 г.

Приложение 2

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ И РАСЧЕТ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА

1.1. Общие положения

Перед выполнением расчетов устойчивости необходимо составить расчетную схему (схему замещения) простейшей электроэнергетической системы, включающую в себя схемы замещения отдельных элементов. Генераторы, трансформаторы и линии электропередачи представляются простейшими схемами замещения, т.е. индуктивными сопротивлениями. Нагрузку рекомендуется представлять в комплексном виде.

Элементы схемы замещения и параметры режима (напряжения, токи, мощности) определяются в относительных единицах [1]. Используется приближенное приведение по средним коэффициентам трансформации. За базисные величины рекомендуется принимать номинальную мощность генератора $S_{\tilde{\sigma}} = S_{ген.ном}$ и напряжение на шинах нагрузки системы $U_{\tilde{\sigma}} = U_{сист.} (U_{*(\tilde{\sigma})c} = 1)$. Также в относительных единицах (в радианах) рекомендуется рассчитывать значения углов между различными векторами, т.к. в наиболее часто используемом пакете прикладных программ *Mathcad* при работе с тригонометрическими функциями углы, по умолчанию, берутся в радианах. Постоянные инерции T и время развития переходного процесса t оставляются в именованных единицах. Перечисленными рекомендациями определяется форма записи уравнений движения, используемых для описания переходного процесса и рассматриваемых далее.

1.2. Определение параметров схемы замещения

Расчет параметров схем замещения отдельных элементов электроэнергетической системы выполняется по известным формулам [1]. Если сопротивление элемента задано в относительных единицах:

$$x_{*(\tilde{\sigma})} = x_{*(ном)} \cdot \frac{S_{\tilde{\sigma}}}{S_{ном}};$$

если в именованных:

$$x_{*(\bar{\sigma})} = x_{(ном)} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{U_{\bar{\sigma}}^2}.$$

Ниже, в табл. 1, приведены расчетные формулы для отдельных элементов системы.

Таблица 1

Элемент системы	Исходные данные	Сопротивление в о.е., приведенное к базисным условиям
Синхронный генератор	$x_d; x'_d; x_q; x_2; S_{ген.ном}$	При условии $S_{\bar{\sigma}} = S_{ген.ном}$ все исходные величины используются без пересчета
Силовой трансформатор	$\Delta U_k (\%); S_{т.ном}$	$x_{*т(\bar{\sigma})} = \frac{\Delta U_k}{100} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{т.ном}}$
Линия электропередачи	$x_0 \text{ (Ом/км)}; l_{линии} \text{ (км)}; U_{л.ном}$	$x_{*л(\bar{\sigma})} = x_0 \cdot l_{линии} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{U_{л.}^2}$

Параметры элементов для схем отдельных последовательностей определяются по рекомендациям [1].

Если в качестве базисной выбрана мощность, отличающаяся от мощности элемента (генератора, двигателя), то соответствующие постоянные инерции необходимо привести к базисной мощности:

$$T_{J(\bar{\sigma})} = T_{J(ном)} \cdot \frac{S_{ном}}{S_{\bar{\sigma}}}. \quad (1)$$

Если в схеме замещения необходимо эквивалентировать несколько агрегатов, то для них определяются эквивалентные постоянные инерции [8]. Например, при установке на КЭС $n_{ген.}$ агрегатов единичной мощностью $P_{ген.ном}$:

$$T_{J\Sigma(\bar{\sigma})} = T_{J(ном)} \cdot \frac{n_{ген.} \cdot P_{ном} / \cos(\varphi_{ген.ном})}{S_{\bar{\sigma}}}. \quad (2)$$

Переводу в относительные единицы подлежат значения всех мощностей, напряжений и э.д.с. При этом следует помнить, что к базисным условиям приводятся как полные мощности, так и их составляющие:

$$S_{*(ном)} = \frac{S_{ном}}{S_{\delta}}; \quad P_{*(ном)} = \frac{P_{ном}}{S_{\delta}}; \quad Q_{*(ном)} = \frac{Q_{ном}}{S_{\delta}}.$$

Комплексная нагрузка может быть представлена в виде последовательно соединенных активного и индуктивного сопротивлений. Связь с величинами мощностей – следующая:

$$z_{*нагр} = r_{*нагр} + j \cdot x_{*нагр} = \frac{S_{\delta}}{S_{нагр}} \cdot \left(\cos \varphi_{нагр} + j \cdot \sin \varphi_{нагр} \right).$$

Активное сопротивление нагрузки для схемы замещения обратной последовательности берется равным $r_{2нагр} = 0,2$ при номинальной мощности и номинальном напряжении нагрузки.

Пример 1. Для простейшей электроэнергетической системы (ЭЭС), приведенной на рис. 1, составить схему замещения и привести параметры этой схемы к базисным условиям с пересчетом в относительные единицы. Исходные данные для элементов ЭЭС приведены в табл. 2. Все величины в табл. 2 отнесены к номинальной мощности соответствующего элемента и его номинальному напряжению.

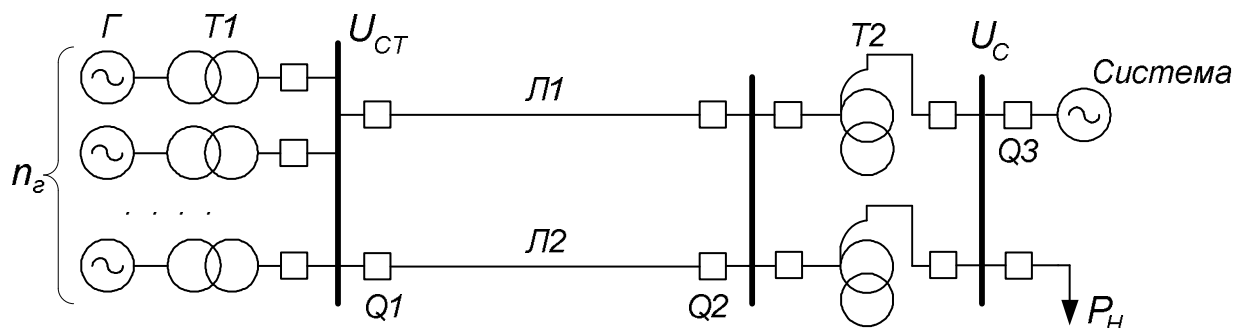


Рис. 1. Принципиальная схема простейшей электроэнергетической системы.

Таблица 2

Генератор									
Тип	$S_{ном},$ МВА	n_z	x_d	x_q	x'_d	x_2	$T_J,$ с	$T_{do},$ с	$T_e,$ с
ТГ	75	4	1,6	-	0,28	0,24	7,4	4,9	0,12
Трансформаторы							Линия		
Т1			Т2						
$S_{ном},$ МВА	$U_k,$ %	Группа соед.	$S_{ном},$ МВА	$U_{кВН},$ %	Группа соед.	k_{T2}	$l,$ км	$U_{ном},$ кВ	$x_0,$ Ом/км
80	10,5	Δ/Y	2x125	11,0	Y/Y	$\frac{110}{220}$	75	110	0,4

Мощность, передаваемая в систему				Напряжение системы
P_C , МВт	$\cos\varphi$	Скольжение S_0	T_j , с	U_C , кВ
150	0,83	0,03	6	220

Решение. Примем в качестве независимых базисных величин $S_{\bar{\sigma}} = S_{\text{ном.ген}}$ и $U_{\bar{\sigma}} = U_{\text{ном.линии}}$. Приведение к базисным условиям выполним приближенное - по средним коэффициентам трансформации. Схема замещения показана на рис. 2.

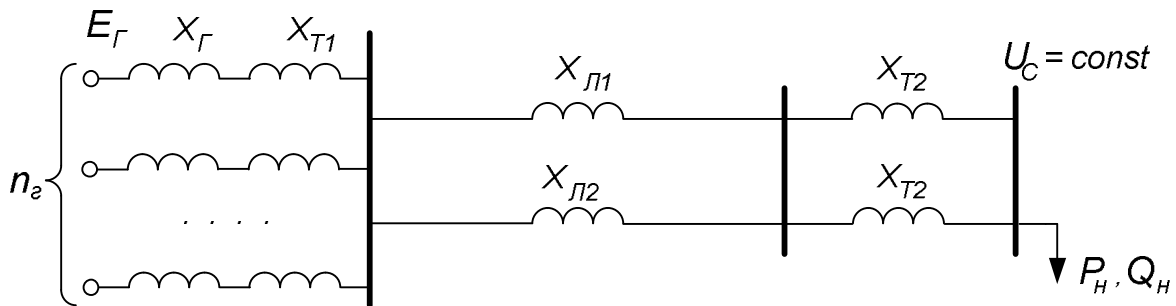


Рис. 2. Схема замещения простейшей электроэнергетической системы.

В соответствии с исходными данными и принятыми базисными условиями имеем:

- для турбогенератора, для всех сопротивлений из таблицы 2:

$$x_{*2(\text{баз})} = x_{\Gamma} = x_{2(\text{исх})} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{\text{ном}}} = x_{2(\text{исх})} \cdot \frac{75}{75} = x_{2(\text{исх})};$$

- для трансформаторов (у автотрансформатора Т2 во внимание принимается только сопротивление обмотки высокого напряжения (ВН), т.к. сопротивление обмотки СН всегда принимается равным нулю, а обмотка НН в данном примере не нагружена и поэтому ее сопротивление в схему замещения не включается):

$$x_{*T1(\text{баз})} = x_{T1} = \frac{\Delta U_{\kappa.T1}}{100} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{\text{ном}}} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{75}{80} = 0,098;$$

$$x_{*T2(\text{баз})} = x_{T2} = \frac{\Delta U_{\kappa.BH.T2}}{100} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{\text{ном}}} = \frac{11,0}{100} \cdot \frac{75}{125} = 0,066;$$

- для линий

$$x_{*Л1(\text{баз})} = x_{*Л2(\text{баз})} = x_{Л1} = x_{Л2} = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{U_{\bar{\sigma}}^2} = 0,4 \cdot 75 \cdot \frac{75}{110^2} = 0,186;$$

- напряжение системы

$$U_{C(баз)} = \frac{U_{C(исх)}}{U_{\delta}} \cdot (k_{T2}) = \frac{220}{110} \cdot \left(\frac{110}{220}\right) = 1;$$

- нагрузка

$$P_{*H(баз)} = P_H = \frac{P_{H(исх)}}{S_{\delta}} = \frac{150}{75} = 2;$$

$$Q_{*H(баз)} = Q_H = P_H \cdot \operatorname{tg}(\varphi) = P_H \cdot \frac{\sqrt{1 - \cos^2(\varphi)}}{\cos(\varphi)} = 2 \cdot \frac{\sqrt{1 - 0,83^2}}{0,83} = 1,344$$

1.3. Расчет исходного установившегося режима.

Векторные диаграммы синхронных генераторов

Генератор при расчетах в схеме замещения представляется индуктивным сопротивлением x_z и приложенной за ним э.д.с. E_z . Величины сопротивления и э.д.с. зависят от типа генератора, отсутствия или наличия АРВ и способа регулирования. Выбирать следует такие параметры, которые не изменяются в первый момент при любом резком изменении режима, т.е. позволяют связать состояние системы, предшествовавшее нарушению режима с новым состоянием, наступающим после нарушения [3].

При отсутствии АРВ:

для турбогенераторов (неявнополюсных синхронных машин): $x_z = x_d$;

$E_z = E_q$ – синхронные сопротивления и э.д.с.;

для гидрогенераторов (явнополюсных синхронных машин): $x_z = x_q$;

$E_z = E_Q$ – синхронное сопротивление по поперечно оси и фиктивная расчетная э.д.с.

При наличии регулятора пропорционального действия (АРВ ПД):

$x_z = x'_d$; $E_z = E'_q$ – переходное сопротивление и поперечная составляющая переходной э.д.с., обусловленной результирующим полным потокосцеплением обмотки возбуждения [3].

При регуляторах сильного действия (АРВ СД): $x_2 = 0$; $E_2 = U_{2q}$ – поперечная составляющая напряжения генератора.

Расчет величин э.д.с. может производиться по формуле

$$E_2 = \sqrt{\left(U_c + \frac{Q_{нагр} \left(\frac{x_2}{n_2} + x_{внеш.} \right)}{U_c} \right)^2 + \left(\frac{P_{нагр} \left(\frac{x_2}{n_2} + x_{внеш.} \right)}{U_c} \right)^2}, \quad (3)$$

где $x_{внеш.} = \frac{x_{T1}}{n_{T1}} + \frac{x_{линии}}{2} + \frac{x_{T2}}{2}$ в исходном (нормальном) режиме;

n_2 , n_{T1} – число генераторов и трансформаторов Т1 на станции.

Углы δ_0 , δ'_0 , δ_{0u} , характеризующие сдвиг вектора соответствующей э.д.с. относительно вектора напряжения U_c , определяются по формуле:

$$\delta_2 = \arctg \frac{P_{нагр} \left(\frac{x_2}{n_2} + x_{внеш.} \right)}{U_c^2 + Q_{нагр} \left(\frac{x_2}{n_2} + x_{внеш.} \right)}. \quad (4)$$

Определяются продольные составляющие переходной э.д.с. E'_q и напряжения генератора U_{2q} :

$$E'_q = E' \cos(\delta_0 - \delta'_0), \quad (5)$$

$$U_{2q} = U_2 \cos(\delta_0 - \delta_{0u}). \quad (6)$$

По рассчитанным значениям э.д.с. и углов и заданному значению $U^*_c = 1$

в координатной плоскости d , q в масштабе строится векторная диаграмма.

Пример 2. Для простейшей электроэнергетической системы содержащей неявнополюсные синхронные машины, схема замещения которой приведена на рис. 2, рассчитать параметры исходного установившегося режима для трех возможных вариантов регулирования возбуждения: нерегулируемый генератор; генератор с АРВ ПД; генератор с АРВ СД и по-

строить векторную диаграмму.

Решение. По формулам (3) – (6) рассчитаем э.д.с., приложенные за сопротивлениями, соответствующими способу регулирования возбуждения.

- турбогенератор без АРВ:

$$x_{Г.экв.1} = \frac{x_d}{n_2} = \frac{1,6}{4} = 0,4;$$

$$x_{внеш.} = \frac{x_{T1}}{n_{T1}} + \frac{x_{линии}}{2} + \frac{x_{T2}}{2} = \frac{0,098}{4} + \frac{0,186}{2} + \frac{0,066}{2} = 0,15;$$

$$E_q = \sqrt{\left(U_c + \frac{Q_H(x_{Г.экв.1} + x_{внеш.})}{U_c} \right)^2 + \left(\frac{P_H(x_{Г.экв.1} + x_{внеш.})}{U_c} \right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(1 + \frac{1,344(0,4 + 0,15)}{1} \right)^2 + \left(\frac{2,0(0,4 + 0,15)}{1} \right)^2} = 2,058;$$

$$\delta_0 = \arctg \frac{P_H(x_{Г.экв.1} + x_{внеш.})}{U_c^2 + Q_H(x_{Г.экв.1} + x_{внеш.})} = \arctg \frac{2,0(0,4 + 0,15)}{1 + 1,344(0,4 + 0,15)} = 0,566 \text{ [рад.]};$$

$$\delta_0[\text{град.}] = \delta_0[\text{рад.}] \cdot \frac{180}{3,14} = 0,566 \cdot \frac{180}{3,14} = 32,4[\text{град.}].$$

- турбогенератор с АРВ ПД:

$$x_{Г.экв.2} = \frac{x'_d}{n_2} = \frac{0,28}{4} = 0,07;$$

$$E' = \sqrt{\left(U_c + \frac{Q_H(x_{Г.экв.2} + x_{внеш.})}{U_c} \right)^2 + \left(\frac{P_H(x_{Г.экв.2} + x_{внеш.})}{U_c} \right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(1 + \frac{1,344(0,07 + 0,15)}{1} \right)^2 + \left(\frac{2,0(0,07 + 0,15)}{1} \right)^2} = 1,368;$$

$$\delta'_0 = \arctg \frac{P_H(x_{Г.экв.2} + x_{внеш.})}{U_c^2 + Q_H(x_{Г.экв.2} + x_{внеш.})} = \arctg \frac{2,0(0,07 + 0,15)}{1 + 1,344(0,07 + 0,15)} = 0,327 \text{ [рад.]};$$

$$\delta'_0[\text{град.}] = \delta'_0[\text{рад.}] \cdot \frac{180}{3,14} = 0,327 \cdot \frac{180}{3,14} = 18,8[\text{град.}];$$

$$E'_q = E' \cdot \cos(\delta_0 - \delta'_0) = 1,368 \cdot \cos(0,566 - 0,327) = 1,329;$$

- турбогенератор с АРВ СД:

$$x_{Гэкв.3} = 0;$$

$$U_{Г} = \sqrt{\left(U_c + \frac{Q_H \cdot x_{внеш.}}{U_c} \right)^2 + \left(\frac{P_H \cdot x_{внеш.}}{U_c} \right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(1 + \frac{1,344 \cdot 0,15}{1} \right)^2 + \left(\frac{2,0 \cdot 0,15}{1} \right)^2} = 1,238;$$

$$\delta_{0u} = \arctg \frac{P_H \cdot x_{внеш.}}{U_c^2 + Q_H \cdot x_{внеш.}} = \arctg \frac{2,0 \cdot 0,15}{1 + 1,344 \cdot 0,15} = 0,245 \text{ [рад.]};$$

$$\delta_{0u} [\text{град.}] = \delta_{0u} [\text{рад.}] \cdot \frac{180}{3,14} = 0,245 \cdot \frac{180}{3,14} = 14,0 [\text{град.}]$$

$$U_{Гq} = U_{Г} \cdot \cos(\delta_0 - \delta_{0u}) = 1,238 \cdot \cos(0,566 - 0,245) = 1,175.$$

Векторная диаграмма системы приведена на рис. 3.

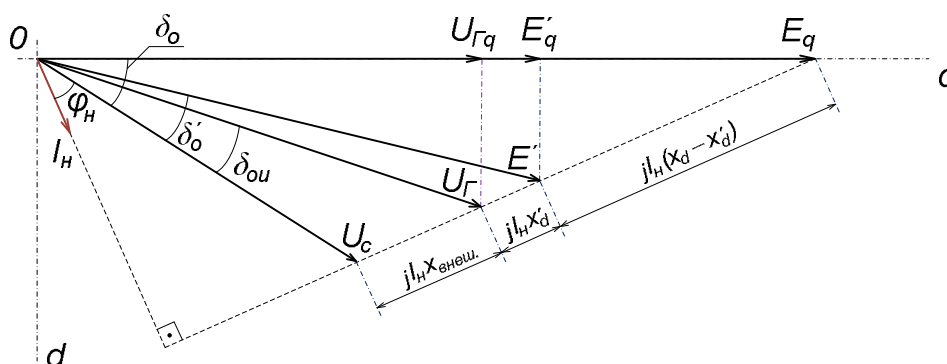


Рис. 3. Векторная диаграмма системы, содержащей неявнополюсный синхронный генератор (турбогенератор).

Пример 3. Рассчитать параметры исходного установившегося режима для трех возможных вариантов регулирования возбуждения, аналогично примеру 2, для простейшей электроэнергетической системы, содержащей явнополюсные синхронные машины и построить векторную диаграмму. Сделаем допущение, что параметры элементов системы те же, что и в предыдущем примере, за одним исключением – для явнополюсной машины дополнительно задана величина $x_q = 0,96$.

Решение. Поскольку параметры элементов системы остались такими же, как в предыдущем примере, дополнительный расчет необходимо провести только для представления генератора, не имеющего АРВ, сопротивлением x_q , определив фиктивную расчетную э.д.с.

E_Q и сопутствующие ей величины δ_{0Q} , E'_{q2} и $U_{\Gamma q2}$. Все остальные параметры берутся такими же, как и в примере 2.

$$x_{\Gamma_{\text{ЭКВ.4}}} = \frac{x_q}{n_2} = \frac{0,96}{4} = 0,24;$$

$$E_Q = \sqrt{\left(U_c + \frac{Q_H(x_{Г.экв.4} + x_{внеш.})}{U_c} \right)^2 + \left(\frac{P_H(x_{Г.экв.4} + x_{внеш.})}{U_c} \right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(1 + \frac{1,344(0,24 + 0,15)}{1} \right)^2 + \left(\frac{2,0(0,24 + 0,15)}{1} \right)^2} = 1,712;$$

$$\delta_{0Q} = \arctg \frac{P_H(x_{\Gamma.Экв.4} + x_{внеш.})}{U_{\tilde{C}}^2 + Q_H(x_{\Gamma.Экв.4} + x_{внеш.})} = \arctg \frac{2,0(0,24 + 0,15)}{1 + 1,344(0,24 + 0,15)} = 0,473 \text{ [рад.]};$$

$$\delta_{0Q}[zpad.] = \delta_{0Q}[pad.] \cdot \frac{180}{3,14} = 0,473 \cdot \frac{180}{3,14} = 27,1[zpad.]$$

$$E'_{q2} = E' \cdot \cos(\delta_{0Q} - \delta'_0) = 1,368 \cdot \cos(0,473 - 0,327) = 1,353$$

$$U_{\Gamma q2} = U_{\Gamma} \cdot \cos(\delta_{0Q} - \delta_{0u}) = 1,238 \cdot \cos(0,473 - 0,245) = 1,206$$

Векторная диаграмма системы, содержащей явнополюсные генераторы, приведена на рис. 4.

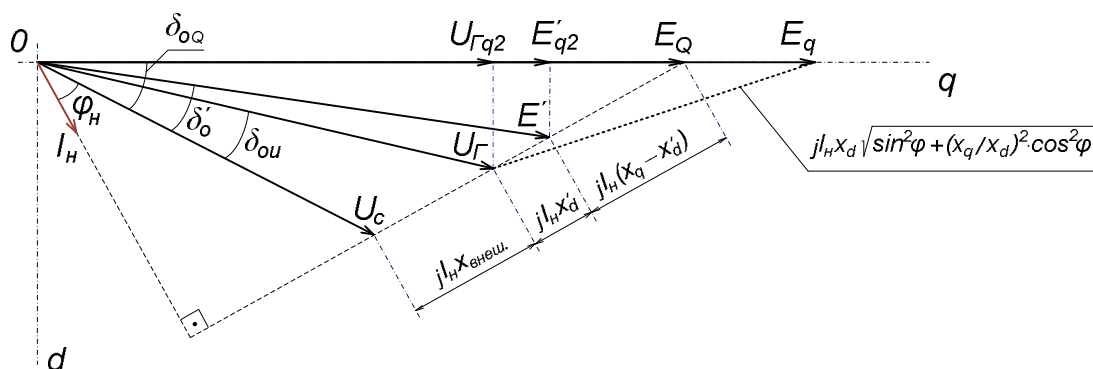


Рис. 4. Векторная диаграмма системы, содержащей явнополюсный синхронный генератор (гидрогенератор).

2. РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ

При выполнении расчетов предполагается, что устройства АРВ безынерционны и обеспечивают отсутствие самораскачивания. Предел передавае-

мой мощности определяется максимумом статической угловой характеристики мощности $P_{E_2} = f(\delta_2)$. Учет действия устройств АРВ производится путем введения необходимых э.д.с. $E_2 = const$, приложенных за соответствующими сопротивлениями x_2 .

Коэффициент запаса статической устойчивости по мощности определяется как [9]

$$k_{\text{зан.ст.}} = \frac{P_{\text{max}} - P_o}{P_{\text{max}}} \cdot 100\%. \quad (7)$$

При расчете запаса статической устойчивости нерегулируемой машины (при отсутствии АРВ) турбогенератор представляется в схеме замещения синхронным индуктивным сопротивлением по продольной оси x_d и приложенной за ним синхронной э.д.с. E_q , определяемой по выражению (3). Угловая характеристика мощности при этом имеет вид

$$P_{Eq} = \frac{E_q \cdot U_c}{x_{d\Sigma}} \sin \delta = P_{mEq} \sin \delta, \quad (8)$$

где P_{mEq} – идеальный предел мощности нерегулируемой передачи – рис. 5;

$$x_{d\Sigma} = \frac{x_d}{n_2} + x_{\text{внеш.}}.$$

Для явнополюсных генераторов (гидрогенераторов) синхронная э.д.с. определяется [2, 3, 8]:

$$E_q^{(я)} = E_Q \frac{x_d - x'_d}{x_q - x'_d} - E'_q \frac{x_d - x_q}{x_q - x'_d}. \quad (9)$$

Здесь E_Q – фиктивная э.д.с., определяемая по выражению (3) при $x_2 = x_q$.

Формула угловой характеристики мощности имеет вид:

$$P_{Eq}^{(я)} = \frac{E_q^{(я)} \cdot U_c}{x_{d\Sigma}} \cdot \sin \delta + \frac{U_c^2}{2} \cdot \frac{\frac{x_d}{n_2} - \frac{x_q}{n_2}}{x_{d\Sigma} \cdot x_{q\Sigma}} \cdot \sin 2\delta, \quad (10)$$

где $x_{q\Sigma} = \frac{x_q}{n_2} + x_{внеш.}$

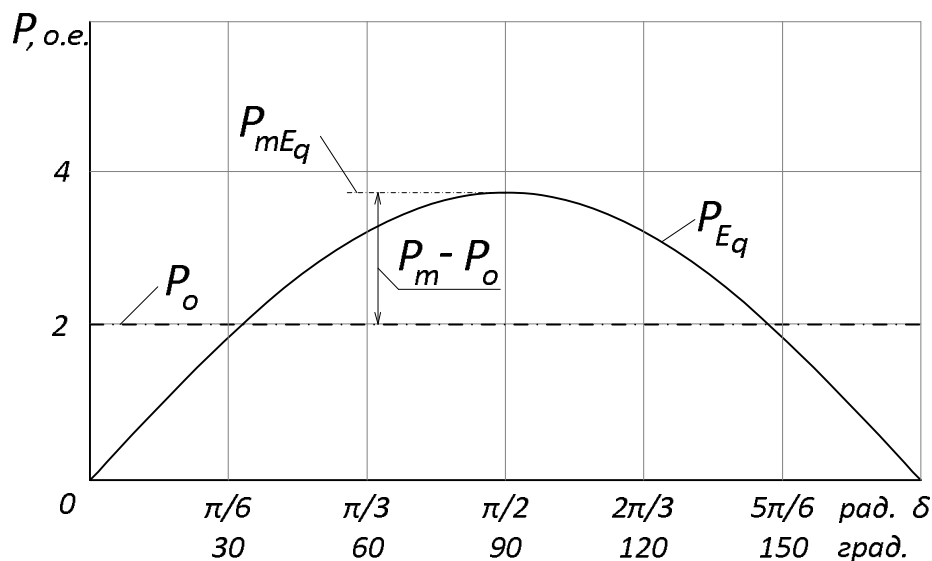


Рис. 5. Угловая характеристика мощности нерегулируемого турбогенератора.

Предел передаваемой мощности и значение угла, при котором $\frac{dP}{d\delta} = 0$ определяются решением задачи нахождения экстремума выражения (10). При этом получается – рис. 6:

$$\delta_m = \arccos\left(-b + \sqrt{b^2 + 0,5}\right),$$

где $b = \frac{E_q^{(я)} \cdot x_{q\Sigma} \cdot n_2}{4 \cdot U_c \cdot (x_d - x_q)}.$

Предел передаваемой мощности при наличии АРВ определяется без учета явнополюсности:

неявнополюсная машина с АРВ ПД:

$$P_{E'_q} = \frac{E'_q \cdot U_c}{x'_{d\Sigma}} \cdot \sin\delta - \frac{U_c^2}{2} \cdot \frac{\frac{x_d}{n_2} - \frac{x'_d}{n_2}}{x_{d\Sigma} \cdot x'_{d\Sigma}} \cdot \sin 2\delta; \quad (11)$$

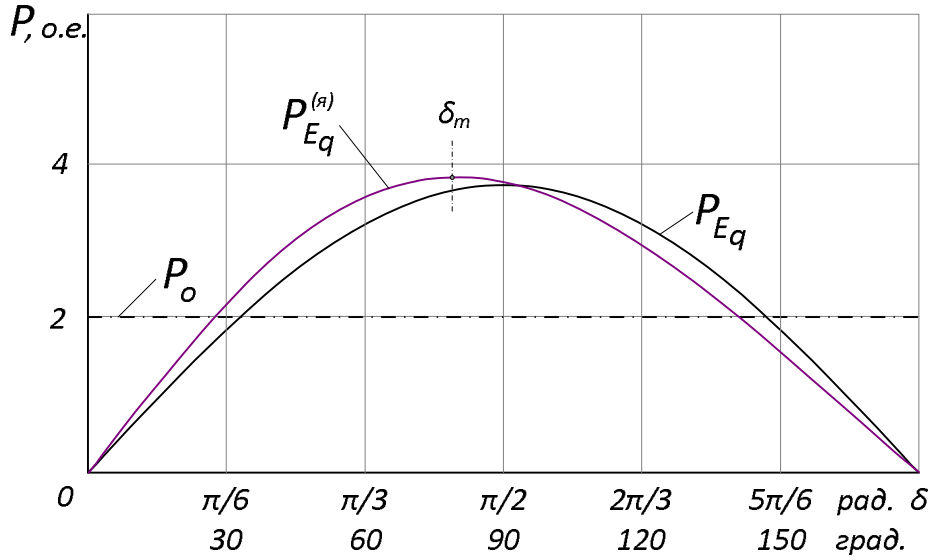


Рис. 6. Угловая характеристика мощности, соответствующая формуле (10).

неявнополюсная машина с АРВ СД:

$$P_{U_{zq}} = \frac{U_{zq} \cdot U_c}{x_{внеш.}} \cdot \sin \delta - \frac{U_c^2}{2} \cdot \frac{\frac{x_d}{n_z}}{x_{d\Sigma} \cdot x_{внеш.}} \cdot \sin 2\delta; \quad (12)$$

явнополюсная машина с АРВ ПД:

$$P_{E'_q} = \frac{E'_q \cdot U_c}{x'_{d\Sigma}} \cdot \sin \delta - \frac{U_c^2}{2} \cdot \frac{\frac{x_q}{n_z} - \frac{x'_d}{n_z}}{x_{q\Sigma} \cdot x'_{d\Sigma}} \cdot \sin 2\delta; \quad (13)$$

явнополюсная машина с АРВ СД:

$$P_{U_{zq}} = \frac{U_{zq} \cdot U_c}{x_{внеш.}} \cdot \sin \delta - \frac{U_c^2}{2} \cdot \frac{\frac{x_q}{n_z}}{x_{q\Sigma} \cdot x_{внеш.}} \cdot \sin 2\delta. \quad (14)$$

Угловые характеристики мощности турбогенератора для трех возможных вариантов регулирования возбуждения приведены на рис. 7.

Как и для формулы (10), в выражениях (11) – (14) можно определить углы, при которых $\frac{dP}{d\delta} = 0$. Но, как правило, вторыми слагаемыми в приведенных выше формулах можно пренебречь и определять пределы передаваемой мощности приближенно:

для машин с АРВ ПД, для обоих типов генераторов:

$$P_{E'_q} \cong \frac{E'_q \cdot U_c}{x'_{d\Sigma}} \cdot \sin \delta \quad \text{и} \quad P_{mE'_q} \cong \frac{E'_q \cdot U_c}{x'_{d\Sigma}};$$

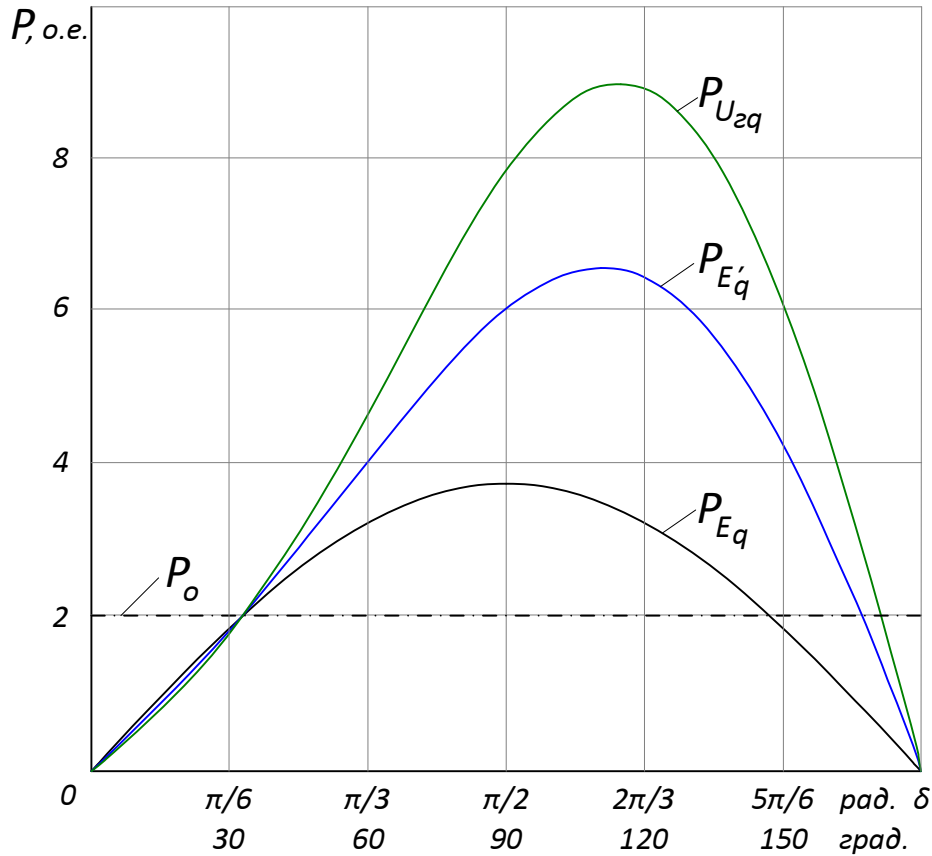


Рис. 7. Угловые характеристики мощности турбогенератора для трех возможных вариантов регулирования возбуждения.

для машин с АРВ СД, для обоих типов генераторов:

$$P_{U_{zq}} \cong \frac{U_{zq} \cdot U_c}{x_{внеш.}} \cdot \sin \delta \quad \text{и} \quad P_{mU_{zq}} \cong \frac{U_{zq} \cdot U_c}{x_{внеш.}}.$$

При выполнении данного пункта задания необходимо рассчитать пределы передаваемой мощности P_{mEq} (либо $P_{mEq}^{(я)}$), $P_{mE'_q}$, $P_{mU_{zq}}$ и соответствующие коэффициенты запаса статической устойчивости $k_{зан.}$. По результатам проведенных расчетов делаются выводы о влиянии различных видов АРВ на

запас статической устойчивости рассматриваемой электропередачи. Величина запаса статической устойчивости в нормальном и утяжеленном режиме должна быть не менее 20%, в послеаварийном режиме – не менее 8% [9].

Пример 4. Используя результаты, полученные в примерах 2 и 3, рассчитать пределы передаваемой мощности для трех возможных вариантов регулирования возбуждения и соответствующие коэффициенты запаса статической устойчивости для двух вариантов синхронных генераторов – неявнополюсных и явнополюсных.

Решение. 1. Неявнополюсная машина (турбогенератор):

идеальный предел мощности электропередачи при отсутствии АРВ на генераторах:

$$P_{mEq} = \frac{E_q \cdot U_c}{x_{d\Sigma}} = \frac{E_q \cdot U_c}{x_{Г\text{экв.1}} + x_{\text{внеш.}}} = \frac{2,058 \cdot 1}{0,4 + 0,15} = 3,742.$$

Коэффициент запаса статической устойчивости по мощности

$$k_{\text{зан.ст.1}} = \frac{P_{mEq} - P_o}{P_{mEq}} \cdot 100\% = \frac{3,742 - 2,0}{3,742} \cdot 100\% = 40,16\%.$$

Идеальный предел мощности электропередачи при использовании на генераторах АРВ ПД (точка 2.1 на рис. 8,а):

- производная:

$$\frac{d \left(P_{E'_q} \right)}{d\delta} = \frac{E'_q \cdot U_c}{x'_{d\Sigma}} \cdot \cos\delta - \frac{U_c^2}{2} \cdot \frac{\frac{x_d}{x_{d\Sigma}} - \frac{x'_d}{x'_{d\Sigma}}}{\frac{n_z}{x_{d\Sigma}} \cdot \frac{n_z}{x'_{d\Sigma}}} \cdot 2\cos 2\delta = 0;$$

- решив полученное уравнение относительно $\cos\delta$, определим угол, при котором достигается экстремум

$$\delta_{m(2.1)} = 110,2[\text{град.}] = 1,922[\text{рад.}],$$

$$\begin{aligned} P_{mE'_q(u\delta)} &= \frac{E'_q \cdot U_c}{x'_{d\Sigma}} \cdot \sin\left(\delta_{m(2.1)}\right) - \frac{U_c^2}{2} \cdot \frac{\frac{x_d}{x_{d\Sigma}} - \frac{x'_d}{x'_{d\Sigma}}}{\frac{n_z}{x_{d\Sigma}} \cdot \frac{n_z}{x'_{d\Sigma}}} \cdot \sin\left(2\delta_{m(2.1)}\right) = \\ &= \frac{1,329 \cdot 1}{0,22} \cdot \sin(1,922) - \frac{1}{2} \cdot \frac{0,4 - 0,07}{0,55 \cdot 0,22} \cdot \sin(2 \cdot 1,922) = 6,554. \end{aligned}$$

Приближенный предел мощности электропередачи при использовании на генераторах АРВ ПД (точка 2.2 на рис. 8,а):

$$P_{mE'_q} \cong \frac{E'_q \cdot U_c}{x'_{d\Sigma}} = \frac{E'_q \cdot U_c}{x_{ГЭКВ.2} + x_{внеш.}} = \frac{1,329 \cdot 1}{0,07 + 0,15} = 6,041.$$

Коэффициенты запаса статической устойчивости по мощности:

- для идеального предела мощности:

$$k_{зан.см.2.1} = \frac{P_{mE'_q(u\partial.)} - P_o}{P_{mE'_q(u\partial.)}} \cdot 100\% = \frac{6,554 - 2,0}{6,554} \cdot 100\% = 69,48\%$$

- для приближенного предела мощности:

$$k_{зан.см.2.2} = \frac{P_{mEq} - P_o}{P_{mEq}} \cdot 100\% = \frac{6,041 - 2,0}{6,041} \cdot 100\% = 66,89\% ;$$

- различие в величинах коэффициентов:

$$\Delta k_{зан.см.2} = \frac{k_{зан.см.2.1} - k_{зан.см.2.2}}{k_{зан.см.2.1}} \cdot 100\% = \frac{69,48 - 66,89}{69,48} \cdot 100\% = 3,73\% .$$

Идеальный предел мощности электропередачи при использовании на генераторах АРВ СД (точка 3.1 на рис. 8,б):

- производная:

$$\frac{d \left(P_{U_{2q}} \right)}{d\delta} = \frac{U_{2q} \cdot U_c}{x_{внеш.}} \cdot \cos\delta - \frac{U_c^2}{2} \cdot \frac{\frac{x_d}{n_2}}{x_{d\Sigma} \cdot x_{внеш.}} \cdot 2\cos 2\delta = 0 ;$$

- угол, при котором достигается экстремум:

$$\delta_{m(3.1)} = 114,3[град.] = 1,993[рад.] ,$$

$$\begin{aligned} P_{mU_{2q}(u\partial.)} &= \frac{U_{2q} \cdot U_c}{x_{внеш.}} \cdot \sin(\delta_{m(3.1)}) - \frac{U_c^2}{2} \cdot \frac{(x_d/n_2)}{x_{d\Sigma} \cdot x_{внеш.}} \cdot \sin(2\delta_{m(3.1)}) = \\ &= \frac{1,175 \cdot 1}{0,15} \cdot \sin(1,993) - \frac{1}{2} \cdot \frac{0,4}{0,55 \cdot 0,15} \cdot \sin(2 \cdot 1,993) = 8,957 . \end{aligned}$$

Приближенный предел мощности электропередачи при использовании на генераторах АРВ СД (точка 3.2 на рис. 8,б):

$$P_{mU_{2q}} \cong \frac{U_{2q} \cdot U_c}{x_{внеш.}} = \frac{1,175 \cdot 1}{0,15} = 7,833 .$$

Коэффициенты запаса статической устойчивости по мощности:

- для идеального предела мощности:

$$k_{\text{зан.см.3.1}} = \frac{P_{mU_{2q}(u\partial.)} - P_o}{P_{mU_{2q}(u\partial.)}} \cdot 100\% = \frac{8,957 - 2,0}{8,957} \cdot 100\% = 77,67\%$$

- для приближенного предела мощности:

$$k_{\text{зан.см.3.2}} = \frac{P_{mU_{2q}} - P_o}{P_{mU_{2q}}} \cdot 100\% = \frac{7,833 - 2,0}{7,833} \cdot 100\% = 74,47\% ;$$

- различие в величинах коэффициентов:

$$\Delta k_{\text{зан.см.3}} = \frac{k_{\text{зан.см.3.1}} - k_{\text{зан.см.3.2}}}{k_{\text{зан.см.3.1}}} \cdot 100\% = \frac{77,67 - 74,47}{77,67} \cdot 100\% = 4,12\% .$$

Результаты расчетов для турбогенераторов с АРВ ПД и АРВ СД иллюстрируются на рис. 8, а, б.

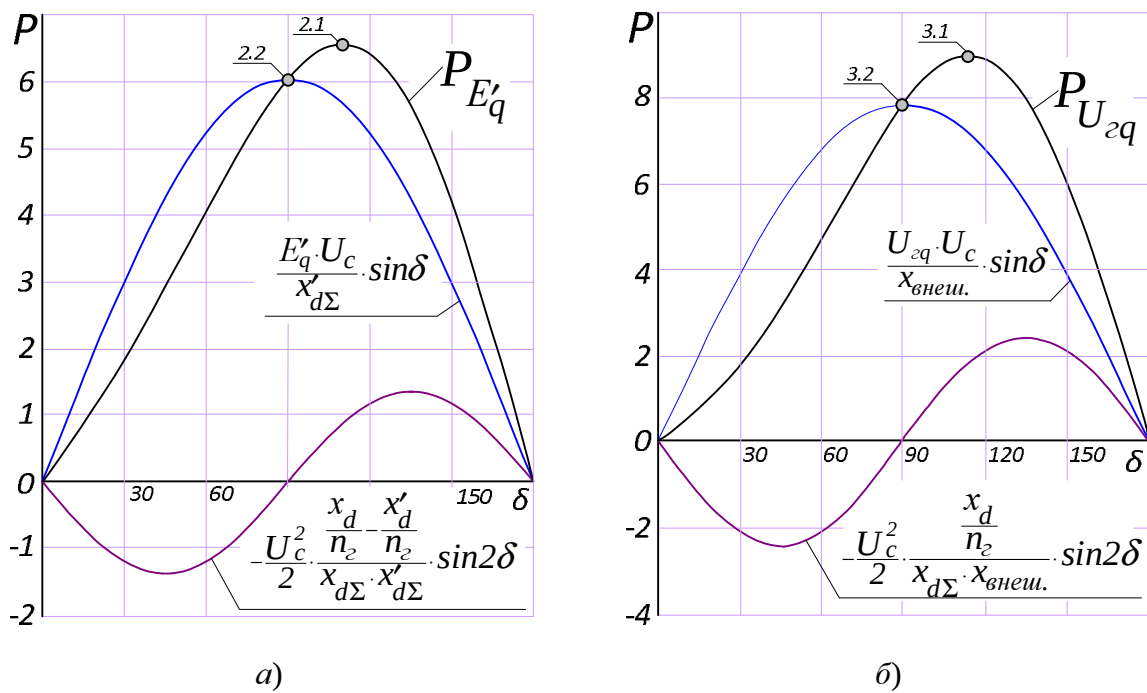


Рис. 8. Угловые характеристики мощности турбогенератора:

а – с АРВ ПД, б – с АРВ СД.

2. Явнополюсная машина (гидрогенератор):

идеальный предел мощности электропередачи при отсутствии АРВ на генераторах (точка 4.1 на рис. 9).

Производная:

$$\frac{d(P_{Eq}^{(я)})}{d\delta} = \frac{E_q^{(я)} \cdot U_c}{x_{d\Sigma}} \cdot \cos\delta + \frac{U_c^2}{2} \cdot \frac{\frac{x_d}{x_{d\Sigma}} - \frac{x_q}{x_{q\Sigma}}}{\frac{n_z}{x_{d\Sigma}} \cdot \frac{n_z}{x_{q\Sigma}}} \cdot 2\cos 2\delta = 0.$$

Э.д.с. по продольной оси (используются данные из примера 3):

$$E_q^{(я)} = E_Q \frac{x_d - x'_d}{x_q - x'_d} - E'_Q \frac{x_d - x_q}{x_q - x'_d} = 1,712 \frac{1,6 - 0,28}{0,96 - 0,28} - 1,353 \frac{1,6 - 0,96}{0,96 - 0,28} = 2,05.$$

Угол, при котором достигается экстремум:

$$\delta_{m(4.1)} = 79,4[град.] = 1,385[рад.],$$

$$\begin{aligned} P_{mEq(u\partial.)}^{(я)} &= \frac{E_q^{(я)} \cdot U_c}{x_{d\Sigma}} \cdot \sin(\delta_{m(4.1)}) + \frac{U_c^2}{2} \cdot \frac{\frac{x_d}{x_{d\Sigma}} - \frac{x_q}{x_{q\Sigma}}}{\frac{n_z}{x_{d\Sigma}} \cdot \frac{n_z}{x_{q\Sigma}}} \cdot \sin(2\delta_{m(4.1)}) = \\ &= \frac{2,05 \cdot 1}{0,55} \cdot \sin(1,385) + \frac{1}{2} \cdot \frac{0,4 - 0,24}{0,55 \cdot 0,39} \cdot \sin(2 \cdot 1,385) = 3,799. \end{aligned}$$

Приближенный предел мощности электропередачи при отсутствии АРВ на генераторах (точка 4.2 на рис. 9):

$$P_{mEq}^{(я)} \cong \frac{E_q^{(я)} \cdot U_c}{x_{d\Sigma}} = \frac{2,05 \cdot 1}{0,55} = 3,727.$$

Коэффициенты запаса статической устойчивости по мощности:

- для идеального предела мощности:

$$k_{зан.см.4.1} = \frac{P_{mEq(u\partial.)}^{(я)} - P_o}{P_{mEq(u\partial.)}^{(я)}} \cdot 100\% = \frac{3,799 - 2,0}{3,799} \cdot 100\% = 47,35\%;$$

- для приближенного предела мощности:

$$k_{зан.см.4.2} = \frac{P_{mEq}^{(я)} - P_o}{P_{mEq}^{(я)}} \cdot 100\% = \frac{3,727 - 2,0}{3,727} \cdot 100\% = 46,34\%;$$

- различие в величинах коэффициентов:

$$\Delta k_{зан.см.4} = \frac{k_{зан.см.4.1} - k_{зан.см.4.2}}{k_{зан.см.4.1}} \cdot 100\% = \frac{47,35 - 46,34}{47,35} \cdot 100\% = 2,13\%.$$

Результаты расчетов иллюстрируются на рис. 9.

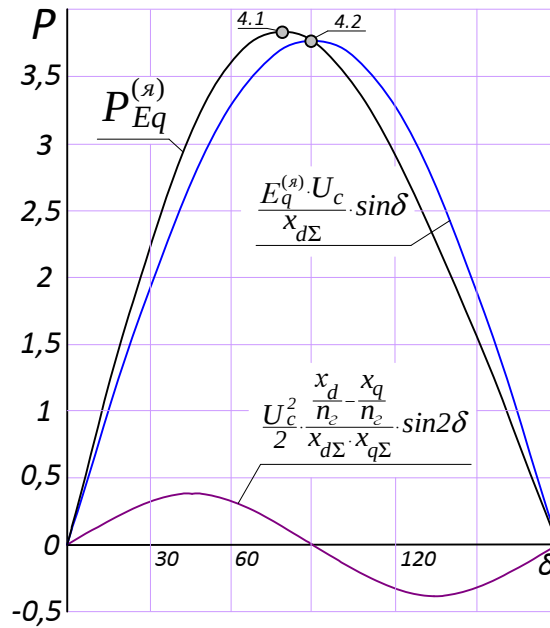


Рис. 9. Угловая характеристика мощности явнополюсной машины при отсутствии АРВ.

Идеальный предел мощности электропередачи при использовании на явнополюсных генераторах АРВ ПД (точка 5.1 на рис. 10,а):

- производная:

$$\frac{d \left(P_{E'_q} \right)}{d\delta} = \frac{E'_q \cdot U_c}{x'_{d\Sigma}} \cdot \cos\delta - \frac{U_c^2}{2} \cdot \frac{\frac{x_q}{x_{q\Sigma}} - \frac{x'_d}{x'_{d\Sigma}}}{\frac{x_q}{x_{q\Sigma}} \cdot \frac{x'_d}{x'_{d\Sigma}}} \cdot 2\cos 2\delta = 0;$$

- угол, при котором достигается экстремум:

$$\delta_{m(5.1)} = 106,2[град.] = 1,852[рад.],$$

$$\begin{aligned} P_{mE'_q(u\partial.)} &= \frac{E'_q \cdot U_c}{x'_{d\Sigma}} \cdot \sin(\delta_{m(5.1)}) - \frac{U_c^2}{2} \cdot \frac{\frac{x_q}{x_{q\Sigma}} - \frac{x'_d}{x'_{d\Sigma}}}{\frac{x_q}{x_{q\Sigma}} \cdot \frac{x'_d}{x'_{d\Sigma}}} \cdot \sin(2\delta_{m(5.1)}) = \\ &= \frac{1,329 \cdot 1}{0,22} \cdot \sin(1,852) - \frac{1}{2} \cdot \frac{0,24 - 0,07}{0,39 \cdot 0,22} \cdot \sin(2 \cdot 1,852) = 6,334. \end{aligned}$$

Приближенный предел мощности электропередачи при использовании на генераторах АРВ ПД (точка 5.2 на рис. 10,а):

$$P_{mE'_q} \cong \frac{E'_q \cdot U_c}{x'_{d\Sigma}} = \frac{E'_q \cdot U_c}{x_{Г\acute{e}кв.2} + x_{внеш.}} = \frac{1,329 \cdot 1}{0,07 + 0,15} = 6,041.$$

Коэффициенты запаса статической устойчивости по мощности:

- для идеального предела мощности:

$$k_{зан.см.5.1} = \frac{P_{mE'_q(ид.)} - P_o}{P_{mE'_q(ид.)}} \cdot 100\% = \frac{6,334 - 2,0}{6,334} \cdot 100\% = 68,42\%$$

- для приближенного предела мощности:

$$k_{зан.см.5.2} = \frac{P_{mEq} - P_o}{P_{mEq}} \cdot 100\% = \frac{6,041 - 2,0}{6,041} \cdot 100\% = 66,89\% ;$$

-различие в величинах коэффициентов:

$$\Delta k_{зан.см.5} = \frac{k_{зан.см.5.1} - k_{зан.см.5.2}}{k_{зан.см.5.1}} \cdot 100\% = \frac{68,42 - 66,89}{68,42} \cdot 100\% = 2,24\% .$$

Идеальный предел мощности электропередачи при использовании на генераторах АРВ СД (точка 6.1 на рис. 10,б):

- производная:

$$\frac{d \left(P_{U_{2q}} \right)}{d \delta} = \frac{U_{2q} \cdot U_c}{x_{внеш.}} \cdot \cos \delta - \frac{U_c^2}{2} \cdot \frac{\frac{x_q}{n_z}}{x_{q\Sigma} \cdot x_{внеш.}} \cdot 2 \cos 2\delta = 0 ;$$

- угол, при котором достигается экстремум:

$$\delta_{m(6.1)} = 112,1[град.] = 1,956[рад.] ,$$

$$\begin{aligned} P_{mU_{2q}(ид.)} &= \frac{U_{2q} \cdot U_c}{x_{внеш.}} \cdot \sin(\delta_{m(6.1)}) - \frac{U_c^2}{2} \cdot \frac{\left(\frac{x_q}{n_z} \right)}{x_{q\Sigma} \cdot x_{внеш.}} \cdot \sin(2\delta_{m(6.1)}) = \\ &= \frac{1,175 \cdot 1}{0,15} \cdot \sin(1,956) - \frac{1}{2} \cdot \frac{0,24}{0,39 \cdot 0,15} \cdot \sin(2 \cdot 1,956) = 8,691 . \end{aligned}$$

Приближенный предел мощности электропередачи при использовании на генераторах АРВ СД (точка 6.2 на рис. 10,б):

$$P_{mU_{2q}} \cong \frac{U_{2q} \cdot U_c}{x_{внеш.}} = \frac{1,175 \cdot 1}{0,15} = 7,833 .$$

Коэффициенты запаса статической устойчивости по мощности:

- для идеального предела мощности:

$$k_{зан.см.6.1} = \frac{P_{mU_{2q}(ид.)} - P_o}{P_{mU_{2q}(ид.)}} \cdot 100\% = \frac{8,691 - 2,0}{8,691} \cdot 100\% = 77,0\%$$

- для приближенного предела мощности:

$$k_{зан.см.6.2} = \frac{P_{mU_{2q}} - P_o}{P_{mU_{2q}}} \cdot 100\% = \frac{7,833 - 2,0}{7,833} \cdot 100\% = 74,47\% ;$$

- различие в величинах коэффициентов:

$$\Delta k_{зан.см.6} = \frac{k_{зан.см.6.1} - k_{зан.см.6.2}}{k_{зан.см.6.1}} \cdot 100\% = \frac{77,0 - 74,47}{77,0} \cdot 100\% = 3,27\% .$$

Результаты расчетов для гидрогенераторов с АРВ двух типов – на рис. 10, а, б.

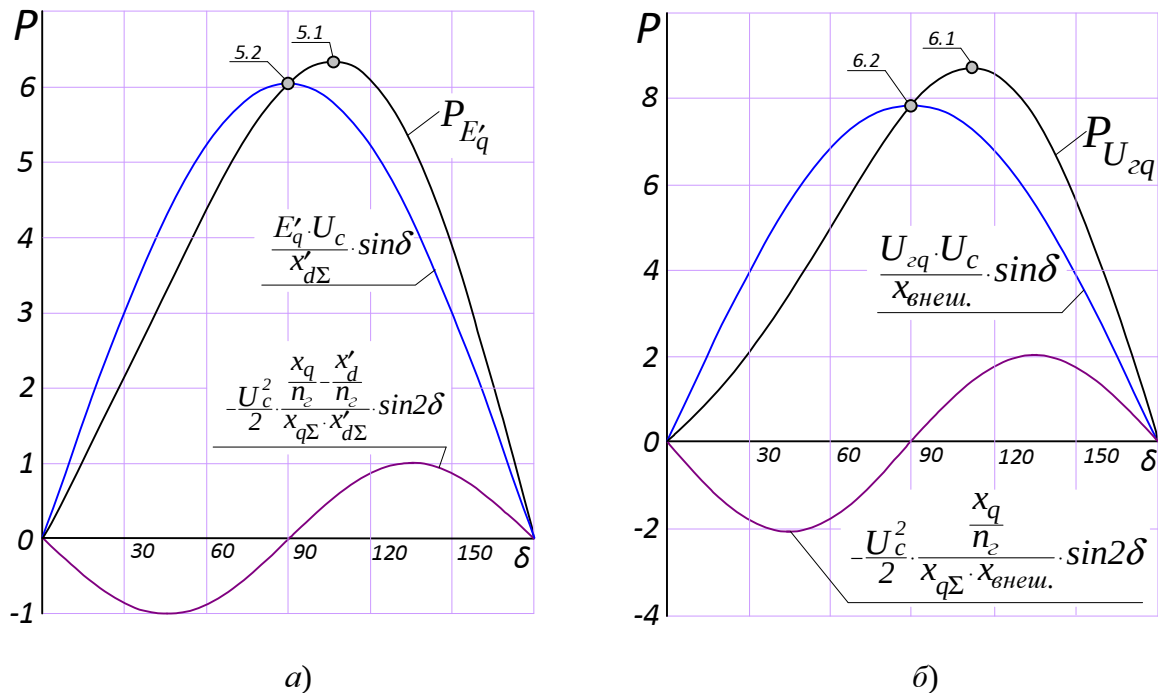


Рис. 10. Угловые характеристики мощности гидрогенератора:

а – с АРВ ПД, б – с АРВ СД.

Разница во всех расчетах не превышает 5%, что и подтверждает допустимость определения коэффициента запаса статической устойчивости по приближенным формулам.

3. РАСЧЕТ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ

3.1. Общие положения

Исследования динамической устойчивости основываются на методах численного решения дифференциального уравнения относительного движения ротора генератора. В случае необходимости учета реакции якоря, действия АРВ, переходных процессов в обмотке ротора вводятся дополнительные дифференциальные уравнения и соотношения, характеризующие действие регуля-

торов.

При выполнении упрощенных расчетов принимаются следующие основные допущения [3, 4]:

- мощность турбины считается неизменной в течение всего переходного режима;
- мощность, вырабатываемая генератором, считается изменяющейся мгновенно при изменении в схеме электропередачи вследствие короткого замыкания или коммутации;
- выполнение расчетов несимметричных режимов производится с учетом только параметров режима прямой последовательности, с использованием правила эквивалентности прямой последовательности [1];
- апериодические моменты, обусловленные потерями мощности, не учитываются.

С учетом указанных допущений для простейшей схемы электропередачи дифференциальное уравнение относительного движения ротора может быть записано в виде [3, 4]:

$$T_J \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_0 - P_{gi} \quad \text{или} \quad T_J \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_0 - \frac{E'_q \cdot U_c}{x_{12}^{(i)}} \cdot \sin \delta. \quad (15)$$

Здесь T_J – постоянная инерции ротора генератора;

$P_0 = P_{нагр.}$ – мощность турбины (для электропередачи без потерь – равна мощности нагрузки);

P_{gi} – электрическая мощность генератора для состояния «i» электропередачи;

$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \alpha$ – ускорение ротора рассматриваемого генератора;

$x_{12}^{(i)}$ – взаимное сопротивление между точкой приложения э.д.с. E'_q и шинами системы U_c для состояния «i» электропередачи.

Для определения собственного $x_{11}^{(i)}$ и взаимного $x_{12}^{(i)}$ сопротивлений схему замещения электропередачи для рассматриваемого режима необходимо преобразовать к эквивалентной трехлучевой звезде. Например, для второго аварийного режима – отключения к.з. в начале линии с одной стороны, исходная схема замещения (рис. 11):

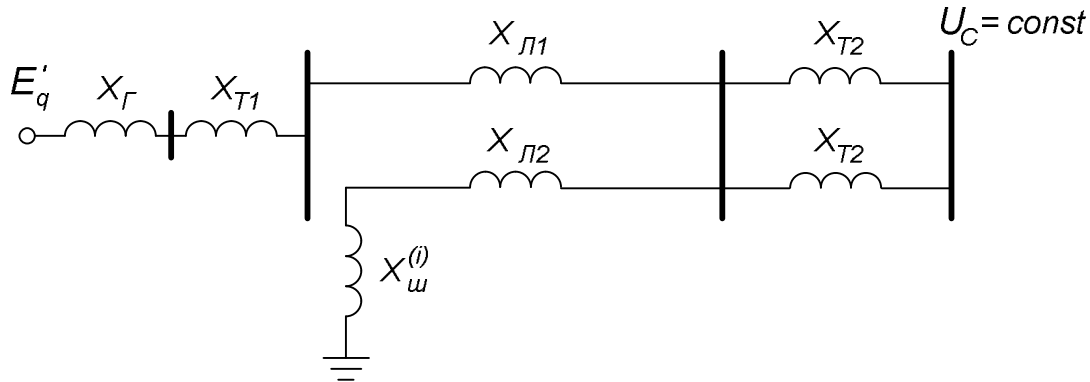


Рис. 11. Исходная схема замещения системы для второго аварийного режима.

На рис. 11 $x_{ш}^{(i)}$ – сопротивление аварийного шунта для рассматриваемого режима.

Преобразованная схема для этого же режима (рис. 12):

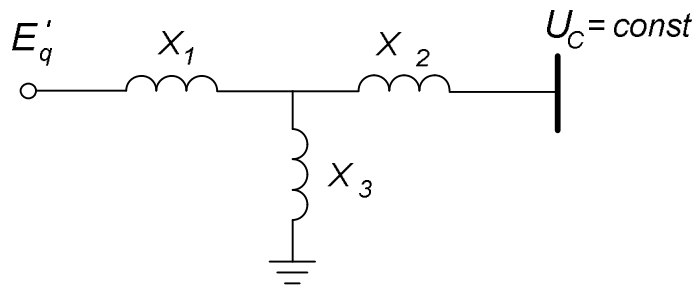


Рис. 12. Преобразованная схема замещения для второго аварийного режима

На рис. 12: $x_1 = x_{Г} + x_{T1} + x_{Л1}$; $x_2 = x_{T2}/2$; $x_3 = x_{Л2} + x_{ш}^{(i)}$.

Собственное $x_{11}^{(i)}$ сопротивление схемы, изображенной на рис. 12:

$$x_{11}^{(i)} = x_1 + \frac{x_2 \cdot x_3}{x_2 + x_3}. \quad (16)$$

Взаимное $x_{12}^{(i)}$ сопротивление:

$$x_{12}^{(i)} = x_1 + x_2 + \frac{x_1 \cdot x_2}{x_3}. \quad (17)$$

Величины, входящие в уравнение относительного движения ротора, могут быть выражены или в именованных единицах, или частично – в относительных, частично – в именованных [3]. В приведенной выше записи уравнения размерность δ , t , T_J – в радианах, P_0 и P_{ci} – в относительных единицах. В курсовой работе рекомендуется время t и постоянную инерции T_J выражать в секундах – (с), мощности – в относительных единицах, а угол δ – в электрических градусах (эл. град), или в радианах (рад).

В первом случае, когда угол выражен в электрических градусах, уравнение (15) имеет следующий вид:

$$\frac{T_J}{360 \cdot f_0} \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_0 - P_{ci}, \quad (18)$$

где $f_0 = 50$ Гц.

Выразив угол в радианах, получим уравнение (15) в виде:

$$\frac{T_J}{\omega_0} \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_0 - P_{ci}, \quad (19)$$

где $\omega_0 = 2\pi f_0 = 314$.

В курсовой работе рекомендуется использовать последнюю запись уравнения относительного движения ротора – (19), т.к. в наиболее часто используемом при выполнении расчетов пакете прикладных программ *Mathcad* при работе с тригонометрическими функциями углы, по умолчанию, берутся в радианах.

В курсовой работе выполняются два расчета динамической устойчивости электропередачи: без учета (приближенный расчет) и с учетом реакции якоря генератора и действия АРВ (уточненный расчет).

При выполнении уточненного расчета для конкретности принимается, что изменение синхронной э.д.с. E_{qe} происходит до установившегося значения по экспоненциальному закону с постоянной времени T_e . Максимальная крат-

ность тока возбуждения и соответствующая э.д.с. принимается равной $E_{qe(nped)} = 5$. При этом к дифференциальному уравнению движения ротора (19) добавляется дифференциальное уравнение переходной э.д.с. и уравнение изменения синхронной э.д.с.:

$$T_{d0} \cdot \frac{dE'_q}{dt} = E_{qe} - E_q, \quad (20)$$

$$E_{qe} = E_{qe(0)} + \left(E_{qe(nped)} - E_{qe(0)} \right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_e}} \right). \quad (21)$$

Здесь T_{d0} – постоянная времени обмотки возбуждения, (с);

T_e – постоянная времени возбудителя, (с).

В выражении (20) синхронная э.д.с. E_q является величиной переменной.

Для неявнополюсной машины (турбогенератора) её изменение во времени описывается выражением

$$E_{q(t)} = \frac{\frac{E'_{q(t)} - U_c}{x_{12}^{(i)}} \cdot \frac{\frac{x_d}{n_z} - \frac{x'_d}{n_z} \cdot \cos \delta(t)}{1 - \frac{\frac{x_d}{n_z} - \frac{x'_d}{n_z}}{x_{11}^{(i)}}}}{\frac{x_d}{n_z} - \frac{x'_d}{n_z}}. \quad (22)$$

В случае явнополюсной машины (гидрогенератор) по формуле (22) вычисляется фиктивная э.д.с. $E_{Q(t)}$. При этом в формулу (22) вместо x_d/n_z подставляется сопротивление x_q/n_z . Необходимое для решения дифференциального уравнения значение $E_{q(t)}$ определяется по выражению (9):

$$E_q^{(я)} = E_Q \frac{x_d - x'_d}{x_q - x'_d} - E'_q \frac{x_d - x_q}{x_q - x'_d}.$$

Численное интегрирование уравнений (19) и (20) выполняется методом после-

довательных интервалов.

3.2. Расчет по правилу площадей

При выполнении приближенного расчета, в соответствии с заданным алгоритмом развития переходного процесса, строятся угловые характеристики мощности для нормального (исходного) P_I , аварийного P_{II} (или нескольких аварийных - P_{II-1} , P_{II-2} и т.п.) и послеаварийного P_{III} режимов при $E'_q = const$. Генератор вводится в схему замещения своим переходным сопротивлением x'_d . Собственное и взаимное сопротивления $x_{11}^{(i)}$ и $x_{12}^{(i)}$ для схем замещения соответствующих режимов определяются с учетом сопротивления аварийного шунта $x_{ш}^{(i)}$, зависящего от вида к.з. и определяемого по эквивалентным сопротивлениям обратной и нулевой последовательностей относительно точки к.з. [1]. Ниже дан пример построения угловых характеристик для одного из возможных алгоритмов развития переходного процесса.

Пример 5. В электрической системе, приведенной на рис. 13, произошло двухфазное к.з. на землю на расстоянии l_a от шин станции. Выключатель $Q1$ со стороны станции отключен первой ступенью дистанционной защиты, действующей без выдержки времени. Выключатель $Q2$ – со стороны системы – отключен второй ступенью дистанционной защиты, имеющей выдержку времени на срабатывание 0,5 сек. Определить сопротивления исходного, аварийных и послеаварийного режимов и построить угловые характеристики мощности.

Решение. В исходном режиме – при отсутствии к.з. – эквивалентное сопротивление электропередачи:

$$x_{н.р.} = x_I = \frac{x_G}{n} + \frac{x_{T1}}{n} + \frac{x_{Л1}}{2} + \frac{x_{T2}}{2} = \frac{x_G}{n} + x_{внеш.}.$$

Для схемы замещения первого аварийного режима, когда к.з. только возникло и еще включены оба выключателя поврежденной линии – рис. 13,б, треугольник, образованный сопротивлениями линий, преобразуем в звезду:

$$a = l_a / l_{линии},$$

$$x'_{Л2} = a \cdot x_{Л2}$$

$$x''_{J2} = (1-a) \cdot x_{J2}$$

$$x_1 = \frac{x_{J1} \cdot x'_{J2}}{x_{J1} + x'_{J2} + x''_{J2}} = \frac{x_{J1} \cdot x'_{J2}}{2 \cdot x_{J1}} = \frac{x'_{J2}}{2};$$

$$x_2 = \frac{x_{J1} \cdot x''_{J2}}{x_{J1} + x'_{J2} + x''_{J2}} = \frac{x_{J1} \cdot x''_{J2}}{2 \cdot x_{J1}} = \frac{x''_{J2}}{2};$$

$$x_3 = \frac{x'_{J2} \cdot x''_{J2}}{x_{J1} + x'_{J2} + x''_{J2}} = \frac{x'_{J2} \cdot x''_{J2}}{2 \cdot x_{J1}}.$$

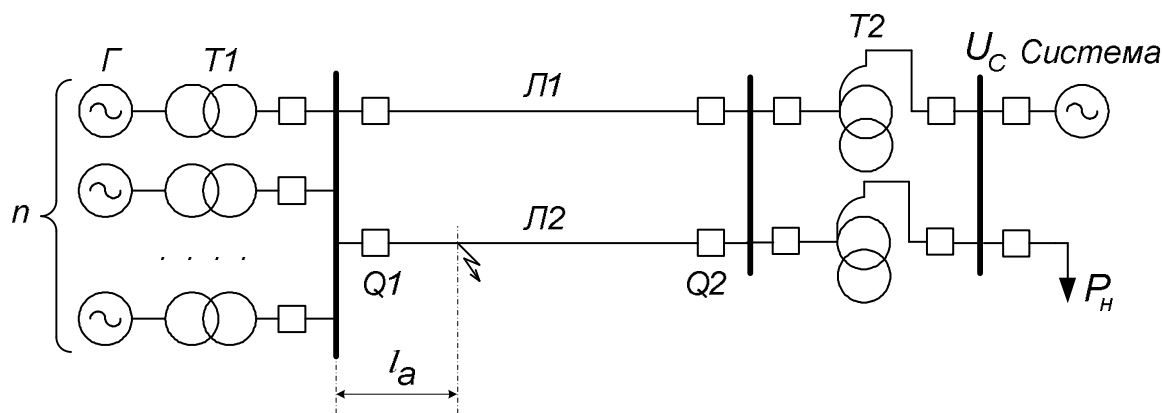
Для получившейся эквивалентной схемы замещения – рис. 14 – определим сопротивление шунта, соответствующее заданному виду к.з.

Напомним, что в зависимости от вида к.з. величина аварийного шунта определяется по формулам, приведенным в таблице 3 [1]:

Таблица 3

Вид к.з.	Обозначение к.з.	Формула для определения аварийного шунта
Трёхфазное	$\kappa^{(3)}$	$x_{ш}^{(3)} = 0$
Двухфазное	$\kappa^{(2)}$	$x_{ш}^{(2)} = x_{\text{экв.О.П.}}$
Однофазное	$\kappa^{(1)}$	$x_{ш}^{(1)} = x_{\text{экв.О.П.}} + x_{\text{экв.Н.П.}}$
Двухфазное на землю	$\kappa^{(1,1)}$	$x_{ш}^{(1,1)} = \left(x_{\text{экв.О.П.}} \cdot x_{\text{экв.Н.П.}} \right) / \left(x_{\text{экв.О.П.}} + x_{\text{экв.Н.П.}} \right)$

В таблице 3 $x_{\text{экв.О.П.}}$ - эквивалентное сопротивление схемы обратной последовательности системы, преобразованное к точке к.з.



а)

Рис. 13(а). Электрическая система для примера 5.

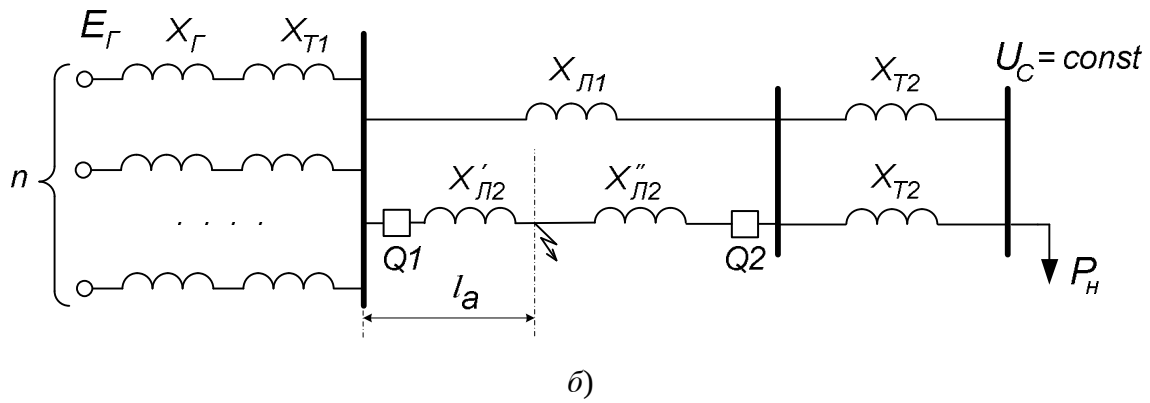


Рис. 13(б). Схема замещения электрической системы для примера 5.

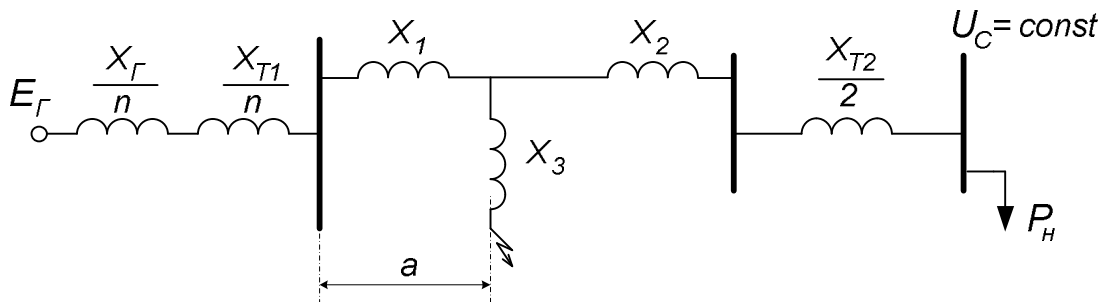


Рис. 14. Эквивалентная схема замещения

Для рис. 14:

$$x_4 = \frac{x_{Г.ОП}}{n} + \frac{x_{T1}}{n} + x_1; \quad x_5 = x_2 + \frac{x_{T2}}{2}.$$

Здесь $x_{Г.ОП}$ – сопротивление обратной последовательности генератора.

$$x_{1экв.О.П.} = \frac{x_4 \cdot x_5}{x_4 + x_5} + x_3.$$

$x_{экв.Н.П.}$ – эквивалентное сопротивление схемы нулевой последовательности системы, преобразованное к точке к.з. Для рис. 14:

$$x_6 = \frac{x_{T1}}{n} + 3 \cdot x_1; \quad x_7 = 3 \cdot x_2 + \frac{x_{T2}}{2}.$$

$$x_{1экв.Н.П.} = \frac{x_6 \cdot x_7}{x_6 + x_7} + 3 \cdot x_3.$$

Сопротивление шунта, соответствующее заданному виду к.з.:

$$x_{ш1} = x_{ш}^{(1,1)} = \frac{x_{1экв.О.П.} \cdot x_{1экв.Н.П.}}{x_{1экв.О.П.} + x_{1экв.Н.П.}}.$$

Добавив сопротивление шунта $x_{ш1}$ в схему прямой последовательности рассматриваемой системы – рис. 15, определяем сопротивление схемы для первого аварийного режима.

$$x_8 = \frac{x_\Gamma}{n} + \frac{x_{T1}}{n} + x_1; \quad x_9 = x_2 + \frac{x_{T2}}{2}; \quad x_{10} = x_3 + x_{ш1},$$

$$x_{ав.р.1} = x_{II-1} = x_8 + x_9 + \frac{x_8 \cdot x_9}{x_{10}}.$$

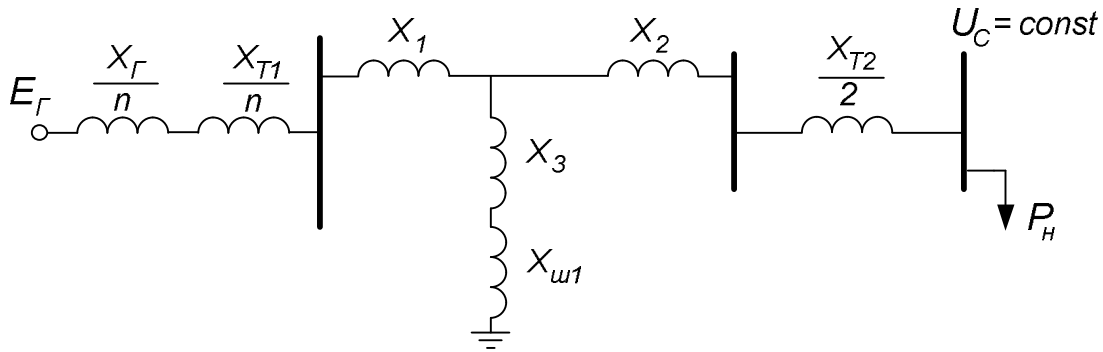


Рис. 15. Схема прямой последовательности с аварийным шунтом $x_{ш1}$.

Для схемы замещения второго аварийного режима, когда к.з. уже отключено с одной стороны – выключен выключатель Q1 – необходимо вновь определить сопротивление аварийного шунта:

$$x_{11} = \frac{x_{\Gamma.ОП}}{n} + \frac{x_{T1}}{n} + x_{Л1}; \quad x_{12} = \frac{x_{T2}}{2}.$$

$$x_{2экв.О.П.} = \frac{x_{11} \cdot x_{12}}{x_{11} + x_{12}} + x_{Л2}''.$$

$$x_{13} = \frac{x_{T1}}{n} + 3 \cdot x_{Л1}; \quad x_{14} = x_{12} = \frac{x_{T2}}{2}.$$

$$x_{2экв.Н.П.} = \frac{x_{13} \cdot x_{14}}{x_{13} + x_{14}} + 3 \cdot x_{Л2}''.$$

Сопротивление шунта для второй аварийной схемы:

$$x_{ш2} = x_{ш}^{(1,1)} = \frac{x_{2экв.О.П.} \cdot x_{2экв.Н.П.}}{x_{2экв.О.П.} + x_{2экв.Н.П.}}.$$

Добавив сопротивление шунта $x_{ш2}$ в схему прямой последовательности рассматриваемой системы – рис. 16, определяем сопротивление схемы для второго аварийного режима.

$$x_{15} = \frac{x_{\Gamma}}{n} + \frac{x_{T1}}{n} + x_{Л1} ; \quad x_{16} = \frac{x_{T2}}{2} ; \quad x_{17} = x''_{Л2} + x_{ш2} ,$$

$$x_{ав.р.2} = x_{II-2} = x_{15} + x_{16} + \frac{x_{15} \cdot x_{16}}{x_{17}} .$$

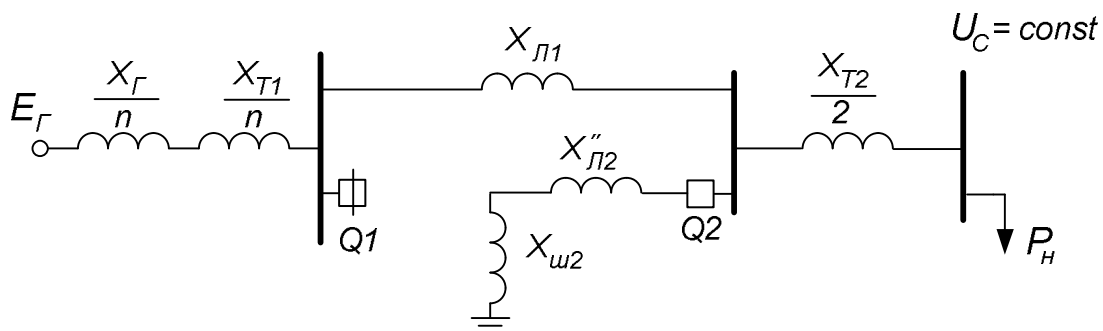


Рис. 16. Схема прямой последовательности с аварийным шунтом $x_{ш2}$

В послеаварийном режиме – после отключения поврежденной линии с обеих сторон – эквивалентное сопротивление электропередачи:

$$x_{n/a.p.} = x_{III} = \frac{x_{\Gamma}}{n} + \frac{x_{T1}}{n} + x_{Л1} + \frac{x_{T2}}{2} .$$

Формулы для угловых характеристик сведены в табл. 4. В этих формулах угол δ - текущая координата, изменяющаяся от 0 до π рад. Характеристики построены на рис. 17.

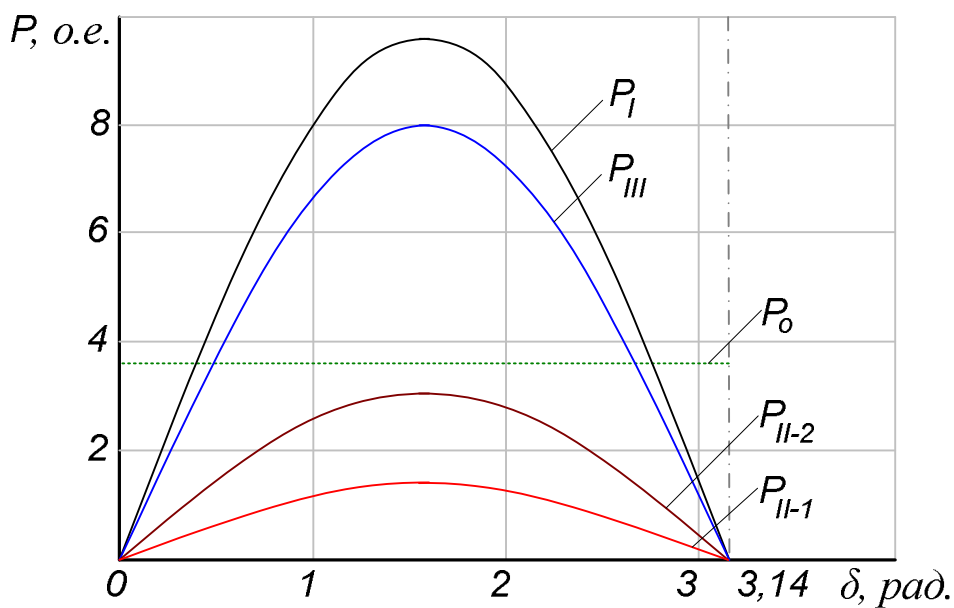


Рис. 17. Угловые характеристики мощности для примера 5.

Таблица 4

Режим	Формула для расчета угловой характеристики	Режим	Формула
Нормальный	$P_I = \frac{E' \cdot U}{q \cdot c} \cdot \sin \delta = \frac{E' \cdot U}{q \cdot c} \cdot \sin \delta$	Второй аварийный	$P_{II-2} = \frac{E' \cdot U}{q \cdot c} \cdot \sin \delta$
Первый аварийный	$P_{II-1} = \frac{E' \cdot U}{q \cdot c} \cdot \sin \delta$	После-аварийный	$P_{III} = \frac{E' \cdot U}{q \cdot c} \cdot \sin \delta$

По правилу площадей непосредственно оценить предельный угол отключения к.з. $\delta_{откл.пред.}$ (далее в тексте - $\delta_{пр.}$) можно лишь для частного случая одновременного отключения поврежденной линии с двух сторон и отсутствия АПВ. При этом должны быть равны между собой площадки, характеризующие избыточные кинетические энергии ускорения и торможения [3,4]:

$$A_{уск.} = A_{торм.} \quad (23)$$

$$\text{Здесь } A_{уск.} = \int_{\delta_0}^{\delta_{пр.}} \Delta P_{(i)} d\delta ,$$

$$A_{торм.} = \int_{\delta_{пр.}}^{\delta_{кр.}} \Delta P_{(i)} d\delta ,$$

$$\Delta P_{(i)} = P_0 - \frac{E' \cdot U}{q \cdot c} \cdot \sin \delta ,$$

$$\delta_{кр.} = \pi - \arcsin \left(\frac{P_0}{P_{mIII}} \right) .$$

Предельный угол отключения в этом случае [3, 4]:

$$\delta_{пр.} = \arccos \left(\frac{P_0 (\delta_{кр.} - \delta_0) + P_{mIII} \cos \delta_{кр.} - P_{mII} \cos \delta_0}{P_{mIII} - P_{mII}} \right) . \quad (24)$$

Графическая иллюстрация приведена на рис. 18.

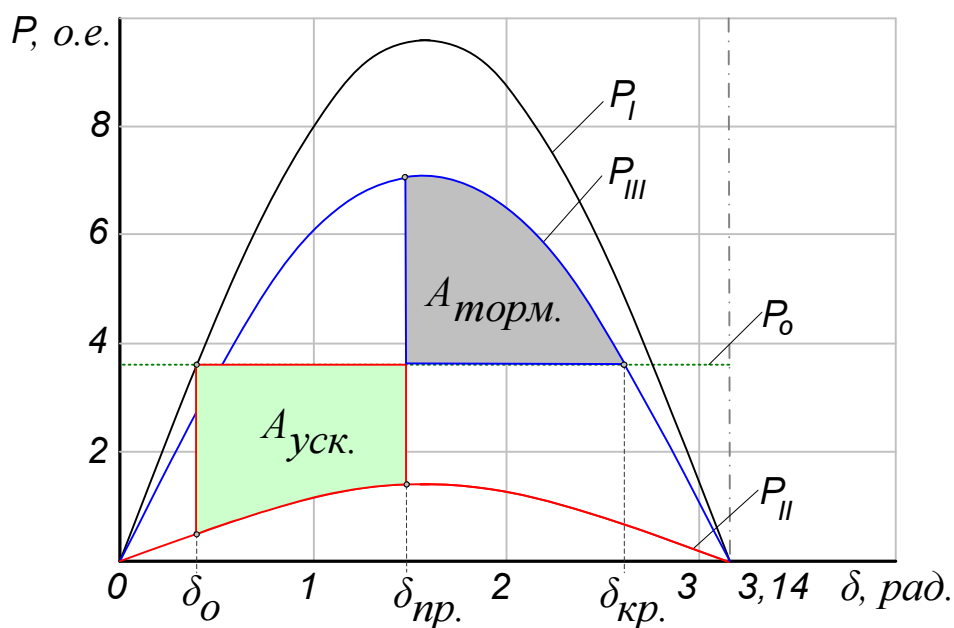


Рис. 18. Соотношение площадок ускорения и торможения при определении предельного угла отключения к.з.

При отключении выключателей на поврежденной линии в разное время, успешном или неуспешном АПВ, конфигурация площадок ускорения и торможения сложная, появляются дополнительные значения углов, соответствующие моментам отключения линии с каждой стороны, последующей проверки состояния линии с помощью АПВ с контролем отсутствия напряжения (АПВ КОН) и, в случае устранения повреждения – включения линии под нагрузку с помощью АПВ с контролем наличия напряжения (АПВ КНН) – рис. 19,а; при устойчивом повреждении происходит возврат переходного процесса на соответствующую аварийную характеристику – рис. 19,б. В результате предельный угол отключения к.з. можно определить только путем последовательного подбора предельного времени отключения к.з., т.е. путем численного эксперимента.

По отношению площадки возможного торможения к площадке фактического ускорения оценивается запас динамической устойчивости:

$$k_{\text{зат.дин}} = \frac{A_{\text{возм.торм.}}}{A_{\text{уск.}}} = \frac{\delta_{\text{отк.}}}{\delta_{\text{отк.}}} \frac{\int_{\delta_o}^{\delta_{\text{кр.}}} \Delta P_{(i)} d\delta}{\int_{\delta_o}^{\delta_{\text{отк.}}} \Delta P_{(i)} d\delta}, \quad (25)$$

где $\delta_{\text{отк.}}$ – угол отключения к.з.

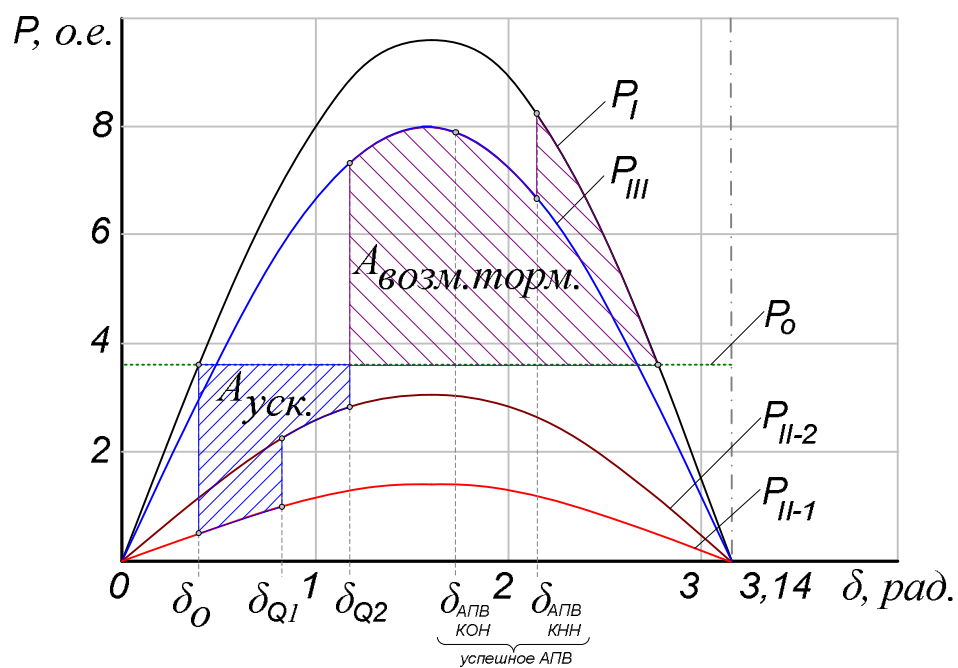
При сложной конфигурации площадок величины $A_{\text{уск.}}$ и $A_{\text{возм.торм.}}$ определяются вычислением нескольких интегралов. Например, для рис. 19,а:

$$k_{\text{зат.дин}} = \frac{A_{\text{возм.торм.}}}{A_{\text{уск.}}} = \frac{\int_{\delta_{Q2}}^{\delta_{KHH}} (P_0 - P_{mIII} \sin \delta) d\delta + \int_{\delta_{KHH}}^{\delta_{\text{кр.}}} (P_0 - P_{mI} \sin \delta) d\delta}{\int_{\delta_o}^{\delta_{Q1}} (P_0 - P_{mII-1} \sin \delta) d\delta + \int_{\delta_{Q1}}^{\delta_{Q2}} (P_0 - P_{mII-2} \sin \delta) d\delta}. \quad (26)$$

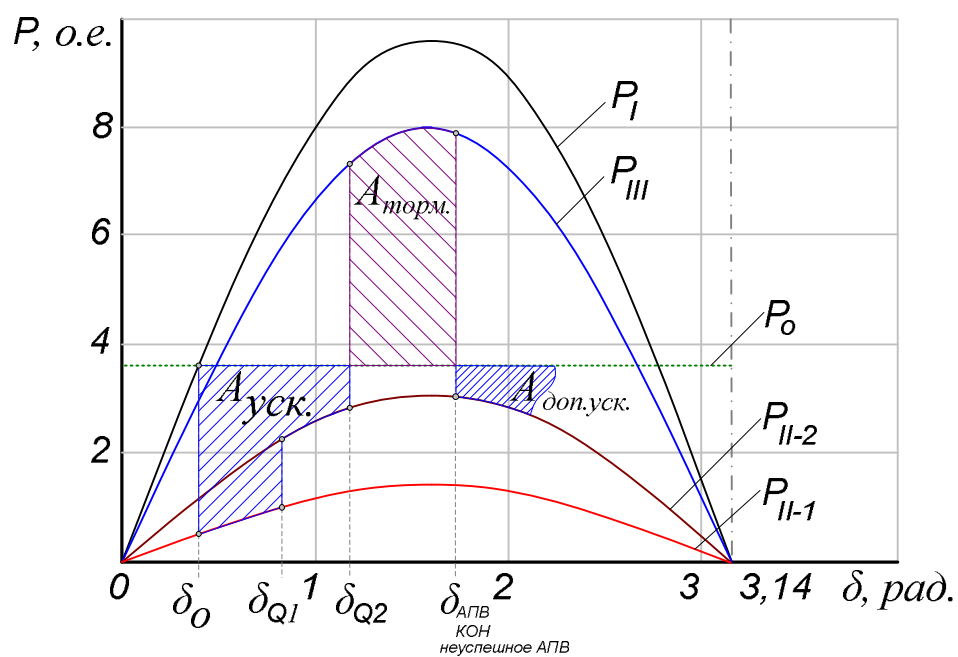
3.3. Использование метода последовательных интервалов в расчетах динамической устойчивости

В курсовой работе метод последовательных интервалов используется для численного интегрирования дифференциальных уравнений (19) и (20). В результате определяются зависимости $\delta = f(t)$, $\alpha = \varphi(t)$. При этом переходный процесс разбивается на равные малые отрезки времени $\Delta t_i = 0,05$ сек, на протяжении каждого из которых соответствующее ускорение α_i считается неизменным.

При выполнении приближенного расчета, связанного с решением только уравнения (19), порядок расчета следующий:



а)



б)

Рис. 19. Конфигурация площадок ускорения и торможения при поочередной коммутации выключателей на поврежденной линии и успешном (а) и неуспешном (б) АПВ.

1. Определяются эквивалентные сопротивления для схем замещения нормального $x_{н.р.} = x_I$, аварийных ($x_{ав.р.1} = x_{II-1}$, $x_{ав.р.2} = x_{II-2}$, $x_{ав.р.j} = x_{II-j}$ и т.п.) и послеаварийного $x_{н/а.р.} = x_{III}$ режимов и строятся соответствующие угловые характеристики.

2. Составляется циклограмма для заданного алгоритма развития переходного процесса, из которой определяются моменты времени, в которые происходит переход от одного расчетного режима к другому. Пример построения циклограммы дан ниже.

Пример 6. В электрической системе, приведенной на рис. 13, произошло двухфазное к.з. на расстоянии l_a от шин станции. Выключатель Q1 со стороны станции отключен первой ступенью дистанционной защиты, действующей без выдержки времени: $t_{pz.1} = 0$ с., $t_{отк.Q1} = 0,1$ с. Выключатель Q2 – со стороны системы – отключен второй ступенью дистанционной защиты, имеющей выдержку времени на срабатывание: $t_{pz.2} = 0,15$ с., $t_{отк.Q2} = 0,1$ с. АПВ с контролем отсутствия напряжения (АПВ КОН) установлена на выключателе Q1: $t_{апв.кон} = 0,15$ с., $t_{вкл.Q1} = 0,1$ с. АПВ с контролем наличия напряжения (АПВ КНН) установлена на выключателе Q2: $t_{апв.кнн} = 0,1$ с., $t_{вкл.Q2} = 0,1$ с. АПВ успешное.

Циклограмма для заданных в примере условий приведена на рис. 20.

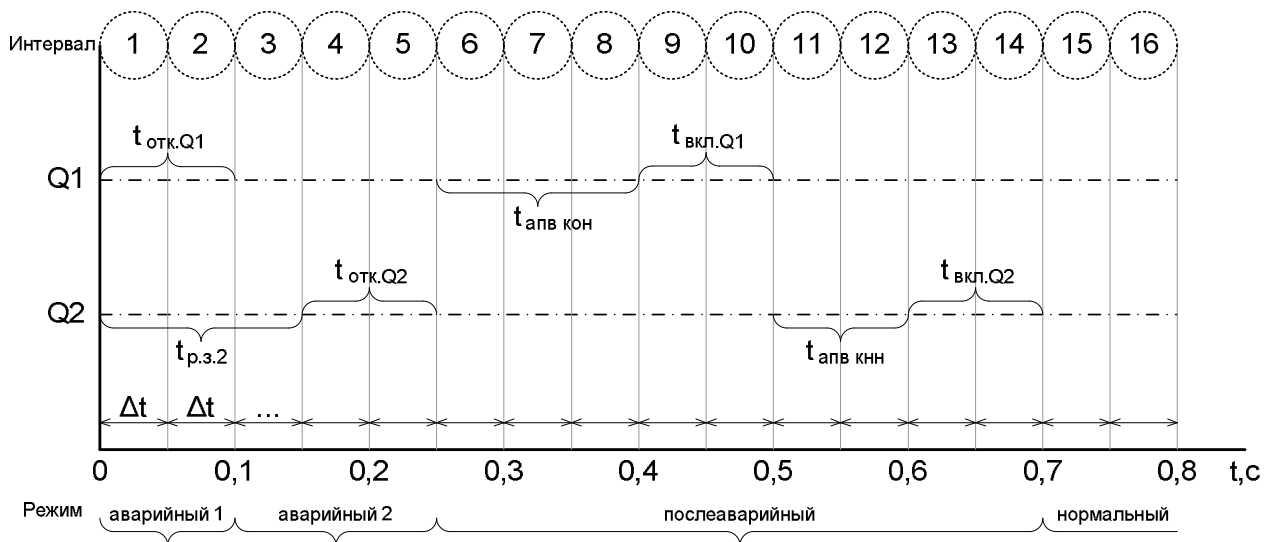


Рис. 20. Циклограмма развития переходного процесса.

3. Для точки баланса: $P_0 = P_{mI} \cdot \sin \delta_0$ определяются исходный угол δ_0 и критический угол для характеристики нормального режима $\delta_{кр.1}$:

$$\delta_0 = \arcsin\left(\frac{P_0}{P_{mI}}\right) = \arcsin\left(\frac{P_0 \cdot \left(\frac{x'_d}{n_z} + x_{внеш.}\right)}{E'_q \cdot U_c}\right), \quad (27)$$

$$\delta_{кр.1} = \pi - \arcsin\left(\frac{P_0 \cdot \left(\frac{x'_d}{n_z} + x_{внеш.}\right)}{E'_q \cdot U_c}\right). \quad (28)$$

Критический угол для характеристики послеаварийного режима:

$$\delta_{кр.2} = \pi - \arcsin\left(\frac{P_0}{P_{mIII}}\right) = \pi - \arcsin\left(\frac{P_0 \cdot \left(\frac{x'_d}{n_z} + \frac{x_{T1}}{n_z} + x_{Л1} + \frac{x_{T2}}{2}\right)}{E'_q \cdot U_c}\right).$$

Кроме того, если генераторов – несколько, по формуле (2) определяется эквивалентная постоянная инерции:

$$T_{J\Sigma} = T_{J(ном)} \cdot \frac{n_{ген} \cdot P_{ном} / \cos(\varphi_{ген.ном})}{S_{\delta}}.$$

4. Для начала переходного процесса по разности мощностей турбины P_0 и генератора P_{II-1} находится изменение угла за первый расчетный интервал:

– разность мощностей в начале первого интервала

$$\Delta P_{(1)} = P_0 - P_{mII-1} \sin(\delta_0) = P_0 - \frac{E'_q \cdot U_c}{x_{II-1}} \sin(\delta_0); \quad (29)$$

– ускорение ротора в начале первого интервала

$$\alpha_{(1)} = \frac{\Delta P_{(1)}}{T_{J\Sigma}} \cdot \omega_0; \quad (30)$$

– приращение угла за первый интервал

$$\Delta \delta_{(1)} = \alpha_{(1)} \cdot \frac{(\Delta t)^2}{2}; \quad (31)$$

– значение угла в конце первого интервала

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

При новом значении угла $\delta_{(1)}$ вычисляется разность мощностей в начале второго интервала $\Delta P_{(2)}$ и определяется приращение угла за второй интервал времени:

$$\begin{aligned}\Delta P_{(2)} &= P_0 - P_{mII-1} \sin\left(\delta_{(1)}\right) = P_0 - \frac{E'_q \cdot U_c}{x_{II-1}} \sin\left(\delta_{(1)}\right); \\ \alpha_{(2)} &= \frac{\Delta P_{(2)}}{T_{J\Sigma}} \cdot \omega_0; \\ \Delta\delta_{(2)} &= \Delta\delta_{(1)} + \alpha_{(2)} \cdot (\Delta t)^2;\end{aligned}\tag{32}$$

Новое значение угла равно

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

5. Приращения угла определяется по формуле (31) только на первом интервале. Для всех последующих интервалов используется формула (32). В случае скачкообразного изменения режима (отключение К.З., успешное или неуспешное АПВ – рис. 19, а, б, рис. 20), когда разность мощностей в начале интервала внезапно изменяется от $\Delta P_{(i,1)}$ до $\Delta P_{(i,2)}$ – рис. 20, интервалы 3, 6, 15 - приращение угла в соответствующем интервале определяется следующим образом:

$$\Delta P_{(i,1)} = P_0 - P_{mII-1} \sin\left(\delta_{(i-1)}\right) = P_0 - \frac{E'_q \cdot U_c}{x_{II-1}} \sin\left(\delta_{(i-1)}\right);\tag{33}$$

$$\Delta P_{(i,2)} = P_0 - P_{mII-2} \sin\left(\delta_{(i-1)}\right) = P_0 - \frac{E'_q \cdot U_c}{x_{II-2}} \sin\left(\delta_{(i-1)}\right);\tag{34}$$

$$\alpha_{(i,1)} = \frac{\Delta P_{(i,1)}}{T_{J\Sigma}} \cdot \omega_0;$$

$$\alpha_{(i,2)} = \frac{\Delta P_{(i,2)}}{T_{J\Sigma}} \cdot \omega_0;$$

$$\alpha_{(i)} = \frac{\left(\alpha_{(i.1)} + \alpha_{(i.2)} \right)}{2}; \quad (35)$$

$$\Delta\delta_{(i)} = \Delta\delta_{(i-1)} + \alpha_{(i)} \cdot (\Delta t)^2.$$

По описанному алгоритму рассчитываются все интервалы циклограммы. Расчет можно завершить раньше при следующих условиях:

- по алгоритму развития переходного процесса АПВ – успешное, и при определении угла $\delta_{(j)}$ на очередном интервале оказалось, что $\Delta\delta_{(j)}$ стало отрицательным, т.е. началось уменьшение угла δ , что свидетельствует о сохранении устойчивости;

- при определении угла $\delta_{(n)}$ на очередном интервале оказалось, что он стал больше предельного по условиям устойчивости угла $\delta_{кр.2}$, генератор потерял устойчивость (выпал из синхронизма).

Расчеты следует выполнять в табличной форме. По результатам расчетов строятся зависимости $\delta = f(t)$, $\alpha = \varphi(t)$ с обозначением характерных углов и соответствующих значений времени.

Пример 7. В электрической системе, приведенной на рис. 21, произошло двухфазное к.з. на расстоянии $l_a = 15$ км от шин ТЭС. Выключатель Q1 со стороны станции отключен первой ступенью дистанционной защиты, действующей без выдержки времени: $t_{pz.1} = 0$ с., $t_{отк.Q1} = 0,1$ с. Выключатель Q2 – со стороны системы – отключен второй ступенью дистанционной защиты, имеющей выдержку времени на срабатывание: $t_{pz.2} = 0,15$ с., $t_{отк.Q2} = 0,1$ с. АПВ с контролем отсутствия напряжения (АПВ КОН) установлена на выключателе Q1: $t_{ав.кон} = 0,15$ с., $t_{вкл.Q1} = 0,1$ с. АПВ с контролем наличия напряжения (АПВ КНН) установлена на выключателе Q2: $t_{ав.кнн} = 0,1$ с., $t_{вкл.Q2} = 0,1$ с.

Исходные данные для элементов системы взять из примера 1.

Выполнить приближенную оценку устойчивости динамического перехода при $E'_q = const$ для двух вариантов электромеханического переходного процесса:

- 1) АПВ успешное;
- 2) АПВ неуспешное, действие защиты линии – как и при первом отключении к.з.

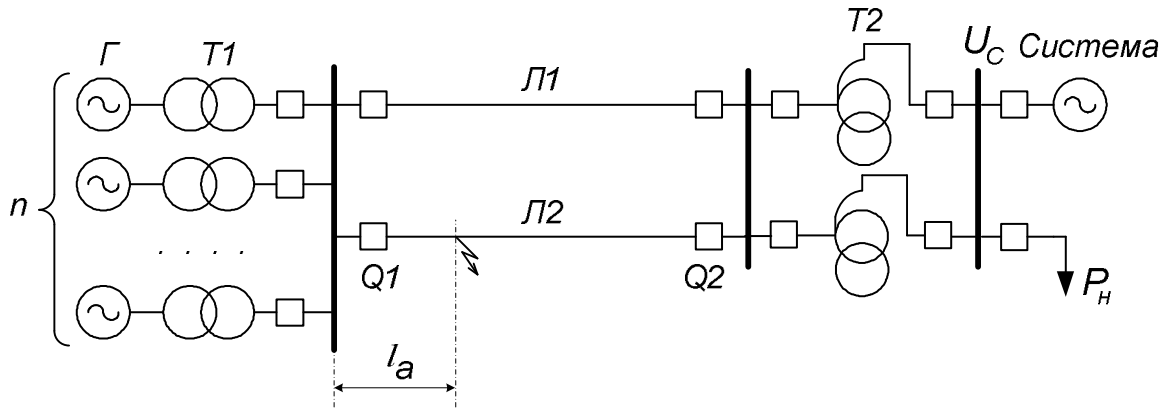


Рис. 21. Электрическая система для примера 7.

Решение. Алгоритм развития аварийного процесса и исходные данные элементов системы взяты такими же, как и в предыдущих примерах для того, чтобы можно было использовать часть рассчитанных ранее величин без дополнительного пересчета.

Схема замещения системы в начальный момент переходного процесса:

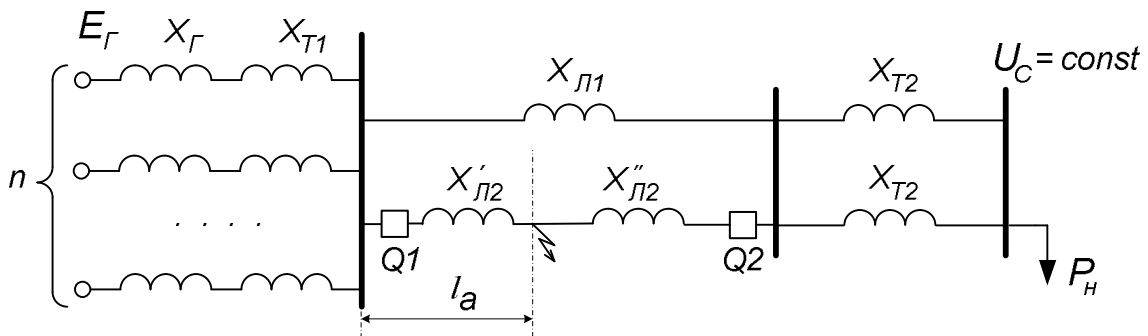


Рис. 22. Схема замещения системы в момент возникновения к.з.

Параметры элементов системы и параметры режима, определенные для базисных условий в примере 1 (в относительных единицах):

$$\begin{aligned}
 x_G = x'_d &= 0,28; & n_2 &= 4; & x_{G.OП} = x_2 &= 0,24; \\
 x_{T1} &= 0,098; & x_{T2} &= 0,066; & x_{L1} = x_{L2} &= 0,186; \\
 U_c &= 1; & P_H &= 2; & Q_H &= 1,344.
 \end{aligned}$$

Поперечная составляющая переходной э.д.с., рассчитанная для генератора с АРВ ПД в примере 2:

$$E'_q = 1,329.$$

Определим сопротивления участков линии 2 и рассчитаем сопротивления нормального, аварийных и послеаварийного режимов по алгоритму, изложенному в примере 5.

Исходный режим:

$$x_{н.р.} = x_I = \frac{x_{Г}}{n_2} + \frac{x_{T1}}{n_2} + \frac{x_{Л1}}{2} + \frac{x_{T2}}{2} = \frac{0,28}{4} + \frac{0,098}{4} + \frac{0,186}{2} + \frac{0,066}{2} = 0,22.$$

Первый аварийный режим – включены оба выключателя (рис. 22):

$$a = l_a / l_{линии} = 15/75 = 0,2;$$

$$x'_{Л2} = a \cdot x_{Л2} = 0,2 \cdot 0,186 = 0,0372; \quad x''_{Л2} = (1-a) \cdot x_{Л2} = 0,8 \cdot 0,186 = 0,149;$$

$$x_1 = \frac{x'_{Л2}}{2} = \frac{0,0372}{2} = 0,0186; \quad x_2 = \frac{x''_{Л2}}{2} = \frac{0,149}{2} = 0,0744; \quad x_3 = \frac{x'_{Л2} \cdot x''_{Л2}}{2 \cdot x_{Л1}} = 0,0037.$$

Вид к.з. – тот же, что и в примере 5, поэтому для определения сопротивления аварийного шунта используем уже полученные формулы:

$$x_4 = \frac{x_{Г.ОП}}{n_2} + \frac{x_{T1}}{n_2} + x_1 = \frac{0,24}{4} + \frac{0,098}{4} + 0,0186 = 0,1031;$$

$$x_5 = x_2 + \frac{x_{T2}}{2} = 0,0744 + \frac{0,066}{2} = 0,1074.$$

$$x_{1экв.О.П.} = \frac{x_4 \cdot x_5}{x_4 + x_5} + x_3 = \frac{0,1031 \cdot 0,1074}{0,1031 + 0,1074} + 0,0037 = 0,0563.$$

$$x_6 = \frac{x_{T1}}{n_2} + 3 \cdot x_1 = \frac{0,098}{4} + 3 \cdot 0,0186 = 0,0803;$$

$$x_7 = 3 \cdot x_2 + \frac{x_{T2}}{2} = 3 \cdot 0,0744 + \frac{0,066}{2} = 0,2562.$$

$$x_{1экв.Н.П.} = \frac{x_6 \cdot x_7}{x_6 + x_7} + 3 \cdot x_3 = \frac{0,0803 \cdot 0,2562}{0,0803 + 0,2562} + 3 \cdot 0,0037 = 0,0722.$$

Сопротивление шунта, соответствующее заданному виду к.з.:

$$x_{ш1} = x_{ш}^{(1,1)} = \frac{x_{1экв.О.П.} \cdot x_{1экв.Н.П.}}{x_{1экв.О.П.} + x_{1экв.Н.П.}} = \frac{0,0563 \cdot 0,0722}{0,0563 + 0,0722} = 0,0316.$$

Добавив сопротивление шунта $x_{ш1}$ в схему прямой последовательности, определяем сопротивление схемы для первого аварийного режима.

$$x_8 = \frac{x_{Г}}{n_2} + \frac{x_{T1}}{n_2} + x_1 = \frac{0,28}{4} + \frac{0,098}{4} + 0,0186 = 0,1131;$$

$$x_9 = x_2 + \frac{x_{T2}}{2} = 0,0744 + \frac{0,066}{2} = 0,1074;$$

$$x_{10} = x_3 + x_{ш1} = 0,0037 + 0,0316 = 0,0353,$$

$$x_{ав.р.1} = x_{II-1} = x_8 + x_9 + \frac{x_8 \cdot x_9}{x_{10}} = 0,1131 + 0,1074 + \frac{0,1131 \cdot 0,1074}{0,0353} = 0,565.$$

Второй аварийный режим – выключатель Q1 отключен (рис. 23):

$$x_{11} = \frac{x_{Г.ОП}}{n} + \frac{x_{T1}}{n} + x_{Л1} = \frac{0,24}{4} + \frac{0,098}{4} + 0,186 = 0,27; \quad x_{12} = \frac{x_{T2}}{2} = \frac{0,066}{2} = 0,033.$$

$$x_{2экв.О.П.} = \frac{x_{11} \cdot x_{12}}{x_{11} + x_{12}} + x''_{Л2} = \frac{0,27 \cdot 0,033}{0,27 + 0,033} + 0,149 = 0,178.$$

$$x_{13} = \frac{x_{T1}}{n} + 3 \cdot x_{Л1} = \frac{0,098}{4} + 3 \cdot 0,186 = 0,582; \quad x_{14} = x_{12} = \frac{x_{T2}}{2} = 0,033.$$

$$x_{2экв.Н.П.} = \frac{x_{13} \cdot x_{14}}{x_{13} + x_{14}} + 3 \cdot x''_{Л2} = \frac{0,582 \cdot 0,033}{0,582 + 0,033} + 3 \cdot 0,149 = 0,478.$$

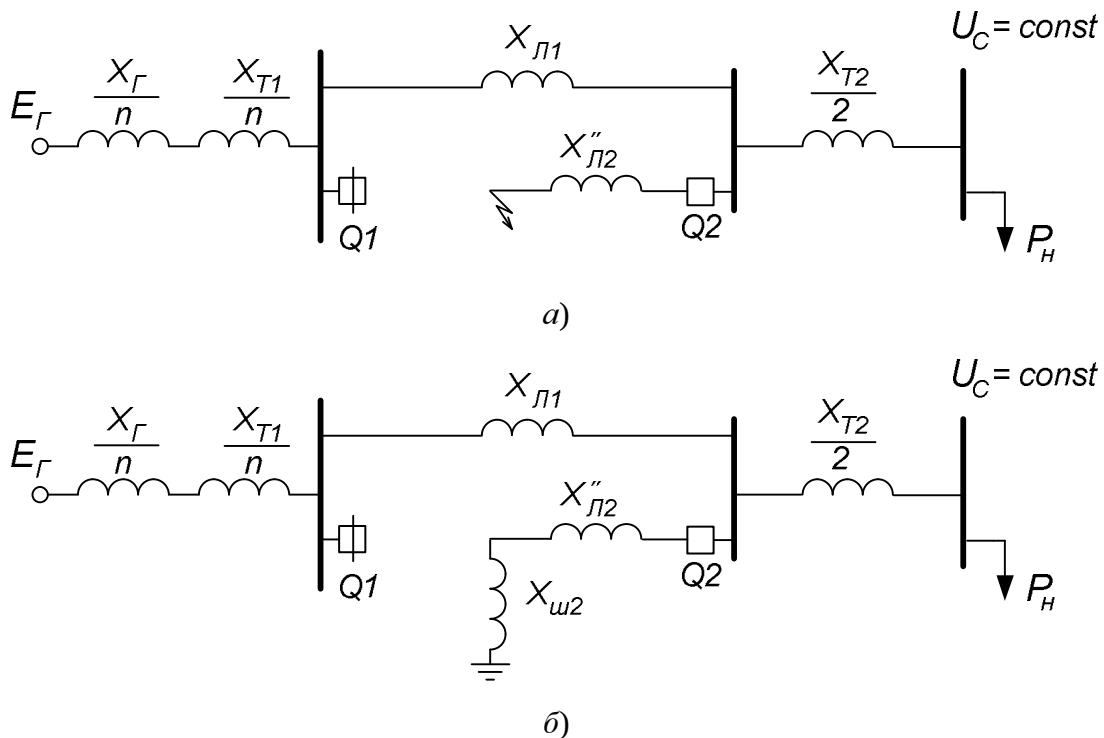


Рис. 23. Схема замещения для второго аварийного режима (а) и схема прямой последовательности с аварийным шунтом $x_{ш2}$ - (б).

Сопротивление шунта для второй аварийной схемы:

$$x_{ш2} = x_{ш}^{(1,1)} = \frac{x_{2экв.О.П.} \cdot x_{2экв.Н.П.}}{x_{2экв.О.П.} + x_{2экв.Н.П.}} = \frac{0,178 \cdot 0,478}{0,178 + 0,478} = 0,089 .$$

Сопротивление схемы для второго аварийного режима (рис. 23, б).

$$x_{15} = \frac{x_{Г}}{n_2} + \frac{x_{T1}}{n_2} + x_{Л1} = \frac{0,28}{4} + \frac{0,098}{4} + 0,186 = 0,28 ;$$

$$x_{16} = \frac{x_{T2}}{2} = 0,033 ; \quad x_{17} = x_{Л2}'' + x_{ш2} = 0,149 + 0,089 = 0,238 ,$$

$$x_{ав.р.2} = x_{II-2} = x_{15} + x_{16} + \frac{x_{15} \cdot x_{16}}{x_{17}} = 0,28 + 0,033 + \frac{0,28 \cdot 0,033}{0,238} = 0,352 .$$

Если на отключившейся линии произойдет неуспешное АПВ КОН на выключателе Q1, возникнет третий аварийный режим – выключатель Q1 включен, выключатель Q2 отключен (рис. 24):

$$x_{18} = \frac{x_{Г.ОП}}{n} + \frac{x_{T1}}{n} = \frac{0,24}{4} + \frac{0,098}{4} = 0,0845 ;$$

$$x_{19} = x_{Л1} + \frac{x_{T2}}{2} = 0,186 + \frac{0,066}{2} = 0,219 ;$$

$$x_{3экв.О.П.} = \frac{x_{18} \cdot x_{19}}{x_{18} + x_{19}} + x_{Л2}' = \frac{0,0845 \cdot 0,219}{0,0845 + 0,219} + 0,0372 = 0,098 .$$

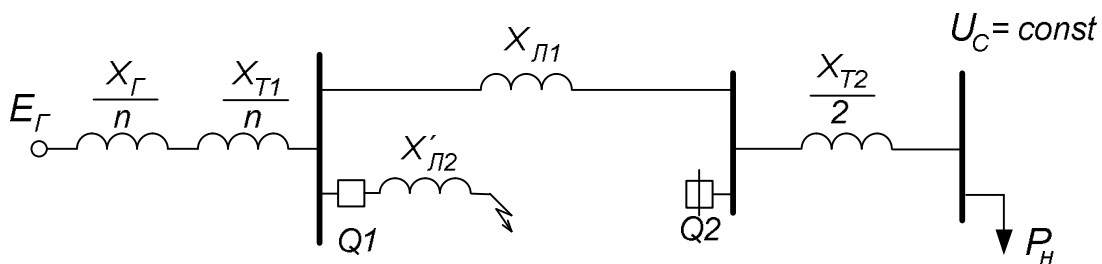


Рис. 24. Схема прямой последовательности в момент неуспешного АПВ КОН.

$$x_{20} = \frac{x_{T1}}{n} = \frac{0,098}{4} = 0,0245 ; \quad x_{21} = 3 \cdot x_{Л1} + \frac{x_{T2}}{2} = 3 \cdot 0,186 + 0,033 = 0,591 ;$$

$$x_{3экв.Н.П.} = \frac{x_{20} \cdot x_{21}}{x_{20} + x_{21}} + 3 \cdot x_{Л2}' = \frac{0,0245 \cdot 0,591}{0,0245 + 0,591} + 3 \cdot 0,0372 = 0,135$$

Сопротивление шунта для третьей аварийной схемы:

$$x_{ш3} = x_{ш}^{(1,1)} = \frac{x_{3экв.О.П.} \cdot x_{3экв.Н.П.}}{x_{3экв.О.П.} + x_{3экв.Н.П.}} = \frac{0,098 \cdot 0,135}{0,098 + 0,135} = 0,057.$$

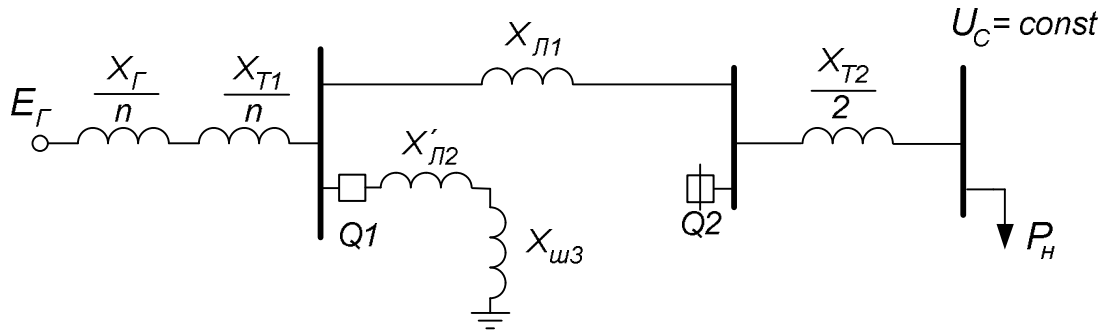


Рис. 25. Схема прямой последовательности с аварийным шунтом $x_{ш3}$.

Сопротивление схемы для третьего аварийного режима.

$$x_{22} = \frac{x_{Г}}{n_2} + \frac{x_{T1}}{n_2} = \frac{0,28}{4} + \frac{0,098}{4} = 0,0945;$$

$$x_{23} = x_{19} = x_{Л1} + \frac{x_{T2}}{2} = 0,186 + \frac{0,066}{2} = 0,219;$$

$$x_{24} = x'_{Л2} + x_{ш3} = 0,0372 + 0,057 = 0,0942,$$

$$x_{ав.р.3} = x_{II-3} = x_{22} + x_{23} + \frac{x_{22} \cdot x_{23}}{x_{24}} = 0,0945 + 0,219 + \frac{0,0945 \cdot 0,219}{0,0942} = 0,533.$$

Эквивалентное сопротивление электропередачи в послеаварийном режиме, после отключения поврежденной линии с обеих сторон:

$$x_{n/a.p.} = x_{III} = \frac{x_{Г}}{n_2} + \frac{x_{T1}}{n_2} + x_{Л1} + \frac{x_{T2}}{2} = \frac{0,28}{4} + \frac{0,098}{4} + 0,186 + \frac{0,066}{2} = 0,313.$$

Сведем полученные результаты в табл. 5. и определим выражения для построения угловых характеристик.

Таблица 5

Режим	Эквивалентное сопротивление схемы замещения, о.е.	Выражение для построения угловой характеристики
1	2	3
Нормальный	$x_{н.р.} = x_I = 0,22$	$P_I = \frac{E' \cdot U_c}{x_I} \cdot \sin \delta = \frac{1,329 \cdot 1}{0,22} \cdot \sin \delta = 6,041 \cdot \sin \delta$

1	2	3
Первый аварийный	$x_{II-1} = 0,565$	$P_{II-1} = \frac{E'_q \cdot U_c}{x_{II-1}} \cdot \sin \delta = 2,352 \cdot \sin \delta$
Второй аварийный	$x_{II-2} = 0,352$	$P_{II-2} = \frac{E'_q \cdot U_c}{x_{II-2}} \cdot \sin \delta = 3,776 \cdot \sin \delta$
Третий аварийный	$x_{II-3} = 0,533$	$P_{II-3} = \frac{E'_q \cdot U_c}{x_{II-3}} \cdot \sin \delta = 2,493 \cdot \sin \delta$
После-аварийный	$x_{III} = 0,313$	$P_{III} = \frac{E'_q \cdot U_c}{x_{III}} \cdot \sin \delta = 4,246 \cdot \sin \delta$

Для точки баланса $P_o = P_{mI} \sin \delta_o$ определяем исходный угол δ_o и критический угол для характеристики нормального режима $\delta_{кр.1}$:

$$\delta_o = \arcsin\left(\frac{P_o}{P_{mI}}\right) = \arcsin\left(\frac{2,0}{6,041}\right) = 0,337 \text{ [рад.]},$$

$$\delta_{кр.1} = \pi - \delta_o = 3,142 - 0,337 = 2,805 \text{ [рад.]}. \quad \delta_{кр.2}$$

Критический угол для характеристики послеаварийного режима:

$$\delta_{кр.2} = \pi - \arcsin\left(\frac{P_o}{P_{mIII}}\right) = \pi - \arcsin\left(\frac{2,0}{4,246}\right) = 3,142 - 0,49 = 2,652 \text{ [рад.]}. \quad \delta_{кр.3}$$

Поскольку генераторов – четыре, по формуле (2) определяем эквивалентную постоянную инерции:

$$T_{J\Sigma} = T_{J(ном)} \cdot \frac{n_{ген} \cdot P_{2.ном} / \cos(\varphi_{ген.ном})}{S_{\delta}} = 7,4 \cdot \frac{4 \cdot 75}{75} = 29,6 \text{ [с.]}. \quad \delta_{кр.4}$$

Методом последовательных интервалов оцениваем динамическую устойчивость рассматриваемой системы для первого варианта – успешного АПВ.

Первый интервал – от 0 до 0,05 с.; в начале интервала на линии 2 произошло двухфазное к.з. на землю. По формулам (29) - (31) определяем величину угла к концу первого интервала:

$$\Delta P_{(1)} = P_o - P_{mII-1} \sin(\delta_o) = 2,0 - 2,352 \cdot \sin(0,337) = 2,0 - 0,778 = 1,222;$$

$$\alpha_{(1)} = \frac{\Delta P_{(1)}}{T_{J\Sigma}} \cdot \omega_o = \frac{1,222}{29,6} \cdot 314 = 12,963;$$

$$\Delta\delta_{(1)} = \alpha_{(1)} \cdot \frac{(\Delta t)^2}{2} = 12,963 \cdot \frac{(0,05)^2}{2} = 0,0162 \text{ [рад.]};$$

$$\delta_{(1)} = \delta_o + \Delta\delta_{(1)} = 0,337 + 0,0162 = 0,3532 \text{ [рад.]}. \quad \Delta P_{(2)} = P_o - P_{mII-1} \sin(\delta_{(1)}) = 2,0 - 2,352 \cdot \sin(0,3532) = 2,0 - 0,814 = 1,186 ;$$

Второй интервал – от 0,05 до 0,1 с.

$$\alpha_{(2)} = \frac{\Delta P_{(2)}}{T_{J\Sigma}} \cdot \omega_o = \frac{1,186}{29,6} \cdot 314 = 12,581 ;$$

$$\Delta\delta_{(2)} = \Delta\delta_{(1)} + \alpha_{(1)} \cdot (\Delta t)^2 = 0,0162 + 12,581 \cdot (0,05)^2 = 0,0476 \text{ [рад.]};$$

$$\delta_{(2)} = \delta_{(1)} + \Delta\delta_{(2)} = 0,3532 + 0,0476 = 0,4 \text{ [рад.]}. \quad \text{Третий интервал – от 0,1 до 0,15 с.; в начале интервала на линии 2 отключается вы-}$$

ключатель Q1 и происходит переход от первого аварийного режима ко второму. Расчет ведется по формулам (33) – (35):

$$\Delta P_{(3.1)} = P_o - P_{mII-1} \sin(\delta_{(2)}) = 2,0 - 2,352 \cdot \sin(0,4) = 2,0 - 0,915 = 1,085 ;$$

$$\Delta P_{(3.2)} = P_o - P_{mII-2} \sin(\delta_{(2)}) = 2,0 - 3,776 \cdot \sin(0,4) = 2,0 - 1,469 = 0,531 ;$$

$$\alpha_{(3.1)} = \frac{\Delta P_{(3.1)}}{T_{J\Sigma}} \cdot \omega_o = \frac{1,085}{29,6} \cdot 314 = 11,51 ;$$

$$\alpha_{(3.2)} = \frac{\Delta P_{(3.2)}}{T_{J\Sigma}} \cdot \omega_o = \frac{0,531}{29,6} \cdot 314 = 5,633 ;$$

$$\alpha_{(3)} = \left(\alpha_{(3.1)} + \alpha_{(3.2)} \right) / 2 = (11,51 + 5,633) / 2 = 8,571 ;$$

$$\Delta\delta_{(3)} = \Delta\delta_{(2)} + \alpha_{(3)} \cdot (\Delta t)^2 = 0,0476 + 8,571 \cdot (0,05)^2 = 0,069 \text{ [рад.]};$$

$$\delta_{(3)} = \delta_{(2)} + \Delta\delta_{(3)} = 0,4 + 0,069 = 0,469 \text{ [рад.]}. \quad \text{На остальных интервалах расчеты ведутся аналогичным образом. Результаты расче-}$$

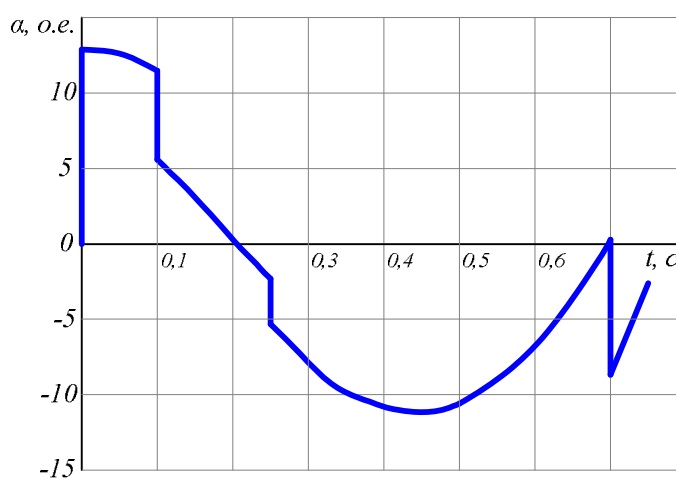
тов сведены в табл. 6.

Поскольку в первом варианте принято условие успешного АПВ, расчеты можно было прекратить после 10 интервала, т.к. $\Delta\delta_{(10)}$ стал отрицательным, т.е. процесс торможения закончился и угол δ начал уменьшаться.

Таблица 6

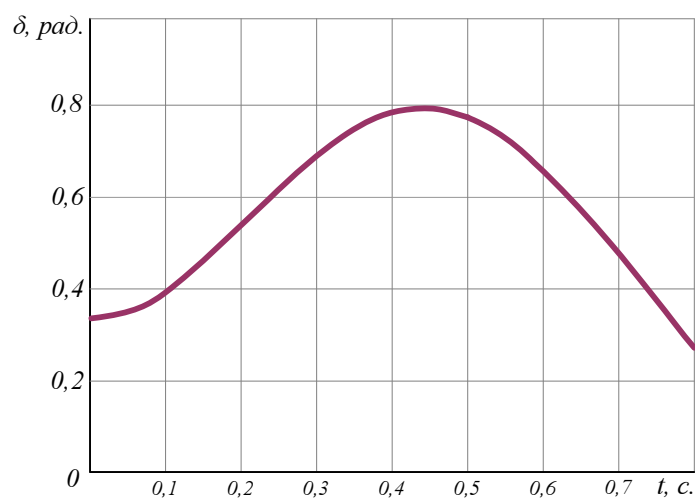
Номер интервала – (i)	$\Delta P_{(i)}$, о.е.	$\alpha_{(i)}$, о.е.	$\Delta \delta_{(i)}$, рад.	$\delta_{(i)}$, рад.	Примечание
0				0,337	Исходный режим
1	1,222	12,963	0,0162	0,3532	К.з. на линии Л2, первый аварийный режим
2	1,186	12,581	0,0476	0,4	
3	1,085 0,531	11,51 5,633	0,069	0,469	Отключение Q1, переход от первого ко второму аварийному режиму
4	0,293	3,108	0,077	0,546	
5	0,04	0,424	0,078	0,624	
6	-0,205 -0,48	-2,177 -5,088	0,0767	0,7	Отключение Q2, переход от второго аварийного режима к послеаварийному
7	-0,734	-7,791	0,057	0,757	
8	-0,917	-9,728	0,033	0,79	
9	-1,015	-10,574	0,0066	0,7966	
10	-1,036	-10,99	-0,021	0,776	
11	-0,972	-10,311	-0,047	0,729	Включение Q1, к.з. устранилось, Л2 – на холостом ходу, режим не изменился
12	-0,828	-8,783	-0,069	0,658	
13	-0,598	-6,344	-0,085	0,573	
14	-0,301	-3,193	-0,093	0,48	
15	0,038 -0,791	0,407 -8,391	-0,103	0,377	Включение Q2, переход режима от послеаварийного к нормальному
16	-0,223	-2,366	-0,109	0,268	

На рис. 26 а, б, приведены зависимости $\delta_1 = f(t)$, $\alpha_1 = \varphi(t)$, а на рис. 27 и 28 – конфигурация площадок ускорения и торможения для первого варианта электромеханического переходного процесса.



а)

Рис. 26 (а). Изменение ускорения ротора α_1 при успешном АПВ;



б)

Рис. 26 б). Изменение угла δ_1 при успешном АПВ.

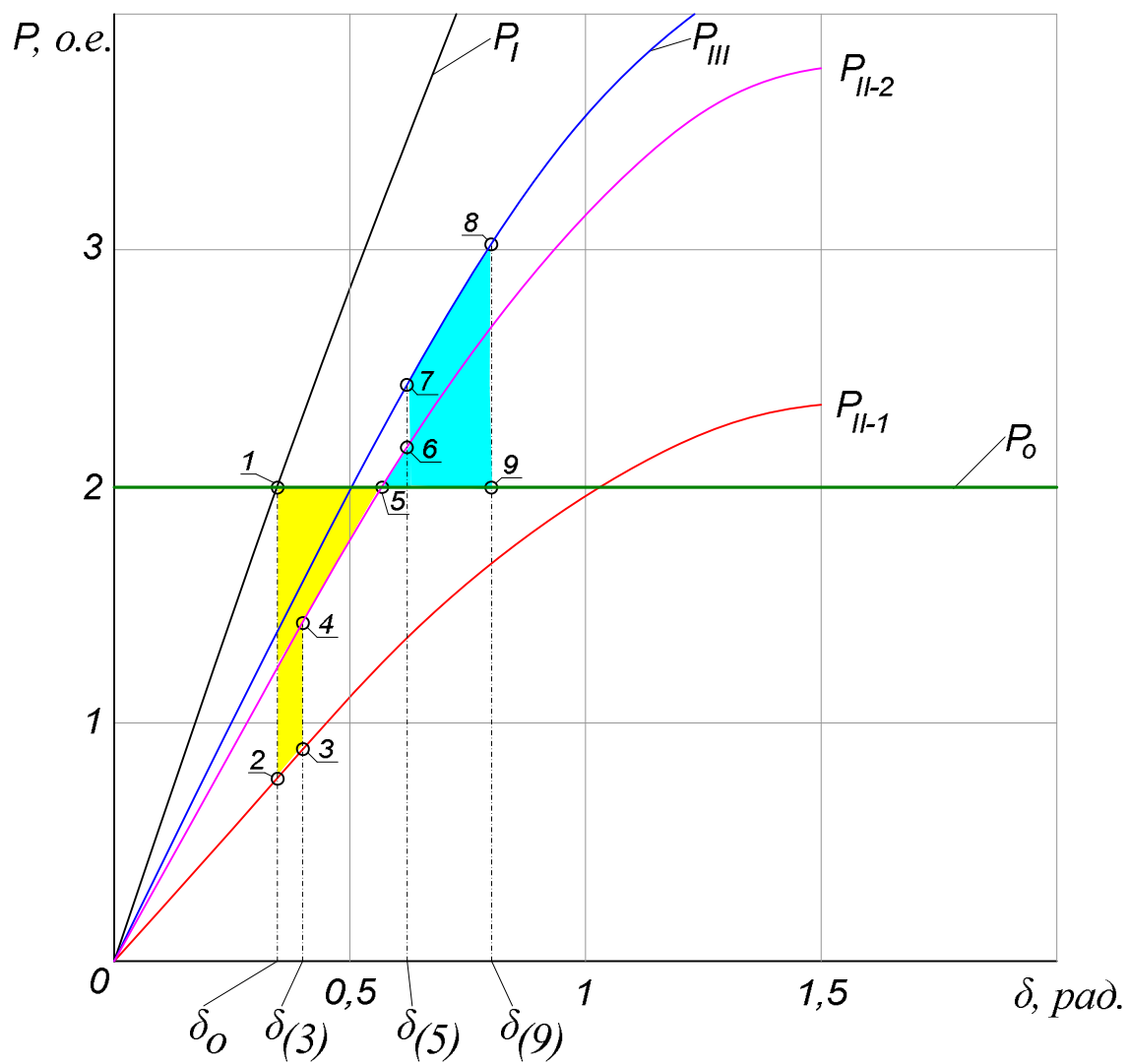


Рис. 27. Площадки ускорения $A_{\text{уск.1}}$ и торможения $A_{\text{торм.1}}$ в первой фазе переходного процесса.

В точке 8 движение ротора вправо прекращается, ротор останавливается. Но в этой точке нет баланса мощности турбины P_0 и генератора $P_{III(10)}$. Начинается вторая фаза переходного процесса – движение ротора от точки 8 влево – рис. 28.

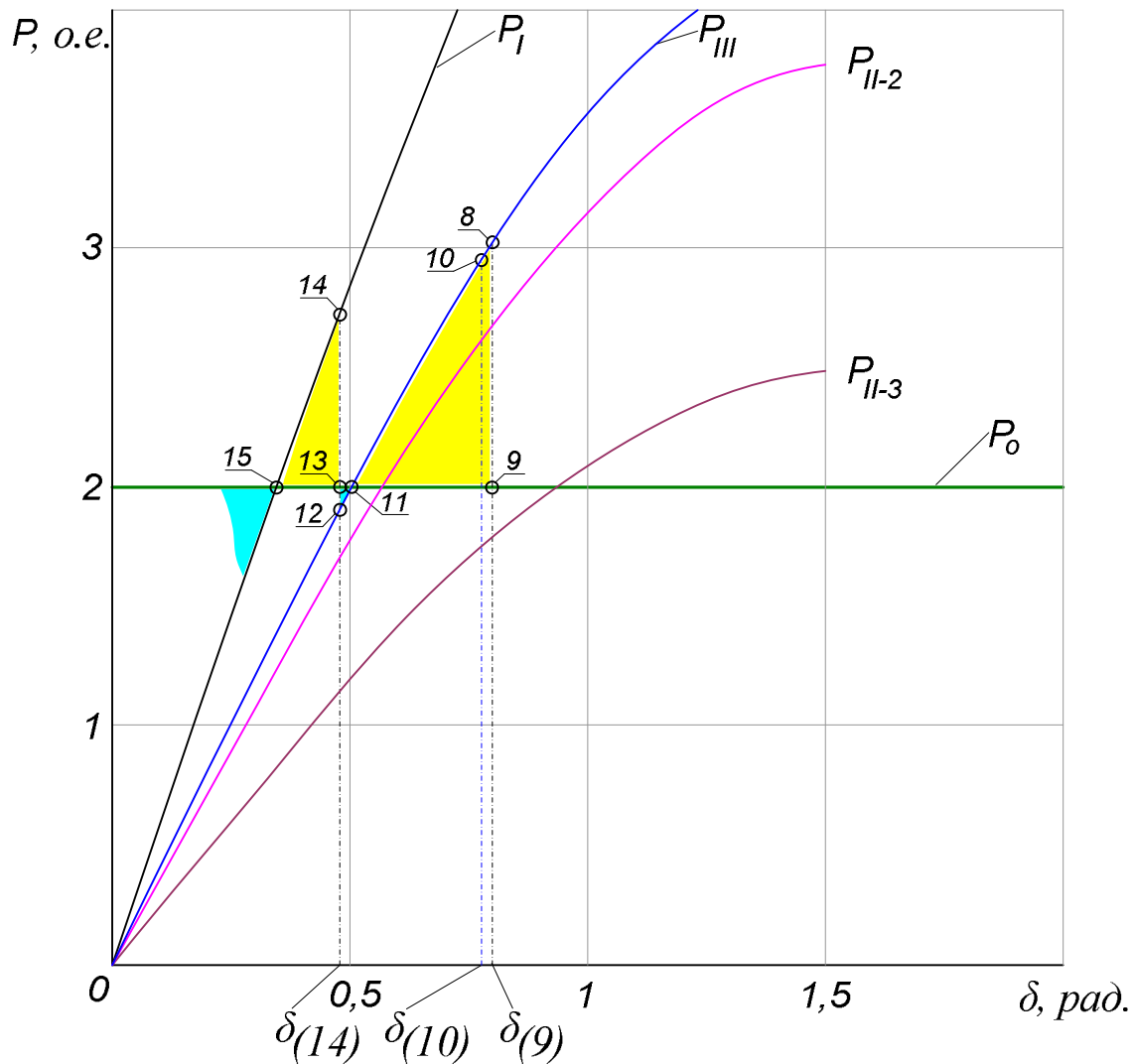


Рис. 28. Площадки обратного ускорения $A_{обр.уск.2.1}$, $A_{обр.уск.2.2}$ и торможения $A_{торм.2}$ во второй фазе переходного процесса.

Площадка обратного ускорения $A_{обр.уск.2.1}$ – фигура ограниченная точками 8-9-11-10-8.

После того, как процесс пройдет точку 11, начинается обратное торможение: $A_{торм.2}$ – треугольник, ограниченный точками 11-12-13-11. Но в точке 12, в результате АПВ КНН, включается выключатель Q2, система возвращается в нормальный режим; на рис. 28 это возвращение – переход процесса из точки 12 в точку 14. В этой точке вновь нет баланса мощности, и ротор эквивалентного генератора продолжает движение влево, но уже по характеру

стике нормального режима – к точке 15. Площадка обратного ускорения $A_{обр.уск.2.2}$ – фигура ограниченная точками 13-14-15-13. Обратное торможение ротора продолжится левее точки 15.

На рис. 28 показана точка 10, в которой, в результате АПВ КОН включился выключатель Q1. По условиям первого рассматриваемого варианта АПВ – успешное, поэтому включение выключателя Q1 не приводит к изменению режима, он остается послеаварийным: передача мощности по отключившейся линии еще не происходит, она включена только с одной стороны и работает на холостом ходу.

Рассмотрим второй вариант переходного процесса: АПВ неуспешное, действие защиты линии – как и при первом отключении к.з.

Циклограмма второго варианта показана на рис. 29.

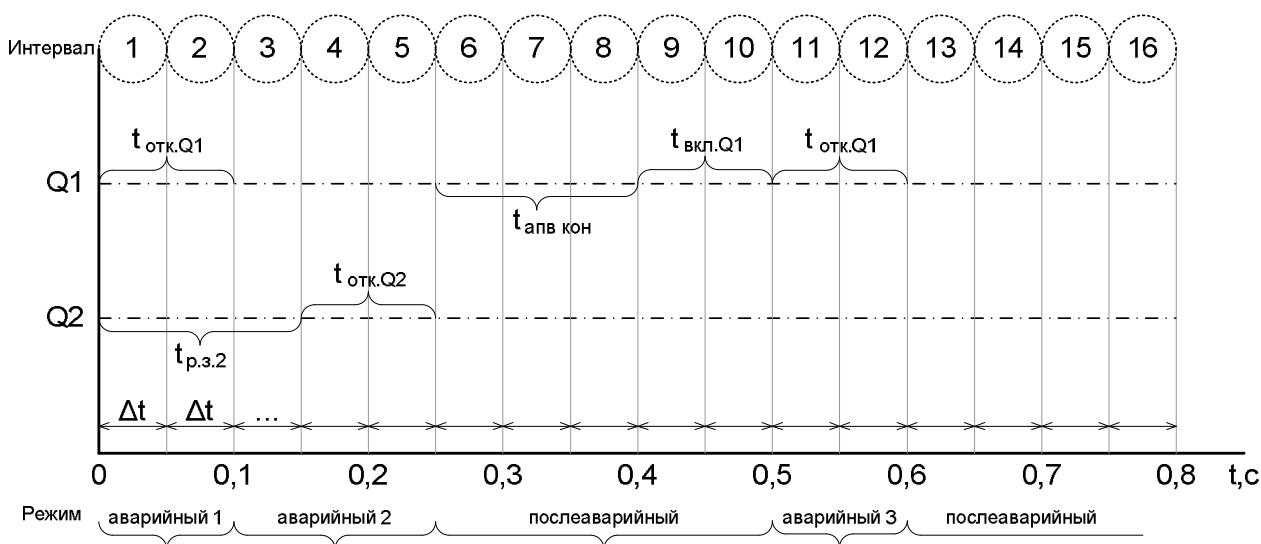


Рис. 29. Циклограмма развития переходного процесса для второго варианта.

Сравнивая рис. 20 и 29, можно отметить, что первые десять интервалов переходный процесс идет так же, как и в первом варианте, и лишь в начале одиннадцатого интервала, из-за включения выключателя $Q1$ на устойчивое к.з., происходит переход от послеаварийного режима к третьему аварийному P_{II-3} . Все необходимые предварительные данные были получены выше. Расчет для интервала 11 выполняется в том же порядке, что и для третьего интервала. Результаты расчетов сведем в табл. 7.

Зависимости $\alpha_j = \varphi(t)$, $\delta_j = f(t)$ приведены, соответственно, на рис. 30 и 31.

Сплошная линия – изменение параметра при развитии переходного процесса по второму варианту; штриховая линия – изменение того же параметра по данным первого варианта. Площадки ускорения и торможения в первой фазе развития переходного процесса аналогичны

варианту 1, поэтому на рис. 32 приведены площадки обратного ускорения и торможения только для второй фазы переходного процесса. Площадка обратного ускорения $A_{обр.уск.3.1}$ – фигура, ограниченная точками 8-9-11-10-8. В точке 10, в результате АПВ КОН, выключателем Q1 на линию 2 подается напряжение и происходит включение на устойчивое к.з. Система переходит из послеаварийного в третий аварийный режим; на рис. 32 этот переход – из точки 10 в точку 12. Движение ротора влево замедляется, начинается обратное торможение: $A_{обр.торм.3.1}$ – фигура, ограниченная точками 11-12-13-14-11.

Таблица 7

Номер интервала – (i)	$\Delta P_{(i)}$, о.е.	$\alpha_{(i)}$, о.е.	$\Delta \delta_{(i)}$, рад.	$\delta_{(i)}$, рад.	Примечание
0				0,337	Исходный режим
1	1,222	12,963	0,0162	0,3532	К.з. на линии Л2, первый аварийный режим
2	1,186	12,581	0,0476	0,4	
3	1,085 0,531	11,51 5,633	0,069	0,469	Отключение Q1, переход от первого ко второму аварийному режиму
4	0,293	3,108	0,077	0,546	
5	0,04	0,424	0,078	0,624	
6	-0,205 -0,48	-2,177 -5,088	0,0767	0,7	Отключение Q2, переход от второго аварийного режима к послеаварийному
7	-0,734	-7,791	0,057	0,757	
8	-0,917	-9,728	0,033	0,79	
9	-1,015	-10,574	0,0066	0,7966	
10	-1,036	-10,99	-0,021	0,776	
11	-0,972 0,255	-10,313 2,704	-0,0305	0,7455	Включение Q1, <u>к.з. не устранилось</u> , переход от послеаварийного режима к третьему аварийному
12	0,31	3,286	-0,0223	0,7232	
13	0,35 -0,811	3,709 -8,602	-0,0284	0,695	Отключение Q1, переход от третьего аварийного режима к послеаварийному
14	-0,717	-7,606	-0,0474	0,647	
15	-0,56	-5,944	-0,0623	0,585	
16	-0,344	-3,647	-0,0714	0,513	

После отключения выключателя Q1 – точка 13 – процесс возвращается на послеаварийную характеристику – в точку 15. В этой точке вновь нет баланса мощности, и ротор эквивалентного генератора продолжает движение влево, но уже по характеристике послеаварийного режима – к точке 16. Площадка обратного ускорения $A_{обр.уск.3.2}$ – фигура ограниченная точками 14-15-16-14. Обратное торможение ротора продолжится левее точки 16.

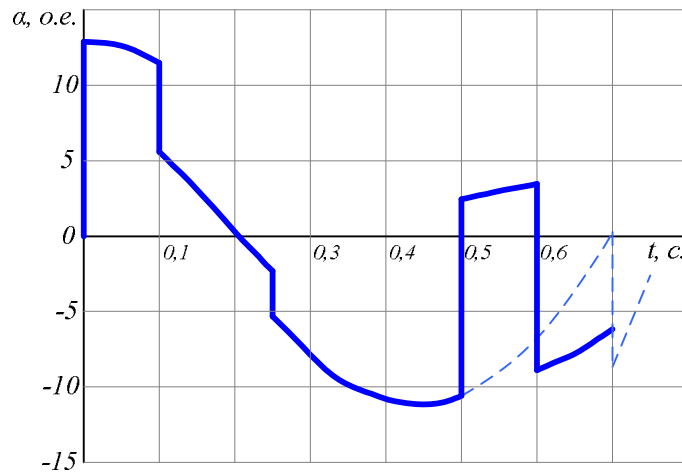


Рис. 30. Изменение ускорения ротора α_2 при неуспешном АПВ.

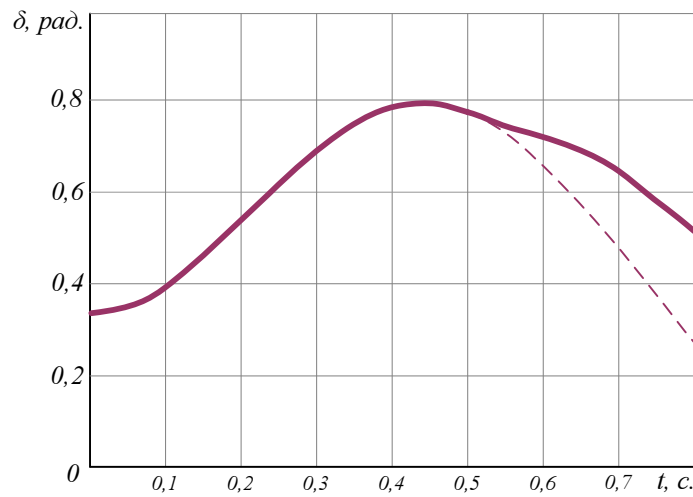


Рис. 31. Изменение угла δ_2 при неуспешном АПВ.

При выполнении уточненного расчета с учетом реакции якоря и действия АРВ совместно с уравнением движения ротора (19) решается дифференциальное уравнение (20) с учетом выражения (21). Расчет выполняется в следующем порядке [2, 3, 4]:

1. Для исходного режима определяются значения начального угла δ_0 , продольной составляющей э.д.с. за переходным индуктивным сопротивлением E'_{q0} , э.д.с. холостого хода E_{q0} . Вынужденная э.д.с. холостого хода E_{qe0} в исходном (нормальном) режиме совпадает с э.д.с. холостого хода: $E_{q0} = E_{qe0}$.

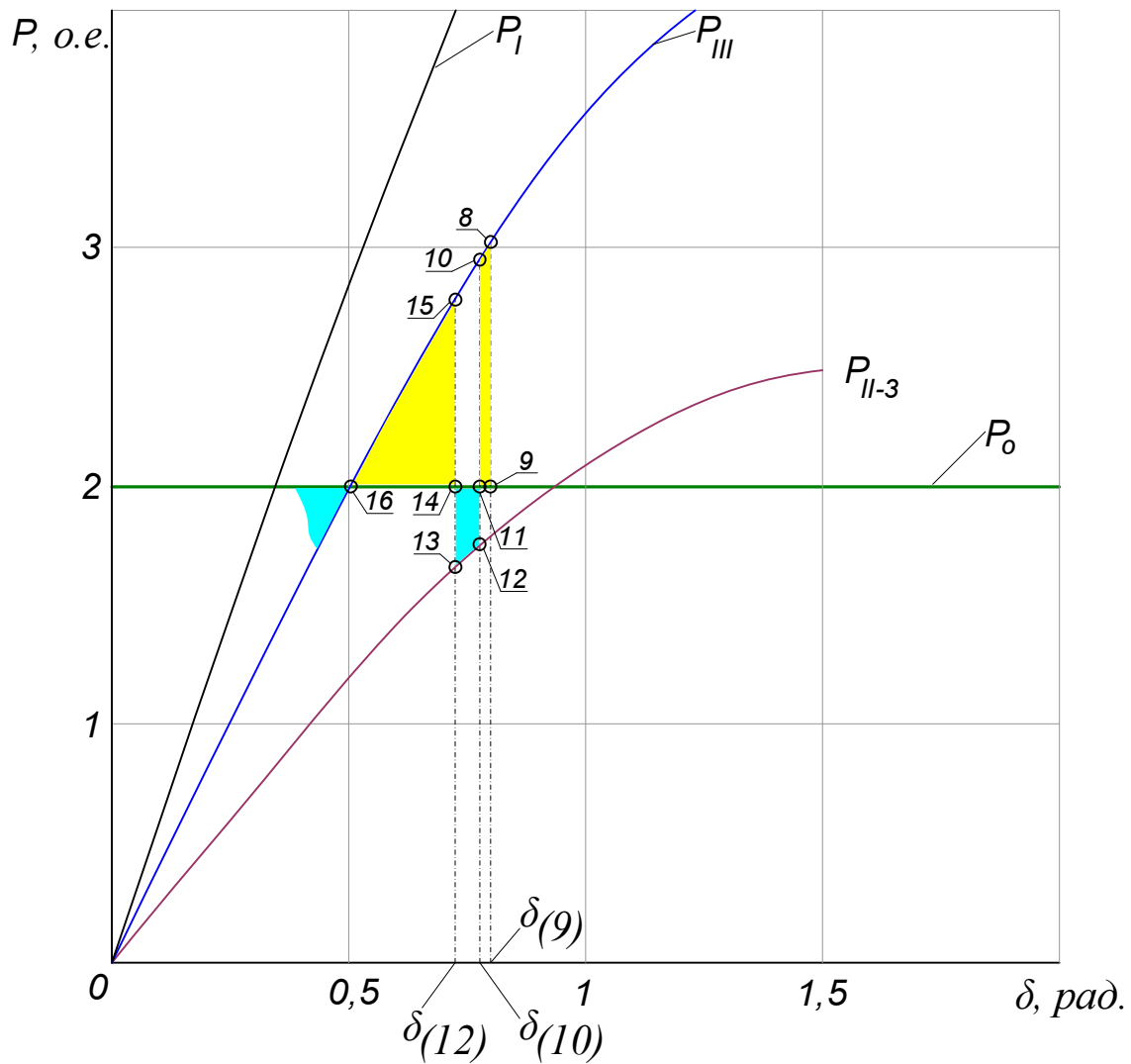


Рис. 32. Площадки обратного ускорения $A_{обр.уск.3.1}$, $A_{обр.уск.3.2}$ и торможения $A_{обр.торм.3.1}$ во второй фазе переходного процесса для второго варианта.

2. Вычисляются собственные $x_{11(j)}$ и взаимные $x_{12(j)}$ индуктивные сопротивления для всех расчетных ситуаций. При этом турбогенератор вводится в схему замещения сопротивлением x_d , гидрогенератор – x_q .

3. При наличии в схеме возбуждения генератора релейной форсировки возбуждения изменение вынужденной э.д.с. за рассчитываемый интервал времени определяется по формуле (21):

$$E_{qe(i)} = E_{qe(0)} + \left(E_{qe(npred)} - E_{qe(0)} \right) \cdot \left(1 - e^{-\left(t_{(i)} / T_e \right)} \right),$$

которую удобнее записать в несколько иной форме, выполнив несложные преобразования:

$$\begin{aligned} E_{qe(i)} &= E_{qe(npred)} - \left(E_{qe(npred)} - E_{qe(0)} \right) \cdot e^{-\left(t_{(i)} / T_e \right)} = \\ &= E_{qe(0)} \cdot k_{форс.} - \left(E_{qe(0)} \cdot k_{форс.} - E_{qe(0)} \right) \cdot e^{-\left(t_{(i)} / T_e \right)} = \\ &= E_{qe(0)} \cdot \left(k_{форс.} - \left(k_{форс.} - 1 \right) \cdot e^{-\left(t_{(i)} / T_e \right)} \right). \end{aligned} \quad (36)$$

Здесь $k_{форс.}$ – кратность форсировки возбуждения; рекомендуется принимать

$$k_{форс.} = 2,0 \div 2,5 ;$$

$t_{(i)}$ – время, соответствующее правой границе расчетного интервала, (с);

T_e – постоянная времени возбудителя, (с).

В расчетах используется среднее значение $E_{qe(i)cp.}$ за расчетный интервал времени:

$$E_{qe(i)cp.} = \frac{E_{qe(i-1)} + E_{qe(i)}}{2}, \quad (37)$$

т.е. за первый интервал:

$$E_{qe(1)cp.} = \frac{E_{qe(0)} + E_{qe(1)}}{2} = \frac{E_{qe0} + E_{qe(1)}}{2},$$

за второй:

$$E_{qe(2)cp.} = \frac{E_{qe(1)} + E_{qe(2)}}{2},$$

и т.д.

По формулам (36) и (37) расчет производится при простейшем учете ав-

томатического регулирования возбуждения, когда необходимо оценить только первый вылет угла δ . В этом случае не контролируют напряжение на шинах генератора, полагая, что все время при коротком замыкании и после его отключения E_{qe} увеличивается.

4. По (22) с учетом замечаний для гидрогенераторов вычисляется э.д.с. холостого хода для первого момента нарушения режима $E_{q(0)}$:

$$E_{q(0)} = \frac{E'_{q(0)} - U_c \cdot \frac{\frac{x_d}{n_z} - \frac{x'_d}{n_z} \cdot \cos \delta_0}{x_{12(av.p.1)}}}{1 - \frac{\frac{x_d}{n_z} - \frac{x'_d}{n_z}}{x_{11(av.p.1)}}}$$

5. Определяются изменение переходной э.д.с. в течение первого расчетного интервала

$$\Delta E'_{q(1)} = \frac{E_{qe(1)cp.} - E_{q(0)}}{T_{d0}} \cdot \Delta t$$

и величина переходной э.д.с. в конце первого интервала

$$E'_{q(1)} = E'_{q(0)} + \Delta E'_{q(1)}.$$

6. Находятся активная мощность генератора в начале первого интервала

$$P_{(0)} = \frac{E_{q(0)} \cdot U_c}{x_{12(av.p.1)}} \cdot \sin(\delta_0)$$

и небаланс мощности $\Delta P_{(0)} = P_o - P_{(0)}$.

7. В соответствии с выражениями (30), (31) метода последовательных интервалов определяется приращение угла $\Delta \delta_{(1)}$.

8. Находится угол $\delta_{(1)}$ в начале следующего интервала:

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

В результате расчета определены значения $E'_{q(1)}$ и $\delta_{(1)}$ в начале второго

интервала, по которым определяется величина э.д.с. $E_{q(1)}$ и расчет повторяется для следующего интервала. При изменении режима в начале k -го интервала приращение угла $\Delta\delta_{(k)}$ определяют по формулам (33) – (35). Вид остальных уравнений при изменении режима остается неизменным, меняются лишь значения собственных и взаимных сопротивлений схемы замещения [4].

По результатам уточненного расчета строятся зависимости во времени угла δ , величин E'_q , E_q , E_{qe} и делаются выводы о характере их изменения.

Пример 8. – Для электрической системы, изображенной на рис. 33, выполнить уточненную оценку устойчивости динамического перехода при простейшем учете действия АРВ и отсутствии контроля напряжения на шинах генератора. Станция – ТЭС с неявнополюсными турбогенераторами. Для уменьшения объема расчетов алгоритм развития аварии и параметры элементов системы взять из примера 7. Кратность форсировки возбуждения принять $k_{\text{форс.}} = 2,5$. Рассмотреть только вариант успешного АПВ.

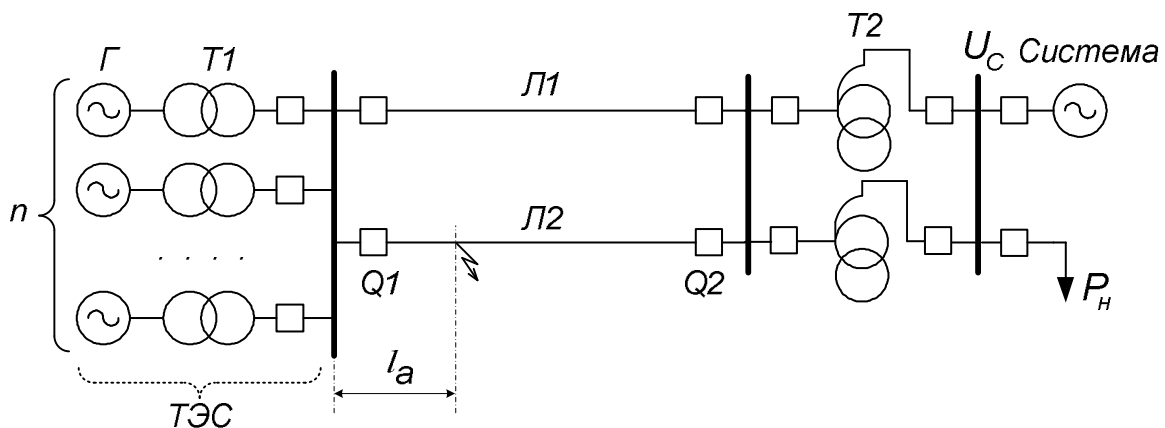


Рис. 33. Электрическая система для примера 8.

Решение. Схема замещения системы в начальный момент переходного процесса:

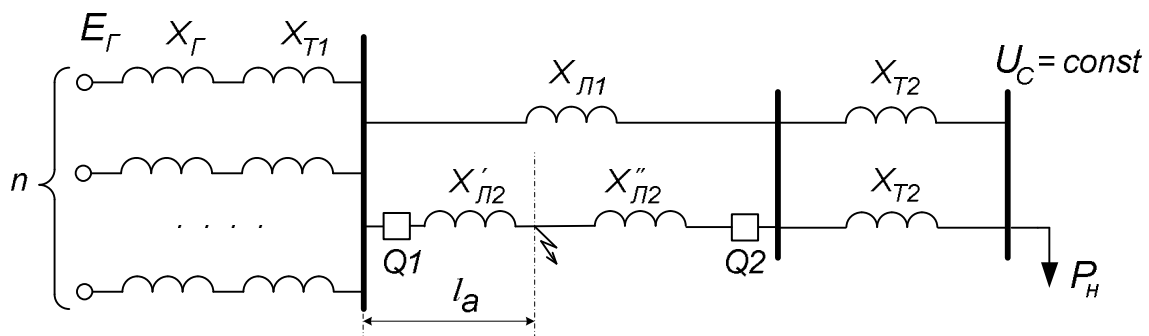


Рис. 34. Схема замещения системы в момент возникновения к.з.

Параметры элементов системы и параметры режима (из предыдущих примеров, в относительных единицах).

$$\text{Генератор: } x_d = 1,6; \quad x'_d = 0,28; \quad x_{Г.ОП} = x_2 = 0,24; \quad n_2 = 4.$$

Остальные элементы системы и параметры режима:

$$x_{T1} = 0,098; \quad x_{T2} = 0,066; \quad x_{Л1} = x_{Л2} = 0,186;$$

$$U_c = 1; \quad P_H = 2; \quad Q_H = 1,344.$$

Э.д.с. за сопротивлением x_d :

$$x_{Г.экв.1} = \frac{x_d}{n_2} = \frac{1,6}{4} = 0,4;$$

$$x_{внеш.} = \frac{x_{T1}}{n_{T1}} + \frac{x_{Л1}}{2} + \frac{x_{T2}}{2} = \frac{0,098}{4} + \frac{0,186}{2} + \frac{0,066}{2} = 0,15;$$

$$E_q = \sqrt{\left(U_c + \frac{Q_H (x_{Г.экв.1} + x_{внеш.})}{U_c} \right)^2 + \left(\frac{P_H (x_{Г.экв.1} + x_{внеш.})}{U_c} \right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(1 + \frac{1,344 (0,4 + 0,15)}{1} \right)^2 + \left(\frac{2,0 (0,4 + 0,15)}{1} \right)^2} = 2,058;$$

$$\delta_o = \arctg \frac{P_H (x_{Г.экв.1} + x_{внеш.})}{U_c^2 + Q_H (x_{Г.экв.1} + x_{внеш.})} = \arctg \frac{2,0 (0,4 + 0,15)}{1 + 1,344 (0,4 + 0,15)} = 0,566 \text{ [рад.]}$$

Э.д.с. за переходным сопротивлением x'_d :

$$x_{Г.экв.2} = \frac{x'_d}{n_2} = \frac{0,28}{4} = 0,07;$$

$$E' = \sqrt{\left(U_c + \frac{Q_H (x_{Г.экв.2} + x_{внеш.})}{U_c} \right)^2 + \left(\frac{P_H (x_{Г.экв.2} + x_{внеш.})}{U_c} \right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(1 + \frac{1,344 (0,07 + 0,15)}{1} \right)^2 + \left(\frac{2,0 (0,07 + 0,15)}{1} \right)^2} = 1,368;$$

$$\delta'_o = \arctg \frac{P_H (x_{Г.экв.2} + x_{внеш.})}{U_C^2 + Q_H (x_{Г.экв.2} + x_{внеш.})} = \arctg \frac{2,0(0,07 + 0,15)}{1 + 1,344(0,07 + 0,15)} = 0,327 \text{ [рад.]};$$

$$E'_q = E' \cdot \cos(\delta_o - \delta'_o) = 1,368 \cdot \cos(0,566 - 0,327) = 1,329$$

Определим собственные и взаимные сопротивления схемы замещения для всех возможных режимов системы.

Исходный (нормальный) режим:

$$x_{11(н.р.)} = x_{12(н.р.)} = \frac{x_d}{n_2} + \frac{x_{T1}}{n_2} + \frac{x_{Л1}}{2} + \frac{x_{T2}}{2} = \frac{1,6}{4} + \frac{0,098}{4} + \frac{0,186}{2} + \frac{0,066}{2} = 0,55.$$

Первый аварийный режим (см. пример 7, $x_{Г} = x_d = 1,6$, $x_{ш1} = 0,0316$)

$$x_8 = \frac{x_{Г}}{n_2} + \frac{x_{T1}}{n_2} + x_1 = \frac{1,6}{4} + \frac{0,098}{4} + 0,0186 = 0,443;$$

$$x_9 = x_2 + \frac{x_{T2}}{2} = 0,0744 + \frac{0,066}{2} = 0,1074;$$

$$x_{10} = x_3 + x_{ш1} = 0,0037 + 0,0316 = 0,0353.$$

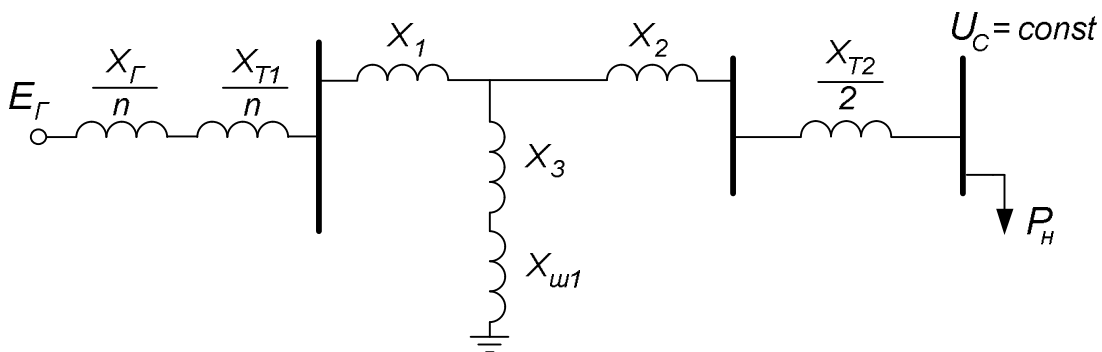
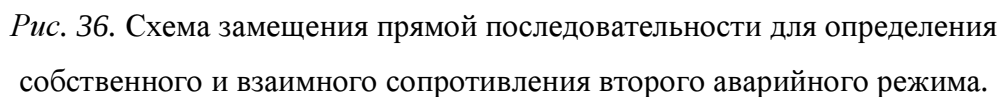


Рис. 35. Схема замещения прямой последовательности для определения собственного и взаимного сопротивления первого аварийного режима.

$$x_{11(ав.р.1)} = x_8 + \frac{x_9 \cdot x_{10}}{x_9 + x_{10}} = 0,443 + \frac{0,1074 \cdot 0,0353}{0,1074 + 0,0353} = 0,469;$$

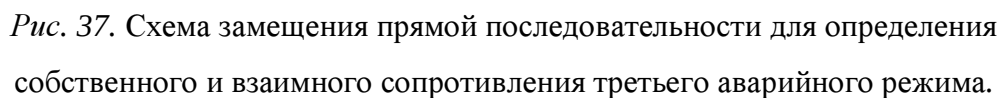
$$x_{12(ав.р.1)} = x_8 + x_9 + \frac{x_8 \cdot x_9}{x_{10}} = 0,443 + 0,1074 + \frac{0,443 \cdot 0,1074}{0,0353} = 1,898.$$

Второй аварийный режим (см. пример 7, рис. 23, б: $x_{Г} = x_d = 1,6$, $x_{ш2} = 0,089$)



$$x_{12(av.p.2)} = x_{15} + x_{16} + \frac{x_{15} \cdot x_{16}}{x_{17}} = 0,61 + 0,033 + \frac{0,61 \cdot 0,033}{0,238} = 0,728.$$

Третий аварийный режим (см. пример 7, рис. 25: $x_{\Gamma} = x_d = 1,6$, $x_{m3} = 0,057$)



$$x_{23} = x_{II} + \frac{x_{T2}}{2} = 0,186 + \frac{0,066}{2} = 0,219;$$

$$x_{24} = x'_{Л2} + x_{ш2} = 0,0372 + 0,057 = 0,0942.$$

$$x_{11(ав.р.3)} = x_{22} + \frac{x_{23} \cdot x_{24}}{x_{23} + x_{24}} = 0,4245 + \frac{0,219 \cdot 0,0942}{0,219 + 0,0942} = 0,49;$$

$$x_{12(ав.р.3)} = x_{22} + x_{23} + \frac{x_{22} \cdot x_{23}}{x_{24}} = 0,4245 + 0,219 + \frac{0,4245 \cdot 0,219}{0,0942} = 1,63.$$

Послеаварийный режим:

$$x_{11(n/a.p.)} = x_{12(n/a.p.)} = \frac{x_d}{n_2} + \frac{x_{T1}}{n_2} + x_{Л1} + \frac{x_{T2}}{2} = \frac{1,6}{4} + \frac{0,098}{4} + 0,186 + \frac{0,066}{2} = 0,643.$$

Оцениваем динамическую устойчивость рассматриваемой системы для первого варианта – успешного АПВ.

Первый интервал – от 0 до 0,05 с.; в начале интервала на линии 2 произошло двухфазное к.з. на землю.

Изменение вынужденной э.д.с. за рассчитываемый интервал ($t_{(1)} = 0,05$, $T_e = 0,12$)

$$E_{qe(1)} = E_{qe(0)} \cdot \left(k_{форс.} - (k_{форс.} - 1) \cdot e^{-\left(t_{(1)}/T_e\right)} \right) =$$

$$= 2,058 \cdot \left(2,5 - (2,5 - 1) \cdot e^{-(0,05/0,12)} \right) = 3,11.$$

Среднее значение $E_{qe(1)ср.}$ за первый интервал:

$$E_{qe(1)ср.} = \frac{E_{qe(0)} + E_{qe(1)}}{2} = \frac{E_{qe0} + E_{qe(1)}}{2} = \frac{2,058 + 3,11}{2} = 2,584.$$

Э.д.с. холостого хода для первого момента нарушения режима $E_{q(0)}$ (в начале первого интервала, $E'_{q(0)} = E'_q = 1,329$, $\delta_0 = 0,566$ [рад.]):

$$E_{q(0)} = \frac{E'_{q(0)} - U_c \cdot \frac{\frac{x_d}{n_2} - \frac{x'_d}{n_2}}{x_{12(ав.р.1)}} \cdot \cos \delta_0}{1 - \frac{\frac{x_d}{n_2} - \frac{x'_d}{n_2}}{x_{11(ав.р.1)}}} = \frac{1,329 - 1 \cdot \frac{\frac{1,6}{4} - \frac{0,28}{4}}{1,898} \cdot \cos(0,566)}{1 - \frac{\frac{1,6}{4} - \frac{0,28}{4}}{0,469}} = 3,989.$$

Изменение переходной э.д.с. в течение первого расчетного интервала ($T_{d0} = 4,9$ [с]):

$$\Delta E'_{q(1)} = \frac{E_{qe(1)cp.} - E_{q(0)}}{T_{d0}} \cdot \Delta t = \frac{2,584 - 3,989}{4,9} \cdot 0,05 = -0,0143.$$

Величина переходной э.д.с. в конце первого интервала

$$E'_{q(1)} = E'_{q(0)} + \Delta E'_{q(1)} = 1,329 - 0,0143 = 1,3147.$$

Активная мощность генератора в начале первого интервала

$$P_{(0)} = \frac{E_{q(0)} \cdot U_c}{x_{12(av.p.1)}} \cdot \sin(\delta_0) = \frac{3,989 \cdot 1}{1,898} \cdot \sin(0,566) = 1,127,$$

$$\text{небаланс мощности } \Delta P_{(0)} = P_o - P_{(0)} = 2,0 - 1,127 = 0,873.$$

$$\alpha_{(1)} = \frac{\Delta P_{(0)}}{T_{J\Sigma}} \cdot \omega_o = \frac{0,873}{29,6} \cdot 314 = 9,261;$$

$$\Delta \delta_{(1)} = \alpha_{(1)} \cdot \frac{(\Delta t)^2}{2} = 9,261 \cdot \frac{(0,05)^2}{2} = 0,0116 \text{ [рад.]};$$

$$\delta_{(1)} = \delta_o + \Delta \delta_{(1)} = 0,566 + 0,0116 = 0,5776 \text{ [рад.]}. \quad \delta_{(1)} = 0,5776$$

Второй интервал – от 0,05 до 0,1 с.

Изменение вынужденной э.д.с. за рассчитываемый интервал ($t_{(2)} = 0,1$)

$$E_{qe(2)} = E_{qe(0)} \cdot \left(k_{форс.} - (k_{форс.} - 1) \cdot e^{-\left(t_{(2)}/T_e\right)} \right) =$$

$$= 2,058 \cdot \left(2,5 - (2,5 - 1) \cdot e^{-(0,1/0,12)} \right) = 3,803.$$

Среднее значение $E_{qe(2)cp.}$ за второй интервал:

$$E_{qe(2)cp.} = \frac{E_{qe(1)} + E_{qe(2)}}{2} = \frac{3,11 + 3,803}{2} = 3,4565.$$

Э.д.с. холостого хода в конце первого интервала (она же – в начале второго интервала):

$$E_{q(1)} = \frac{E'_{q(1)} - U_c \cdot \frac{\frac{x_d}{n_2} - \frac{x'_d}{n_2}}{x_{12(av,p.1)}} \cdot \cos \delta_{(1)}}{1 - \frac{\frac{x_d}{n_2} - \frac{x'_d}{n_2}}{x_{11(av,p.1)}}} = \frac{1,3147 - 1 \cdot \frac{1,6}{1,898} \cdot \frac{0,28}{4} \cdot \cos(0,5776)}{1 - \frac{1,6}{0,469} \cdot \frac{0,28}{4}} = 3,944.$$

Изменение переходной э.д.с. в течение второго расчетного интервала:

$$\Delta E'_{q(2)} = \frac{E_{qe(2)cp} - E_{q(1)}}{T_{d0}} \cdot \Delta t = \frac{3,4565 - 3,944}{4,9} \cdot 0,05 = -0,00497.$$

Величина переходной э.д.с. в конце второго интервала

$$E'_{q(2)} = E'_{q(1)} + \Delta E'_{q(2)} = 1,3147 - 0,00497 = 1,3097.$$

Активная мощность генератора в начале второго интервала

$$P_{(1)} = \frac{E_{q(1)} \cdot U_c}{x_{12(av,p.1)}} \cdot \sin(\delta_{(1)}) = \frac{3,944 \cdot 1}{1,898} \cdot \sin(0,5776) = 1,135,$$

$$\text{небаланс мощности } \Delta P_{(1)} = P_o - P_{(1)} = 2,0 - 1,135 = 0,865.$$

$$\alpha_{(2)} = \frac{\Delta P_{(1)}}{T_{J\Sigma}} \cdot \omega_o = \frac{0,865}{29,6} \cdot 314 = 9,176;$$

$$\Delta \delta_{(2)} = \Delta \delta_{(1)} + \alpha_{(2)} \cdot (\Delta t)^2 = 0,0116 + 9,176 \cdot (0,05)^2 = 0,0345 \text{ [рад.]};$$

$$\delta_{(2)} = \delta_{(1)} + \Delta \delta_{(2)} = 0,5776 + 0,0345 = 0,612 \text{ [рад.]}. \quad \Delta \delta_{(2)} = 0,0345$$

Третий интервал – от 0,1 до 0,15 с. В начале интервала – отключение Q1, переход от первого ко второму аварийному режиму. $t_{(3)} = 0,15$.

$$E_{qe(3)} = E_{qe(0)} \cdot \left(k_{фopc} - (k_{фopc} - 1) \cdot e^{-\left(t_{(3)}/T_e\right)} \right) =$$

$$= 2,058 \cdot \left(2,5 - (2,5 - 1) \cdot e^{-(0,15/0,12)} \right) = 4,261.$$

$$E_{qe(3)cp} = \frac{E_{qe(2)} + E_{qe(3)}}{2} = \frac{3,803 + 4,261}{2} = 4,032.$$

Э.д.с. холостого хода в конце второго интервала (до отключения выключателя Q1):

$$E_{q(2.1)} = \frac{E'_{q(2)} - U_c \cdot \frac{\frac{x_d}{n_2} - \frac{x'_d}{n_2}}{x_{12(av.p.1)}} \cdot \cos \delta_{(2)}}{1 - \frac{\frac{x_d}{n_2} - \frac{x'_d}{n_2}}{x_{11(av.p.1)}}} = \frac{1,3097 - 1 \cdot \frac{\frac{1,6}{4} - \frac{0,28}{4}}{1,898} \cdot \cos(0,612)}{1 - \frac{\frac{1,6}{4} - \frac{0,28}{4}}{0,469}} = 3,938.$$

Э.д.с. холостого хода после отключения выключателя Q1 (в начале третьего интервала):

$$E_{q(2.2)} = \frac{E'_{q(2)} - U_c \cdot \frac{\frac{x_d}{n_2} - \frac{x'_d}{n_2}}{x_{12(av.p.2)}} \cdot \cos \delta_{(2)}}{1 - \frac{\frac{x_d}{n_2} - \frac{x'_d}{n_2}}{x_{11(av.p.2)}}} = \frac{1,3097 - 1 \cdot \frac{\frac{1,6}{4} - \frac{0,28}{4}}{0,728} \cdot \cos(0,612)}{1 - \frac{\frac{1,6}{4} - \frac{0,28}{4}}{0,639}} = 1,941.$$

Изменение переходной э.д.с. в течение третьего расчетного интервала:

$$\Delta E'_{q(3)} = \frac{E_{qe(3)cp.} - E_{q(2.2)}}{T_{d0}} \cdot \Delta t = \frac{4,032 - 1,941}{4,9} \cdot 0,05 = 0,0213.$$

Величина переходной э.д.с. в конце третьего интервала

$$E'_{q(3)} = E'_{q(2)} + \Delta E'_{q(3)} = 1,3097 + 0,0213 = 1,331.$$

Активная мощность генератора в начале третьего интервала

$$P_{(2.1)} = \frac{E_{q(2.1)} \cdot U_c}{x_{12(av.p.1)}} \cdot \sin(\delta_{(2)}) = \frac{3,938 \cdot 1}{1,898} \cdot \sin(0,612) = 1,193,$$

$$P_{(2.2)} = \frac{E_{q(2.2)} \cdot U_c}{x_{12(av.p.2)}} \cdot \sin(\delta_{(2)}) = \frac{1,941 \cdot 1}{0,728} \cdot \sin(0,612) = 1,533,$$

небалансы мощности

$$\Delta P_{(2.1)} = P_o - P_{(2.1)} = 2,0 - 1,193 = 0,807;$$

$$\Delta P_{(2.2)} = P_o - P_{(2.2)} = 2,0 - 1,533 = 0,467;$$

$$\alpha_{(3.1)} = \frac{\Delta P_{(2.1)}}{T_{J\Sigma}} \cdot \omega_o = \frac{0,807}{29,6} \cdot 314 = 8,561;$$

$$\alpha_{(3.2)} = \frac{\Delta P_{(2.2)}}{T_{J\Sigma}} \cdot \omega_0 = \frac{0,467}{29,6} \cdot 314 = 4,953;$$

$$\alpha_{(3)} = \frac{\alpha_{(3.1)} + \alpha_{(3.2)}}{2} = \frac{8,561 + 4,953}{2} = 6,757$$

$$\Delta \delta_{(3)} = \Delta \delta_{(2)} + \alpha_{(3)} \cdot (\Delta t)^2 = 0,0345 + 6,757 \cdot (0,05)^2 = 0,0514 \text{ [рад.]};$$

$$\delta_{(3)} = \delta_{(2)} + \Delta \delta_{(3)} = 0,612 + 0,0514 = 0,663 \text{ [рад.]}. \quad \Delta \delta_{(3)} = 0,0345 + 6,757 \cdot (0,05)^2 = 0,0514 \text{ [рад.]}$$

На остальных интервалах расчеты ведутся аналогичным образом. Результаты расчетов сведены в табл. 8. Изменение во времени э.д.с. иллюстрируются на рис. 38, 39 и 40.

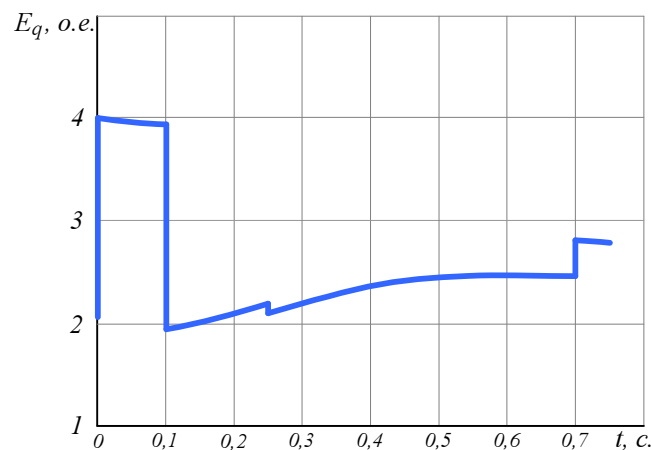


Рис. 38. Изменение во времени э.д.с. холостого хода E_q .

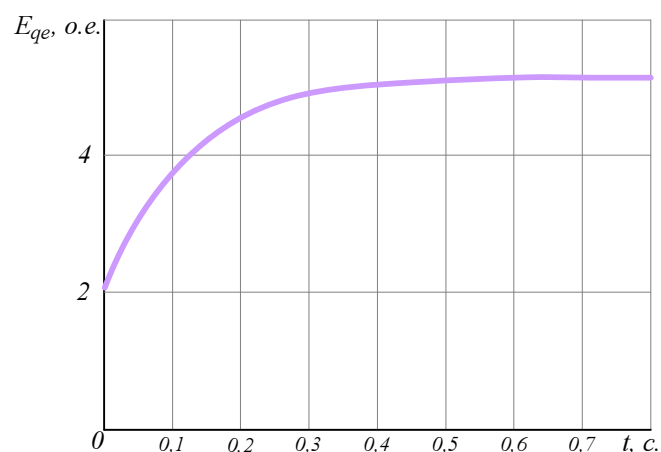


Рис. 39. Изменение во времени вынужденной э.д.с. холостого хода E_{qe} при отсутствии контроля напряжения на шинах генератора.

Таблица 8

Результаты расчетов по интервалам для примера 8.

Номер интервала (i)	$E_{q(i)}$, о.е.	$E_{qe(i)}$, о.е.	$E_{qe(i)cp.}$, о.е.	$\Delta E'_{q(i)}$, о.е.	$E'_{q(i)}$, о.е.	$P_{(i)}$, о.е.	$\Delta P_{(i)}$, о.е.	$\alpha_{(i)}$, о.е.	$\Delta \delta_{(i)}$, рад.	$\delta_{(i)}$, рад.	Примечание
0	2,058	2,058			1,329					0,566	Исходный режим
1	3,989	3,11	2,584	-0,0143	1,315	1,126	0,873	9,261	0,0116	0,578	К.з. на линии Л2, первый ава- рийный режим
2	3,944	3,803	3,456	-0,0050	1,310	1,135	0,865	9,176	0,0345	0,612	
3	3,938 1,941	4,261	4,032	0,0213	1,331	1,193 1,533	0,807 0,467	8,561 4,954	0,0514	0,663	Отключение Q1, переход от первого ко второму аварий- ному режиму
4	2,014	4,562	4,411	0,0245	1,355	1,701	0,299	3,168	0,0593	0,722	
5	2,099	4,761	4,661	0,0261	1,381	1,906	0,094	0,999	0,0618	0,784	
6	2,192 2,091	4,892	4,826	0,0279	1,409	2,126 2,296	-0,126 -0,296	-1,338 -3,140	0,0562	0,840	Отключение Q2, переход от второго аварийного режима к послеаварийному
7	2,191	4,978	4,935	0,0280	1,437	2,539	-0,539	-5,713	0,0419	0,882	
8	2,281	5,035	5,006	0,0278	1,465	2,739	-0,739	-7,835	0,0223	0,904	
9	2,358	5,072	5,053	0,0275	1,492	2,882	-0,882	-9,361	-0,0011	0,903	
10	2,413	5,097	5,084	0,0272	1,520	2,946	-0,946	-10,034	-0,0262	0,877	
11	2,448	5,113	5,105	0,0271	1,547	2,928	-0,928	-9,841	-0,0508	0,826	Включение Q1, АПВ КОН успешное, линия Л2 – на хо- лостом ходу, продолжается послеаварийный режим
12	2,463	5,124	5,118	0,0271	1,574	2,815	-0,815	-8,650	-0,0724	0,754	
13	2,465	5,131	5,127	0,0272	1,601	2,622	-0,622	-6,600	-0,0889	0,665	
14	2,459	5,136	5,133	0,0273	1,628	2,359	-0,359	-3,814	-0,0984	0,566	
15	2,455 2,805	5,139	5,137	0,0238	1,652	2,047 2,734	-0,047 -0,734	-0,497 -7,782	-0,109	0,457	Включение Q2, переход ре- жима от послеаварийного к нормальному
16	2,784	5,141	5,14	0,0240	1,676	2,233	-0,233	-2,468	-0,115	0,342	

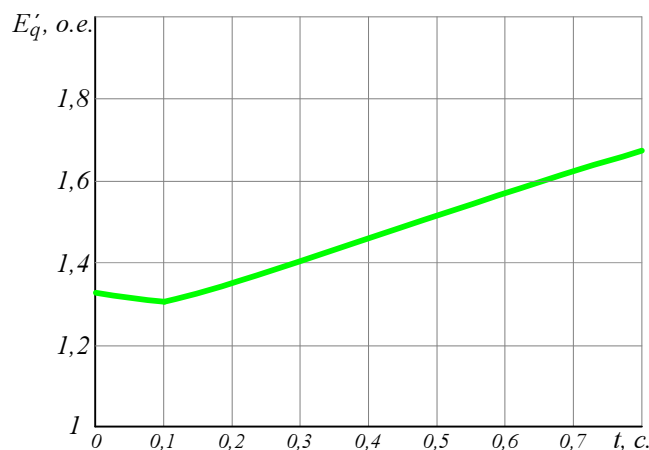


Рис. 40. Изменение во времени переходной э.д.с. E'_q .

Сравнение результатов расчета изменения угла δ в таблицах 6 и 8 позволяет отметить, что при уточненном расчете возрастание угла прекратилось на один интервал раньше - приращение угла $\Delta\delta$ стало отрицательным не на десятом, как в таблице 6, а на девятом интервале (соответствующая ячейка таблицы 8 выделена цветной заливкой). Однако сравнение абсолютных величин угла в обоих примерах недостаточно наглядно иллюстрирует, как влияет учет действия АРВ, даже в простейшей форме, на динамическую устойчивость системы, т.к. начальный угол в примерах отличается. Ниже, в табл. 9, вылет угла для сравниваемых примеров дан в долях от соответствующего $\delta_{нач.j} = \delta_{0,j}$, где j – номер примера.

Таблица 9

Сопоставление изменения угла вылета ротора для примеров 7 и 8 при выражении угла $\delta_{(i)}$ в долях от соответствующего начального угла $\delta_{0,j}$

Номер интервала – (i)	Пример 7, упрощенный расчет, данные из таблицы 6; $\delta_{0.7} = 0,337$ [рад.]		Пример 8, уточненный расчет, данные из таблицы * $\delta_{0.8} = 0,566$ [рад.]		Примечание
	$\delta_{(i)}$, рад.	$k_{упр.} = \frac{\delta_{(i)}}{\delta_{0.7}}$	$\delta_{(i)}$, рад.	$k_{умч.} = \frac{\delta_{(i)}}{\delta_{0.8}}$	
1	2	3	4	5	6
0	0,337	1	0,566	1	Исходный режим
1	0,3532	1,048	0,578	1,021	Возникновение к.з.
2	0,4	1,187	0,612	1,081	
3	0,469	1,392	0,663	1,171	Отключение Q1
4	0,546	1,620	0,722	1,276	
5	0,624	1,852	0,784	1,385	
6	0,7	2,077	0,840	1,484	Отключение Q2
7	0,757	2,246	0,882	1,558	
8	0,79	2,344	0,904	1,597	
9	0,7966	2,364	0,903	1,595	

Продолжение таблицы 9

1	2	3	4	5	6
10	0,776	2,303	0,877	1,549	
11	0,729	2,163	0,826	1,459	Включение Q1
12	0,658	1,952	0,754	1,332	
13	0,573	1,700	0,665	1,175	
14	0,48	1,424	0,566	1	
15	0,377	1,119	0,457	0,807	Включение Q2
16	0,268	0,752	0,342	0,604	

Очевидно (рис. 41), что при APB динамическая устойчивость системы выше.

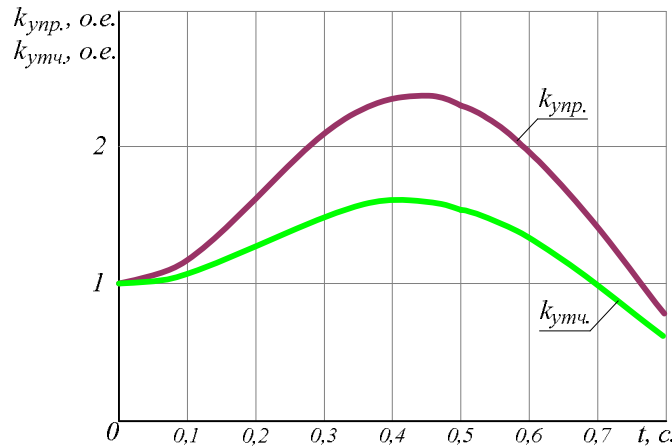


Рис. 41. Иллюстрация к табл. 9.

В случае, если напряжение на шинах генератора превышает номинальное (или заданное, например $U_{г.зад.} = 1,03$), необходимо снять форсировку возбуждения. Изменение вынужденной э.д.с. $E_{qe(\eta)}$ в режиме снятия форсировки, определяется по формуле [8]:

$$E_{qe(\eta)} = E_{qe(0)} + \left(E_{qe(\eta-1)} - E_{qe(0)} \right) \cdot e^{-\left[\left(t_{(i)} - t_{(\eta)} \right) / T_e \right]}, \quad (38)$$

где η – номер расчетного интервала, на котором снимается форсировка;

$E_{qe(\eta-1)}$ – значение вынужденной э.д.с. на момент снятия форсировки,

т.е. в конце предыдущего интервала. Эта э.д.с. определялась еще по формуле (36);

$t_{(\eta)}$ – время, соответствующее левой границе интервала, на котором нача-

лось снятие форсировки возбуждения;

$t_{(i)}$ – время, соответствующее правой границе расчетного интервала, (с).

Пример 9. – Для электрической системы, исходные и расчетные данные которой определены в примере 8, выполнить уточненную оценку устойчивости динамического перехода при простейшем учете действия АРВ и наличии контроля напряжения на шинах генератора. Принять $U_{з.зад.} = 1,03$. Рассмотреть только вариант успешного АПВ.

Решение. Поскольку все необходимые величины уже определены в предыдущем примере, расчет начинаем с первого интервала. Необходимые данные берем из табл. 8 и заполняем аналогичную табл. 10. Отличие этой таблицы от предыдущей: для того, чтобы графы заполнялись в последовательности расчетов, столбец $P_{(i)}$ поставлен вторым, и после него добавлен столбец $U_{з(i)}$. Таблица 10 приведена после расчетов для четвертого интервала.

Первый интервал – от 0 до 0,05 с.;

$$E_{q(0)} = \frac{E'_{q(0)} - U_c \cdot \frac{\frac{x_d}{n_z} - \frac{x'_d}{n_z} \cdot \cos \delta_0}{x_{12(ав.р.1)}}}{1 - \frac{\frac{x_d}{n_z} - \frac{x'_d}{n_z}}{x_{11(ав.р.1)}}} = \frac{1,329 - 1 \cdot \frac{1,6}{4} - \frac{0,28}{4} \cdot \cos(0,566)}{1 - \frac{1,6}{4} - \frac{0,28}{4}} = 3,989.$$

Активная мощность генератора в начале первого интервала

$$P_{(0)} = \frac{E_{q(0)} \cdot U_c}{x_{12(ав.р.1)}} \cdot \sin(\delta_0) = \frac{3,989 \cdot 1}{1,898} \cdot \sin(0,566) = 1,127.$$

Продольная составляющая напряжения на шинах генератора

$$U_{зq(0)} = E'_{q(0)} \cdot \frac{x_d}{x_d - x'_d} - E_{q(0)} \cdot \frac{x'_d}{x_d - x'_d} = 1,329 \cdot \frac{1,6}{1,6 - 0,28} - 3,989 \cdot \frac{0,28}{1,6 - 0,28} = 0,765.$$

$$B_{(0)} = \operatorname{tg}(\delta_{U_{зq(0)}}) = \frac{P_{(0)} \cdot (x_d / n_z)}{E_{q(0)} \cdot U_{зq(0)}} = \frac{1,127 \cdot (1,6/4)}{3,989 \cdot 0,765} = 0,148.$$

Напряжение на шинах генератора

$$U_{з(0)} = \frac{U_{зq(0)}}{\cos(\arctg(B_{(0)}))} = \frac{0,765}{\cos(\arctg(0,148))} = 0,773 < 1,03.$$

Поскольку напряжение не превысило заданное значение, дальнейший расчет аналогич-

чен предыдущему примеру.

Второй интервал – от 0,05 до 0,1 с.

Изменение вынужденной э.д.с. за рассчитываемый интервал ($t_{(2)} = 0,1$)

$$E_{q(1)} = \frac{E'_{q(1)} - U_c \cdot \frac{\frac{x_d}{n_2} - \frac{x'_d}{n_2}}{x_{12(ав.р.1)}} \cdot \cos \delta_{(1)}}{1 - \frac{\frac{x_d}{n_2} - \frac{x'_d}{n_2}}{x_{11(ав.р.1)}}} = \frac{1,3147 - 1 \cdot \frac{1,6}{4} - \frac{0,28}{4} \cdot \cos(0,5776)}{1 - \frac{1,6}{4} - \frac{0,28}{4}} = 3,944.$$

$$P_{(1)} = \frac{E_{q(1)} \cdot U_c}{x_{12(ав.р.1)}} \cdot \sin(\delta_{(1)}) = \frac{3,944 \cdot 1}{1,898} \cdot \sin(0,5776) = 1,135$$

Продольная составляющая напряжения на шинах генератора

$$U_{zq(1)} = E'_{q(1)} \cdot \frac{x_d}{x_d - x'_d} - E_{q(1)} \cdot \frac{x'_d}{x_d - x'_d} = 1,315 \cdot \frac{1,6}{1,6 - 0,28} - 3,944 \cdot \frac{0,28}{1,6 - 0,28} = 0,757.$$

$$B_{(1)} = \operatorname{tg}(\delta_{Uzq(1)}) = \frac{P_{(1)} \cdot (x_d / n_2)}{E_{q(1)} \cdot U_{zq(1)}} = \frac{1,135 \cdot (1,6/4)}{3,944 \cdot 0,757} = 0,152.$$

Напряжение на шинах генератора

$$U_{z(1)} = \frac{U_{zq(1)}}{\cos(\arctg(B_{(1)}))} = \frac{0,757}{\cos(\arctg(0,152))} = 0,765 < 1,03.$$

Поскольку напряжение не превысило заданное значение, дальнейший расчет на втором интервале также аналогичен предыдущему примеру.

Третий интервал – от 0,1 до 0,15 с. В начале интервала – отключение Q1, переход от первого ко второму аварийному режиму. $t_{(3)} = 0,15$.

Э.д.с. холостого хода после отключения выключателя Q1 (в начале третьего интервала):

$$E_{q(2.2)} = \frac{E'_{q(2)} - U_c \cdot \frac{(x_d/n_2) - (x'_d/n_2)}{x_{12(ав.р.2)}} \cdot \cos \delta_{(2)}}{1 - \frac{(x_d/n_2) - (x'_d/n_2)}{x_{11(ав.р.2)}}} =$$

$$= \frac{1,3097 - 1 \cdot \frac{(1,6/4) - (0,28/4)}{0,728} \cdot \cos(0,612)}{1 - \frac{(1,6/4) - (0,28/4)}{0,639}} = 1,941.$$

Активная мощность генератора в начале третьего интервала

$$P_{(2.2)} = \frac{E_{q(2.2)} \cdot U_c}{x_{12(av.p.2)}} \cdot \sin(\delta_{(2)}) = \frac{1,941 \cdot 1}{0,728} \cdot \sin(0,612) = 1,533,$$

Продольная составляющая напряжения на шинах генератора

$$U_{\varepsilon q(2)} = E'_{q(2)} \cdot \frac{x_d}{x_d - x'_d} - E_{q(2.2)} \cdot \frac{x'_d}{x_d - x'_d} = 1,310 \cdot \frac{1,6}{1,6 - 0,28} - 1,941 \cdot \frac{0,28}{1,6 - 0,28} = 1,176$$

$$B_{(2)} = \operatorname{tg}(\delta_{U_{\varepsilon q(2)}}) = \frac{P_{(2.2)} \cdot (x_d / n_{\varepsilon})}{E_{q(2.2)} \cdot U_{\varepsilon q(2)}} = \frac{1,533 \cdot (1,6/4)}{1,941 \cdot 1,176} = 0,269.$$

Напряжение на шинах генератора

$$U_{\varepsilon(2)} = \frac{U_{\varepsilon q(2)}}{\cos(\arctg(B_{(2)}))} = \frac{1,176}{\cos(\arctg(0,269))} = 1,217 > 1,03.$$

Так как напряжение на шинах генератора превышает заданное, форсировка прекращается и вынужденная э.д.с. изменяется по закону

$$E_{qe(3)} = E_{qe(0)} + (E_{qe(2)} - E_{qe(0)}) \cdot e^{-\left[\left(t_{(3,прав)} - t_{(3,лев.)}\right) / T_e\right]} =$$

$$= 2,058 + (3,803 - 2,058) \cdot e^{-\left[(0,15 - 0,1) / 0,12\right]} = 3,208.$$

$$E_{qe(3)cp.} = \frac{E_{qe(2)} + E_{qe(3)}}{2} = \frac{3,803 + 3,208}{2} = 3,505.$$

Изменение переходной э.д.с. в течение третьего расчетного интервала:

$$\Delta E'_{q(3)} = \frac{E_{qe(3)cp.} - E_{q(2.2)}}{T_{d0}} \cdot \Delta t = \frac{3,505 - 1,941}{4,9} \cdot 0,05 = 0,016.$$

Величина переходной э.д.с. в конце третьего интервала

$$E'_{q(3)} = E'_{q(2)} + \Delta E'_{q(3)} = 1,310 + 0,016 = 1,326.$$

Все остальные величины те же, что и в третьем интервале предыдущего примера.

Четвертый интервал – от 0,15 до 0,2 с.

Э.д.с. холостого хода:

$$E_{q(3)} = \frac{E'_{q(3)} - U_c \cdot \frac{\frac{x_d}{n_z} - \frac{x'_d}{n_z}}{x_{12(av,p.2)}} \cdot \cos \delta_{(3)}}{1 - \frac{\frac{x_d}{n_z} - \frac{x'_d}{n_z}}{x_{11(av,p.2)}}} = \frac{1,326 - 1 \cdot \frac{1,6}{0,728} - \frac{0,28}{0,728} \cdot \cos(0,663)}{1 - \frac{1,6}{0,639} - \frac{0,28}{0,639}} = 2,003.$$

Активная мощность генератора в начале четвертого интервала

$$P_{(3)} = \frac{E_{q(3)} \cdot U_c}{x_{12(av,p.2)}} \cdot \sin(\delta_{(3)}) = \frac{2,003 \cdot 1}{0,728} \cdot \sin(0,663) = 1,692,$$

Продольная составляющая напряжения на шинах генератора

$$U_{zq(3)} = E'_{q(3)} \cdot \frac{x_d}{x_d - x'_d} - E_{q(3)} \cdot \frac{x'_d}{x_d - x'_d} = 1,326 \cdot \frac{1,6}{1,6 - 0,28} - 2,003 \cdot \frac{0,28}{1,6 - 0,28} = 1,182.$$

$$B_{(3)} = \operatorname{tg}(\delta_{Uzq(3)}) = \frac{P_{(3)} \cdot (x_d / n_z)}{E_{q(3)} \cdot U_{zq(3)}} = \frac{1,692 \cdot (1,6/4)}{2,003 \cdot 1,182} = 0,286.$$

Напряжение на шинах генератора

$$U_{z(3)} = \frac{U_{zq(3)}}{\cos(\arctg(B_{(3)}))} = \frac{1,182}{\cos(\arctg(0,286))} = 1,23 > 1,03.$$

$$E_{qe(4)} = E_{qe(0)} + \left(E_{qe(2)} - E_{qe(0)} \right) \cdot e^{-\left[\left(t_{(4, прав)} - t_{(3, лев.)} \right) / T_e \right]} =$$

$$= 2,058 + (3,803 - 2,058) \cdot e^{-\left[(0,2 - 0,1) / 0,12 \right]} = 2,816.$$

$$E_{qe(4)cp.} = \frac{E_{qe(3)} + E_{qe(4)}}{2} = \frac{3,208 + 2,816}{2} = 3,012.$$

Изменение переходной э.д.с. в течение третьего расчетного интервала:

$$\Delta E'_{q(4)} = \frac{E_{qe(4)cp.} - E_{q(3)}}{T_{d0}} \cdot \Delta t = \frac{3,012 - 2,003}{4,9} \cdot 0,05 = 0,01.$$

Величина переходной э.д.с. в конце третьего интервала

$$E'_{q(4)} = E'_{q(3)} + \Delta E'_{q(4)} = 1,326 + 0,01 = 1,336.$$

Далее рассчитываются приращение угла $\Delta \delta_{(4)}$ и угол $\delta_{(4)}$ к концу четвертого интер-

вала. Величина $\Delta P_{(3)}$ по сравнению с предыдущим примером почти не изменилась (в примере 8: $\Delta P_{(3)} = 0,299 \cong 0,3$, в примере 9: $\Delta P_{(3)} = 0,308 \cong 0,31$), поэтому угол $\delta_{(4)}$ получился таким же: $\delta_{(4)} = 0,722$.

На следующих интервалах расчеты ведутся в том же порядке, что и выше. Результаты приведены в табл. 10. Заливкой выделены параметры, величины которых изменились по сравнению с примером 8.

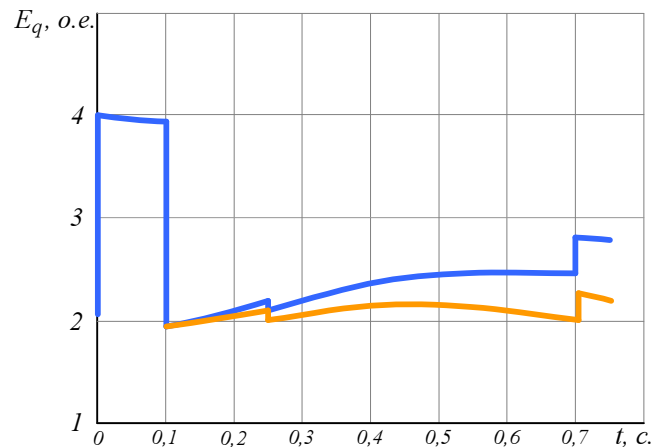


Рис. 42. Изменение во времени э.д.с. холостого хода E_q . Отключению форсировки возбуждения соответствует нижняя линия.

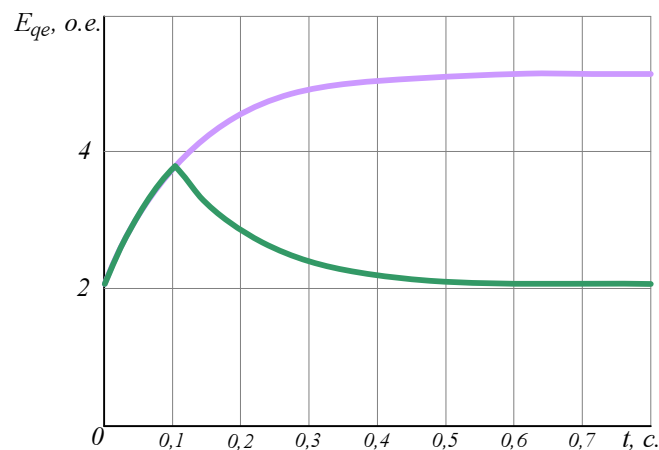


Рис. 43. Изменение во времени вынужденной э.д.с. холостого хода E_{qe} . Отключению форсировки возбуждения соответствует нижняя линия.

Таблица 10

Результаты расчетов по интервалам для примера 9.

Номер интервала (i)	$E_{q(i)}$, о.е.	$P_{(i)}$, о.е.	$U_{\varepsilon(i)}$, о.е.	$E_{qe(i)}$, о.е.	$E_{qe(i)cp}$, о.е.	$\Delta E'_{q(i)}$, о.е.	$E'_{q(i)}$, о.е.	$\Delta P_{(i)}$, о.е.	$\alpha_{(i)}$, о.е.	$\Delta \delta_{(i)}$, рад.	$\delta_{(i)}$, рад.	Примечание
0	2,058			2,058			1,329				0,566	Исходный режим
1	3,989	1,126	0,773	3,11	2,584	-0,0143	1,315	0,873	9,261	0,0116	0,578	К.з. на линии Л2, первый аварийный режим
2	3,944	1,135	0,765	3,803	3,456	-0,0050	1,310	0,865	9,176	0,0345	0,612	
3	3,938 1,941	1,193 1,533	1,217	3,208	3,505	0,016	1,326	0,807 0,467	8,561 4,954	0,0514	0,663	Отключение Q1, переход от первого ко второму аварийному режиму
4	2,003	1,692	1,230	2,816	3,012	0,010	1,336	0,308	3,267	0,0596	0,722	
5	2,059	1,870	1,237	2,558	2,687	0,0064	1,342	0,130	1,379	0,0630	0,785	
6	2,112 2,011	2,051 2,211	1,278	2,388	2,473	0,0047	1,347	-0,051 -0,211	-0,542 -2,240	0,0595	0,844	Отключение Q2, переход от второго аварийного режима к послеаварийному
7	2,067	2,404	1,281	2,275	2,331	0,0027	1,350	-0,404	-4,286	0,0488	0,893	
8	2,112	2,558	1,283	2,201	2,238	0,0013	1,351	-0,558	-5,924	0,0340	0,927	
9	2,142	2,665	1,283	2,152	2,176	0,0003	1,351	-0,665	-7,054	0,0160	0,943	
10	2,157	2,714	1,283	2,120	2,136	-0,0002	1,351	-0,714	-7,574	-0,0030	0,940	
11	2,153	2,705	1,283	2,099	2,109	-0,0004	1,350	-0,705	-7,481	-0,0217	0,918	Включение Q1, АПВ КОН успешное, холостой ход Л2, продолжается послеаварийный режим
12	2,134	2,635	1,283	2,085	2,092	-0,0004	1,350	-0,635	-6,736	-0,0438	0,874	
13	2,096	2,510	1,284	2,076	2,081	-0,0002	1,349	-0,510	-5,410	-0,0573	0,817	
14	2,051	2,326	1,284	2,070	2,073	0,0002	1,350	-0,326	-3,458	-0,0660	0,751	
15	2,002 2,278	2,123 2,825	1,254	2,066	2,068	-0,0021	1,348	-0,123 -0,825	-1,305 -8,752	-0,0785	0,672	Включение Q2, переход от послеаварийного к нормальному режиму
16	2,195	2,486	1,253	2,063	2,064	-0,0013	1,346	-0,486	-5,155	-0,0914	0,581	

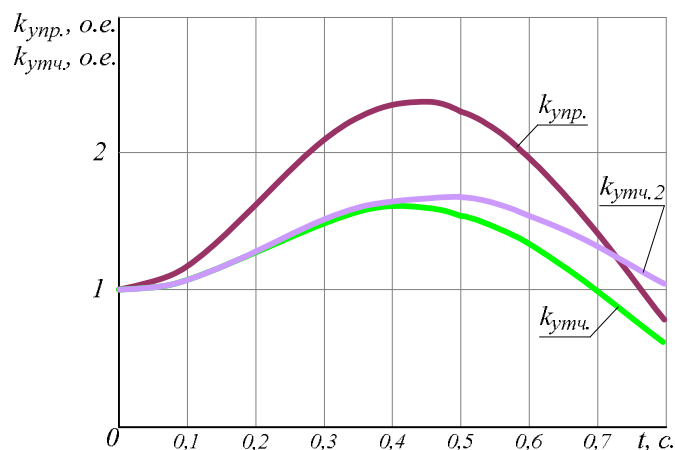


Рис. 44. Изменение угла вылета ротора при выражении угла $\delta_{(i)}$ в долях от соответствующего начального угла. Отключению форсировки возбуждения соответствует линия $k_{утч.2}$.

Форсировка возбуждения снимается после отключения к.з. на линии со стороны станции выключателем $Q1$ – рис. 33. В результате динамический переход занимает больший промежуток времени – линия $k_{утч.2}$ на рис. 44.

Если в системе имеются явнополюсные синхронные генераторы, то они, как уже отмечалось выше, при уточненном расчете вводятся в схему замещения индуктивным сопротивлением x_q . Кроме того, при определении параметров исходного режима и далее, на каждом интервале, необходимо находить фиктивную э.д.с.: E_{Q0} для нормального (исходного) режима и $E_{Q(i)}$ – в процессе оценки динамического перехода. Эти нюансы показаны ниже, в примере 10.

Пример 10. Для электрической системы, изображенной на рис. 45, выполнить уточненную оценку устойчивости динамического перехода – с учетом действия АРВ.

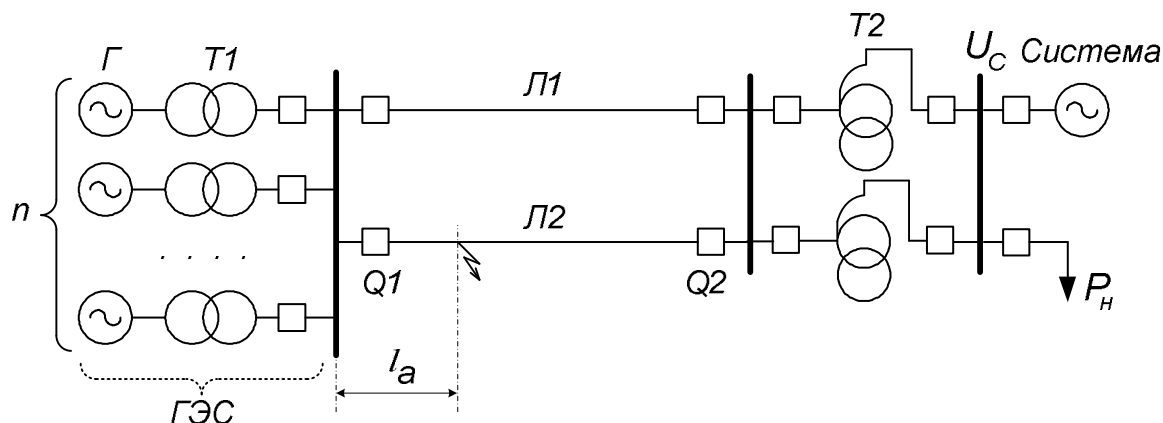


Рис. 45. Электрическая система для примера 10.

Станция – ГЭС с явнополюсными генераторами. Для уменьшения объема расчетов алгоритм развития аварии и параметры элементов системы взять из предыдущего примера, дополнив параметры генератора сопротивлением $x_q = 0,96$.

Решение. Для того, чтобы показать особенности расчетов для системы, содержащей явнополюсные машины, достаточно рассмотреть только первый интервал. Схема замещения системы в начальный момент переходного процесса:

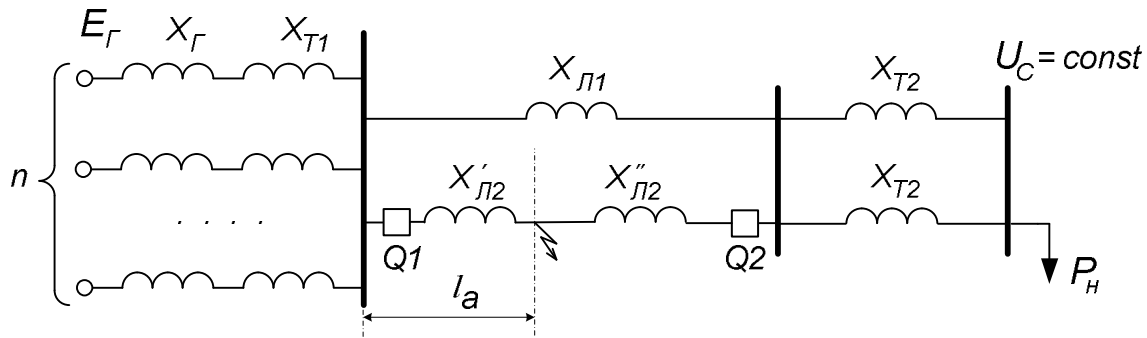


Рис. 46. Схема замещения системы в момент возникновения к.з.

Параметры элементов системы и параметры режима (из предыдущих примеров, в относительных единицах).

Генератор: $x_d = 1,6$; $x_q = 0,96$; $x'_d = 0,28$; $x_{Г.ОП} = x_2 = 0,24$; $n_2 = 4$.

Остальные элементы системы и параметры режима:

$x_{T1} = 0,098$; $x_{T2} = 0,066$; $x_{Л1} = x_{Л2} = 0,186$;

$U_c = 1$; $P_H = 2$; $Q_H = 1,344$.

Э.д.с. за сопротивлением x_q :

$$x_{Г.экв.4} = \frac{x_q}{n_2} = \frac{0,96}{4} = 0,24;$$

$$E_Q = \sqrt{\left(U_c + \frac{Q_H (x_{Г.экв.4} + x_{внеш.})}{U_c} \right)^2 + \left(\frac{P_H (x_{Г.экв.4} + x_{внеш.})}{U_c} \right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(1 + \frac{1,344(0,24 + 0,15)}{1} \right)^2 + \left(\frac{2,0(0,24 + 0,15)}{1} \right)^2} = 1,712;$$

$$\delta_{oQ} = \arctg \frac{P_H (x_{Г.экв.4} + x_{внеш.})}{U_c^2 + Q_H (x_{Г.экв.4} + x_{внеш.})} = \arctg \frac{2,0(0,24 + 0,15)}{1 + 1,344(0,24 + 0,15)} = 0,473 [\text{рад.}];$$

Э.д.с. за переходным сопротивлением x'_d :

$$x_{Г.экв.2} = \frac{x'_d}{n_2} = \frac{0,28}{4} = 0,07;$$

$$E' = \sqrt{\left(U_c + \frac{Q_H (x_{Г.экв.2} + x_{внеш.})}{U_c} \right)^2 + \left(\frac{P_H (x_{Г.экв.2} + x_{внеш.})}{U_c} \right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(1 + \frac{1,344(0,07 + 0,15)}{1} \right)^2 + \left(\frac{2,0(0,07 + 0,15)}{1} \right)^2} = 1,368;$$

$$\delta'_o = \arctg \frac{P_H (x_{Г.экв.2} + x_{внеш.})}{U_c^2 + Q_H (x_{Г.экв.2} + x_{внеш.})} = \arctg \frac{2,0(0,07 + 0,15)}{1 + 1,344(0,07 + 0,15)} = 0,327 \text{ [рад.]};$$

$$E'_{q2} = E' \cdot \cos(\delta_{oQ} - \delta'_o) = 1,368 \cdot \cos(0,473 - 0,327) = 1,353$$

Э.д.с. за синхронным продольным сопротивлением x_d :

$$E_q^{(я)} = E_Q \frac{x_d - x'_d}{x_q - x'_d} - E'_{q2} \frac{x_d - x_q}{x_q - x'_d} = 1,712 \frac{1,6 - 0,28}{0,96 - 0,28} - 1,353 \frac{1,6 - 0,96}{0,96 - 0,28} = 2,05.$$

Определим собственные и взаимные сопротивления схемы замещения для всех возможных режимов системы.

Исходный (нормальный) режим:

$$x_{11(н.р.)} = x_{12(н.р.)} = \frac{x_q}{n_2} + \frac{x_{T1}}{n_2} + \frac{x_{Л1}}{2} + \frac{x_{T2}}{2} = \frac{0,96}{4} + \frac{0,098}{4} + \frac{0,186}{2} + \frac{0,066}{2} = 0,39.$$

Первый аварийный режим ($x_{Г} = x_q = 0,96$, $x_{ш1} = 0,0316$)

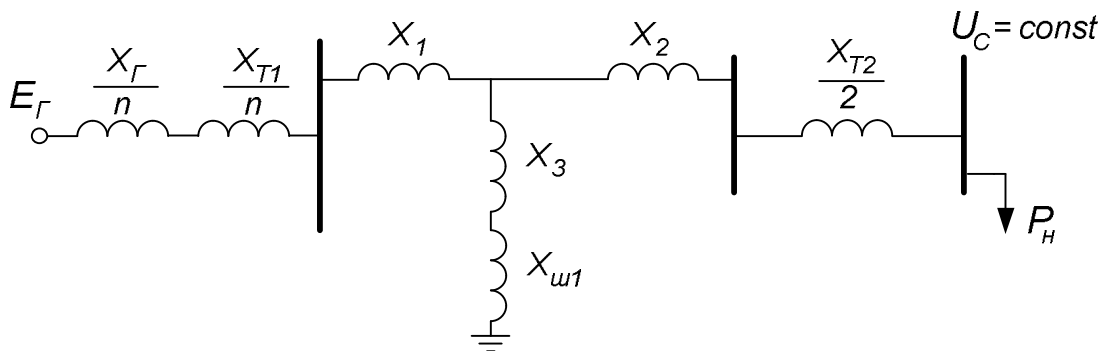


Рис. 47. Схема замещения прямой последовательности для определения собственного и взаимного сопротивления первого аварийного режима.

$$x_8 = \frac{x_{\Gamma}}{n_2} + \frac{x_{T1}}{n_2} + x_1 = \frac{0,96}{4} + \frac{0,098}{4} + 0,0186 = 0,2831;$$

$$x_9 = x_2 + \frac{x_{T2}}{2} = 0,0744 + \frac{0,066}{2} = 0,1074;$$

$$x_{10} = x_3 + x_{u1} = 0,0037 + 0,0316 = 0,0353;$$

$$x_{11(av.p.1)} = x_8 + \frac{x_9 \cdot x_{10}}{x_9 + x_{10}} = 0,2831 + \frac{0,1074 \cdot 0,0353}{0,1074 + 0,0353} = 0,3097;$$

$$x_{12(av.p.1)} = x_8 + x_9 + \frac{x_8 \cdot x_9}{x_{10}} = 0,2831 + 0,1074 + \frac{0,2831 \cdot 0,1074}{0,0353} = 1,2518.$$

Второй аварийный режим ($x_{\Gamma} = x_q = 0,96$, $x_{u2} = 0,089$)

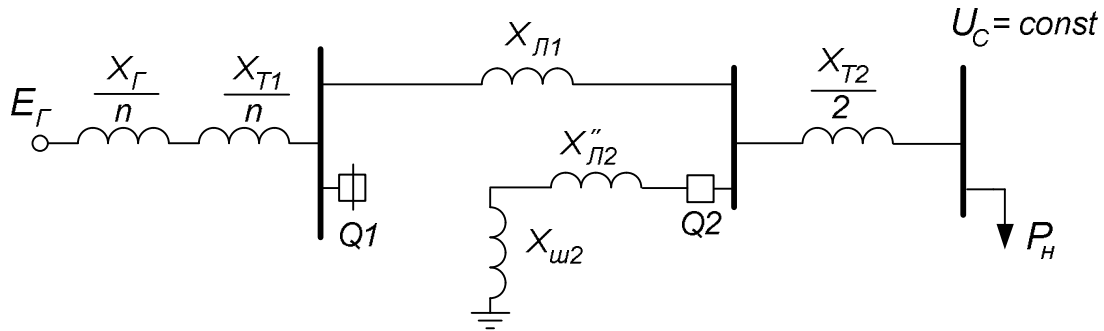


Рис. 48. Схема замещения прямой последовательности для определения собственного и взаимного сопротивления второго аварийного режима.

$$x_{15} = \frac{x_{\Gamma}}{n_2} + \frac{x_{T1}}{n_2} + x_{Л1} = \frac{0,96}{4} + \frac{0,098}{4} + 0,186 = 0,45;$$

$$x_{16} = \frac{x_{T2}}{2} = \frac{0,066}{2} = 0,033;$$

$$x_{17} = x''_{Л2} + x_{u2} = 0,149 + 0,089 = 0,238.$$

$$x_{11(av.p.2)} = x_{15} + \frac{x_{16} \cdot x_{17}}{x_{16} + x_{17}} = 0,45 + \frac{0,033 \cdot 0,238}{0,033 + 0,238} = 0,479;$$

$$x_{12(av.p.2)} = x_{15} + x_{16} + \frac{x_{15} \cdot x_{16}}{x_{17}} = 0,45 + 0,033 + \frac{0,45 \cdot 0,033}{0,238} = 0,545.$$

Третий аварийный режим ($x_{\Gamma} = x_q = 0,96$, $x_{u3} = 0,057$)

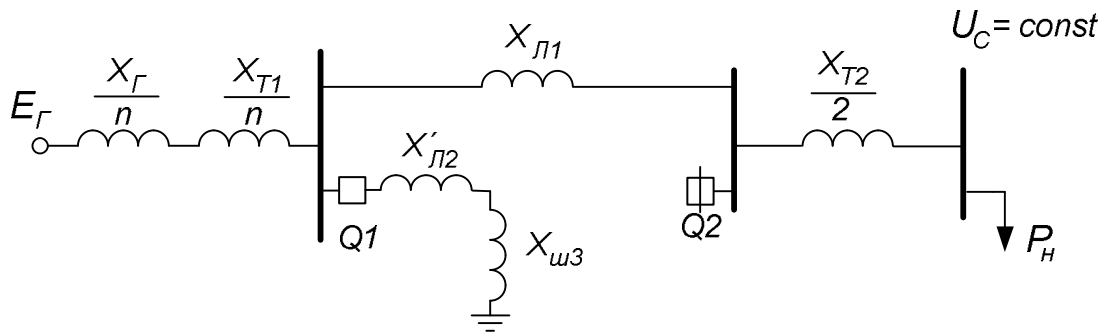


Рис. 49. Схема замещения прямой последовательности для определения собственного и взаимного сопротивления третьего аварийного режима.

$$x_{22} = \frac{x_f}{n_2} + \frac{x_{T1}}{n_2} = \frac{0,96}{4} + \frac{0,098}{4} = 0,264;$$

$$x_{23} = x_{L1} + \frac{x_{T2}}{2} = 0,186 + \frac{0,066}{2} = 0,219;$$

$$x_{24} = x'_{L2} + x_{w2} = 0,0372 + 0,057 = 0,0942.$$

$$x_{11(ав.р.3)} = x_{22} + \frac{x_{23} \cdot x_{24}}{x_{23} + x_{24}} = 0,264 + \frac{0,219 \cdot 0,0942}{0,219 + 0,0942} = 0,329;$$

$$x_{12(ав.р.3)} = x_{22} + x_{23} + \frac{x_{22} \cdot x_{23}}{x_{24}} = 0,264 + 0,219 + \frac{0,264 \cdot 0,219}{0,0942} = 1,097.$$

Послеаварийный режим:

$$x_{11(n/a.p.)} = x_{12(n/a.p.)} = \frac{x_q}{n_2} + \frac{x_{T1}}{n_2} + x_{L1} + \frac{x_{T2}}{2} = \frac{0,96}{4} + \frac{0,098}{4} + 0,186 + \frac{0,066}{2} = 0,483.$$

Оцениваем динамическую устойчивость рассматриваемой системы для первого варианта

Первый интервал – от 0 до 0,05 с.; в начале интервала на линии 2 произошло двухфазное к.з. на землю.

Расчетная э.д.с. фиктивной неявнополюсной машины в первый момент нарушения режима определяется по формуле (22) при подстановке в нее следующих величин:

$$x_f = x_q = 0,96; \quad x_{11(ав.р.1)} = 0,3097; \quad x_{12(ав.р.1)} = 1,2518;$$

$$E'_{q(0)} = E'_{q2} = 1,353;$$

$$\delta_{(0)} = \delta_{oQ} = 0,473.$$

$$E_{Q(0)} = \frac{E'_{q(0)} - U_c \cdot \frac{\frac{x_q}{n_z} - \frac{x'_d}{n_z}}{x_{12(av.p.1)}} \cdot \cos \delta_{(0)}}{1 - \frac{\frac{x_q}{n_z} - \frac{x'_d}{n_z}}{x_{11(av.p.1)}}} = \frac{1,353 - 1 \cdot \frac{0,96}{1,2518} - \frac{0,28}{4} \cdot \cos(0,473)}{1 - \frac{0,96}{4} - \frac{0,28}{4}} = 2,731.$$

Активная мощность генератора в начале первого интервала

$$P_{(0)} = \frac{E_{Q(0)} \cdot U_c}{x_{12(av.p.1)}} \cdot \sin(\delta_{(0)}) = \frac{2,731 \cdot 1}{1,2518} \cdot \sin(0,473) = 0,995.$$

Продольная составляющая напряжения на шинах генератора

$$U_{zq(0)} = E'_{q(0)} \cdot \frac{x_q}{x_q - x'_d} - E_{Q(0)} \cdot \frac{x'_d}{x_q - x'_d} = 1,353 \cdot \frac{0,96}{0,96 - 0,28} - 2,731 \cdot \frac{0,28}{0,96 - 0,28} = 0,785$$

$$B_{(0)} = \operatorname{tg}(\delta_{U_{zq(0)}}) = \frac{P_{(0)} \cdot \left(\frac{x_q}{n_z} \right)}{E_{Q(0)} \cdot U_{zq(0)}} = \frac{0,995 \cdot (0,96/4)}{2,731 \cdot 0,785} = 0,111.$$

Напряжение на шинах генератора

$$U_{z(0)} = \frac{U_{zq(0)}}{\cos(\arctg(B_{(0)}))} = \frac{0,785}{\cos(\arctg(0,111))} = 0,790 < 1,03.$$

Поскольку напряжение на шинах генератора не превышает заданного, изменение вынужденной э.д.с. за первый интервал рассчитываем по формуле (21), $t_{(1)} = 0,05$, $T_e = 0,12$,

$$E_{qe(0)} = E_q^{(я)} = 2,05:$$

$$E_{qe(1)} = E_{qe(0)} \cdot \left(k_{форс.} - (k_{форс.} - 1) \cdot e^{-\left(t_{(1)} / T_e \right)} \right) =$$

$$= 2,05 \cdot \left(2,5 - (2,5 - 1) \cdot e^{-(0,05/0,12)} \right) = 3,098.$$

Среднее значение $E_{qe(1)cp.}$ за первый интервал:

$$E_{qe(1)cp.} = \frac{E_{qe(0)} + E_{qe(1)}}{2} = \frac{E_{qe0} + E_{qe(1)}}{2} = \frac{2,05 + 3,098}{2} = 2,574.$$

Зная $E_{Q(0)}$, найдем э.д.с. холостого хода $E_{q(0)}$:

$$E_{q(0)} = E_{Q(0)} \frac{x_d - x'_d}{x_q - x'_d} - E'_{q(0)} \frac{x_d - x_q}{x_q - x'_d} = 2,731 \cdot \frac{1,6 - 0,28}{0,96 - 0,28} - 1,353 \cdot \frac{1,6 - 0,96}{0,96 - 0,28} = 4,028.$$

Изменение переходной э.д.с. в течение первого расчетного интервала ($T_{d0} = 4,9$ [с]):

$$\Delta E'_{q(1)} = \frac{E_{qe(1)cp} - E_{q(0)}}{T_{d0}} \cdot \Delta t = \frac{2,574 - 4,028}{4,9} \cdot 0,05 = -0,0148.$$

Величина переходной э.д.с. в конце первого интервала

$$E'_{q(1)} = E'_{q(0)} + \Delta E'_{q(1)} = 1,353 - 0,0148 = 1,338.$$

Небаланс мощности $\Delta P_{(0)} = P_o - P_{(0)} = 2,0 - 0,995 = 1,005$.

$$\alpha_{(1)} = \frac{\Delta P_{(0)}}{T_{J\Sigma}} \cdot \omega_o = \frac{1,005}{29,6} \cdot 314 = 10,661;$$

$$\Delta \delta_{(1)} = \alpha_{(1)} \cdot \frac{(\Delta t)^2}{2} = 10,661 \cdot \frac{(0,05)^2}{2} = 0,0133 \text{ [рад.]};$$

$$\delta_{(1)} = \delta_{(0)} + \Delta \delta_{(1)} = 0,473 + 0,0133 = 0,486 \text{ [рад.]}. \quad \delta_{(1)}$$

В результате расчета определены значения $E'_{q(1)}$ и $\delta_{(1)}$ в начале второго интервала,

по которым находится величина э.д.с. $E_{Q(1)}$ и все последующие параметры режима, т.е.

расчет повторяется для второго интервала. При изменении режима в начале k -го интервала приращение угла $\Delta \delta_{(k)}$ определяют по формулам (33) – (35). Вид остальных уравнений при

изменении режима остается неизменным, меняются лишь значения собственных и взаимных сопротивлений схемы замещения [4], что и было показано в примерах 8 и 9.

4. РАСЧЕТ УСТОЙЧИВОСТИ УЗЛА НАГРУЗКИ

4.1. Статическая устойчивость асинхронной нагрузки

В случае отключения выключателя Q3 - рис. 50, а - баланс мощности в оставшейся части системы сохранится. Но напряжение на шинах нагрузки $U_{нагр.}$ будет теперь зависеть от режима работы эквивалентной асинхронной нагрузки.

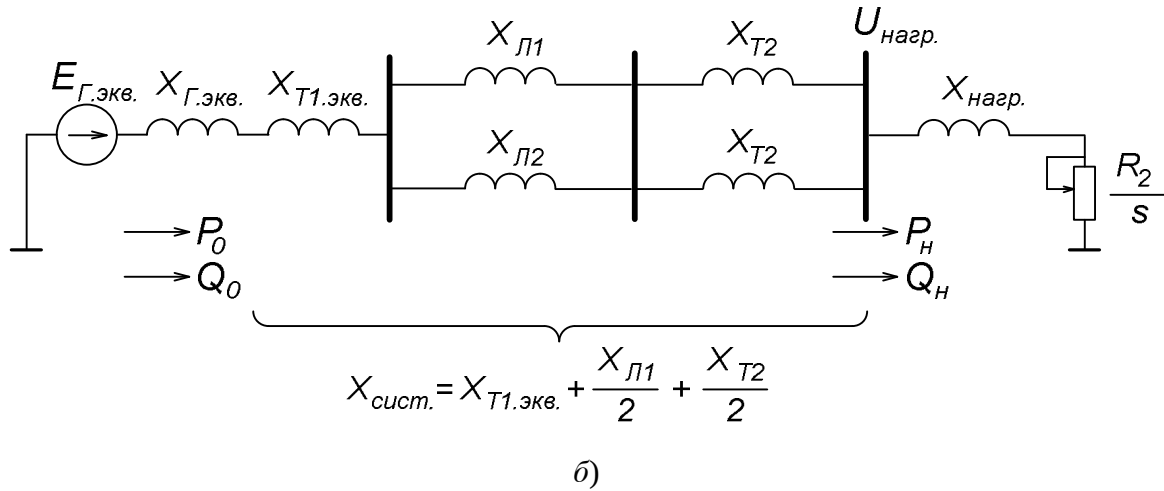
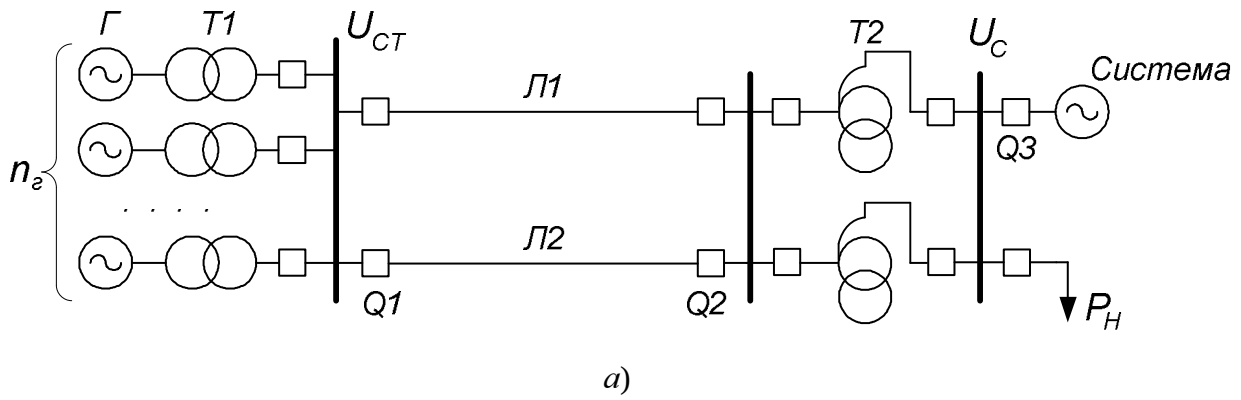


Рис. 50. Расчетная схема для анализа устойчивости асинхронной нагрузки.

При определении запаса устойчивости в качестве независимой переменной теперь должна рассматриваться э.д.с. $E_{Г.экв.}$, зависящая от вида регулирования возбуждения генератора (см. раздел 1.3). Генератор вводится в схему замещения соответствующим сопротивлением $x_{Г.экв.}$. Расчетная схема приведена на рис. 50, б.

На схеме нагрузка представлена в виде комплексного сопротивления в относительных единицах (см. раздел 1.2):

$$z_{нагр} = r_{нагр} + j \cdot x_{нагр} = \frac{S_{\delta}}{S_{нагр}} \cdot \left(\cos \varphi_{нагр} + j \cdot \sin \varphi_{нагр} \right). \quad (39)$$

Активное сопротивление схемы замещения R_2 эквивалентного асинхронного двигателя определяется как

$$R_2 = r_{нагр.} \cdot s_0, \quad (40)$$

где s_0 - скольжение эквивалентного асинхронного двигателя, замещающего нагрузку, при $U_{нагр.0} = 1$.

Для обеспечения устойчивости асинхронной нагрузки необходимо выполнение прямого критерия устойчивости [3, 4]

$$\frac{dP}{ds} > 0, \quad (41)$$

что эквивалентно условиям

$$P_{max} > P_{нагр.}; \quad s_{кр.} > s_0, \quad (42)$$

где

$$P_{max} = \frac{(E_{Г.экв.})^2}{2 \cdot x_{\Sigma}}; \quad s_{кр.} = \frac{R_2}{x_{\Sigma}}; \quad x_{\Sigma} = x_{Г.экв.} + x_{сист.} + x_{нагр.}$$

Так как $P_0 = \frac{(E_{Г.кр.})^2}{2 \cdot x_{\Sigma}}$ то условие устойчивости (42) может быть записано в виде

де

$$E_{Г.} > E_{Г.кр.}; \quad s_{кр.} > s_0; \quad E_{Г.кр.} = \sqrt{2 \cdot P_0 \cdot x_{\Sigma}}. \quad (43)$$

По известному значению э.д.с. $E_{Г.кр.}$ можно найти соответствующее ей критическое напряжение на шинах нагрузки

$$U_{нагр.кр.} = \sqrt{\left(E_{Г.кр.} - \frac{Q_0 \cdot (x_{Г.экв.} + x_{сист.})}{E_{Г.кр.}} \right)^2 + \left(\frac{P_0 \cdot (x_{Г.экв.} + x_{сист.})}{E_{Г.кр.}} \right)^2} \quad (44)$$

и определить запас статической устойчивости нагрузки по напряжению

$$k_{зан.U} = \frac{U_{нагр.0} - U_{нагр.кр.}}{U_{нагр.0}} \cdot 100\%. \quad (45)$$

Результаты расчета для различных видов АРВ генератора и его отсутствии представляются в виде таблицы и делаются соответствующие выводы.

Пример 11. Для простейшей электроэнергетической системы (ЭЭС), приведенной на рис. 50 а,б, рассчитать коэффициент запаса устойчивости нагрузки для следующих случаев:

- 1) выключатель Q3 включен;
- 2) выключатель Q3 отключен, генератор не имеет АРВ;
- 3) выключатель Q3 отключен, на генераторе установлено АРВ ПД;
- 4) выключатель Q3 отключен, на генераторе – АРВ СД.

Исходные данные для элементов ЭЭС и параметры схемы замещения взять из примеров 1 и 2, генератор - неявнополусный.

Решение. Рассматриваемый пример аналогичен задаче 7.6 [8]. Ранее, в упомянутых примерах 1 и 2, определены параметры элементов схемы замещения и параметры режима. Приготовим их для последующих расчетов в виде табл. 11

Таблица 11

	$x_{Г.экв.}$ о.е.	$x_{сист.}$ о.е.	P_H , о.е.	Q_H , о.е.	$\cos\varphi_H$, о.е.	s_0 , о.е.	T_j , с
Генератор без АРВ	0,4	0,15	2,0	1,344	0,83	0,03	6
Генератор с АРВ ПД	0,07						
Генератор с АРВ СД	0						

Рассчитаем по (39) параметры эквивалентного асинхронного двигателя, представляющего нагрузку:

$$z_{нагр} = r_{нагр} + j \cdot x_{нагр} = \frac{S_0}{S_{нагр}} \cdot \left(\cos\varphi_{нагр} + j \cdot \sin\varphi_{нагр} \right) =$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2^2 + 1,344^2}} \cdot (0,83 + j \cdot 0,558) = 0,344 + j \cdot 0,232 .$$

Случай 1 – выключатель Q3 включен. Напряжение на шинах нагрузки неизменно: $U_{нагр.} = U_c = 1 = const$. Определим по аналогии с (42) и (43) критическое скольжение и напряжение на зажимах эквивалентного асинхронного двигателя

$$R_2 = r_{нагр.} \cdot s_0 = 0,344 \cdot 0,03 = 0,01 ;$$

$$s_{кр.U} = \frac{R_2}{x_{нагр.}} = \frac{0,01}{0,232} = 0,044 ;$$

$$U_{нагр.кр.} = \sqrt{2 \cdot P_0 \cdot x_{нагр.}} = \sqrt{2 \cdot 2,0 \cdot 0,232} = 0,963$$

Максимальная мощность нагрузки, которую двигатель может вращать без нарушения его устойчивой работы [8]:

$$P_{max} = \frac{\left(U_{нагр.} \right)^2}{2 \cdot x_{нагр.}} = \frac{1}{2 \cdot 0,232} = 2,155$$

Коэффициент запаса устойчивости по мощности

$$k_{зан.P} = \frac{P_{max} - P_0}{P_{max}} \cdot 100\% = \frac{2,155 - 2,0}{2,155} \cdot 100\% = 7,19\% .$$

Коэффициент запаса устойчивости по скольжению

$$k_{зан.s} = \frac{s_{кр.} - s_0}{s_0} \cdot 100\% = \frac{0,044 - 0,03}{0,03} \cdot 100\% = 46,7\% .$$

Случай 2 – выключатель Q3 отключен, АРВ на генераторе отсутствует.

Суммарное сопротивление от генератора до двигателя

$$x_{\Sigma.1} = x_{Г.экв.1} + x_{сист.} + x_{нагр.} = 0,4 + 0,15 + 0,232 = 0,782 .$$

Критическое скольжение

$$s_{кр.E.1} = \frac{R_2}{x_{\Sigma.1}} = \frac{0,01}{0,782} = 0,013 < s_0 = 0,03$$

Коэффициент запаса устойчивости по скольжению

$$k_{зан.s.1} = \frac{s_{кр.E.1} - s_0}{s_0} \cdot 100\% = \frac{0,013 - 0,03}{0,03} \cdot 100\% = -56,7\% .$$

Из полученных данных видно, что эквивалентный асинхронный двигатель в данном случае неустойчив. До отключения выключателя Q3 двигатель работал устойчиво со скольжением 0,03; при внезапном отключении выключателя Q3 и отсутствии АРВ на генераторе работа двигателя со скольжением 0,03 оказалась правее $s_{кр.E.1}$, развивается процесс опрокидывания двигателя.

Рассчитаем критическую э.д.с. по (43):

$$E_{Г.кр.1} = \sqrt{2 \cdot P_0 \cdot x_{\Sigma.1}} = \sqrt{2 \cdot 2,0 \cdot 0,782} = 1,769$$

и по (44) – соответствующее ей критическое напряжение на шинах нагрузки

$$U_{нагр.кр.1} = \sqrt{\left(E_{Г.кр.1} - \frac{Q_0 \cdot (x_{Г.экв.1} + x_{сист.})}{E_{Г.кр.1}} \right)^2 + \left(\frac{P_0 \cdot (x_{Г.экв.1} + x_{сист.})}{E_{Г.кр.1}} \right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(1,769 - \frac{1,344 \cdot (0,4 + 0,15)}{1,769}\right)^2 + \left(\frac{2,0 \cdot (0,4 + 0,15)}{1,769}\right)^2} = 1,487.$$

Определяем по (45) запас статической устойчивости нагрузки по напряжению

$$k_{зан.U.1} = \frac{U_{нагр.0} - U_{нагр.кр.1}}{U_{нагр.0}} \cdot 100\% = \frac{1 - 1,487}{1} \cdot 100\% = -48,7\%.$$

Эквивалентный асинхронный двигатель в данном случае неустойчив и по второму критерию – нет запаса устойчивости нагрузки по напряжению.

Случай 3 – выключатель Q3 отключен, на генераторе – АРВ ПД.

Суммарное сопротивление от генератора до двигателя

$$x_{\Sigma.2} = x_{Г.экв.2} + x_{сист.} + x_{нагр.} = 0,07 + 0,15 + 0,232 = 0,452.$$

Критическое скольжение

$$s_{кр.E.2} = \frac{R_2}{x_{\Sigma.2}} = \frac{0,01}{0,452} = 0,022 < s_0 = 0,03$$

Коэффициент запаса устойчивости по скольжению

$$k_{зан.s.2} = \frac{s_{кр.E.2} - s_0}{s_0} \cdot 100\% = \frac{0,022 - 0,03}{0,03} \cdot 100\% = -26,7\%.$$

Эквивалентный асинхронный двигатель в и данном случае неустойчив по первому критерию – нет запаса устойчивости по скольжению.

Рассчитаем критическую э.д.с. по (43):

$$E_{Г.кр.2} = \sqrt{2 \cdot P_0 \cdot x_{\Sigma.2}} = \sqrt{2 \cdot 2,0 \cdot 0,452} = 1,345$$

и по (44) – соответствующее ей критическое напряжение на шинах нагрузки

$$U_{нагр.кр.2} = \sqrt{\left(E_{Г.кр.2} - \frac{Q_0 \cdot (x_{Г.экв.2} + x_{сист.})}{E_{Г.кр.2}}\right)^2 + \left(\frac{P_0 \cdot (x_{Г.экв.2} + x_{сист.})}{E_{Г.кр.2}}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(1,345 - \frac{1,344 \cdot (0,07 + 0,15)}{1,345}\right)^2 + \left(\frac{2,0 \cdot (0,07 + 0,15)}{1,345}\right)^2} = 1,172.$$

Определяем по (45) запас статической устойчивости нагрузки по напряжению

$$k_{зан.U.2} = \frac{U_{нагр.0} - U_{нагр.кр.2}}{U_{нагр.0}} \cdot 100\% = \frac{1 - 1,172}{1} \cdot 100\% = -17,2\%.$$

Эквивалентный асинхронный двигатель и в данном случае – при наличии на генера-

торе АРВ ПД – неустойчив по второму критерию – нет запаса устойчивости нагрузки по напряжению.

Случай 4 – выключатель Q3 отключен, на генераторе – АРВ СД.

Суммарное сопротивление от генератора до двигателя

$$x_{\Sigma.3} = x_{Г.экв.3} + x_{сист.} + x_{нагр.} = 0 + 0,15 + 0,232 = 0,382.$$

Критическое скольжение

$$s_{кр.Е.3} = \frac{R_2}{x_{\Sigma.3}} = \frac{0,01}{0,382} = 0,026 < s_0 = 0,03$$

Коэффициент запаса устойчивости по скольжению

$$k_{зан.с.3} = \frac{s_{кр.Е.3} - s_0}{s_0} \cdot 100\% = \frac{0,026 - 0,03}{0,03} \cdot 100\% = -13,3\%.$$

Эквивалентный асинхронный двигатель в и данном случае неустойчив по первому критерию – нет запаса устойчивости по скольжению.

Рассчитаем критическую э.д.с. по (43):

$$E_{Г.кр.3} = \sqrt{2 \cdot P_0 \cdot x_{\Sigma.3}} = \sqrt{2 \cdot 2,0 \cdot 0,382} = 1,236$$

и по (44) – соответствующее ей критическое напряжение на шинах нагрузки

$$U_{нагр.кр.3} = \sqrt{\left(E_{Г.кр.3} - \frac{Q_0 \cdot (x_{Г.экв.3} + x_{сист.})}{E_{Г.кр.3}} \right)^2 + \left(\frac{P_0 \cdot (x_{Г.экв.3} + x_{сист.})}{E_{Г.кр.3}} \right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(1,236 - \frac{1,344 \cdot (0 + 0,15)}{1,236} \right)^2 + \left(\frac{2,0 \cdot (0 + 0,15)}{1,236} \right)^2} = 1,10.$$

Определяем по (45) запас статической устойчивости нагрузки по напряжению

$$k_{зан.У.3} = \frac{U_{нагр.0} - U_{нагр.кр.3}}{U_{нагр.0}} \cdot 100\% = \frac{1 - 1,10}{1} \cdot 100\% = -10,0\%.$$

Эквивалентный асинхронный двигатель и в случае наличия на генераторе АРВ СД неустойчив и по второму критерию – нет запаса устойчивости нагрузки по напряжению.

4.2. Статическая устойчивость типовой нагрузки

Прямой критерий устойчивости (41) для комплексной нагрузки неприменим. Критерием устойчивости асинхронных электродвигателей, входящих в состав типовой комплексной нагрузки, является вторичный критерий устойчиво-

сти [3, 4].

$$\frac{dE_{\Gamma}}{dU} > 0, \quad (46)$$

эквивалентный критерию (41). Для применения вторичного критерия устойчивости следует определить зависимость $E_{\Gamma} = f(U)$ по выражению (3), задаваясь различными значениями напряжения $U_{нагр.}$ и определяя соответствующие значения мощностей по характеристикам типовой нагрузки [8] (см. табл. 12).

Таблица 12

Характеристика типовой нагрузки

$U_{нагр.}, \text{ о.е.}$	1,0	0,95	0,9	0,85	0,8	0,75	0,7
$P_{нагр.}, \text{ о.е.}$	1,0	0,969	0,941	0,916	0,893	0,872	0,855
$Q_{нагр.}, \text{ о.е.}$	1,0	0,93	0,885	0,858	0,844	0,848	0,880

По результатам расчета строятся графики $E_{\Gamma} = f(U)$ для разных видов АРВ и его отсутствии, определяются критические напряжения $U_{нагр.кр.}$ и коэффициенты запаса устойчивости нагрузки по напряжению $k_{зан.U}$ по (45).

Пример 12. Для проверки устойчивости комплексной нагрузки, включающей в себя осветительную нагрузку и асинхронные двигатели, построить зависимости $E_{экр.} = f(U)$ и $Q_{экр.} = f(E_{экр.})$ и воспользоваться практическими критериями устойчивости комплексной нагрузки [3, 4, 8]: $dE_{экр.}/dU > 0$ и $dQ_{экр.}/dE_{экр.} \rightarrow \infty$. В качестве источника принять электрическую станцию с турбогенераторами, имеющими АРВ ПД, из предыдущего примера; выключатель Q3 отключен. Нагрузку при $U_{нагр.0} = 1$ также взять из предыдущего примера 11: $P_{нагр.(0)} = 2,0$, $Q_{нагр.(0)} = 1,344$. Характеристики типовой нагрузки принять по табл. 12.

Решение. Рассматриваемый пример аналогичен задаче 7.4 [8].

Задаваясь значениями $U_{нагр.(i)}$ из табл. 12, из статических характеристик комплексной нагрузки определяем фактическую нагрузку для каждого значения напряжения:

$$P_{н.(i)} = P_{н.(i, табл.н.1)} \cdot P_{нагр.(0)} = P_{н.(i, табл.н.1)} \cdot 2,0;$$

$$Q_{н.(i)} = Q_{н.(i, табл.н.1)} \cdot Q_{нагр.(0)} = Q_{н.(i, табл.н.1)} \cdot 1,344.$$

Например, при $U_{нагр.(3)} = 0,9$:

$$P_{н.(3)} = 0,941 \cdot 2,0 = 1,882;$$

$$Q_{н.(3)} = 0,885 \cdot 1,344 = 1,189.$$

Результаты этих и последующих расчетов сводим в табл. 13.

Рассчитаем реактивную мощность, которую эквивалентный генератор выдает в сеть:

$$Q_{экв.(i)} = Q_{н.(i)} + \Delta Q_{(i)} = Q_{н.(i)} + \frac{P_{н.(i)}^2 + Q_{н.(i)}^2}{U_{нагр.(i)}^2} \cdot (x_{Гэкв.2} + x_{сист.}).$$

Например, при $U_{нагр.(1)} = 1$:

$$\Delta Q_{(1)} = \frac{P_{н.(1)}^2 + Q_{н.(1)}^2}{U_{нагр.(1)}^2} \cdot (x_{Гэкв.2} + x_{сист.}) = \frac{2,0^2 + 1,344^2}{1} \cdot (0,07 + 0,15) = 1,277,$$

$$Q_{экв.(1)} = Q_{н.(1)} + \Delta Q_{(1)} = 1,344 + 1,277 = 2,621.$$

Находим эквивалентную э.д.с. источника:

$$E_{экв.(i)} = \sqrt{\left(U_{нагр.(i)} + \frac{Q_{н.(i)} \cdot (x_{Гэкв.2} + x_{сист.})}{U_{нагр.(i)}} \right)^2 + \left(\frac{P_{н.(i)} \cdot (x_{Гэкв.2} + x_{сист.})}{U_{нагр.(i)}} \right)^2}.$$

Например, при $U_{нагр.(3)} = 0,9$:

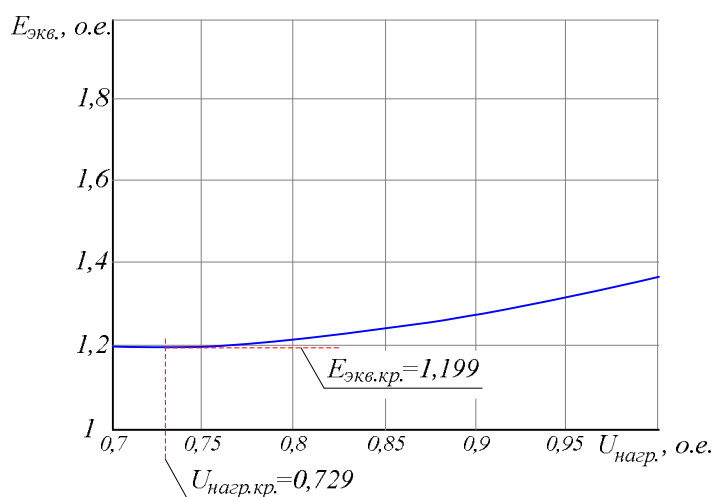
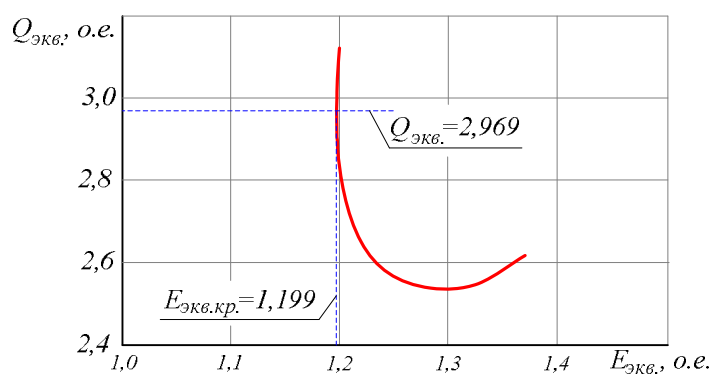
$$\begin{aligned} E_{экв.(3)} &= \sqrt{\left(U_{нагр.(3)} + \frac{Q_{н.(3)} \cdot (x_{Гэкв.2} + x_{сист.})}{U_{нагр.(3)}} \right)^2 + \left(\frac{P_{н.(3)} \cdot (x_{Гэкв.2} + x_{сист.})}{U_{нагр.(3)}} \right)^2} = \\ &= \sqrt{\left(0,9 + \frac{1,189 \cdot (0,07 + 0,15)}{0,9} \right)^2 + \left(\frac{1,882 \cdot (0,07 + 0,15)}{0,9} \right)^2} = 1,276. \end{aligned}$$

По данным табл. 13 строятся графики зависимостей $E_{экв.} = f(U)$ – рис. 51, и

$Q_{экв.} = f(E_{экв.})$ – рис. 52, и по ним определяются $E_{экв.кр.}$, $U_{нагр.кр.}$ и $Q_{экв.}(E_{экв.кр.})$.

Результаты расчетов для примера 12

$U_{нагр.}, \text{ о.е.}$	1,0	0,95	0,9	0,85	0,8	0,75	0,7
$P_{н(i)}, \text{ о.е.}$	2,0	1,938	1,882	1,832	1,786	1,744	1,71
$Q_{н(i)}, \text{ о.е.}$	1,344	1,25	1,189	1,153	1,134	1,14	1,183
$\Delta Q_{(i)}, \text{ о.е.}$	1,277	1,296	1,346	1,427	1,538	1,698	1,941
$Q_{экв.(i)}, \text{ о.е.}$	2,621	2,546	2,545	2,58	2,672	2,838	3,124
$E_{экв.(i)}, \text{ о.е.}$	1,368	1,318	1,276	1,242	1,215	1,199	1,199

Рис. 51. Зависимость $E_{экв.}$ от $U_{нагр.}$.Рис. 52. Зависимость $Q_{экв.}$ от $E_{экв.}$.

Запас статической устойчивости по напряжению:

$$k_{зан.U} = \frac{U_{нагр.0} - U_{нагр.кр.}}{U_{нагр.0}} \cdot 100\% = \frac{1 - 0,729}{1} \cdot 100\% = 27,1\%.$$

Таким образом, устойчивая работа данной нагрузки обеспечивается при $U_{нагр.} \geq U_{нагр.кр.} \cong 0,729$.

4.3. Динамическая устойчивость асинхронной нагрузки

При расчетах динамической устойчивости не учитываются электромагнитные переходные процессы в обмотках двигателей. Изменение скольжения, обусловленное изменением режима, определяется численным интегрированием уравнения движения асинхронного электродвигателя:

$$T_j \cdot \frac{ds}{dt} = M_{ном.} - M(s), \quad (47)$$

где T_j – постоянная инерции, приведенная к номинальной мощности двигателя, [с];

$M_{ном.}$ – номинальный механический момент сопротивления, [о.е.];

$M(s)$ – электромагнитный момент двигателя, [о.е.], определяемый по формуле

$$M(s) = \frac{2 \cdot k_{max}}{\frac{s}{s_{кр.1}} + \frac{s_{кр.1}}{s}} \cdot \left(\frac{U_{\partial в.}}{U_{ном.}} \right)^2, \quad (48)$$

$$\text{где } k_{max} = \frac{M_{max.}}{M_{ном.}} \cong \frac{P_{max.}}{P_{ном.}}; \quad P_{max.} = \frac{U_{ном.}^2}{2 \cdot x_{нагр.}}; \quad s_{кр.1} = \frac{R_2}{x_{нагр.}}.$$

В формулы (47) и (48) рекомендуется все величины подставлять в относительных единицах при номинальной мощности двигателя.

В случае к.з. на двигателе напряжение $U_{\partial в.}$ уменьшается и для его определения необходимо рассматривать схему замещения, показанную на рис. 53, а для общего случая. С помощью эквивалентных преобразований расчетная схема приводится к виду, изображенному на рис. 53, б.

Напряжение $U_{\partial в.}$ на зажимах двигателя в зависимости от скольжения определится по формуле

$$U_{\partial в.} = I \cdot z_{\partial в.} = \frac{E_{\text{экв.}} \cdot \sqrt{\left(x_{\text{нагр.}}\right)^2 + \left(\frac{R_2}{s}\right)^2}}{\sqrt{\left(x_{C.\text{экв.}} + x_{\text{нагр.}}\right)^2 + \left(\frac{R_2}{s}\right)^2}}. \quad (49)$$

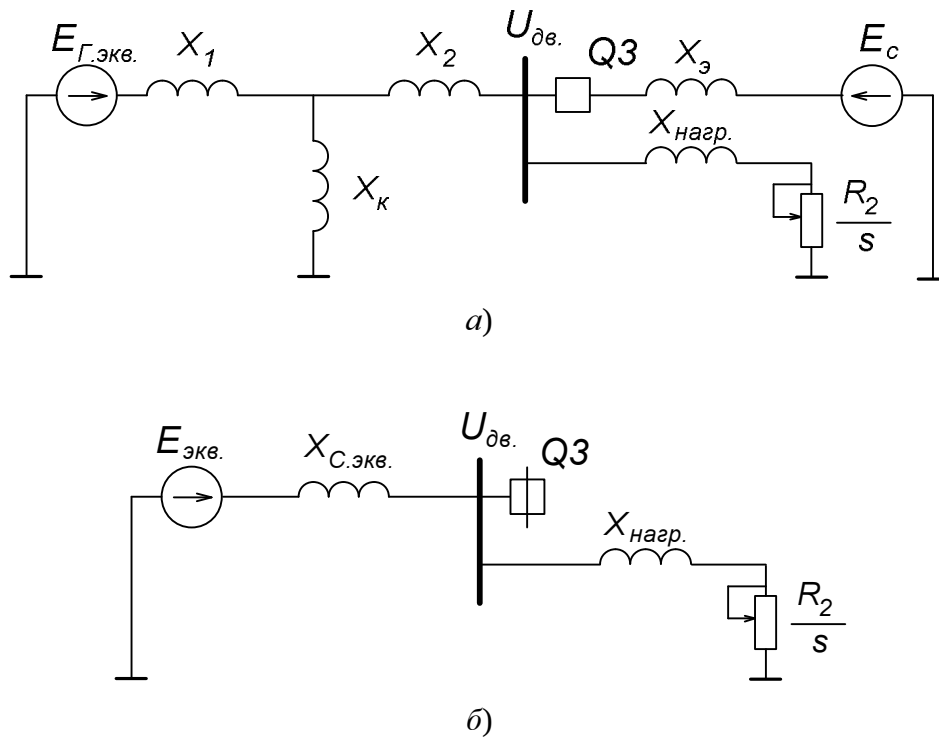


Рис. 53. Схема замещения для оценки динамической устойчивости асинхронного двигателя: а – общий случай; б – при отключении системы неограниченной мощности.

Для подготовки к численному решению дифференциальное уравнение (47) запишем в виде

$$\frac{ds}{dt} = \frac{M_{\text{ном.}}}{T_j} - \frac{M(s)}{T_j} = f_2 \quad (50)$$

при начальных условиях

$$s_{(0)} = s_0$$

На каждом шаге интегрирования величина f_2 определяется с использованием

выражений (48) и (49).

При отключении к.з. напряжение на шинах двигателя восстанавливается до значения, близкого к номинальному. Если при продолжении процесса численного интегрирования с $U_{\text{дв.}} = U_{\text{ном.}}$ скольжение продолжает расти, то устойчивость не сохраняется.

Уравнение (50) может решаться вручную, например, методом Эйлера. При этом приращение скольжения за интервал времени определяется по формуле

$$\Delta s_{(n+1)} = f_{2(n)} \cdot \Delta t. \quad (51)$$

Чтобы определить предельное время перерыва электроснабжения (допускаемое время из условий успешного самозапуска), надо определить время достижения предельного скольжения $s_{\text{пр.}}$, которое при $M_{\text{ном.}} = \text{const}$ вычисляется по выражению (48) при $U_{\text{дв.}} = U_{\text{ном.}}$ и $M_{(s)} = M_{\text{ном.}}$ т.е.

$$M_{\text{ном.}} = \frac{2 \cdot k_{\text{max}}}{\frac{s_{\text{пр.}}}{s_{\text{кр.1}}} + \frac{s_{\text{кр.1}}}{s_{\text{пр.}}}} \cong P_{\text{ном.}}. \quad (52)$$

При этом решение дифференциального уравнения (47) упрощается (т.к. $M_{(s)} = 0$) и сводится к виду

$$dt = \frac{T_j}{P_{\text{ном.}}} ds,$$

откуда

$$t_{\text{пр.}} = \frac{T_j}{P_{\text{ном.}}} \cdot \int_{s_0}^{s_{\text{пр.}}} ds = \frac{T_j}{P_{\text{ном.}}} \cdot (s_{\text{пр.}} - s_0). \quad (53)$$

Пример 13. Для простейшей электроэнергетической системы (ЭЭС), рассмотренной в примере 11, при питании нагрузки от системы неограниченной мощности (подпитка шин $U_{\text{дв.}} = U_{\text{нагр.}}$ со стороны станции отсутствует) определить предельное время перерыва электроснабжения при отключении выключателя Q3.

Решение. Предельное скольжение $s_{np.}$ определим из уравнения (52). В примере 11

были получены следующие величины, необходимые для расчета:

– максимальная мощность нагрузки, которую двигатель может вращать без нарушения его устойчивой работы

$$P_{max} = \frac{\left(U_{нагр.} \right)^2}{2 \cdot x_{нагр.}} = \frac{1}{2 \cdot 0,232} = 2,155 ;$$

– критическое скольжение

$$R_2 = r_{нагр.} \cdot s_0 = 0,344 \cdot 0,03 = 0,01 ;$$

$$s_{кр.1} = \frac{R_2}{x_{нагр.}} = \frac{0,01}{0,232} = 0,044 .$$

Определяем $k_{max} = \frac{M_{max.}}{M_{ном.}} \cong \frac{P_{max.}}{P_{ном.}} = \frac{2,155}{2,0} = 1,077$ и подставляем все значения в

(52):

$$M_{ном.} = \frac{2 \cdot k_{max}}{\frac{s_{np.}}{s_{кр.1}} + \frac{s_{кр.1}}{s_{np.}}} \cong P_{ном.}, \text{ т.е. } \frac{2 \cdot 1,077}{\frac{s_{np.}}{0,044} + \frac{0,044}{s_{np.}}} \cong 2,0 .$$

После преобразований получим квадратное уравнение:

$$\left(s_{np.} \right)^2 - 0,0474 \cdot s_{np.} + 0,00194 = 0 ,$$

$$s_{np.1,2} = \frac{0,0474 \pm \sqrt{(0,0474)^2 - 4 \cdot 0,00194}}{2} = \frac{0,0474 \pm \sqrt{-0,00529}}{2} .$$

Подкоренное выражение оказалось отрицательным. Это означает, что при перерыве электроснабжения самозапуск эквивалентного двигателя не обеспечивается.

**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**
**Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования**
**«СТАВРОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ»**
Институт механики и энергетики
Кафедра электроснабжения и эксплуатации электрооборудования

Курсовая работа
по дисциплине «Режимы работы электрооборудования систем
электроснабжения»
Тема: «»

Выполнил:

Студент __ курса ____ группы
ФИО

Направление подготовки: _____

Форма обучения: _____

Проверил:

уч. степень, должность
ФИО _____

Зарегистрирована

« ____ » _____ 20 ____ г.

Критерий	Максимальное значение в баллах	Набранных баллов
Оформление курсовой работы (проекта)	10	
Содержание курсовой работы (проекта)	60	
Защита курсовой работы (проекта)	30	
ИТОГО	100	

Оценка « _____ » Дата _____ Подпись _____

Ставрополь, 20 ____