



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

В.И. Готман

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

**Расчет режимов короткого замыкания
в системе электроснабжения промышленного предприятия**

*Рекомендовано в качестве учебно-методического пособия
Редакционно-издательским советом
Томского политехнического университета*

Издательство
Томского политехнического университета
2012



УДК 621.311.018(076)
ББК 31.29-5:31:27-01я73
Г73

Г73

Готман В.И.

Переходные процессы в системах электроснабжения. Расчет режимов короткого замыкания в системе электроснабжения промышленного предприятия: учебно-методическое пособие по курсовой работе / В.И. Готман; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 70 с.

В учебно-методическом пособии рассматриваются принципы составления схемы замещения и расчет ее параметров в относительных и именованных единицах. Излагается методика расчета токов трехфазных, двухфазных и однофазных коротких замыканий в системах электроснабжения предприятий; обсуждается специфика расчетов аварийных режимов в сетях до 1000 кВ, а также однофазных замыканий в сети с изолированной нейтралью.

Пособие подготовлено на кафедре электрических сетей и электротехники и предназначено для студентов ИДО, обучающихся по специальности 140610 «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений» и направлению 140400 «Электроэнергетика и электротехника».

УДК 621.311.018(076)

ББК 31.29-5:31:27-01я73

Рецензенты

Заместитель главного инженера Томского ПМЭС
А.М. Старцев

Кандидат технических наук,
заместитель директора ООО НПО «СибГеосервис»
Д.В. Джумик

© ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, 2012

© Готман В.И., 2012

© Оформление. Издательство Томского политехнического университета, 2012



ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ЗАДАНИЕ НА КУРСОВУЮ РАБОТУ	5
2. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ	7
3. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ	10
3.1. Общие сведения о схеме замещения прямой последовательности	10
3.2. Расчетные выражения для приведения параметров СЭС в именованных и относительных единицах	12
4. РАСЧЕТ ТОКОВ ТРЕХФАЗНОГО КЗ	24
4.1. Общие сведения о режимах коротких замыканий в сетях 6, 10 кВ и электроустановках до 1000 В	24
4.2. Расчет токов трехфазного короткого замыкания	25
4.2.1. Короткое замыкание в сетях напряжением 6, 10, 110 кВ	25
4.2.2. Короткое замыкание в сетях напряжением до 1000 В	27
4.3. Ударный ток короткого замыкания	28
5. РАСЧЕТ ТОКОВ НЕСИММЕТРИЧНЫХ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ	32
5.1. Общие сведения о расчете несимметричных коротких замыканий	32
5.2. Схемы замещения и сопротивления силовых элементов для токов прямой, обратной и нулевой последовательностей	33
5.3. Расчет токов двухфазного короткого замыкания	36
5.4. Расчет токов однофазных коротких замыканий в установках до 1000 В	40
5.5. Расчет токов однофазных коротких замыканий в сетях 6 (10) кВ с изолированной нейтралью	44
Приложение 1	50
П1.1. Информация по заданию на курсовую работу	50
П1.2. Параметры силового оборудования систем электроснабжения	54
Приложение 2. СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ	64
Приложение 3. ОБРАЗЕЦ ТИТУЛЬНОГО ЛИСТА КУРСОВОЙ РАБОТЫ	68
ЛИТЕРАТУРА	69



ВВЕДЕНИЕ

Расчет аварийных режимов систем электроснабжения необходим для выяснения истинных параметров режима при различных видах повреждений. Токи режимов коротких замыканий используются при выборе параметров электрооборудования, устройств релейной защиты и автоматики электрической сети.

Система электроснабжения промышленного предприятия (СЭС ПП) представляет совокупность электроустановок, предназначенных для обеспечения потребителей промышленного предприятия электрической энергией. Подстанции, распределительные устройства, токопроводы, воздушные и кабельные линии являются составной частью системы электроснабжения промышленных предприятий.

Режим работы системы – это совокупность процессов, характеризующих состояние системы электроснабжения в любой момент времени. Различают **установившиеся нормальные** и **переходные аварийные режимы СЭС**.

Аварийные режимы возникают вследствие повреждения элементов электрической сети. Наиболее опасными и частыми повреждениями в СЭС являются симметричные и несимметричные короткие замыкания. Вследствие КЗ нарушается нормальная работа СЭС; короткие замыкания оказывают на электрооборудование неблагоприятное термическое и электродинамическое действие как в месте повреждения, так и при прохождении аварийных токов по неповрежденным элементам СЭС. Для проектирования надежной системы электроснабжения необходимо знать параметры токов коротких замыканий.

В сетях с изолированной нейтралью короткие замыкания приводят к повышению фазных напряжений в неповрежденных фазах в $\sqrt{3}$ раз, что может привести к пробое изоляции. При значительных токах однофазного замыкания в указанных сетях за счет дуги возможен переход однофазного КЗ в двух- или трехфазное замыкание.



1. ЗАДАНИЕ НА КУРСОВУЮ РАБОТУ

В основу задания на курсовую работу (КР) положен типовой фрагмент схемы электроснабжения энергоемкого промышленного предприятия, которая содержит три класса напряжения: 110, 6 (10) кВ и установки до 1000 В.

Курсовая работа предусматривает расчеты режимов трехфазного, двухфазного и однофазного коротких замыканий (КЗ) на всех указанных классах напряжения. Предложенные виды аварийных ситуаций учитывают специфику режимов работы сетей 0,4–110 кВ; виды и режимы КЗ тесно связаны с теми задачами, которые решаются на их основе.

Принципиальными моментами задания является то, что схемы содержат сети 0,4; 0,6; 110 кВ с эффективно заземленной нейтралью и сети 6 (10) кВ, у которых нейтрали обмоток трансформаторов не заземлены; в схемах присутствуют синхронные и асинхронные двигатели, которые накладывают определенное сложности в расчеты режимов КЗ. Особой спецификой отличаются электроустановки напряжением до 1000 В, для которых некоторую неопределенность вносит учет переходных сопротивлений коммутационных аппаратов и неподвижных контактных соединений.

Вариант задания на курсовую работу выбирается в соответствии с первой буквой фамилии студента и двумя последними цифрами номера зачетной книжки.

Студенты, фамилии которых начинаются с букв **А до О** включительно выбирают номер схемы и тип элементов системы электроснабжения (СЭС) по табл. **П1.1 и П1.2 (прил. 1)**.

Студенты, фамилии которых начинаются с букв **П до Я** включительно выбирают номер схемы и тип элементов системы электроснабжения (СЭС) по табл. **П1.3 и П1.4 (прил. 1)**.

Принципиальные схемы СЭС представлены на **рис. П1.1; рис. П1.2; рис. П1.3; рис. П1.4**; параметры электрооборудования для СЭС помещены в табл. **П1.5–П1.12 (прил. 1)**.

Индивидуальное задание по курсовой работе связано непосредственно с номером расчетной схемы СЭС и приведено в табл. **П2.1 и П2.2 (прил. 2)**.

Для решения задач курсовой работы рекомендуется смешанная система исчисления: именованная и относительная. Для элементов системы электроснабжения классом напряжения 110, 10, 6 кВ сопротивле-



ния и ЭДС источников питания, так же как и для расчетных выражений режимов короткого замыкания, предлагается относительная система исчисления, для электроустановок до 1000 В – именованная система исчисления. Студент вправе сам выбирать систему исчисления: либо согласиться с рекомендациями, либо применять именованную или относительную систему исчисления для всей схемы в целом.

Пояснительная записка может быть выполнена как на компьютере (текстовый редактор *Word 7.0*, *Word 200*; шрифт *Times New Roman* размер 12pt или 14pt, *интервал междустрочный* – одинарный. Формулы *желательно* набирать в редакторе *Math Type*), так и в рукописном варианте. На титульном листе указываются кодовые номера задания.

В начале пояснительной записки размещается принципиальная схема системы электроснабжения, параметры оборудования и приводится полная формулировка задания.

Решение каждого вопроса задания должно сопровождаться его формулировкой, а далее собственно решение, которое содержит:

- схему замещения;
- краткие пояснения к проводимым действиям (решению);
- расчетные формулы в общем виде с подстановкой цифровых значений параметров и результат с указанием размерности; при однотипных расчетах допускается приводить расчетное выражение и результат.

В конце записки привести список источников информации; в начале записки – оглавление.

2. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ

ПРИМЕР № 1

В качестве примера рассмотрим принципиальную схему системы электроснабжения, представленную на рис. 2.1.

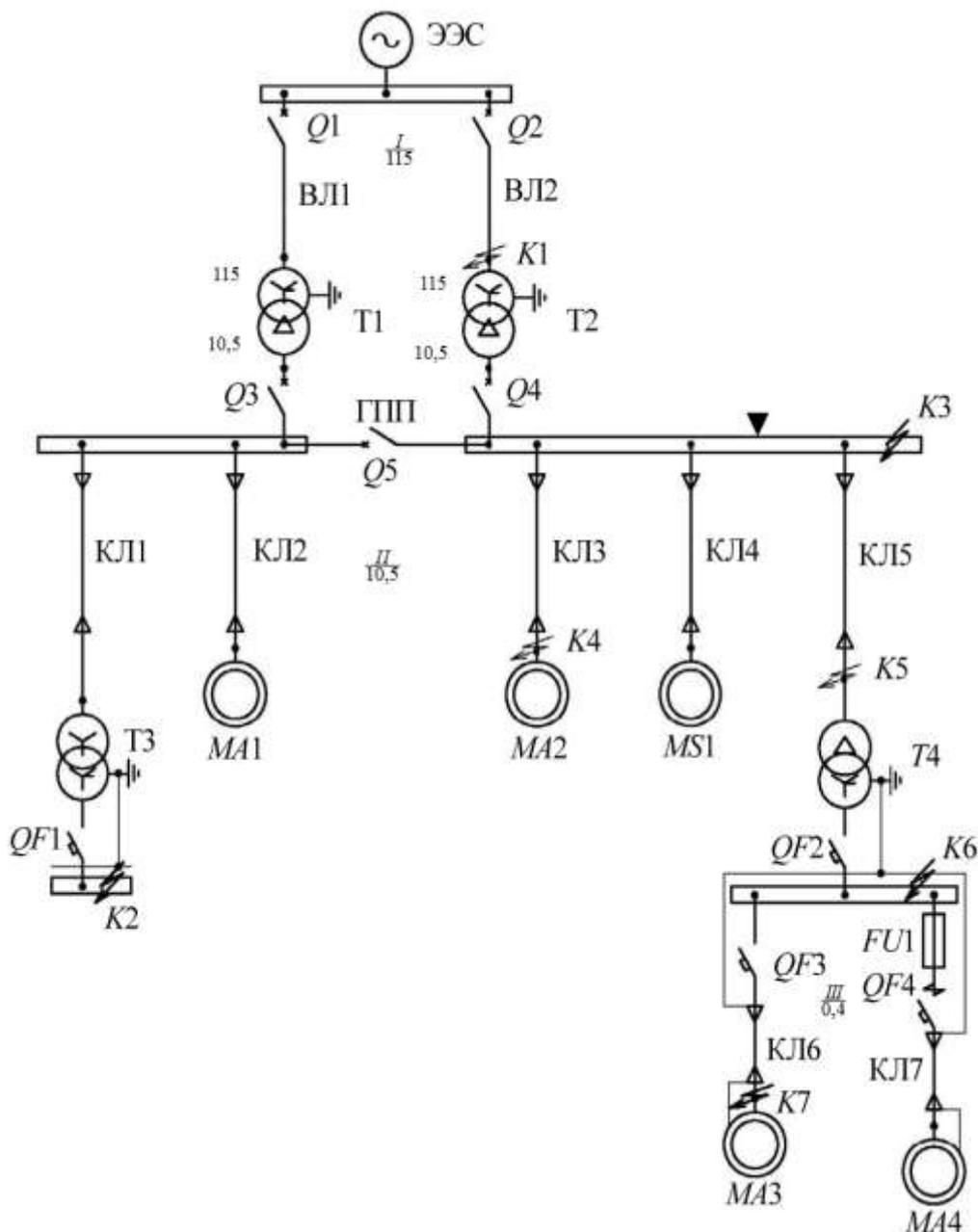


Рис. 2.1. Расчетная схемы СЭС ПП к примеру № 1

Схема имеет три класса напряжения: 110, 10, 0,4 кВ; нагрузка представлена синхронным и асинхронными двигателями, подключенными через кабельные линии. Коммутационными аппаратами являются:

Q1, Q2 – линейные выключатели; Q3, Q4 – вводные выключатели; Q5 – секционный выключатель (в нормальном режиме отключен); QF1–QF4 – автоматические выключатели (расцепители) в электроустановках 0,4 кВ; K1–K7 – точки предполагаемых коротких замыканий.

Римскими цифрами на схеме пронумерованы ступени напряжения (ступени трансформации); под номером ступени указаны средне-номинальные напряжения сети.

Для дальнейшего расчета необходимо выбрать исходные данные для силового оборудования, которые частично позаимствованы из табл. П1.5–П1.12 и представлены в табл. 2.1–2.6.

Таблица 2.1

Параметры внешней электроэнергетической системы (ЭЭС)
$E_c = 115$ кВ – ЭДС питающей энергосистемы
$S_k^{(3)} = 2100$ МВА – мощность трехфазного КЗ в узле подключения к СЭС

Таблица 2.2

Тип трансформатора	Параметры трансформаторов (табл. П1.5)				
	$S_{ном}$, ВА	$U_{ВН}$, кВ	$U_{НН}$, кВ	u_k , %	ΔP_k , МВт
T1, T2 (ТРДН-25000/110)	25	115	10,5	10,5	0,12
T4 (ТМ-2500/10)	2,5	10,5	0,4	5,5	0,025
T3 (ТМ-2500/10)	2,5	10,5	0,4	5,5	0,025
$R_{0T} = 10,4$ мОм; $X_{0T} = 32$ мОм					

Таблица 2.3

Тип СД	Параметры синхронного двигателя (табл. П1.7)						
	$P_{ном}$, МВт	$U_{ном}$, кВ	$I_{ном}$, А	$\cos\varphi_{ном}$, отн. ед.	$\eta_{ном}$, отн. ед.	$I_{*пск}$, отн. ед.	$M_{*пск}$, отн. ед.
MS1 (СТД-5000)	5	10	329	0,9	0,975	5,58	2,07



Таблица 2.4

Тип АД	Параметры асинхронных двигателей (табл. П1.9; П1.10)							
	P_H , МВт	U_H , кВ	I_H , А	$\cos\varphi_H$, отн. ед.	$\eta_{\text{ном}}$, отн. ед.	$I_{*пск}$, отн. ед.	$S_{\text{ном}}$, отн. ед.	M_{*max} , отн. ед.
МА1, МА2 (2АЗМ-3200)	3,2	10	210	0,91	0,968	5,2	0,005	2,6
МА3 (4А355m2)	0,315	0,38	551	0,92	0,945	6,5	0,01	2,2
МА4 (4А315s4)	0,160	0,38	290	0,92	0,95	6,5	0,014	2,2
	Для МА3, МА4 $R_{*АД(\text{ном})} = 0,018$ о.е. – активное сопротивление статорной обмотки							

Длительно допустимые токи проводов и кабелей и соответствующие им сечения выбираются исходя из значения максимальных рабочих токов соответствующих присоединений. В рамках курсовой работы не предусмотрен расчет максимальных рабочих токов присоединений. В задании для каждого присоединения уже выбраны сечения проводов и кабелей (табл. П1.1–П1.12) по их длительно допустимым токам с учетом конфигурации расчетной схемы и подключенной нагрузки.

Таблица 2.5

Тип линии	Параметры воздушной и кабельной линий (табл. П1.6; П1.8; П1.10; П1.11)							
	$U_{\text{ном}}$, кВ	F_2 , мм ²	l , км	$R_{1\text{пг}}$, Ом/км	$X_{1\text{пг}}$, Ом/км	n , шт.	$I_{с.пг}$, А/км	$Z_{(\phi-0)\text{пг}}$, МОм/м
ВЛ1, ВЛ2, АС 95	110	95	40	0,306	0,434	1	–	–
КЛ1, КЛ5	10	120	0,50	0,258	0,081	1	1,23	–
КЛ2, КЛ3	10	185	0,40	0,167	0,077	1	1,50	–
КЛ4	10	150	0,45	0,206	0,079	2	1,36	–
КЛ6	0,38	185	0,045	0,167	0,063	2	–	0,37
КЛ7	0,38	150	0,030	0,206	0,063	2	–	0,45

Таблица 2.6

<p>Параметры автоматических выключателей (расцепителей) QF1–QF4 Для всех автоматических выключателей в цепи $U = 0,38$ кВ принимаем $R_F = 10$ МОм</p>

Для своего варианта, аналогично примеру № 1, выписываются необходимые данные всех элементов расчетной СЭС, пользуясь таблицами прил. 1.



3. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ

3.1. Общие сведения о схеме замещения прямой последовательности

Важным обстоятельством в расчете переходного процесса является учет синхронных генераторов, а также синхронных и асинхронных двигателей. В начальный момент короткого замыкания напряжение на шинах указанных элементов скачкообразно снижается, и тем значительно, чем ближе точка короткого замыкания к их шинам. В этих условиях использовать напряжение синхронных и асинхронных машин для расчета токов в начальный момент КЗ в системе электроснабжения невозможно. Как известно, сверхпереходная ЭДС $E''_{(0)}$ генераторов и двигателей в начальный момент внезапного нарушения режима остается неизменной и равной своему значению в предшествующем режиме E''_0 . Этой ЭДС в схеме замещения соответствует сверхпереходная реактивность x''_d (x''). Неизменность E''_0 при $t = 0$ определяет ее практическую ценность и позволяет рассчитывать начальное значение периодической слагаемой тока переходного режима (в дальнейшем, при $t > 0$, E''_0 изменится до значения, соответствующего новому установившемуся режиму машины). Термины «сверхпереходная ЭДС», «сверхпереходная реактивность» следует относить к тому, что E''_0 вместе с x'' позволяют оценить переход от нормального режима к режиму короткого замыкания. Следует особо подчеркнуть, что начальное значение $E''_{(0)}$ определяется по параметрам напряжения и тока (U и I), с которыми машина работала до нарушения режима. В этом смысле $E''_{(0)}$ называют «расчетной», поскольку её нельзя измерить.

Синхронные и асинхронные двигатели, расположенные в непосредственной близости к точке короткого замыкания, переходят в генераторный режим и являются дополнительными источниками подпитки места короткого замыкания, что требует своего учета. Тем не менее следует отметить, что это влияние, как правило, носит локальный характер и существенно зависит от следующих факторов: типа двигателя, его мощности, электрической удаленности до места короткого замыкания и стадии переходного процесса.



Наличие относительно мощной двигательной нагрузки характерно для сетей и электроустановок 6–10 кВ и относительно маломощных – для распределительных сетей 0,4 кВ.

Ток, генерируемый двигателями, учитывается при проверке аппаратов, шинпроводов и проводников распределительных устройств (РУ) 6, 10 кВ и электроустановок до 1000 В, а также при выборе и расчете устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики электрооборудования. Математические выражения для расчета сверхпереходных параметров синхронных двигателей ($E''_{сд}$, $X''_{сд}$) приведены в табл. 3.4 и для асинхронных ($E''_{ад}$, $X''_{ад}$) – в табл. 3.5.

В качестве внешнего источника питания системы электроснабжения энергорайона (предприятия) является электроэнергетическая система. При расчете режимов КЗ энергосистему представляют в виде эквивалентного источника с реактивностью (x_c), за которой приложена неизменная ЭДС (E_c). Информацию по указанным параметрам внешнего источника питания может предоставить энергоснабжающая организация по официальному запросу. Возможен и косвенный способ их расчета. При известной величине начального сверхпереходного тока I''_c или мощности S_K при трехфазном КЗ в узле присоединения энергосистемы к рассматриваемому энергорайону можно определить реактивность x_c (табл. 3.1). За этой реактивностью считают подключенным источник бесконечной мощности с ЭДС E_c . При отсутствии точной информации можно принять $E_c = U_{ср}$, где $U_{ср}$ – среднее номинальное напряжение ступени в узле присоединения энергосистемы к СЭС энергорайона. В курсовой работе для питающей энергосистемы заданы её ЭДС и мощность трехфазного КЗ.

Для заданной схемы электроснабжения составляется схема замещения прямой последовательности, в которую электроэнергетическая система (ЭЭС) вводится ЭДС (E_c) и эквивалентным реактивным сопротивлением (x_c), синхронные и асинхронные двигатели, подлежащие учету, вводят в схему замещения своими сверхпереходными сопротивлениями x'' и ЭДС E'' . Воздушные и кабельные линии, трансформаторы, реакторы учитываются активно-индуктивными сопротивлениями. Учет асинхронных двигателей в сети 6 (10) кВ целесообразен при их активной мощности 600 кВт и более и непосредственной электрической связью с узлом КЗ или через кабельную линию. Особенности учета переходных сопротивлений в электроустановках до 1000 В изложены в разд. 4, 5 и примере 3.

При расчете сверхпереходных ЭДС синхронных и асинхронных двигателей считают, что до возникновения КЗ они работали в режиме номинальной загрузки. Специфика учета двигательной нагрузки, в зависимости от вида, места короткого замыкания и назначения расчетов, обсуждаются в разд. 4 и 5.

Расчетные выражения для определения параметров электрической схемы замещения в системе именованных и относительных единиц приведены в табл. 3.1–3.6. Рекомендуется расчеты в сетях 110, 6 (10) кВ осуществлять в системе относительных единиц, а в электроустановках до 1000 В – в системе именованных единиц (при этом границей системы исчисления принимаются шины 6 (10) кВ трансформаторов 6 (10) / 0,4 (0,6) кВ.

3.2. Расчетные выражения для приведения параметров СЭС в именованных и относительных единицах

Примечание:

В записи параметров, например $E_{*c(б)}$, индекс * означает, что параметр представлен в относительных единицах (отн. ед.); (б) – при принятых базисных условиях и (ном) – в качестве базисных приняты номинальные параметры элемента.

Таблица 3.1

1. 	Параметры электроэнергетической системы (ЭЭС): E_c – ЭДС электроэнергетической системы в узле подключения к СЭС предприятия, кВ; $S_k^{(3)}$ – мощность системы при трехфазном КЗ в узле подключения, МВА
1. Расчетные параметры в именованных единицах на ступени системы: $x_c = \frac{E_c^2}{S_k^{(3)}} \text{ – реактивное сопротивление системы на ступени } E_c, \text{ Ом;}$ E_c – ЭДС системы, кВ.	
2. Расчетные параметры в относительных базисных единицах: $x_{*c(б)} = \frac{E_c^2}{S_k^{(3)}} \frac{S_б}{U_б^2} \text{ – реактивное сопротивление системы, отн. ед.;}$ $E_{*c(б)} = E_c / U_б \text{ – ЭДС системы, отн. ед.;}$ где $U_б$ – базисное напряжение на ступени системы, кВ	

Таблица 3.2

2 	<p>Параметры двухобмоточного трансформатора:</p> <p>$S_{\text{ном}}$ – номинальная мощность, МВА;</p> <p>$U_{\text{вн}} / U_{\text{нн}}$ – соответственно номинальное напряжение обмоток высокого и низкого напряжения трансформатора, кВ;</p> <p>u_k – напряжение короткого замыкания, %;</p> <p>ΔP_k – потери короткого замыкания, МВт</p>
<p>1. Расчетные параметры в именованных единицах на ступени высокого напряжения:</p> <p>$Z_T = \frac{u_k U_{\text{нн}}^2}{100 S_{\text{ном}}}$ – полное сопротивление трансформатора, приведенное к ступени напряжения, на которой находится обмотка низкого напряжения трансформатора $U_{\text{нн}}$, Ом;</p> <p>$R_T = \frac{\Delta P_k U_{\text{нн}}^2}{S_{\text{ном}}^2}$ – активное сопротивление трансформатора, приведенное к ступени напряжения, на которой находится обмотка низкого напряжения трансформатора $U_{\text{нн}}$, Ом;</p> <p>$x_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}$ – реактивное сопротивление трансформатора на ступени напряжения $U_{\text{нн}}$, Ом.</p> <p>Для трансформаторов с $U_{\text{вн}} = 110$ кВ и выше активное сопротивление по сравнению с реактивным мало, поэтому им можно пренебречь. Тогда реактивное сопротивление приравняют к полному, т.е. $x_T \approx Z_T$, Ом.</p> <p>2. Расчетные параметры в относительных базисных единицах:</p> <p>$Z_{*T(\delta)} = \frac{u_k U_{\text{нн}}^2}{100 S_{\text{ном}}} \left(\frac{S_{\delta}}{U_{\delta}^2} \right)$ – полное сопротивление трансформатора, отн. ед.;</p> <p>$R_{*T(\delta)} = \frac{\Delta P_k U_{\text{нн}}^2}{S_{\text{ном}}^2} \left(\frac{S_{\delta}}{U_{\delta}^2} \right)$ – активное сопротивление трансформатора, отн. ед.;</p> <p>$x_{*T(\delta)} = \sqrt{Z_{*T(\delta)}^2 - R_{*T(\delta)}^2}$ – реактивное сопротивление трансформатора, отн. ед., где U_{δ} – базисное напряжение ступени, на которой находится обмотка низкого напряжения трансформатора, кВ.</p> <p>Для трансформаторов с $U_{\text{вн}} = 110$ кВ и выше активное сопротивление по сравнению с реактивным мало, поэтому им можно пренебречь. Тогда реактивное сопротивление приравняют к полному, т.е. $x_{*T(\delta)} \approx Z_{*T(\delta)}$, отн. ед.</p>	

Таблица 3.3

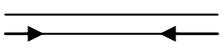
<p>3.</p> 	<p>Параметры воздушной (ВЛ) и кабельной (КЛ) линии:</p> <p>$r_{\text{ПГ}}$, $x_{\text{ПГ}}$ – погонные активное и индуктивное сопротивление одной цепи линии, Ом/км; L – протяженность (ВЛ) или (КЛ) линии, км; n – число параллельных линий; $U_{\text{НОМ}}$ – номинальное напряжение линии, кВ</p>
<p>1. Расчетные параметры в именованных единицах на ступени ВЛ, КЛ:</p> <p>$r_{\text{Л}} = r_{\text{ПГ}} \frac{L}{n}$; $x_{\text{Л}} = x_{\text{ПГ}} \frac{L}{n}$ – эквивалентное активное и индуктивное сопротивления n параллельных линий на ступени $U_{\text{НОМ}}$, Ом.</p> <p>2. Расчетные параметры в относительных базисных единицах:</p> <p>$r_{*\text{Л}(\text{б})} = r_{\text{ПГ}} \frac{L}{n} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{б}}^2}$; $x_{*\text{Л}(\text{б})} = x_{\text{ПГ}} \frac{L}{n} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{б}}^2}$ – эквивалентное активное и индуктивное сопротивления n параллельных линий, отн. ед., где $U_{\text{б}}$ – базисное напряжение ступени, на которой находится линия ($U_{\text{НОМ}}$), кВ</p>	

Таблица 3.4

<p>4.</p> 	<p>Параметры синхронного двигателя (MS):</p> <p>$P_{\text{НОМ}}$ – номинальная активная мощность, МВт; $U_{\text{НОМ}}$ – номинальное напряжение, кВ; $I_{\text{НОМ}}$ – номинальный ток, А; $\cos \varphi_{\text{НОМ}}$ – номинальный коэффициент мощности, отн. ед.; $\eta_{\text{НОМ}}$ – номинальный коэффициент полезного действия, отн. ед.; $I_{*\text{ПСК}}$ – кратность пускового тока, отн. ед.; $M_{*\text{ПСК}}$ – кратность начального пускового момента, отн. ед.</p>
<p>1. Расчетные параметры в именованных единицах на ступени напряжения СД:</p> <p>$S_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{\eta_{\text{НОМ}} \cdot \cos \varphi_{\text{НОМ}}}$ – полная номинальная мощность, МВА;</p> <p>$R_{\text{СД}} = \left[0,25(1 - \eta_{\text{НОМ}}) \cos \varphi_{\text{НОМ}} \right] \cdot \left(\frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}} \right)$ – активное сопротивление статорной обмотки на ступени $U_{\text{НОМ}}$, Ом;</p>	

Окончание табл. 3.4

$$X''_{*CD(НОМ)} = \left\{ \frac{1}{I_{*ПСК}} \sqrt{1 - \left(\frac{M_{*ПСК} \cdot \cos\varphi_{НОМ}}{I_{*ПСК}} \right)^2} \right\} - \text{сверхпереходная реактивность}$$

двигателя в относительных единицах, приведенная к его номинальным параметрам ($U_{НОМ}$, $S_{НОМ}$), отн. ед.

Допустимо использовать упрощенную формулу расчета сверхпереходной реактивности для синхронных двигателей напряжением 6 (10) кВ $X''_{*CD(НОМ)} = 1/I_{*ПСК}$ – сверхпереходная реактивность двигателя в относительных единицах, приведенная к его номинальным параметрам ($U_{НОМ}$, $S_{НОМ}$), отн. ед.;

$$X''_{CD} = \left\{ \frac{1}{I_{*ПСК}} \sqrt{1 - \left(\frac{M_{*ПСК} \cdot \cos\varphi_{НОМ}}{I_{*ПСК}} \right)^2} \right\} \cdot \left(\frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}} \right) \text{ или } X''_{CD} = \frac{U_{НОМ}^2}{I_{*ПСК} \cdot S_{НОМ}} \text{ (для}$$

упрощенной формулы) – сверхпереходная реактивность двигателя в именованных единицах, приведенная к ступени его номинального напряжения $U_{НОМ}$, Ом;

$$E''_{*CD(НОМ)} = \sqrt{(\cos\varphi_{НОМ})^2 + (\sin\varphi_{НОМ} + X''_{*CD(НОМ)})^2} - \text{сверхпереходная ЭДС}$$

двигателя в относительных единицах, приведенная к его номинальному напряжению ($U_{НОМ}$), отн. ед.;

$E''_{CD} = (E''_{*CD(НОМ)}) \cdot U_{НОМ}$ – сверхпереходная ЭДС двигателя в именованных единицах на ступени $U_{НОМ}$, кВ.

2. Расчетные параметры в относительных базисных единицах:

$$S_{НОМ} = \frac{P_{НОМ}}{\eta_{НОМ} \cdot \cos\varphi_{НОМ}} - \text{полная номинальная мощность, МВА;}$$

$$R_{*CD(б)} = R_{CD} \left(\frac{S_{б}}{U_{б}^2} \right) - \text{активное сопротивление статорной обмотки в относитель-}$$

ных единицах, отн. ед.;

$$X''_{*CD(б)} = X''_{CD} \left(\frac{S_{б}}{U_{б}^2} \right) - \text{сверхпереходная реактивность двигателя в относитель-}$$

ных единицах, отн. ед.;

$E''_{*CD(б)} = E''_{CD} / U_{б}$ – сверхпереходная ЭДС двигателя в относительных единицах, отн. ед.,

где $U_{б}$ – базисное напряжение ступени, на которой находится двигатель, кВ

Таблица 3.5

5. 	Параметры асинхронного двигателя (МА): $P_{\text{НОМ}}$ – номинальная активная мощность, МВт; $U_{\text{НОМ}}$ – номинальное напряжение, кВ; $I_{\text{НОМ}}$ – номинальный ток, А; $\cos\varphi_{\text{НОМ}}$ – номинальный коэффициент мощности, отн. ед.; $\eta_{\text{НОМ}}$ – номинальный коэффициент полезного действия, отн. ед.; $S_{\text{НОМ}}$ – номинальное скольжение, отн. ед.; $I_{*\text{ПСК}}$ – кратность пускового тока, отн. ед.; $M_{*\text{max}}$ – кратность максимального вращающего момента, отн. ед.; $R_{*\text{АД(НОМ)}}$ – активное сопротивление статорной обмотки для АД на напряжении 0,38; 0,66 кВ отн. ед.
1. Расчетные параметры в именованных единицах на ступени напряжения АД: $S_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{\eta_{\text{НОМ}} \cdot \cos\varphi_{\text{НОМ}}}$ – полная номинальная мощность, МВА; $R_{*\text{АД(НОМ)}} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{\eta_{\text{НОМ}}}$ – активное сопротивление статорной обмотки для асинхронного двигателя напряжением 6, 10 кВ в относительных единицах на базе его номинальных параметров ($U_{\text{НОМ}}$, $S_{\text{НОМ}}$), отн. ед.; $R_{\text{АД}} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{\eta_{\text{НОМ}}} \left(\frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}} \right)$ – активное сопротивление статорной обмотки на ступени $U_{\text{НОМ}}$, Ом. Для асинхронных двигателей напряжением 0,38; 0,66 кВ имеем: $R_{\text{АД}} = R_{*\text{АД(НОМ)}} \left(\frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}} \right)$ – активное сопротивление статорной обмотки в именованных единицах на ступени ($U_{\text{НОМ}}$), Ом, где $R_{*\text{АД(НОМ)}}$ – активное сопротивление статорной обмотки в номинальных относительных единицах ($R_{*\text{АД(НОМ)}}$); приведено в табл. П1.10; $X''_{*\text{АД(НОМ)}} = \frac{0,475}{M_{*\text{max}} \cdot \cos\varphi_{\text{НОМ}}}$ – сверхпереходная реактивность двигателя в относительных единицах, приведенная к его номинальным параметрам ($U_{\text{НОМ}}$, $S_{\text{НОМ}}$), отн. ед. Допустимо использовать упрощенную формулу расчета сверхпереходной реактивности для асинхронных двигателей напряжением 6 (10) кВ: $X''_{*\text{АД(НОМ)}} = 1 / I_{*\text{ПСК}}$ – сверхпереходная реактивность двигателя в относительных единицах, приведенная к его номинальным параметрам ($U_{\text{НОМ}}$, $S_{\text{НОМ}}$), отн. ед.;	

Окончание табл. 3.5

$$X''_{AD} = \frac{0,475}{M_{*max} \cdot \cos\varphi_{НОМ}} \cdot \left(\frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}} \right) \quad \text{или} \quad X''_{AD} = \frac{U_{НОМ}^2}{I_{*пск} \cdot S_{НОМ}} \quad (\text{для упрощенной}$$

формулы) – сверхпереходная реактивность двигателя в именованных единицах на ступени его номинального напряжения ($U_{НОМ}$), Ом;

$$E''_{*AD(НОМ)} = \sqrt{(\cos\varphi_{НОМ})^2 + (\sin\varphi_{НОМ} - X''_{*AD(НОМ)})^2} \quad - \text{сверхпереходная ЭДС}$$

двигателя в относительных единицах, приведенная к его номинальному напряжению ($U_{НОМ}$), отн. ед.;

$$E''_{AD} = (E''_{*AD(НОМ)}) \cdot U_{НОМ} \quad - \text{сверхпереходная ЭДС двигателя в именованных единицах на ступени } U_{НОМ}, \text{ кВ.}$$

2. Расчетные параметры в относительных базисных единицах:

$$S_{НОМ} = \frac{P_{НОМ}}{\eta_{НОМ} \cdot \cos\varphi_{НОМ}} \quad - \text{полная номинальная мощность, МВА;}$$

$$R_{*AD(б)} = \frac{S_{НОМ}}{\eta_{НОМ}} \left(\frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}} \right) \left(\frac{S_б}{U_б^2} \right) \quad - \text{активное сопротивление статорной обмотки}$$

асинхронного двигателя напряжением 6, 10 кВ в относительных единицах, отн. ед. Для асинхронных двигателей напряжением 0,38; 0,66 кВ имеем

$$R_{*AD(б)} = R_{*AD(НОМ)} \left(\frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}} \right) \left(\frac{S_б}{U_б^2} \right) \quad - \text{активное сопротивление статорной обмотки}$$

асинхронного двигателя в относительных единицах, отн. ед.,

где $R_{*AD(НОМ)}$ – активное сопротивление статорной обмотки в номинальных относительных единицах ($R_{*AD(НОМ)}$) приведено в табл. П1.10;

$$X''_{*AD(б)} = X''_{AD} \left(\frac{S_б}{U_б^2} \right) \quad - \text{сверхпереходная реактивность асинхронного двигателя}$$

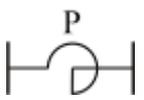
в относительных единицах, отн. ед.;

$$E''_{*AD(б)} = \left\{ \sqrt{(\cos\varphi_{НОМ})^2 + (\sin\varphi_{НОМ} - X''_{*AD(НОМ)})^2} \right\} \cdot \left(\frac{U_{НОМ}}{U_б} \right) \quad - \text{сверхпереходная}$$

ЭДС асинхронного двигателя в относительных единицах, отн. ед.,

где $U_б$ – базисное напряжение ступени, на которой находится асинхронный двигатель, кВ

Таблица 3.6

б. 	Параметры токоограничивающего реактора: $U_{p.ном}$ – номинальное напряжение, кВ; $I_{p.ном}$ – номинальный ток, А; $X_{p.ном}$ – номинальное реактивное сопротивление, Ом; ΔP_p – номинальные потери активной мощности на фазу, кВт
1. Расчетные параметры в именованных единицах на ступени напряжения реактора: $R_p = \frac{\Delta P_p \cdot 10^3}{I_{p.ном}^2}$ – активное сопротивление реактора, соответствующее его номинальным параметрам на ступени $U_{p.ном}$, Ом; X_p – номинальное реактивное сопротивление, Ом; приведено в табл. П1.12.	
2. Расчетные параметры в относительных базисных единицах: $R_{*p(б)} = \frac{\Delta P_p \cdot 10^3}{I_{p.ном}^2} \cdot \left(\frac{S_б}{U_б^2} \right)$ – активное сопротивление реактора в относительных единицах, отн. ед.; $X_{*p(б)} = X_p \left(\frac{S_б}{U_б^2} \right)$ – реактивное сопротивление, отн. ед., где $U_б$ – базисное напряжение ступени, на которой находится реактор, кВ	

ПРИМЕР № 2

Для принципиальной схемы к ПРИМЕРУ № 1 (рис. 2.1) составим электрическую *схему замещения прямой последовательности*, которая представлена на рис. 3.1. Эта схема предназначена для расчетов режима трехфазного замыкания; на ее базе можно также рассчитывать режимы несимметричных КЗ в указанных точках (К1-К7). На рис. 3.1, а параметры всех элементов представлены в относительных базисных единицах. На рис. 3.1, б представлен фрагмента схемы, питающейся от трансформатора Т4; параметры элементов на этой схеме выражены в именованных единицах (сопротивления – в мОм, а ЭДС асинхронных двигателей – в В); параметры этой части схемы замещения приведены к ступени 0,4 кВ. При расчете режимов КЗ в точках К1, К3, К4, К5 для силовых элементов классом напряжения 110, 10 кВ сопротивления и ЭДС источников питания будем рассчитывать в относительных единицах; для электроустановок 0,38 кВ параметры элементов – кабельных линий, трансформаторов Т3, Т4, асинхронных двигателей МА3, МА4 – будем представлять в именованных единицах на ступени 0,4 кВ.

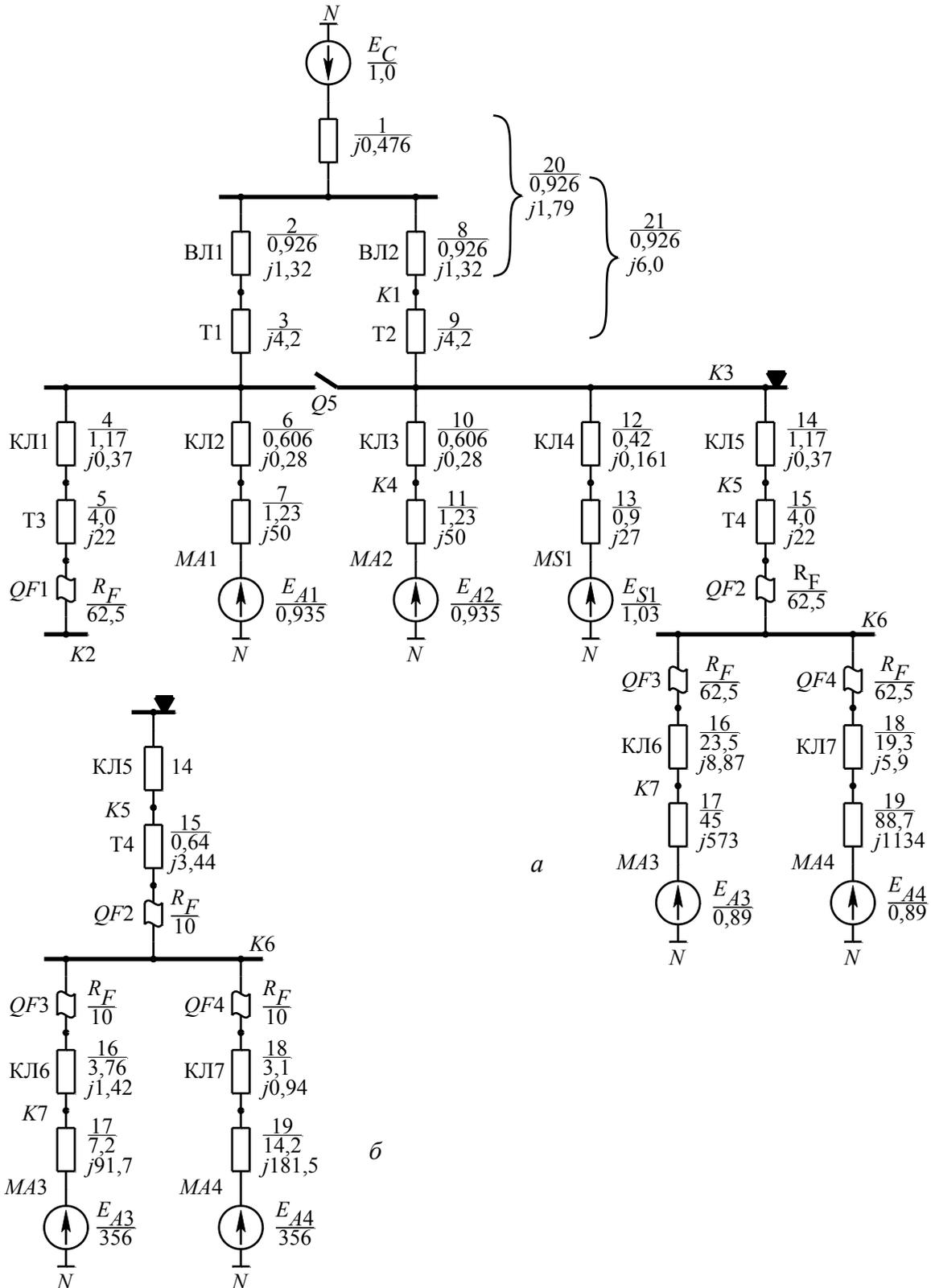


Рис. 3.1: а – схема замещения для принципиальной схемы рис. 2.1 (параметры представлены в отн. ед.); б – фрагмент схемы замещения с параметрами в именованных единицах



Ниже более детально рассматриваются индивидуальные особенности указанных видов двигательной нагрузки. При расчете сверхпереходных ЭДС синхронных и асинхронных двигателей принято, что в нормальном режиме они работали с номинальной загруженностью. Как известно в начальный момент КЗ указанные элементы переходят в генераторный режим и посылают ток в место КЗ.

На схеме замещения (рис. 3.1) сопротивления и ЭДС всех элементов пронумерованы арабскими цифрами, которые располагаются над горизонтальной чертой, под чертой приведены расчетные значения ЭДС и сопротивлений всех элементов (активная и индуктивная составляющие).

В примере 2 произведен расчет параметров элементов схемы замещения с использованием данных, представленных в табл. 2.1–2.6, и расчетных выражений табл. 3.1–3.5.

I. Расчет параметров схемы замещения в относительных единицах

Примечания:

1) расчету подлежат параметры следующих элементов: ЭЭС, ВЛ1, ВЛ2, Т1, Т2, КЛ1– КЛ5, MS1, МА1, МА2;

2) с целью сокращения записи у математических символов будем опускать индекс (б), индекс (*) – оставим.

1. Намечаем ступени трансформации, обозначенные римскими цифрами на рис. 2.1: I ступень – 110 кВ; II – 10 кВ; III – 0,38 кВ; рассчитываем коэффициенты трансформации на базе номинальных напряжений трансформаторов:

$$k_{II-I} = \frac{U_{HH(T1)}}{U_{BH(T1)}} = \frac{10,5}{115} = 0,0913;$$

$$k_{III-II} = \frac{U_{HH(T4)}}{U_{BH(T4)}} = \frac{10,5}{0,4} = 0,0381.$$

2. Принимаем базисную мощность $S_{б} = 1000$ МВА (единую для всей схемы) и базисное напряжение на первой ступени $U_{бI} = 115$ кВ; находим базисные напряжения на ступени II и III:

$$U_{бII} = U_{бI} \cdot k_{II-I} = 115 \cdot 0,0913 = 10,5 \text{ кВ};$$

$$U_{бIII} = U_{бII} \cdot k_{III-II} = 10,5 \cdot 0,0381 = 0,4 \text{ кВ}$$



и базисные токи:

$$I_{\text{бI}} = \frac{S_{\text{б}}}{\sqrt{3} U_{\text{бI}}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 115} = 5,026 \text{ кА};$$

$$I_{\text{бII}} = \frac{S_{\text{б}}}{\sqrt{3} U_{\text{бII}}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 55,05 \text{ кА};$$

$$I_{\text{бIII}} = 1445,09 \text{ кА}.$$

3. Рассчитываем параметры схемы замещения:

• **Электроэнергетическая система:**

$$E_{*c} = E_c / U_{\text{бI}} = 115 / 115 = 1,0 \text{ – ЭДС системы};$$

$$x_{*c} = \frac{E_c^2 S_{\text{б}}}{S_k^{(3)} U_{\text{бI}}^2} = \frac{115^2 \cdot 1000}{2100 \cdot 115^2} = 0,476 \text{ – реактивность системы}.$$

• **Асинхронные двигатели МА1, МА2:**

$$S_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{\eta_{\text{НОМ}} \cdot \cos \varphi_{\text{НОМ}}} = \frac{3,2}{0,968 \cdot 0,91} = 3,633 \text{ – полная мощность, МВА};$$

ность, МВА;

$$X''_{*АД1(\text{НОМ})} = X''_{*АД2(\text{НОМ})} = 0,2 \text{ – сверхпереходная реактивность}$$

в относительных номинальных единицах;

$$E''_{*АД1} = E''_{*АД2} = \left\{ \sqrt{(0,91)^2 + (0,414 - 0,2)^2} \right\} \left(\frac{10}{10,5} \right) = 0,935 \text{ –}$$

сверхпереходная ЭДС;

$$R_{*АД1} = R_{*АД2} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{\eta_{\text{НОМ}}} \left(\frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}} \right) \left(\frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{бII}}^2} \right) = 1,23 \text{ – активное сопротивление статорной обмотки};$$

тивление статорной обмотки;

$$X''_{*АД1} = X''_{*АД2} = 50,0 \text{ – сверхпереходная реактивность}.$$

• **Трансформаторы Т1, Т2:**

$$X_{*Т1} = X_{*Т2} \approx Z_{*Т1} = \frac{u_k U_{\text{НН}}^2}{100 S_{\text{НОМ}}} \left(\frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{бII}}^2} \right) = \frac{10,5 \cdot 10,5^2}{100 \cdot 25} \left(\frac{1000}{10,5^2} \right) = 4,2 \text{ –}$$

реактивное сопротивление.

• **Синхронный двигатель MS1:**

$$S_{\text{НОМ}} = 5,7 \text{ (МВА) – полная мощность};$$



$X''_{*CD(НОМ)} = 0,17$ – сверхпереходная реактивность в относительных номинальных единицах;

$$E''_{*CD} = \left\{ \sqrt{(\cos\varphi_{НОМ})^2 + (\sin\varphi_{НОМ} + X''_{*CD(НОМ)})^2} \right\} \left(\frac{U_{НОМ}}{U_{6II}} \right) = 1,03$$
 –

сверхпереходная ЭДС;

$R_{*CD} = 0,90$ – активное сопротивление статорной обмотки;

$X''_{*CD1} = 27,0$ – сверхпереходная реактивность.

• **Воздушные и кабельные линии:**

○ **ВЛ1, ВЛ2:**

$$R_{*ВЛ1} = R_{*ВЛ2} = r_{ПГ} \frac{L}{n} \frac{S_{\sigma}}{U_{6I}^2} = 0,926$$
 – активное сопротивление;

$$X_{*ВЛ1} = X_{*ВЛ2} = 1,32$$
 – реактивное сопротивление.

○ **КЛ1–КЛ5:**

$$R_{*КЛ1} = R_{*КЛ5} = 1,17, \quad X_{*КЛ1} = X_{*КЛ5} = 0,37;$$

$$R_{*КЛ2} = R_{*КЛ3} = 0,606, \quad X_{*КЛ2} = X_{*КЛ3} = 0,28;$$

$$R_{*КЛ4} = 0,42, \quad X_{*КЛ4} = 0,161.$$

**II. Расчет параметров схемы замещения
в именованных единицах**

Примечание:

1) расчету подлежат параметры следующих элементов: Т3, Т4, КЛ6, КЛ7, МА3, МА4.

• **Трансформаторы Т3, Т4:**

$$R_{Т3} = R_{Т4} = 0,64$$
 – активное сопротивление, мОм;

$$Z_{Т3} = Z_{Т4} = 3,5$$
 – полное сопротивление, мОм;

$$X_{Т3} = X_{Т4} = \sqrt{Z_{Т3}^2 - R_{Т3}^2} = 3,44$$
 – реактивное сопротивление, мОм;

$R_{0Т3} = 14,4$ мОм, $X_{0Т3} = 32$ мОм – сопротивления нулевой последовательности для трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y₀.



- **Кабельные линии КЛ6, КЛ7:**

$$R_{\text{КЛ6}} = r_{\text{ПГ}} \frac{L}{n} = \mathbf{3,76} \text{ мОм}; \quad X_{\text{КЛ6}} = \mathbf{1,42} \text{ мОм};$$

$$R_{\text{КЛ7}} = \mathbf{3,1} \text{ мОм}; \quad X_{\text{КЛ7}} = \mathbf{0,94} \text{ мОм}; \quad Z_{(\text{ф-0})\text{КЛ6}} = \mathbf{8,32} \text{ мОм}.$$

- **Асинхронный двигатель МА3:**

$$S_{\text{НОМ}} = 0,362 \text{ – полная мощность, МВА};$$

$X_{*\text{АД3}(\text{НОМ})} = 0,23$ – сверхпереходная реактивность в относительных номинальных единицах;

$$E''_{\text{АД3}} = \mathbf{0,356} \text{ – сверхпереходная ЭДС, кВ};$$

$$R_{\text{АД3}} = R_{*\text{АД3}(\text{НОМ})} \left(\frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}} \right) = \mathbf{7,20} \text{ – активное сопротивление}$$

статорной обмотки, мОм;

$$X''_{\text{АД3}} = \mathbf{91,70} \text{ – сверхпереходная реактивность, мОм}.$$

- **Асинхронный двигатель МА4:**

$$S_{\text{НОМ}} = 0,183 \text{ – полная мощность, МВА};$$

$$X_{*\text{АД4}(\text{НОМ})} = \frac{0,475}{2,2 \cdot 0,92} = 0,23 \text{ – сверхпереходная реактивность}$$

в относительных номинальных единицах;

$$E''_{\text{АД4}} = \mathbf{0,356} \text{ – сверхпереходная ЭДС, кВ};$$

$$R_{\text{АД4}} = \mathbf{14,20} \text{ – активное сопротивление статорной обмотки, мОм};$$

$$X''_{\text{АД4}} = X_{*\text{АД4}(\text{НОМ})} \left(\frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}} \right) = \mathbf{181,5} \text{ – сверхпереходная реак-$$

тивность, мОм.

- **Автоматические выключатели QF1–QF4 имеют $R_F = 10$ мОм.**



4. РАСЧЕТ ТОКОВ ТРЕХФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

4.1. Общие сведения о режимах коротких замыканий в сетях 6, 10 кВ и электроустановках до 1000 В

Электрические сети напряжением 6–35 кВ принято называть распределительными, поскольку по ним осуществляется электроснабжение большинства потребителей. Надежность распределительных сетей существенно ниже, чем сетей более высокого класса напряжений. На их долю приходится 70–75 % общего числа повреждений в энергосистемах. Настоящая курсовая работа посвящена методам расчета и анализа режимов коротких замыканий в распределительных сетях напряжением 110; 6; 10 кВ и электроустановках до 1000 В. Указанные сети имеют ряд особенностей, которые необходимо учитывать при расчетах аварийных режимов:

1. Распределительные сети 6–35 кВ имеют изолированную или компенсированную нейтраль (заземление нейтрали через большое индуктивное сопротивление). В этих условиях, при однофазном замыкании на землю, ток определяется емкостной проводимостью здоровых фаз относительно земли; эти токи незначительны по величине, составляют не более 10–30 А и не представляют опасности для аппаратуры.

2. В сетях 0,4; 0,6; 6, 10 кВ используются воздушные и кабельные линии сравнительно малых сечений. Это приводит к необходимости учета активных сопротивлений при расчете режимов короткого замыкания.

3. Электроустановки до 1000 В имеют заземленную нейтраль, что важно для режимов однофазного короткого замыкания ($K^{(1)}$). На величину тока КЗ электроустановок до 1000 В существенно влияют активные и реактивные сопротивления таких элементов цепи, как шины, токовые катушки расцепителей автоматических выключателей; первичные обмотки многовитковых трансформаторов тока, переходные сопротивления подвижных контактов коммутационных аппаратов (автоматических выключателей, рубильников, разъединителей). В практических расчетах учет суммарного сопротивления указанных элементов можно осуществлять приближенно посредством введения в схему дополнительного активного сопротивления. Его значение изменяется в пределах (15–30) мОм и зависит от удаленности КЗ от шин питающей подстанции. Рекомендуются следующие значения переходного сопротивления:



- для распределительных устройств (РУ) подстанций – 15 мОм;
- для первичных цеховых распределительных пунктов (РП) – 20 мОм;
- для вторичных цеховых РП – 25 мОм;
- для КЗ непосредственно у электроприемников, получающих питание от вторичных РП – 30 мОм.

В настоящей курсовой работе рекомендуется суммарное активное сопротивление вышеупомянутых элементов учитывать приближенно, принимая для всех указанных в схеме автоматических выключателей QF активное сопротивление, равное $R_F = 10 - 15$ мОм на ступени 0,4 (0,66) кВ.

4. Учет двигательной нагрузки на токи КЗ осуществляется в зависимости от их мощности, места расположения в схеме, целей расчета режима. Более подробно особенности учета двигательной нагрузки освещаются ниже, непосредственно в описании методов расчета режимов КЗ применительно к настоящей курсовой работе.

Основными расчетными режимами системы электроснабжения предприятий являются: режимы трехфазного ($K^{(3)}$), двухфазного ($K^{(2)}$) и однофазного ($K^{(1)}$) коротких замыканий. Наибольшую вероятность имеют $K^{(1)}$, наименьшую – трехфазные короткие замыкания $K^{(3)}$. Расчет каждого из указанных видов КЗ имеет свои целевые назначения, которые и определяют условия расчета.

4.2. Расчет токов трехфазного короткого замыкания

Учет конкретных факторов при расчете трехфазных коротких замыканий $K^{(3)}$ существенно зависит от целей и назначений расчета. В данной КР будем считать, что $K^{(3)}$ рассчитывается для выбора электроаппаратов, шинопроводов и проводников. Это требует выбора наиболее тяжелых условий с целью получения максимальных значений токов трехфазного короткого замыкания.

4.2.1. Короткое замыкание в сетях напряжением 6, 10, 110 кВ

- При трехфазном коротком замыкании ($K^{(3)}$) в точке **КЗ** с целью обеспечения максимальных значений токов считаем, что *схема находится в послеаварийном режиме*, т.е. отключена воздушная (кабель-



ная) линия Л1 и на ГПП включен выключатель Q2 для обеспечения резервного электроснабжения потребителей соседней секции шин; энергосистема связана с СЭС линией Л2.

- В расчете режима ($K^{(3)}$) в точке КЗ учитывается подпитка двигательной нагрузки, расположенной на ступени 6 (10) кВ и связанной с местом КЗ непосредственно или через кабельную линию (при единичной мощности двигателя 600 кВт и более).

- Для всех прочих точек трехфазного короткого замыкания, расположенных как в сети 6 (10) кВ, так и 0,38 (0,66) кВ, режим схемы **нормальный**, т.е. в работе обе линии (Л1, Л2) и выключатель Q2 отключен.

- Влияние двигателей может учитываться при КЗ в пределах той ступени, на которой они расположены, и не учитывается при КЗ на других ступенях трансформации. Это обстоятельство позволяет схеме нормального режима представить в виде двух независимых частей, одна из которых одержит энергосистему и питается по линии Л1, другая также содержит энергосистему и питается по линии Л2; выключатель Q2 отключен.

- Влияние двигательной нагрузки на ток КЗ не учитывается, если ток от неё поступает к месту КЗ через те же элементы, по которым протекает ток от основного источника (энергосистем).

Ниже приводятся расчетные выражения для режима трехфазного замыкания (для сетей напряжением 110, 6, 10 кВ рекомендуется система относительных единиц, а для электроустановок до 1000 В – система именованных единиц).

Для расчета начального сверхпереходного тока $I_{n(0)}$ (т.е. периодической составляющей в начальный момент трехфазного КЗ) используется схема замещения для токов прямой последовательности. Для ветви, представленной источником с ЭДС E_i и полным сопротивлением от источника до места КЗ $Z_i = \sqrt{R_i^2 + X_i^2}$, ток трехфазного КЗ ($I_{n(i)}^{(3)}$) определяется выражением:

- для системы относительных единиц

$$I_{n(i)}^{(3)} = \frac{E_{*i}}{Z_{*i}} I_{\delta}, \text{ кА}, \quad (4.1)$$

где $I_{\delta} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} U_{\delta}}$ – базисный ток, кА;

U_{δ} – базисное напряжение на ступени КЗ, кВ;

- для системы именованных единиц

$$I_{n(i)}^{(3)} = \frac{E_i}{\sqrt{3} Z_i} = \frac{E_{\phi i}}{Z_i}, \text{ кА}, \quad (4.2)$$

где $E_i, E_{\phi i}$ – соответственно междуфазная и фазная ЭДС, В;

Z_i – сопротивление цепи КЗ;

параметры E_i, Z_i приведены к ступени короткого замыкания.

Для системы именованных единиц рекомендуется использовать такие размерности:

- для ступеней 6, 10, 110 кВ параметры E_i – кВ, Z_i – Ом; I – кА;
- для ступеней 0,4; 0,66 кВ параметры E_i – В, Z_i – мОм; I – кА.

Для схем с несколькими источниками питания, которые связаны с местом КЗ через общие для них сопротивления, приходится осуществлять эквивалентные преобразования. В приведенных выше выражениях под ЭДС и сопротивлением следует понимать результирующие значения E_{Σ} и $Z_{\Sigma} = \sqrt{R_{\Sigma}^2 + X_{\Sigma}^2}$ эквивалентруемых частей схемы. В процессе упрощения две параллельные активные ветви, имеющие соответственно E_1, Z_1 и E_2, Z_2 , заменяются эквивалентной ветвью с параметрами

$$E_{12} = \frac{E_1 Z_2 + E_2 Z_1}{Z_1 + Z_2}, \quad Z_{12} = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2}. \quad (4.3)$$

В приведенных здесь и ранее выражениях E, Z являются величинами вещественными (без фаз).

При наличии нескольких независимых активных ветвей, связанных с узлом КЗ, результирующий ток трехфазного КЗ представляет сумму токов отдельных источников

$$I_{n\Sigma}^{(3)} = \sum I_{n(i)}^{(3)}. \quad (4.4)$$

4.2.2. Короткое замыкание в сетях напряжением до 1000 В

- Для выбора аппаратуры на основном щите комплектной трансформаторной подстанции (КТП) рассчитывается ток $K^{(3)}$ на шинах 0,38 (0,66) кВ понижающего трансформатора для наиболее тяжелых условий; для схем курсовой работы – это точка **К6**. В этом режиме следует **учитывать подпитку от асинхронных двигателей**. Переходными сопротивлениями подвижных контактов коммутационных аппаратов



и сопротивлениями неподвижных контактных соединений следует пренебречь.

- Для $K^{(3)}$ на клеммах асинхронных двигателей электроустановок **активное сопротивление контактных соединений и коммутационных аппаратов в цепи короткого замыкания необходимо учесть**, принимая для каждого QF активное сопротивление, равное $R_F = 10 - 15 \text{ мОм}$.

- Двигатели, установленные в сети **6 (10) кВ**, при КЗ в электроустановках 0,38 (0,66) кВ **не учитываются**.

- При КЗ на шинах **одного из двигателей** влияние второго (соседнего) двигателя **не учитывается**, т.к. ток от этого двигателя поступает к месту КЗ через кабельную линию, по которой протекает ток от основного источника (энергосистемы).

4.3. Ударный ток короткого замыкания

Для проверки аппаратов и шинных конструкций на электродинамическую стойкость необходимо вычислять **ударный ток короткого замыкания** ($i_{уд}$). Он представляет максимальное мгновенное значение полного тока короткого замыкания. Расчетное выражение для указанной характеристики тока обычно находят для условий отсутствия тока в предшествующем режиме и наибольшем значении апериодической составляющей.

На рис. 4.1 представлена волновая диаграмма токов, отражающая периодическую и апериодическую слагаемые в переходном режиме.

При её построении считалось, что до КЗ схема находилась в режиме холостого хода и в момент возникновения КЗ периодическая слагаемая имела амплитудное значение $I_{П\max}$ (отрицательный максимум). Это наиболее тяжёлые условия режима КЗ, при котором начальное значение апериодической слагаемой тока КЗ достигает своего максимального значения, равного амплитуде периодической слагаемой, т.е. $i_a(0) = I_{П\max}$. Из рис. 4.1 следует, что ударный ток наступает спустя пол периода ($T/2 = 0,01 \text{ с}$) после возникновения короткого замыкания и равен сумме амплитудного значения периодической и величине апериодического тока для времени $t = 0,01 \text{ с}$.

Для таких источников питания, как «электроэнергетическая система», синхронный генератор, синхронный двигатель, периодическая слагаемая тока КЗ на интервале $t = 0,01 \text{ с}$ остается неизменной и равной своему значению при $t = 0$.

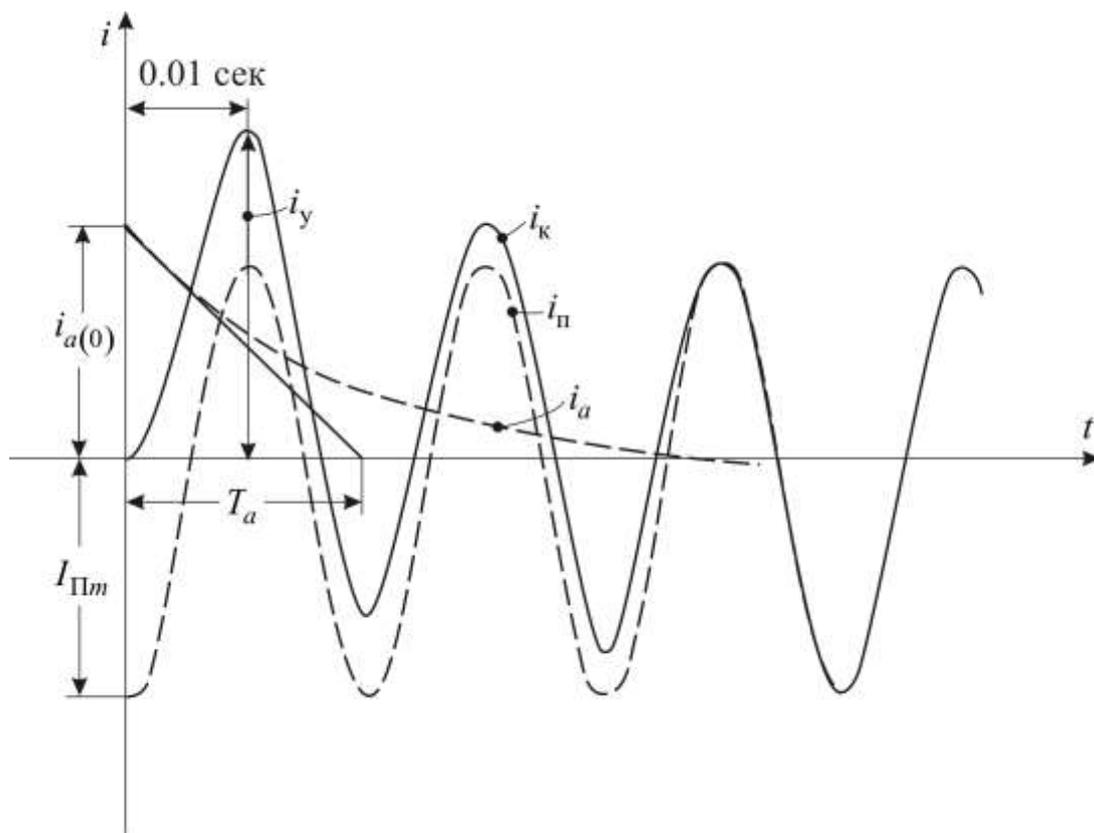


Рис. 4.1. Осциллограмма тока КЗ для расчета ударного тока $i_{уд}$

Для таких источников ударный ток $i_{уд}$ определяется по выражению

$$i_{уд} = \sqrt{2} I_{n(0)} k_{уд}, \quad (4.5)$$

в котором $k_{уд}$ – ударный коэффициент; рассчитывается по формуле

$$k_{уд} = 1 + e^{-0,01/T_a} \text{ и } T_a = \frac{L_K}{R_K} = \frac{X_K}{\omega R_K}. \quad (4.6)$$

В этих выражениях:

$I_{n(0)}$ – действующее значение периодической слагаемой тока трехфазного КЗ для $t = 0$;

T_a – постоянная времени затухания аperiodической слагаемой тока КЗ; выражается в секундах и определяется параметрами цепи КЗ;

R_K , X_K – активное и реактивное сопротивления цепи КЗ;

$\omega = 2\pi f = 314$ рад/с – угловая синхронная скорость.

Для упрощения расчетов ударного коэффициента ($k_{уд}$) можно по параметрам цепи КЗ определить отношение X_K / R_K и обратиться к графику $k_{уд} = f(X_K / R_K)$, рис. 4.2.

Величина ударного коэффициента зависит от постоянной времени T_a и находится в пределах $1 < k_{уд} < 2$. Чем больше величина активного сопротивления цепи короткого замыкания, тем быстрее затухает апериодический ток и тем соответственно меньше ударный коэффициент.

Асинхронный двигатель не имеет обмотки возбуждения, в силу чего периодическая слагаемая тока КЗ затухает достаточно быстро. Её затухание происходит с переходной постоянной времени $T'_{(АД)}$, которая определяется активным и реактивным сопротивлениями ротора с учетом воздействия на них параметров цепи статора в переходном режиме.

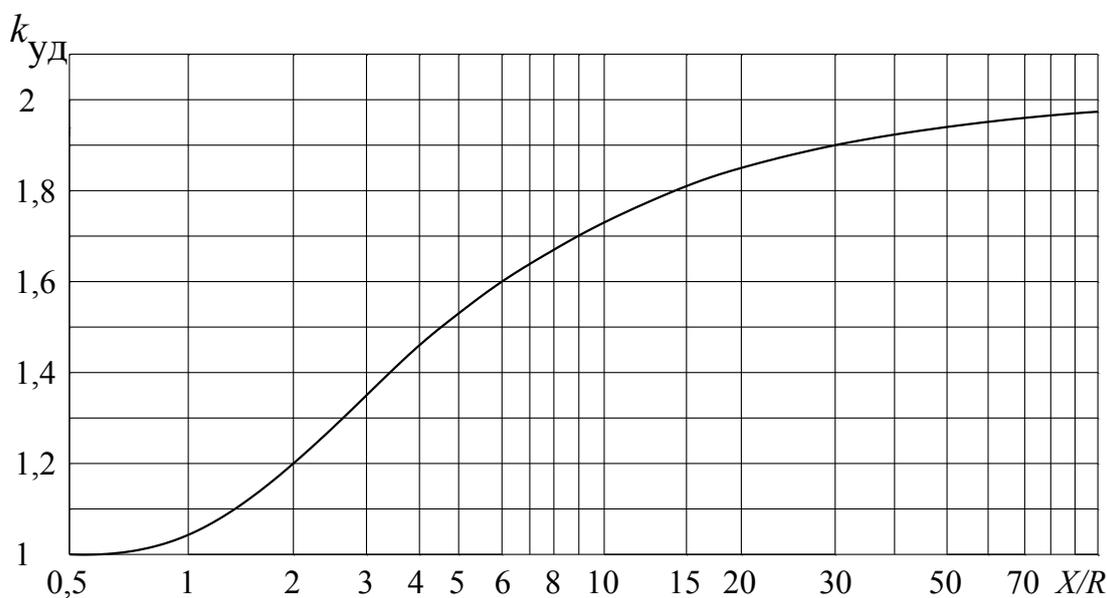


Рис. 4.2. Графическая зависимость ударного коэффициента ($k_{уд}$) от X_K / R_K

Постоянные времени затухания периодической ($T'_{(АД)}$) и апериодической ($T_{a(АД)}$) слагаемых весьма близки друг к другу, что практически позволяет их принимать равными. С учетом сказанного ударный коэффициент для асинхронного двигателя следует рассчитывать по выражению

$$k_{уд(АД)} = e^{-0,01/T'_{(АД)}} + e^{-0,01/T_{a(АД)}} \approx 2e^{-0,01/T_{a(АД)}} \quad (4.7)$$



При использовании для расчета $k_{уд(АД)}$ асинхронного двигателя графической зависимости $k_{уд} = f(X_K / R_K)$, изображенной на рис. 4.2, следует по параметру $X_{K(АД)} / R_{K(АД)}$ на графике определить $k_{уд}$ и далее воспользоваться выражением

$$k_{уд(АД)} = 2 \cdot (k_{уд} - 1). \quad (4.8)$$

К узлу короткого замыкания могут примыкать несколько независимых источников питания. При учете для каждого источника (i) индивидуального ударного коэффициента $k_{уд(i)}$ результирующий ударный ток ($i_{уд\Sigma}$) представляется суммой ударных токов независимых источников:

$$i_{уд\Sigma} = \sqrt{2} \sum k_{уд(i)} I_{n(i)}. \quad (4.9)$$

5. РАСЧЕТ ТОКОВ НЕСИММЕТРИЧНЫХ КЗ

5.1. Общие сведения о расчете несимметричных коротких замыканий

Замечание: для простоты изложения расчетные выражения в этом разделе записаны для системы относительных единиц; для упрощения записи индексы * и (б) опущены.

Двухфазное $K^{(2)}$ и однофазное $K^{(1)}$ короткие замыкания являются несимметричными. Расчет несимметричных КЗ производится методом симметричных составляющих. Он основан на разложении несимметричных векторов тока I_A , I_B , I_C (напряжения) на три симметричные системы:

I_{a1} , I_{b1} , I_{c1} – систему токов *прямой последовательности*;

I_{a2} , I_{b2} , I_{c2} – систему токов *обратной последовательности*;

I_{a0} , I_{b0} , I_{c0} – систему токов *нулевой последовательности*.

Симметричная система токов прямой последовательности представляет три одинаковых по величине вектора с относительным сдвигом по фазе в 120° , вращающихся против часовой стрелки. Чередование фаз A, B, C принимается по часовой стрелке. Аналогичные условия имеем для обратной последовательности с чередованием фаз A, C, B . Система нулевой последовательности существенно отличается от прямой и обратной тем, что отсутствует сдвиг фаз.

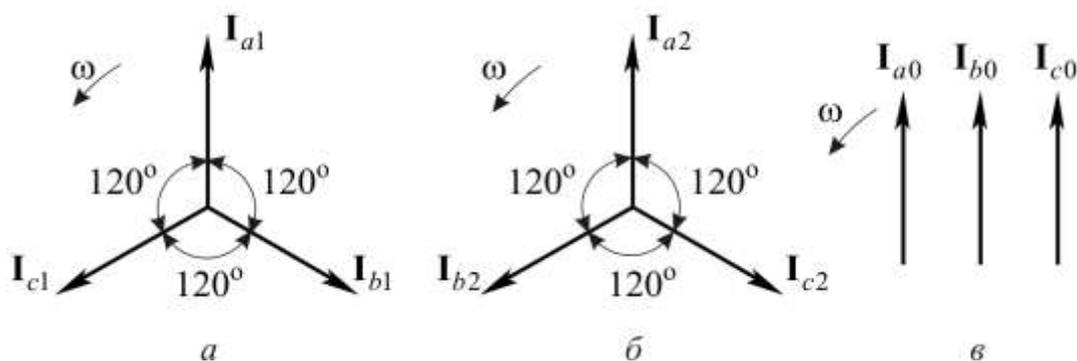


Рис. 5.1. Симметричная система токов прямой (а), обратной (б) и нулевой (в) последовательностей

Нулевая система токов, по существу, представляет три однофазных тока, для которых три провода трехфазной цепи представляют прямой



провод, а обратным проводом служит земля или четвертый (нулевой) провод, по которому возвращается $3\mathbf{I}_0$ ¹.

При анализе несимметричных режимов все расчетные выражения приводят на *одну особую фазу*, в качестве которой выступает фаза *A*. Искомые фазные токи (напряжения) несимметричного режима представляются векторной суммой их симметричных составляющих, которые через симметричные вектора особой фазы *A* записываются так:

$$\mathbf{I}_A = \mathbf{I}_{a1} + \mathbf{I}_{a2} + \mathbf{I}_0;$$

$$\mathbf{I}_B = a^2\mathbf{I}_{a1} + a\mathbf{I}_{a2} + \mathbf{I}_0;$$

$$\mathbf{I}_C = a\mathbf{I}_{a1} + a^2\mathbf{I}_{a2} + \mathbf{I}_0,$$

где *a* – комплексное число с модулем, равным 1, называемое *оператором фазы* ($a = e^{j120^\circ} = -0,5 + j\sqrt{3}/2$; $a^2 = e^{j240^\circ} = -0,5 - j\sqrt{3}/2$).

5.2. Схемы замещения и сопротивления силовых элементов для токов прямой, обратной и нулевой последовательностей

Для практической реализации метода симметричных составляющих необходимо составлять три схемы замещения: прямой, обратной и нулевой последовательностей. Конфигурация этих схем и параметры их элементов в общем случае не одинаковы.

Схема прямой последовательности является той же, что и для расчета тока трехфазного замыкания. Из этой схемы находят результирующую ЭДС и результирующее сопротивление прямой последовательности: $E_{1\Sigma}$ и $Z_{1\Sigma}$. Началом этой схемы являются точки нулевого потенциала источников питания, концом – место короткого замыкания, к которому приложено напряжение прямой последовательности U_{K1} .

Пути протекания тока обратной последовательности являются теми же, что и для тока прямой последовательности. В силу этого схема замещения обратной последовательности полностью повторяет схему прямой последовательности с той особенностью, что в ней отсутствуют ЭДС источников, элементы схемы учитываются сопротивлениями обратной последовательности и в месте КЗ приложено напряжение обратной последовательности U_{K2} .

¹ Жирным шрифтом прямого начертания обозначены векторные переменные.



Для статических элементов (воздушных и кабельных линий, трансформаторов, токоограничивающих реакторов) сопротивления прямой и обратной последовательностей равны. У синхронных и асинхронных машин сопротивления обратной последовательности незначительно отличаются от сверхпереходных сопротивлений прямой последовательности. В практических расчетах этим неравенством пренебрегают, что позволяет принимать *сопротивление обратной последовательности равным сопротивлению прямой последовательности* ($Z_{2\Sigma} = Z_{1\Sigma}$).

Схема нулевой последовательности существенно отличается от схемы прямой последовательности в силу различных путей циркуляции токов нулевой последовательности; ее приходится составлять для режима $K^{(1)}$. Конфигурация схемы нулевой последовательности определяется в основном схемой соединения обмоток трансформаторов и их местом расположения. Схема замещения нулевой последовательности может существовать при наличии в исходной схеме трансформаторов с глухо заземленными нейтральями; к таким относятся сети 110 кВ и сети напряжением до 1000 В, которые рассматриваются в настоящей курсовой работе.

При коротком замыкании со стороны обмотки трансформатора, соединенной в «треугольник» (Δ) или «звезда» без заземленной нейтрали (Y), сопротивление нулевой последовательности трансформатора бесконечно велико ($Z_{T0} = \infty$), и это соответствует разрыву в схеме замещения в месте расположения трансформатора. В трансформаторе со схемой Y_0 / Δ , при КЗ со стороны обмотки Y_0 , справедливо равенство $Z_{T0} = Z_{T1}$. При этом за обмоткой, соединенной в Δ , заканчивается путь циркуляции токов нулевой последовательности; на схеме замещение это отражается тем, что за указанным трансформатором ставится нулевой потенциал («земля»). Для трансформаторов со схемой Y_0 / Y сопротивление нулевой последовательности конечно, однако существенно превышает сопротивление прямой последовательности $Z_{T0} > Z_{T1}$ (см. данные табл. П1.5). Как и в предыдущем случае, за указанным трансформатором заканчивается схема нулевой последовательности и в схеме замещения ставится нулевой потенциал – «земля».

Для воздушных и кабельных линий сопротивления нулевой последовательности существенно больше сопротивлений прямой последовательности $Z_{кЛ0} > Z_{кЛ1}$. В справочной литературе приводятся соотношения между сопротивлением прямой и нулевой последовательностей для воздушных и кабельных линий с учетом конструктивного исполнения, материала проводника и защитной изоляции (для кабельных ли-



ний). В данной КР необходимая информация для $Z_{KЛ0}$ приведена в табл. П1.11. Из схемы замещения нулевой последовательности определяется результирующее сопротивление $Z_{0\Sigma}$; как и в схеме обратной последовательности, в ней отсутствуют ЭДС, а в узле КЗ приложено напряжение нулевой последовательности U_{K0} .

Расчетные выражения при несимметричных КЗ приводятся для одной *особой фазы*, в качестве которой принимают фазу *A*. Особая фаза *A* находится в условиях, отличных от условий для двух других фаз – *B* и *C*.

На основе метода симметричных составляющих можно сформулировать *правило эквивалентности прямой последовательности*. Согласно этого правила *ток прямой последовательности* $I_{K1}^{(n)}$ особой фазы *A* при любом (*n*) несимметричном коротком замыкании рассчитывается по выражению

$$I_{K1}^{(n)} = \frac{E_{\Sigma}}{(Z_{1\Sigma} + Z_{\Delta}^{(n)})}, \quad (5.1)$$

где E_{Σ} , $Z_{1\Sigma}$ – соответственно результирующая ЭДС и результирующее сопротивление схемы прямой последовательности;

$Z_{\Delta}^{(n)}$ – дополнительное сопротивление, которое для двухфазного короткого замыкания ($K^{(2)}$) определяется эквивалентным сопротивлением схемы обратной последовательности

$$Z_{\Delta}^{(2)} = Z_{2\Sigma};$$

для однофазного замыкания на землю ($K^{(1)}$) – суммой эквивалентных сопротивлений схемы замещения обратной и нулевой последовательностей:

$$Z_{\Delta}^{(1)} = Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}.$$

В свою очередь, *модуль тока при любом несимметричном коротком замыкании* можно вычислить по выражению

$$I_K^{(n)} = m^{(n)} I_{K1}^{(n)}, \quad (5.2)$$

где $m^{(n)}$ – коэффициент, характеризующий рассчитываемый вид короткого замыкания, который соответственно для двухфазного и однофазного КЗ имеет следующие значения:

$$m^{(2)} = \sqrt{3}, \quad m^{(1)} = 3.$$

5.3. Расчет токов двухфазного короткого замыкания

Режим двухфазного замыкания характерен тем, что отсутствует нулевая последовательность и протекают только токи прямой и обратной последовательностей. Считая фазу A особой, для $K^{(2)}$ имеем замыкание фаз B и C . На рис. 5.2 для рассматриваемых условий приведены: a – комплексная схема замещения и b – векторная диаграмма токов. Непосредственно из комплексной схемы замещения следует, что токи прямой и обратной последовательности связаны соотношением

$$I_{A2} = -I_{A1},$$

а ток прямой последовательности фазы A можно рассчитать по выражению

$$I_{A1} = \frac{E_{\Sigma}}{(Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma})}. \quad (5.3)$$

Принимая $Z_{2\Sigma} = Z_{1\Sigma}$, имеем

$$I_{A1}^{(2)} = \frac{E_{\Sigma}}{(Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma})} = \frac{E_{\Sigma}}{2 \cdot Z_{1\Sigma}} = \frac{1}{2} I_k^{(3)}, \quad (5.4)$$

где $I_k^{(3)}$ – ток трехфазного КЗ в той же точке.

Модули тока поврежденных фаз B и C в месте короткого замыкания, в соответствии с (5.2), вычисляются на основе выражения

$$I_{kC} = I_{kB} = m^{(2)} I_{A1} = \sqrt{3} I_{A1}. \quad (5.5)$$

Формула (5.5) для токов поврежденных фаз вытекает также из векторной диаграммы токов рис. 5.2, b . Отметим, что фаза A не замыкала и ток короткого замыкания в ней отсутствует. Это следует из условия $\mathbf{I}_{kA} = \mathbf{I}_{kA1} + \mathbf{I}_{kA2} = 0$ и отражено на векторной диаграмме.

С учетом приведенных выше соотношений (5.4) и (5.5) ток двухфазного $I_k^{(2)}$ можно выразить через ток трехфазного $I_k^{(3)}$ КЗ

$$I_k^{(2)} = \sqrt{3} I_{A1}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_k^{(3)} = 0,87 I_k^{(3)}. \quad (5.6)$$

Благодаря этой связи существенно упрощается расчет тока двухфазного замыкания $I_k^{(2)}$.

Как отмечалось ранее (см. п. 4.2.1), для системы именованных единиц рекомендуется использовать такие размерности параметров:

- для ступеней 6, 10, 110 кВ: напряжение (ЭДС) E – кВ; сопротивление Z – Ом; ток (I) получается в кА;
- для ступеней 0,4; 0,66 кВ: напряжение (ЭДС) E – В; сопротивление Z – мОм; ток (I) получается в кА.

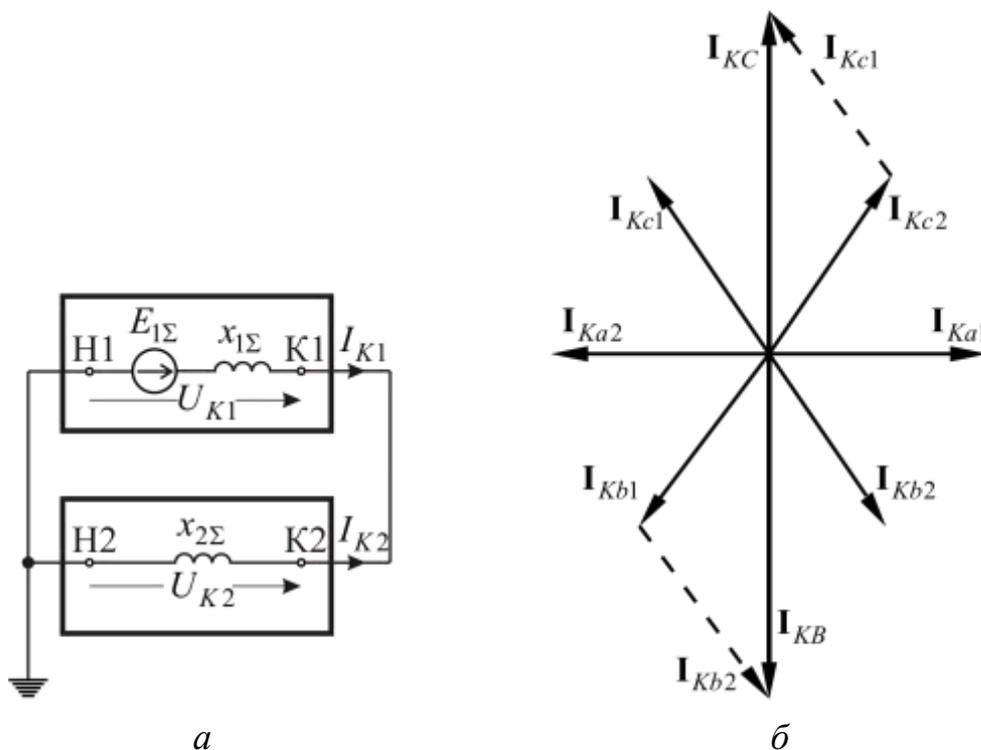


Рис. 5.2. Двухфазное КЗ:

a – комплексная схема замещения; b – векторная диаграмма токов

Ток двухфазного КЗ используется для проверки чувствительности устройств релейной защиты и автоматики и находится для условий, когда его значение минимально. Он рассчитывается для нормального состояния схемы электроснабжения, т.е. схема представлена в виде двух независимых частей, одна из которых содержит энергосистему и питается по линии Л1, другая также содержит энергосистему и питается по линии Л2; выключатель Q2 отключен (см. пояснения в п. 4.2.1).

Влияние двигательной нагрузки при расчете $K^{(2)}$, как в сети 6 (10) кВ, так и в сети 0,38 (0,66) кВ, не учитывается. Для $K^{(2)}$ в сети низкого напряжения 0,38 (0,66) кВ активное сопротивление контактных соединений и коммутационных аппаратов в цепи короткого замыкания необходимо учесть, принимая для каждого QF активное сопротивление, равное $R_F = 10 - 15$ мОм.

При проектировании и настройке релейной защиты и системы противоаварийной автоматики не всегда достаточно знать ток в месте КЗ. В ряде случаев необходимо знать значения токов на стороне высокого напряжения трансформатора при КЗ на стороне низкого напряжения. При переходе через трансформатор симметричные составляющие токов и напряжений изменяются не только по величине, но также и по фазе, в зависимости от группы (схемы) соединения обмоток трансформатора. При этом векторные диаграммы токов со стороны источника питания имеют другой вид (и состав симметричных составляющих токов), нежели векторные диаграммы токов на ступени напряжения, где произошло КЗ. Для учета фактора изменения фазы симметричных составляющих токов пользуются *комплексными коэффициентами трансформации* прямой и обратной последовательностей. Установлено, что для трансформатора с 11-й группой соединения обмоток $Y_0 / \Delta - 11$ ($\Delta / Y_0 - 11$) при переходе со стороны «звезды» трансформатора на сторону «треугольника» векторы прямой последовательности поворачиваются на 30° в положительном направлении (против вращения часовой стрелки), а векторы обратной последовательности – на 30° в противоположном направлении (рис. 5.3).

При переходе через трансформатор в обратном направлении угловые смещения симметричных составляющих меняют свой знак на противоположный. При переходе через трансформатор с 12-й группой соединения обмоток $Y_0 / Y - 12$, ($Y / Y - 12$) токи прямой и обратной последовательности изменяются только по величине, а по фазе не изменяются. Вектора токов нулевой последовательности фазовых изменений не претерпевают.

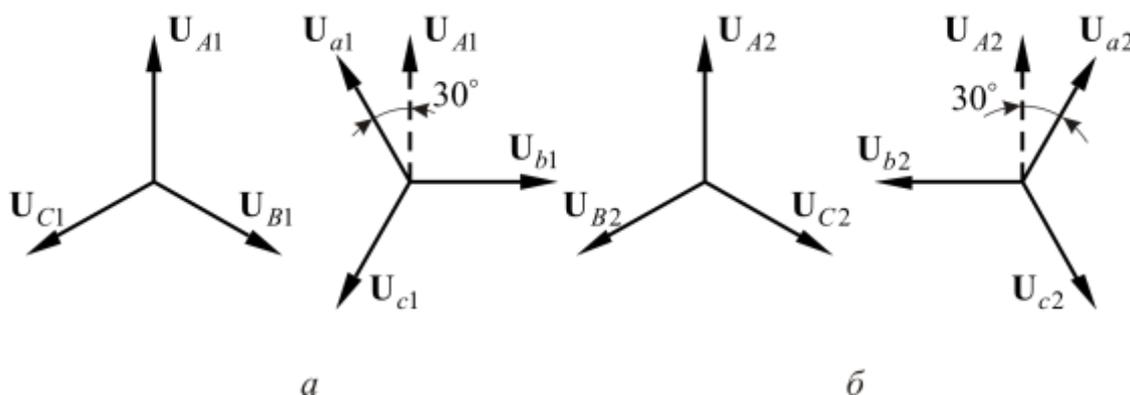


Рис. 5.3. Фазовый сдвиг напряжений прямой (а) и обратной (б) последовательностей при переходе через трансформатор с соединением $Y / \Delta - 11$



Выше были установлены следующие соотношения по месту $K^{(2)}$, независимо от схемы соединения обмотки трансформатора на стороне, где произошло короткое замыкание:

$$I_{A2} = -I_{A1}; I_{A1}^{(2)} = \frac{1}{2}I_k^{(3)}; I_k^{(2)} = 0,87I_k^{(3)};$$

$$I_{kC} = j\sqrt{3}I_{A1}; I_{kB} = -j\sqrt{3}I_{A1}.$$

Получим соотношения для фазных токов на стороне обмотки высокого напряжения трансформатора, соединенной по схеме Δ , при КЗ на низкой стороне с соединением обмоток Y_0 с учетом фазных изменений трансформируемых токов:

$$\begin{aligned} I_{A(\Delta)} &= I_{A1(\Delta)} + I_{A2(\Delta)} = \\ &= k_{Y/\Delta} \left(I_{A1(Y_0)} e^{j30^\circ} - I_{A1(Y_0)} e^{-j30^\circ} \right) = k_{Y/\Delta} (jI_{A1(Y_0)}); \end{aligned}$$

$$I_{A(\Delta)} = I_{C(\Delta)};$$

$$\begin{aligned} I_{B(\Delta)} &= I_{B1(\Delta)} + I_{B2(\Delta)} = k_{Y/\Delta} \left(a^2 I_{A1(Y_0)} e^{j30^\circ} - a I_{A1(Y_0)} e^{-j30^\circ} \right) = \\ &= k_{Y/\Delta} (-j2I_{A1(Y_0)}), \end{aligned}$$

где $k_{Y/\Delta} = U_Y / U_\Delta < 1$ – коэффициент трансформации трансформатора; a – оператор фазы, равный

$$a = e^{j120^\circ} = -0,5 + j\sqrt{3}/2;$$

$$a^2 = e^{j240^\circ} = -0,5 - j\sqrt{3}/2.$$

Полученные соотношения для модулей токов можно записать так:

$$I_{A\Delta}^{(2)} = I_{C\Delta}^{(2)} = \frac{1}{2}I_{kY}^{(3)} \cdot (k_{Y/\Delta}); I_{B\Delta}^{(2)} = I_{kY}^{(3)} \cdot (k_{Y/\Delta}).$$

Без подробных пояснений приведем аналогичные соотношения для следующих условий: двухфазное короткое замыкание происходит на низкой стороне трансформатора со схемой соединения обмоток Δ , при этом имеем токи $I_\Delta^{(2)}$, $I_{k\Delta}^{(3)}$. Значения токов на стороне высокого напряжения трансформатора со схемой обмоток Y_0 составляют

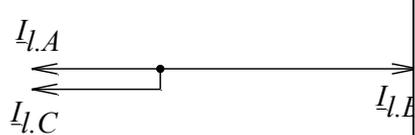
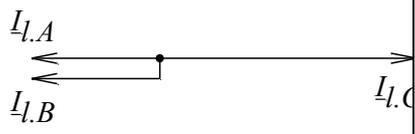
$$I_{AY}^{(2)} = I_{BY}^{(2)} = \frac{1}{2} I_{k\Delta}^{(3)} \cdot (k_{\Delta/Y}); \quad I_{CY}^{(2)} = I_{k\Delta}^{(3)} \cdot (k_{\Delta/Y});$$

при $k_{\Delta/Y} = U_{\Delta} / U_Y < 1$.

Эти результаты сведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Значения токов на ступени,
отделенной от места замыкания фаз В и С трансформатором

Схема соединения обмоток, за которыми произошло КЗ	Векторные диаграммы токов со стороны источника питания	Значения токов после перехода через трансформатор на стороне обмотки, имеющей следующее соединение
Y ₀		$\Delta: I_{A\Delta}^{(2)} = I_{C\Delta}^{(2)} = \frac{1}{2} I_{kY}^{(3)} \cdot (k_{Y/\Delta});$ $I_{B\Delta}^{(2)} = I_{kY}^{(3)} \cdot (k_{Y/\Delta});$ $k_{Y/\Delta} = U_Y / U_{\Delta} < 1$
Δ		$Y_0: I_{AY}^{(2)} = I_{BY}^{(2)} = \frac{1}{2} I_{k\Delta}^{(3)} \cdot (k_{\Delta/Y});$ $I_{CY}^{(2)} = I_{k\Delta}^{(3)} \cdot (k_{\Delta/Y});$ $k_{\Delta/Y} = U_{\Delta} / U_Y < 1$

5.4. Расчет токов однофазных коротких замыканий в установках до 1000 В

Режим однофазного КЗ возможен только в сети с эффективно заземленной (глухо-заземленной) нейтралью. В рамках курсовой работы необходимо рассчитать режимы однофазного короткого замыкания на землю в характерных точках ступени напряжения до 1000 В. *Минимальный ток однофазного короткого замыкания используется для проверки чувствительности и селективности действия релейной защиты.*

Он рассчитывается для нормального состояния схемы электроснабжения, т.е. схема представлена в виде двух независимых частей, одна из которых содержит энергосистему и питается по линии Л1, другая также содержит энергосистему и питается по линии Л2; выключатель Q2 отключен (см. пояснения в п. 4.2).

Влияние двигательной нагрузки при расчете $K^{(1)}$ не учитывается. Активное сопротивление контактных соединений и коммутационных аппаратов в цепи короткого замыкания необходимо учесть, принимая для каждого QF сопротивление, равное $R_F = 10 - 15$ мОм.

На рис. 5.4 для однофазного короткого замыкания на землю в сети с глухо заземленной нейтралью приведены: *a* – комплексная схема замещения и *б* – векторная диаграмма токов. При $K^{(1)}$ считаем, что замкнула на землю фаза *A*; фазы *B* и *C* не замыкали и токи КЗ в них равны нулю. Непосредственно из комплексной схемы замещения следует, что токи прямой, обратной и нулевой последовательностей для особой фазы *A* связаны простым соотношением

$$I_{A1} = I_{A2} = I_{A0}, \quad (5.7)$$

а току прямой последовательности фазы и полному току КЗ фазы *A* соответствуют выражения

$$I_{A1}^{(1)} = \frac{E_{\phi\Sigma}}{(Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma})}; \quad (5.8)$$

$$I_{kA}^{(1)} = 3 \cdot I_{A1}^{(1)} = \frac{3 \cdot E_{\phi\Sigma}}{(Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma})},$$

где $E_{\phi\Sigma}$ – результирующая фазная ЭДС схемы прямой последовательности.

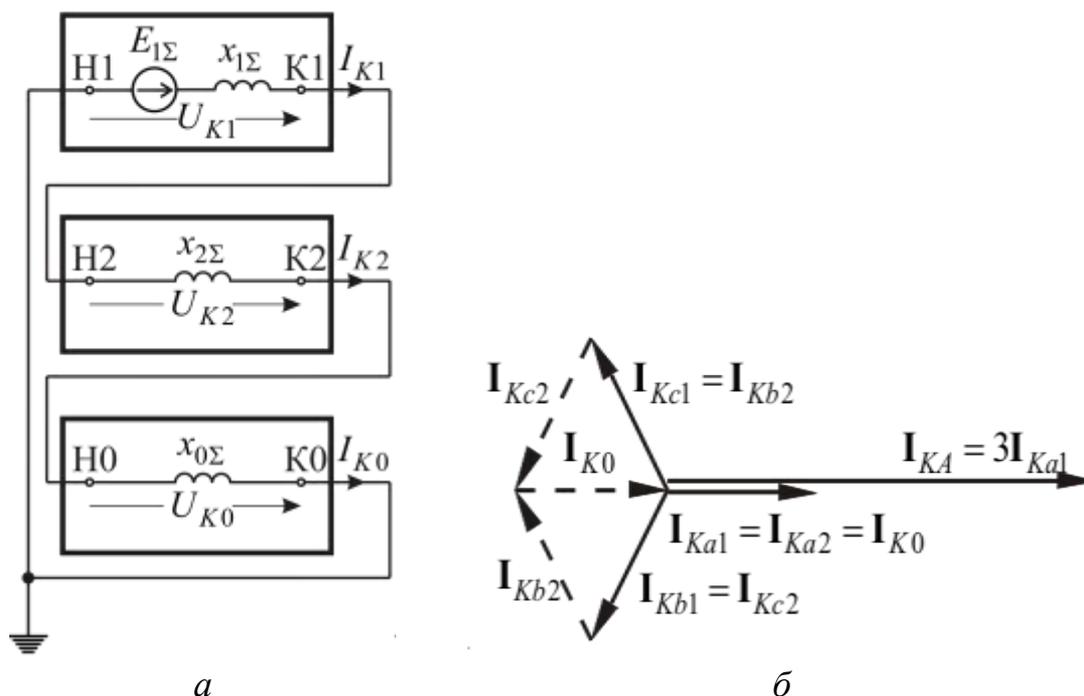


Рис. 5.4. Однофазное КЗ:
a – комплексная схема замещения; *б* – векторная диаграмма токов



Принимая $Z_{2\Sigma} = Z_{1\Sigma}$, имеем

$$I_{kA}^{(1)} = \frac{3 \cdot E_{\phi\Sigma}}{(2 \cdot Z_{1\Sigma} + Z_{0T})}. \quad (5.9)$$

При КЗ на выводах обмотки трансформатора, соединенной в «звезду» с заземленной нейтралью (Y_0), и обмоткой высокого напряжения, соединенной в Δ или Y , схема нулевой последовательности состоит собственно из трансформатора с сопротивлением $Z_{0\Sigma} = Z_{0T}$. Для этих условий формулу (5.9) можно представить в виде

$$I_{kA}^{(1)} = \frac{3 \cdot E_{\phi\Sigma}}{Z_{CT}^{(1)}}, \quad (5.10)$$

где $Z_{CT}^{(1)}$ – эквивалентное сопротивление внешней системы электроснабжения до трансформатора плюс собственно сопротивление трансформатора и сопротивление расцепителя QF при $K^{(1)}$; $Z_{CT}^{(1)}$ определяется результирующими сопротивлениями схемы прямой, обратной и нулевой последовательности и рассчитывается по выражению

$$Z_{CT}^{(1)} = \sqrt{(2 \cdot R_{1CЭС} + 2 \cdot R_{1T} + R_{0T} + 3R_F)^2 + (2 \cdot X_{1CЭС} + 2 \cdot X_{1T} + X_{0T})^2}, \quad (5.11)$$

в котором $R_{1CЭС}$, $X_{1CЭС}$ – соответственно суммарное активное и реактивное сопротивления в схеме прямой последовательности от ЭДС источника питания до трансформатора, на низкой стороне которого произошло КЗ; в (5.11) учтено, что $R_{1CЭС} = R_{2CЭС}$ и $X_{1CЭС} = X_{2CЭС}$; в схеме нулевой последовательности указанные элементы не входят;

R_{1T} , X_{1T} – активное и реактивное сопротивления трансформатора; в (5.11) учтено, что для любых трансформаторов $R_{1T} = R_{2T}$ и $X_{1T} = X_{2T}$;

R_{0T} , X_{0T} – сопротивления нулевой последовательности трансформаторов; эти сопротивления для рассматриваемой точки КЗ определяют собственно схему нулевой последовательности; отметим, что для трансформаторов со схемами соединения обмоток Y_0 / Δ справедливо: $R_{1T} = R_{2T} = R_{0T}$ и $X_{1T} = X_{2T} = X_{0T}$; однако для трансформаторов со схемами соединения обмоток Y_0 / Y и Z_0 / Y эти соотношения не выполняются: $R_{0T} \neq R_{1T}$, $X_{0T} \neq X_{1T}$ и сопротивления R_{0T} , X_{0T} определяются экспериментально и приведены в табл. П1.5;

R_F – активное сопротивление контактных соединений и коммутационного аппарата QF в цепи трансформатора (входит трижды: в схему прямой, обратной и нулевой последовательностей).



Считаем, что в схеме, рассмотренной выше, к шинам низкого напряжения трансформатора подключена кабельная линия, питающая асинхронный двигатель. Рассмотрим $K^{(1)}$ в конце кабельной линии (точка $K7$ на рис. 2.1). В расчетной схеме необходимо дополнительно учесть сопротивление кабельной линии и автоматического выключателя QF.

На базе (5.10) расчетное выражение для рассматриваемого случая запишется так:

$$I_{kA}^{(1)} = \frac{3 \cdot E_{\phi\Sigma}}{Z_{CT}^{(1)} + (2Z_{1Л} + Z_{0Л})} = \frac{E_{\phi\Sigma}}{Z_{CT}^{(1)} / 3 + Z_{(\phi-0)}}, \quad (5.12)$$

где $Z_{(\phi-0)} = \frac{(2Z_{1Л} + Z_{0Л})}{3}$ – эквивалентное сопротивление линии для режима однофазного замыкания, называемое *сопротивлением петля фаза–нуль*. Оно определяется опытным путем и приводится в справочной литературе; для КР – приведено в табл. П1.11. Для параллельных линий имеем

$$Z_{(\phi-0)} = Z_{(\phi-0)ПГ} \cdot L / n.$$

В выражении (5.12) $Z_{CT}^{(1)}$ – эквивалентное сопротивление внешней системы электроснабжения до трансформатора плюс собственно сопротивление трансформатора и сопротивление двух расцепителей QF; в отличие от $Z_{CT}^{(1)}$ по (5.11) в данном случае необходимо дополнительно учесть сопротивление второго расцепителя, так что

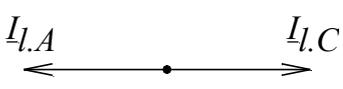
$$Z_{CT}^{(1)} = \sqrt{(2 \cdot R_{ICЭС} + 2 \cdot R_{1Т} + R_{0Т} + 6R_F)^2 + (2 \cdot X_{ICЭС} + 2 \cdot X_{1Т} + X_{0Т})^2}. \quad (5.13)$$

Напоминаем, что для системы именованных единиц на ступенях 0,4; 0,66 кВ *рекомендуется* следующая размерность параметров: E – В; Z – мОм; ток получается в КА.

При переходе через трансформатор токи прямой и обратной последовательностей претерпевают фазовые изменения; токи нулевой последовательности за пределами обмотки высокого напряжения, соединенной в Δ или Y , не протекают. Трансформацию токов можно рассчитать в соответствии с правилом, изложенным в разд. 5.2. Результаты трансформации токов для $K^{(1)}$ приведены в табл. 5.2.

Таблица 5.2

 Значения токов на ступени, отделенной от места КЗ трансформатором $Y_0 / \Delta - 11$, при однофазном КЗ фазы «А»

Схема соединения обмоток, за которыми произошло КЗ	Векторные диаграммы токов со стороны источника питания	Значения токов после перехода через трансформатор на стороне обмотки, соединенной в треугольник Δ
Y_0		$\Delta : I_{A\Delta}^{(1)} = I_{C\Delta}^{(1)} = \frac{I_{kY}^{(1)}}{\sqrt{3}} \cdot (k_{Y/\Delta});$ $I_{B\Delta}^{(1)} = 0; k_{Y/\Delta} = U_Y / U_{\Delta} < 1$

5.5. Расчет токов однофазных коротких замыканий в сетях 6 (10) кВ с изолированной нейтралью

Нейтрали трансформаторов в сетях 6, 10, 35 кВ не заземляются, и поэтому сети такого класса напряжения называются *сетями с изолированной нейтралью*, а замыкание фазы на землю принято называть *простым замыканием*. В этих условиях при однофазном замыкании на землю ток определяется *суммарной емкостью* относительно земли всех линий, *электрически связанных с местом замыкания*,

$$I_{kA}^{(1)} = I_3 = \frac{3U_{\text{ф.ср}}}{-jx_{C0\Sigma}} = 3U_{\text{ф.ср}}j\omega C_{0\Sigma}, \quad (5.14)$$

где $x_{C0\Sigma}$ – результирующее емкостное сопротивление нулевой последовательности воздушных и кабельных линий, электрически связанных с точкой замыкания;

$U_{\text{ф.ср}}$ – среднее фазное напряжение ступени КЗ.

Из сказанного следует, что величина тока замыкания не зависит от места замыкания и его значение равно утроенному емкостному току одной фазы в нормальных условиях. По этой причине распределительные сети 6 ÷ 35 кВ называются *сетями с малыми токами замыкания*.

В практических расчетах возможна приближенная оценка величины тока замыкания на землю по выражению

$$I_3 = \frac{\sqrt{3}U_{\text{ф.ср}}}{N} L = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{N} L, \text{ А,}$$

где $U_{\text{ср.ном}}$ – среднее номинальное напряжение ступени КЗ, кВ;

N – коэффициент, принимаемый для воздушных линий равным 350, для кабельных – 10;

L – суммарная длина воздушных или кабельных линий, электрически связанных с точкой замыкания на землю, км.

Из векторной диаграммы напряжений (рис. 5.5) следует, что в режиме КЗ фазные напряжения неповрежденных фаз B и C увеличиваются в $\sqrt{3}$ раз, принимая значения межфазного напряжения. При этом «треугольник» линейных напряжений остается без изменений, как и в нормальном режиме, и перемещается в соответствии с перемещением центра тяжести, положение которого определяется напряжением нулевой последовательности. Благодаря неизменности треугольника линейных напряжений и возможен длительный эксплуатационный режим при простом замыкании.

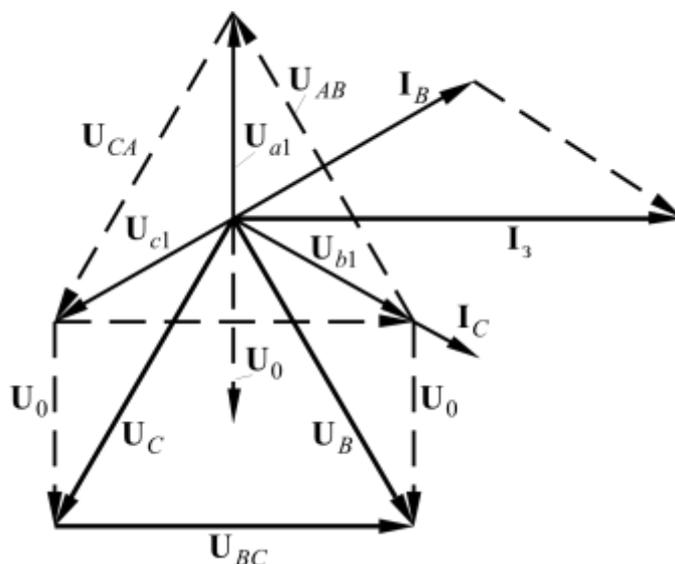


Рис. 5.5. Векторные диаграммы напряжений и токов в месте простого замыкания на землю

Увеличение класса напряжения и протяженности сети приводят к росту тока замыкания на землю до десятков и сотен ампер. Дуга при таких токах может гореть длительно и переходить на соседние фазы, превращая однофазное замыкание в двух- или трехфазное. Согласно

ПУЭ допустимые токи ($I_{k(\text{доп})}^{(1)}$) не должны превышать: в сети 10 кВ $I_{k(\text{доп})}^{(1)} = 20 \text{ А}$, в сети 6 кВ $I_{k(\text{доп})}^{(1)} = 30 \text{ А}$.

Ток однофазного КЗ, обусловленный отдельной линией, можно определить практическим методом по справочным данным погонных емкостных токов кабелей при однофазном замыкании на землю, т.е.

$$I_{\text{л}} = I_{\text{с.пг}} \cdot n \cdot L, \quad (5.15)$$

где $I_{\text{с.пг}}$ – погонный емкостный ток, А/км;

L – длина линии, км;

n – число параллельных линий.

Общий ток в месте КЗ представляет сумму токов N отдельных линий:

$$I_k^{(1)} = I_3 = \sum I_{\text{ли}}. \quad (5.16)$$

ПРИМЕР № 3

Рассмотрим короткие замыкания для ряда точек, указанных на принципиальной схеме рис. 2.1 и её схеме замещения – рис. 3.1. В табл. 5.3 и 5.4 представлены параметры электрической схемы замещения.

Таблица 5.3

Параметры элементов схемы замещения,
расположенных на ступенях 110, 10 кВ

Тип элемента	№ Z	R , отн. ед.	X , отн. ед.	E'' , отн. ед.
ЭЭС	Z_1	–	0,476	1,0
ВЛ1	Z_2	0,926	1,32	
Т1	Z_3	–	4,20	
КЛ1	Z_4	1,17	0,37	
КЛ2	Z_6	0,606	0,28	
МА1	Z_7	1,23	50,0	0,935
ВЛ2	Z_8	0,926	1,32	
Т2	Z_9	–	4,20	
КЛ3	Z_{10}	0,606	0,28	
МА2	Z_{11}	1,23	50,0	0,935
КЛ4	Z_{12}	0,42	0,161	
MS1	Z_{13}	0,90	27,0	1,03
КЛ5	Z_{14}	1,17	0,37	



Таблица 5.4

Параметры элементов схемы замещения,
расположенных на ступени 0,4 кВ

Тип элемента	№ Z	R, мОм	X, мОм	E ⁿ , кВ
T3	Z ₅	0,64	3,44	
T3	R _{0T3} + j X _{0T3}	14,4	32	
QF1	R _{F1}	10,0		
T4	Z ₁₅	0,64	3,44	
QF2	R _{F2}	10,0		
QF3	R _{F3}	10,0		
КЛ6	Z ₁₆	3,76	1,42	
КЛ6	Z _{(φ=0)кЛ6}	8,32		
МА3	Z ₁₇	7,20	91,7	0,356
QF4	R _{F4}	10,0		
КЛ7	Z ₁₈	3,10	0,94	
МА4	Z ₁₉	14,2	181,5	0,356

Расчеты режимов короткого замыкания

Задание на расчеты режимов короткого замыкания представлено в табл. 5.5.

Таблица 5.5

Точка КЗ	K1	K3			K4	K5
Вид КЗ	K ⁽³⁾ , K ⁽²⁾	K ⁽³⁾	K ⁽²⁾	K ⁽¹⁾	K ⁽³⁾ , K ⁽²⁾	K ⁽³⁾ , K ⁽²⁾
Элемент СЭС, по которому определяется расчетный ток КЗ	ВЛ2	T2 _{нн} ; КЛ2; КЛ3; КЛ4; I _{kΣ} ⁽³⁾ ; i _{удΣ}	T2 _{нн} , ВЛ2	I _k ⁽¹⁾	КЛ3	КЛ5

Окончание табл. 5.5

Точка КЗ	К2		К6			К7
	$K^{(3)}$	$K^{(1)}$	$K^{(3)}$	$K^{(2)}$	$K^{(1)}$	$K^{(3)}, K^{(2)}, K^{(1)}$
Элемент СЭС, по которому определяется расчетный ток КЗ	Т3 _{нн} ($I_k^{(3)}$, $i_{уд}$), КЛ1	Т3 _{нн} ; КЛ1	Т4 _{нн} , КЛ5, КЛ6, КЛ7, $I_{k\Sigma}^{(3)}$, $i_{уд\Sigma}$, $U_{ост}$ в узле «▼»	Т4 _{нн} , КЛ5	Т4 _{нн} , КЛ5	КЛ6

1. Точка короткого замыкания К1

Считаем, что схема находится в нормальном состоянии; выключатель Q5 отключен. Ток короткого замыкания в точке К1 определяется энергосистемой. Определим ток в линии ВЛ2 для $K^{(3)}$, $K^{(2)}$ в точке К1.

• Начальный сверхпереходный ток (действующее значение) в ветви ВЛ2 при $K^{(3)}$ в точке К1 рассчитывается по выражению (4.1):

$$I_k^{(3)} = \frac{E_{*c}}{Z_{*20}} I_{6I} = \frac{1,0 \cdot 5,026}{2,02} = 2,49 \text{ кА},$$

где $I_{6I} = 5,026$ кА – базисный ток на ступени КЗ (110 кВ);

$Z_{*20} = Z_{*1} + Z_{*8} = j0,476 + 0,926 + j1,32 = 0,926 + j1,796 = 2,02$ – результирующее сопротивление до точки КЗ.

• Ток двухфазного КЗ можно рассчитать по соотношению (5.6)

$$I_k^{(2)} = 0,87 \cdot I_{n(0)}^{(3)} = 0,87 \cdot 2,49 = 1,17 \text{ кА}.$$

2. Точка короткого замыкания К3

Для указанной точки короткого замыкания, расположенной на ГПП, требуется рассчитать:

- для $K^{(3)}$ ток в элементах схемы: Т2_{нн}, КЛ2, КЛ3, КЛ4 и $I_{k\Sigma}^{(3)}$, $i_{уд\Sigma}$;
- для $K^{(2)}$ – ток в элементах схемы: Т2_{нн}, ВЛ2;
- для $K^{(1)}$ – ток однофазного замыкания $I_k^{(1)}$.

Расчет $K^{(3)}$

Считаем, что схема находится в послеаварийном режиме, т.е. отключена воздушная линия ВЛ1 и на ГПП включен выключатель Q5

для обеспечения резервного электроснабжения потребителей соседней секции шин; энергосистема связана с СЭС линией ВЛ2.

• Для указанного состояния схемы результирующий ток трехфазного замыкания определяется выражением

$$I_{k\Sigma}^{(3)} = \sum I_{k(i)}^{(3)} = I_{k(T2)}^{(3)} + I_{k(КЛ2)}^{(3)} + I_{k(КЛ3)}^{(3)} + I_{k(КЛ4)}^{(3)} = 13,2 \text{ кА},$$

где $I_{k(T2)}^{(3)}$ – ток, посылаемый системой через трансформатор Т2;

$I_{k(КЛ2)}^{(3)}$, $I_{k(КЛ3)}^{(3)}$, $I_{k(КЛ4)}^{(3)}$ – токи подпитки КЗ асинхронными и синхронным двигателями, расположенными на ступени КЗ (10 кВ); мощность каждого из них более 600 кВт, которая является минимально рекомендуемой для учета режимов короткого замыкания.

Отметим, что линия КЛ1 находится на холостом ходу, а подпитку от двигателей, расположенных на ступени 0,4 кВ, не учитывается. Действующие значения периодических слагаемых тока для упомянутых элементов определяются по выражению (4.1).

• Суммарный ударный ток КЗ, с учетом подпитки двигательной нагрузки, рассчитывается по выражению (4.9) с учетом (4.5):

$$\begin{aligned} i_{уд\Sigma} &= \sqrt{2} \sum k_{уд(i)} I_{k(i)} = \\ &= \sqrt{2} \left(k_{уд21} I_{k(T2)}^{(3)} + k_{уд23} I_{k(КЛ2)}^{(3)} + k_{уд24} I_{k(КЛ3)}^{(3)} + k_{уд25} I_{k(КЛ4)}^{(3)} \right). \end{aligned}$$

Для ветви электроэнергетической системы (ЭЭС) и синхронного двигателя (MS1) ударные коэффициенты целесообразно найти по графику (рис. 4.2), для асинхронных двигателей MA1, MA2 – по формуле (4.7) на базе активных и реактивных сопротивлений ветвей источников питания: X_{*21} , R_{*21} ; X_{*25} , R_{*25} ; X_{*23} , R_{*23} .

Расчетные параметры тока трехфазного замыкания: периодическая слагаемая $I_{k\Sigma}^{(3)}$ и ударный ток $i_{уд\Sigma}$ являются для данной схемы на ступени 10 кВ максимально возможными.

Аналогичным образом продолжается расчет токов КЗ согласно заданию.

Приложение 1

Задание на курсовую работу разбито на две группы, и для каждой группы информация представлена в двух таблицах:

- задание первой группы выполняют студенты, фамилия которых начинается с буквы А до О включительно, и для них информация представлена в табл. П1.1 и П1.2;
- задание второй группы выполняют студенты, фамилия которых начинается с буквы П до Я включительно, и для них информация представлена в табл. П1.3 и П1.4.

П1.1. Информация по заданию на курсовую работу

1.1. Для студентов первой группы, фамилия которых начинается с буквы А до О включительно: номер вашего варианта в табл. П1.1 определяется *последней* цифрой номера зачётной книжки.

Таблица П1.1

Параметры схемы СЭС № 1, 2

№ варианта	№ схемы СЭС	Параметры энергосистемы		Реакторы	Синхронные двигатели MS1 и MS2	Длина l кабельных линий Л3 и Л4 в схеме № 2, км
		ЭДС E_c , кВ	мощность $K^{(3)}$ в узле подключения к СЭС $s_k^{(3)}$, МВ·А			
1	1	10,5	600	РБ 10-1000-0,22	СТД-800	–
2	1	10,5	650	РБ 10-1600-0,35	СТД-1000	–
3	1	6,3	400	РБ 10-1000-0,14	СТД-2000	–
4	1	6,3	500	РБ 10-1600-0,20	СТД-2500	–
5	1	10,5	550	РБ 10-1000-0,22	СТД-1250	–
6	2	6,3	250		СТД-1600	4
7	2	10,5	300		СТД-630	3
8	2	10,5	320		СТД-2000	4
9	2	10,5	280		СТД-800	2
0	2	10,5	340		СТД-2500	3

Примечания:

1. Линии Л3 и Л4 в схеме № 2 состоят из трёх параллельных кабелей; сечение фазы каждого кабеля составляет 185 мм^2 .
2. В схеме 1 сечение линии Л3 должно быть примерно в два раза больше сечения линии Л13.



1.2. Для студентов первой группы, фамилия которых начинается с буквы А до О включительно: номер вашего варианта в табл. П1.2 определяется **предпоследней** цифрой номера зачётной книжки.

Таблица П1.2

Параметры схемы СЭС № 1, 2

№ варианта	Длина l линий Л1 и Л2 в схемах № 1, 2, км	Параметры трансформаторов			Асинхронные двигатели МА1, МА2	Асинхронные двигатели МА3, МА5	Асинхронные двигатели МА4, МА6
		тип и мощность трансформаторов Т1, Т2, Т3	номинальное напряжение на низкой стороне $U_{НН}$, кВ				
			Т1, Т2	Т3			
1	2,5	ТМ-1600	0,69	0,4	2А3М1-800	4А315s4	4А200l6
2	3	ТМ-1600	0,40	0,4	2А3М-1000	4А280m2	4А200m2
3	3	ТМ-1000	0,40	0,4	2А3М-2000	4А280s4	4А250s6
4	3,5	ТМ-1000	0,69	0,4	2А3М-2500	4А250m4	4А250m6
5	4	ТМ-630	0,40	0,4	2А3М-1250	4А250s2	4А160m4
6	10	ТМ-1600	0,69	0,4	2А3М-1600	4А280s4	4А250s2
7	12	ТМ-400	0,69	0,4	2А3М1-630	4А200m6	4А250m6
8	10	ТМ-1000	0,40	0,4	2А3М-2000	4А315s4	4А132m2
9	11	ТМ-630	0,40	0,4	2А3М1-800	4А250s2	4А132s4
0	8	ТМ-400	0,40	0,4	2А3М-2500	4А250m6	4А200l6

Примечания:

1. Линии Л1 и Л2 в схемах № 1, 2 состоят из четырех параллельных кабелей; сечение фазы каждого кабеля составляет 240 мм^2 .

2. Номинальное напряжение на высокой стороне трансформаторов Т1, Т2, Т3 составляет ($U_{ВН}$) либо 10,5 кВ, либо 6,3 кВ. Класс этого напряжения согласовывается с напряжением «Системы» E_c по данным табл. П1.1.



2.1. Для студентов второй группы, фамилия которых начинается с буквы П до Я включительно: номер вашего варианта в табл. П1.3 определяется *последней* цифрой номера зачётной книжки.

Таблица П1.3

Параметры схемы СЭС № 3, 4

№ варианта	№ схемы СЭС	Параметры энергосистемы		Трансформаторы Т1, Т2; номинальное напряжение на высокой стороне $U_{ВН} = 115$, кВ	Синхронные двигатели MS1 и MS2	Длина / кабельных линий Л3 и Л4 в схеме № 4, км
		ЭДС E_c , кВ	мощность $K^{(3)}$ в узле подключения к СЭС $S_k^{(3)}$, МВ·А			
1	3	115	1500	ТДН-16000	СТД-630	–
2	3	115	3000	ТДН-10000	СТД-1000	–
3	3	115	3400	ТДН-16000	СТД-1250	–
4	3	115	2000	ТДН-16000	СТД-1600	–
5	3	115	2500	ТДН-10000	СТД-2000	–
6	4	115	3200	ТМН-6300	СТД-630	4
7	4	115	1500	ТДН-6300	СТД-800	3
8	4	115	2800	ТДН-10000	СТД-1250	4
9	4	115	2300	ТМН-6300	СТД-1000	3
0	4	115	1000	ТДН-16000	СТД-630	5

Примечания:

1. Линии Л3 и Л4 в схеме № 4 состоят из трёх параллельных кабелей; сечение фазы каждого кабеля составляет 185 мм².

2. В схеме 3 сечение линии Л3 должно быть примерно в два раза больше сечения линии Л13.

3. Номинальное напряжение на низкой стороне трансформаторов Т1, Т2 составляет ($U_{НН}$) либо 10,5 кВ, либо 6,3 кВ. Класс этого напряжения согласовывается с напряжением высокой стороны трансформаторов Т3, Т4, Т5 по данным табл. П1.4.



2.2. Для студентов второй группы, фамилия которых начинается с буквы П до Я включительно: номер вашего варианта в табл. П1.4 определяется **предпоследней** цифрой номера зачётной книжки.

Таблица П1.4

Параметры схемы СЭС № 3, 4

№ варианта	Длина l линий ВЛ1 и ВЛ2 в схемах № 3, 4, км	Параметры трансформаторов			Асинхронные двигатели МА1, МА2	Асинхронные двигатели МА3, МА5	Асинхронные двигатели МА4, МА6
		тип и мощность трансформаторов Т3, Т4, Т5	номинальное напряжение на низкой стороне $U_{НН}$, кВ				
			Т3, Т4	Т5			
1	30	ТМ-400/10,5	0,4	0,4	2А3М1-630	4А200m6	4А200l6
2	25	ТМ-1000/6,3	0,69	0,4	2А3М-1000	4А250s6	4А250s2
3	20	ТМ-1600/10,5	0,69	0,4	2А3М-1250	4А315s4	4А200l6
4	18	ТМ-1600/10,5	0,40	0,4	2А3М-1600	4А200m2	4А280m2
5	22	ТМ-630/6,3	0,40	0,4	2А3М-2000	4А250m4	4А132m2
6	35	ТМ-630/6,3	0,69	0,4	2А3М1-630	4А160m6	4А250s6
7	15	ТМ-400/10,5	0,40	0,4	2А3М1-800	4А132m2	4А132s4
8	32	ТМ-1000/6,3	0,69	0,4	2А3М-1250	4А280s4	4А200m2
9	24	ТМ-1600/10,5	0,40	0,4	2А3М-1000	4А280m2	4А250s6
0	15	ТМ-1000/6,3	0,69	0,4	2А3М1-630	4А250s2	4А250m6

Примечание:

Линии ВЛ1 и ВЛ2 в схемах № 3, 4 выполнены сталеалюминевым проводом сечением 70 мм^2 ; погонные сопротивления прямой последовательности составляют: $R_{\text{ЛПГ}} = 0,428 \text{ Ом/км}$; $X_{\text{ЛПГ}} = 0,444 \text{ Ом/км}$.

П1.2. Параметры силового оборудования систем электроснабжения

Таблица П1.5

Параметры трансформаторов в схемах СЭС № 1, 2, 3, 4

Тип трансформатора	$S_{\text{ном}}$, МВ·А	$U_{\text{ВН}}$, кВ	$U_{\text{НН}}$, кВ	u_k , %	ΔP_k , МВт	R_{0T} , МОм	X_{0T} , МОм
ТМН-6300/110	6,3	115	10,5; 6,3	10,5	0,044		
ТДН-10000/110	10,0	115	10,5; 6,3	10,5	0,058		
ТДН-16000/110	16,0	115	10,5; 6,3	10,5	0,085		
ТРДН-25000/110	25,0	115	10,5; 6,3	10,5	0,120		
ТРДН-40000/110	40,0	115	10,5; 6,3	10,5	0,170		
ТМ-400/10; 6	0,4	10,5; 6,3	0,69; 0,4	4,5	0,0059	55,6	149
ТМ-630/10; 6	0,63	10,5; 6,3	0,69; 0,4	5,5	0,0085	30,2	95,8
ТМ-1000/10; 6	1,0	10,5; 6,3	0,69; 0,4	5,5	0,0122	19,1	60,6
ТМ-1600/10; 6	1,6	10,5; 6,3	0,69; 0,4	5,5	0,018	16,3	50
ТМ-2500/10; 6	2,5	10,5; 6,3	0,69; 0,4	5,5	0,025	10,4	32

Примечание:

Сопротивления нулевой последовательности R_{0T} , X_{0T} (МОм) относятся к трансформаторам со схемой соединения обмоток Y/Y_0 и приведены к стороне 0,4 кВ. Такими трансформаторами являются: в семах № 1, 2 трансформатор ТЗ и в схемах № 3, 4 – Т5; все прочие трансформаторы в схемах № 1, 2, 3, 4, имеют схему соединения обмоток Y_0/Δ , которые указаны на принципиальных схемах.

Таблица П1.6

Параметры кабелей к трансформаторам в схемах СЭС № 1, 2, 3, 4

Тип трансформатора	$U_{\text{ВН}}$, кВ	F_2 , мм ²	l , км	$U_{\text{НН}}$, кВ	$I_{\text{ном(А.вк)}}$, А
ТМ-400/10; 6	6,3; 10,5	25/16	0,2	0,69; 0,4	630/1000
ТМ-630/10; 6	6,3; 10,5	35/25	0,25	0,69; 0,4	1000/1600
ТМ-1000/10; 6	6,3; 10,5	70/50	0,3	0,69; 0,4	1600/2500
ТМ-1600/10; 6	6,3; 10,5	95/70	0,4	0,69; 0,4	2500/4000
ТМ-2500/10; 6	6,3; 10,5	150/120	0,5	0,69; 0,4	4000/6000

Примечание:

F – сечение кабельной линии для питания трансформатора; в числителе приведены значения для $U_{\text{ВН}} = 6,3$ кВ, в знаменателе – для $U_{\text{ВН}} = 10,5$ кВ;

l – длина кабельной линии.

Данные автоматического выключателя $I_{\text{ном(Авк)}}$ носят информационный характер и в КР не используются.

Таблица П1.7

**Параметры синхронных двигателей MS1, MS2
в схемах СЭС № 1, 2, 3, 4**

Тип СД (MS1, MS2)	$P_{\text{ном}}$, МВт	$U_{\text{ном}}$, кВ	$I_{\text{ном}}$, А	$\cos\varphi_{\text{ном}}$, отн. ед.	$\eta_{\text{ном}}$, отн. ед.	$I_{*\text{пск}}$, отн. ед.	$M_{*\text{пск}}$, отн. ед.
СТД-630	0,63	6/10	71/42	0,9	0,958	5,58	2,03
СТД-800	0,80	6/10	89/54	0,9	0,960	6,70	2,01
СТД-1000	1,00	6/10	112/67	0,9	0,963	6,48	2,41
СТД-1250	1,25	6/10	135/82	0,9	0,968	6,79	2,07
СТД-1600	1,60	6/10	178/107	0,9	0,969	6,91	2,16
СТД-2000	2,00	6/10	220/133	0,9	0,969	6,16	2,22
СТД-2500	2,50	6/10	276/166	0,9	0,972	7,22	1,75
СТД-5000	5,00	6/10	-/329	0,9	0,975	5,58	2,07

Примечание:

$I_{*\text{пск}}$, $M_{*\text{пск}}$ – начальный пусковой ток и начальный пусковой момент.

Таблица П1.8

**Параметры кабелей к двигателям MS1, MS2
в схемах СЭС № 1, 2, 3, 4**

Тип СД (MS1, MS2)	$P_{\text{ном}}$, МВт	$U_{\text{ном}}$, кВ	$I_{\text{ном}}$, А	F , мм ²	l , км
СТД-630	0,63	6/10	71/42	50/35	0,2
СТД-800	0,80	6/10	89/54	70/50	0,25
СТД-1000	1,00	6/10	112/67	95/50	0,3
СТД-1250	1,25	6/10	135/82	120/70	0,35
СТД-1600	1,60	6/10	178/107	150/95	0,4
СТД-2000	2,00	6/10	220/133	185/120	0,45
СТД-2500	2,50	6/10	276/166	240/150	0,5
СТД-5000	5,00	6/10	-/329	-/2*150	0,45

Примечание:

F , l – сечение и длина кабельной линии к двигателю; в числителе даны F для $U_{\text{ном}} = 6,3$ кВ, в знаменателе – для $U_{\text{ном}} = 10,5$ кВ.



Таблица П1.9

Параметры асинхронных двигателей МА
в схемах СЭС № 1, 2, 3, 4

Тип АД (МА)	$P_{\text{НОМ}}$, МВт	$U_{\text{НОМ}}$, кВ	$I_{\text{НОМ}}$, А	$\cos\varphi_{\text{H}}$, отн. ед.	η_{H} , отн. ед.	$I_{*_{\text{ПСК}}}$, отн. ед.	$S_{\text{НОМ}}$, отн. ед.
2АЗМ1-630	0,63	6/10	71/42	0,9	0,955	5,2	0,01
2АЗМ1-800	0,8	6/10	90/55	0,9	0,958	5,2	0,01
2АЗМ-1000	1,0	6/10	115/68	0,89	0,958	5,0	0,01
2АЗМ-1250	1,25	6/10	137/84	0,89	0,963	5,5	0,00833
2АЗМ-1600	1,6	6/10	180/110	0,9	0,965	5,5	0,00833
2АЗМ-2000	2,0	6/10	225/135	0,91	0,965	4,8	0,00833
2АЗМ-2500	2,5	6/10	270/162	0,92	0,969	5,3	0,00833
2АЗМ-3200	3,2	6/10	350/210	0,91	0,968	5,2	0,005
4А132s4	0,0075	0,38/0,66	14/8	0,87	0,95	7,5	0,024
4А132m2	0,011	0,38/0,66	20/12	0,9	0,95	7,5	0,023
4А160m6	0,015	0,38/0,66	27/16	0,9	0,95	6,0	0,026
4А160m4	0,0185	0,38/0,66	34/20	0,9	0,95	7,0	0,022
4А200m6	0,022	0,38/0,66	40/23	0,9	0,9	6,5	0,023
4А200l6	0,030	0,38/0,66	55/32	0,91	0,91	6,5	0,021
4А200m2	0,037	0,38/0,66	67/39	0,91	0,915	7,5	0,019
4А250s6	0,045	0,38/0,66	83/48	0,91	0,915	6,5	0,014
4А250m6	0,055	0,38/0,66	100/58	0,92	0,92	6,5	0,013
4А250s2	0,075	0,38/0,66	135/78	0,92	0,9	7,5	0,014
4А250m4	0,090	0,38/0,66	165/96	0,92	0,915	7,0	0,013
4А280s4	0,110	0,38/0,66	200/115	0,92	0,92	6,0	0,023
4А280m2	0,132	0,38/0,66	245/142	0,92	0,92	7,0	0,02
4А315s4	0,160	0,38/0,66	290/170	0,92	0,95	6,5	0,014
4А355m2	0,315	0,38/0,66	551/317	0,92	0,945	6,5	0,01



Таблица П1.10

**Параметры асинхронных двигателей МА
в схемах СЭС № 1, 2, 3, 4**

Тип АД (МА)	$P_{\text{НОМ}}$, МВт	$U_{\text{НОМ}}$, кВ	M^*_{max} , отн. ед.	F_2 , мм ²	l , км	$R^*_{\text{АД}}$, отн. ед.
2АЗМ1-630	0,63	6/10	1,9	50/35	0,15	–
2АЗМ1-800	0,8	6/10	1,9	70/50	0,2	–
2АЗМ-1000	1,0	6/10	1,9	95/50	0,25	–
2АЗМ-1250	1,25	6/10	2,1	120/70	0,3	–
2АЗМ-1600	1,6	6/10	2,1	150/95	0,35	–
2АЗМ-2000	2,0	6/10	2,1	185/120	0,4	–
2АЗМ-2500	2,5	6/10	2,3	240/150	0,45	–
2АЗМ-3200	3,2	6/10	2,6	2×(150/185)	0,4	–
4А132s4	0,0075	0,38/0,66	3,0	10/6	0,02	0,048
4А132m2	0,011	0,38/0,66	2,8	16/10	0,025	0,040
4А160m6	0,015	0,38/0,66	2,0	25/16	0,03	0,062
4А160m4	0,0185	0,38/0,66	2,3	25/16	0,02	0,042
4А200m6	0,022	0,38/0,66	2,4	35/25	0,025	0,050
4А200l6	0,030	0,38/0,66	2,4	50/25	0,03	0,046
4А200m2	0,037	0,38/0,66	2,5	50/35	0,035	0,029
4А250s6	0,045	0,38/0,66	2,1	70/35	0,025	0,037
4А250m6	0,055	0,38/0,66	2,1	95/50	0,02	0,034
4А250s2	0,075	0,38/0,66	2,5	120/70	0,025	0,021
4А250m4	0,090	0,38/0,66	2,3	150/95	0,035	0,024
4А280s4	0,110	0,38/0,66	2,0	185/95	0,03	0,023
4А280m2	0,132	0,38/0,66	2,2	2×(120/150)	0,025	0,017
4А315s4	0,160	0,38/0,66	2,2	2×(150/185)	0,03	0,018
4А355m2	0,315	0,38/0,66	2,2	2×(185/240)	0,045	0,018

Примечания:

1. Данные табл. П1.10 являются продолжением данных табл. П1.9.
2. F , l – сечение и длина кабельной линии к двигателю; в числителе приведены значения F для $U_{\text{НОМ}} = 6,3$ (0,38) кВ, в знаменателе – для $U_{\text{НОМ}} = 10,5$ (0,66) кВ.

Таблица П1.11

Параметры кабелей в схемах СЭС № 1, 2, 3, 4

$F, \text{ мм}^2$	$R_{1\text{ПГ}}, \text{ Ом/км}$	$X_{1\text{ПГ}}, \text{ Ом/км},$ при $U_{\text{НОМ}}, \text{ кВ}$			$I_{\text{с. пг}}, \text{ А/км},$ при $U_{\text{НОМ}}, \text{ кВ}$		$Z_{(\phi-0)\text{ПГ}}, \text{ мОм/м}$
		до 1 кВ	6 кВ	10 кВ	6 кВ	10 кВ	
6	5,170	0,094	–	–	–	–	7,49
10	3,100	0,088	0,11	0,122	0,33	–	4,73
16	1,940	0,084	0,102	0,113	0,37	0,52	3,08
25	1,240	0,072	0,091	0,099	0,47	0,62	2,10
35	0,890	0,068	0,087	0,095	0,54	0,71	1,57
50	0,620	0,066	0,083	0,090	0,63	0,81	1,16
70	0,443	0,065	0,080	0,086	0,73	0,94	0,87
95	0,325	0,064	0,078	0,083	0,85	1,10	0,69
120	0,258	0,064	0,076	0,081	0,95	1,23	0,58
150	0,206	0,063	0,074	0,079	1,07	1,36	0,45
185	0,167	0,063	0,073	0,077	1,18	1,50	0,37
240	0,129	–	0,071	0,075	1,31	1,67	–

Примечания:

1. Кабели напряжением выше 1 кВ – трехжильные алюминиевые с бумажной изоляцией и вязкой пропиткой; F – сечение фазной жилы, мм^2 .

2. Кабели напряжением до 1 кВ – четырехжильные в алюминиевой оболочке; F – сечение фазной жилы, мм^2 .

3. $R_{1\text{ПГ}}, X_{1\text{ПГ}}$ – погонные активное и индуктивное сопротивления прямой последовательности, Ом/км;

$I_{\text{с. пг}}$ – погонный емкостный ток однофазного замыкания на землю, А/км;

$Z_{(\phi-0)\text{ПГ}}$ – погонное полное сопротивление петли фаза – нуль кабелей на напряжением до 1 кВ, мОм/м.

Таблица П1.12

Параметры реакторов в схеме СЭС № 1

Тип реактора	$U_{\text{р.ном}}, \text{ кВ}$	$I_{\text{р.ном}}, \text{ А}$	$X_{\text{р.ном}}, \text{ Ом}$	$\Delta P_{\text{р}}, \text{ кВт}$
РБ 10-1000-0,14	10	1000	0,14	3,5
РБ 10-1000-0,22	10	1000	0,22	4,4
РБ 10-1600-0,20	10	1600	0,20	7,5
РБ 10-1600-0,35	10	1600	0,35	11,0

Примечание:

$\Delta P_{\text{р}}$ – номинальные потери активной мощности на фазу.



Таблица П1.13

Параметры расцепителей и сопротивления неподвижных контактных соединений в схемах СЭС № 1, 2, 3, 4
(носят информационный характер
и в курсовой работе не используются)

Автоматический выключатель			Алюминиевый кабель с автоматическим выключателем		Шинопровод с автоматическим выключателем	
$I_{НОМ(АВК)}$, А	$R_{А.ВК}$, МОм	$X_{А.ВК}$, МОм	F , мм ²	$R_{КОНТ}$, МОм	$I_{НОМ(ШИН)}$, А	$R_{КОНТ}$, МОм
50	8,30	4,50	16	0,085	250	0,0090
70	4,50	2,00	25	0,064	400	0,0060
100	2,90	1,20	35	0,056	630	0,0040
140	1,95	0,70	50	0,043	1600	0,0034
200	1,70	0,50	70	0,029	2500	0,0024
400	1,05	0,17	95	0,027	4000	0,0012
600	0,66	0,13	120	0,024	6000	0,0008
1000	0,37	0,10	150	0,021		
1600	0,14	0,08	185	0,015		
2500	0,13	0,07	240	0,012		
4000	0,10	0,05				
6000	0,07	0,04				

Примечание:

$I_{НОМ(АВК)}$ – номинальный ток автоматического выключателя (расцепителя), А;

$R_{А.ВК}$, $X_{А.ВК}$ – активное и реактивное сопротивление автоматического выключателя (суммарное сопротивление катушек и подвижных контактов), МОм;

F , $R_{КОНТ}$ – сечение жилы кабеля и активное сопротивление неподвижного контактного соединения;

$I_{НОМ(ШИН)}$, $R_{КОНТ}$ – номинальный ток шинопровода и активное сопротивление неподвижного контактного соединения.

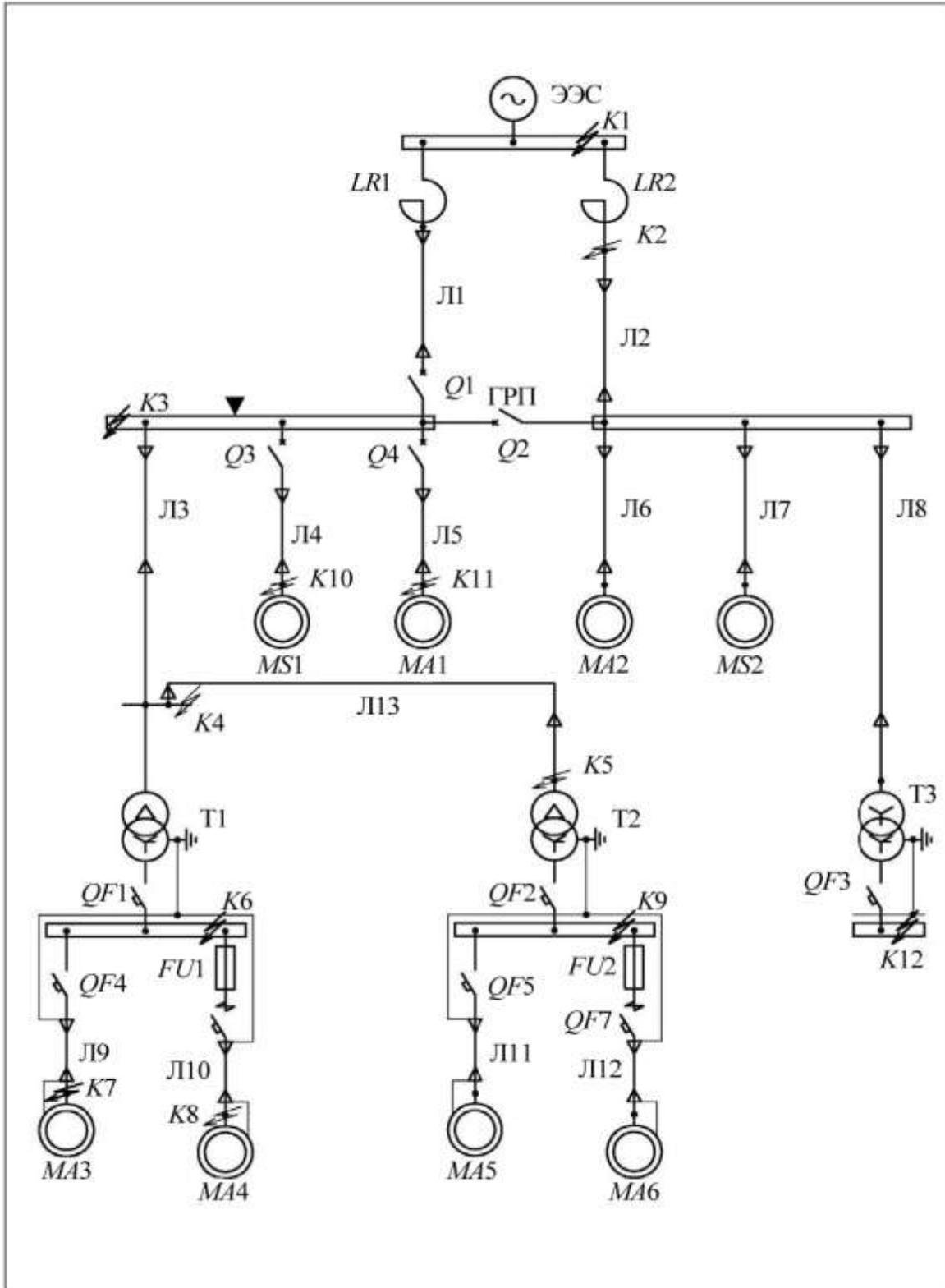


Рис. П1.1. Расчетная схема СЭС № 1

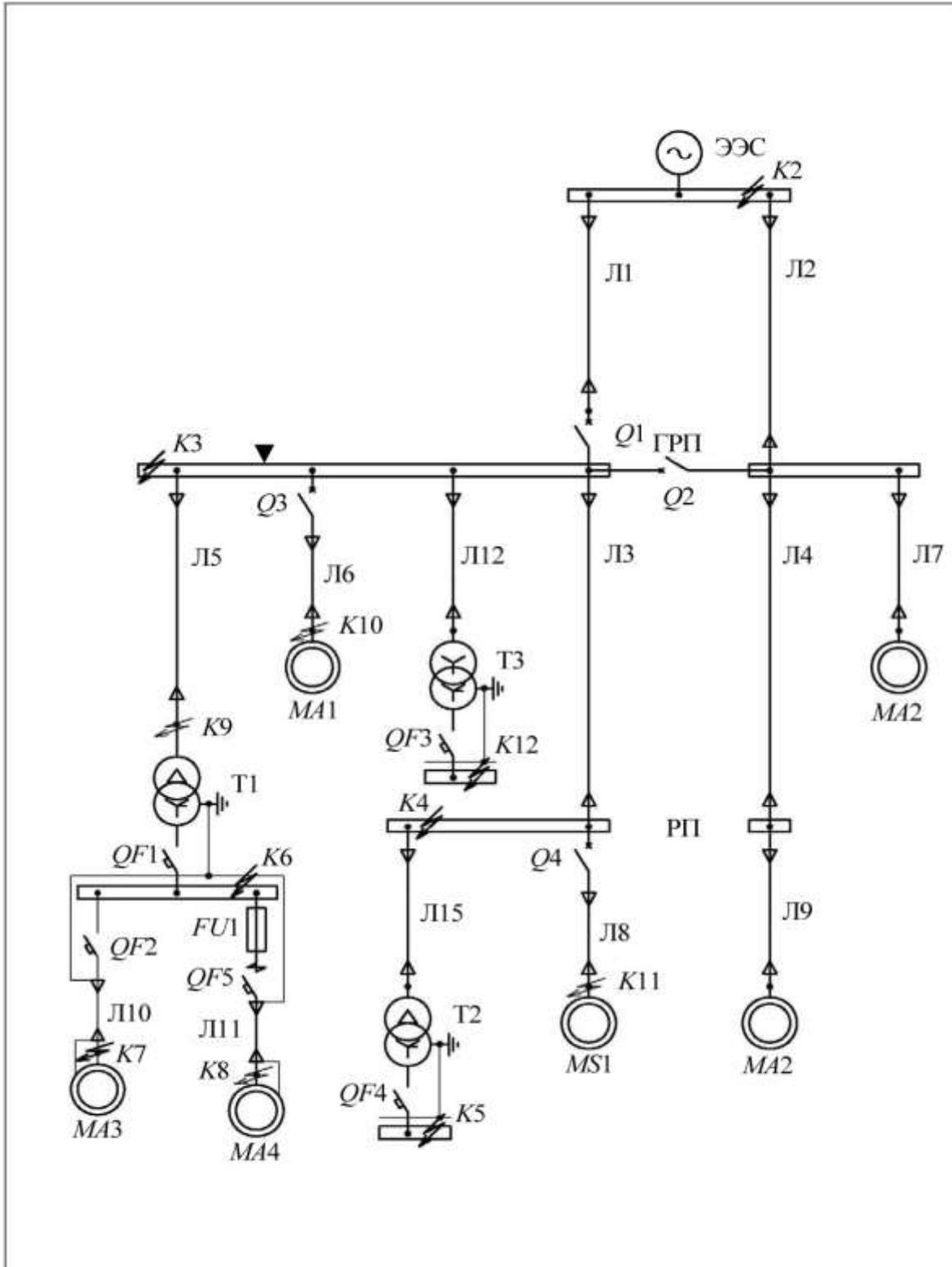


Рис. П1.2. Расчетная схема СЭС № 2

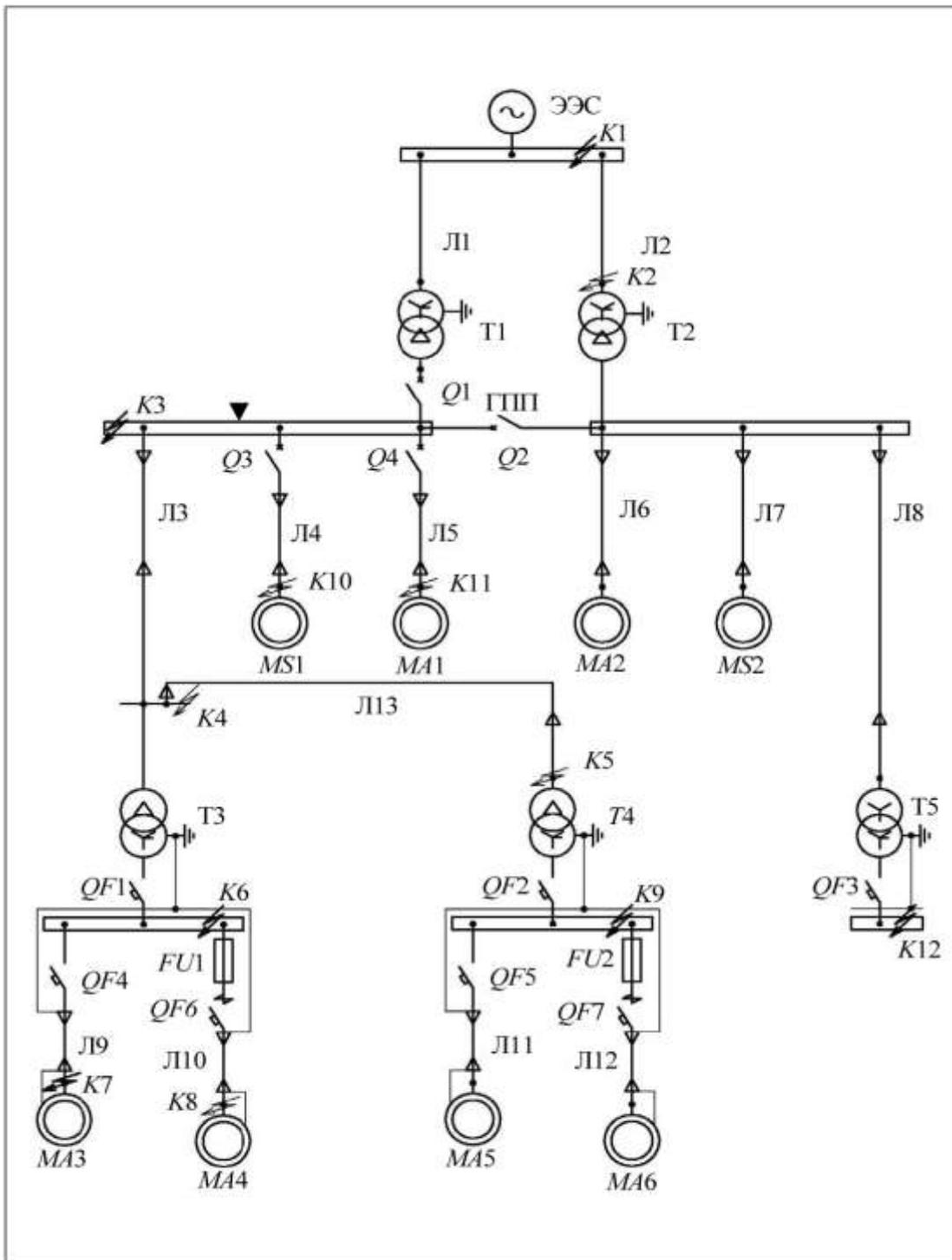


Рис. П1.3. Расчетная схема СЭС № 3

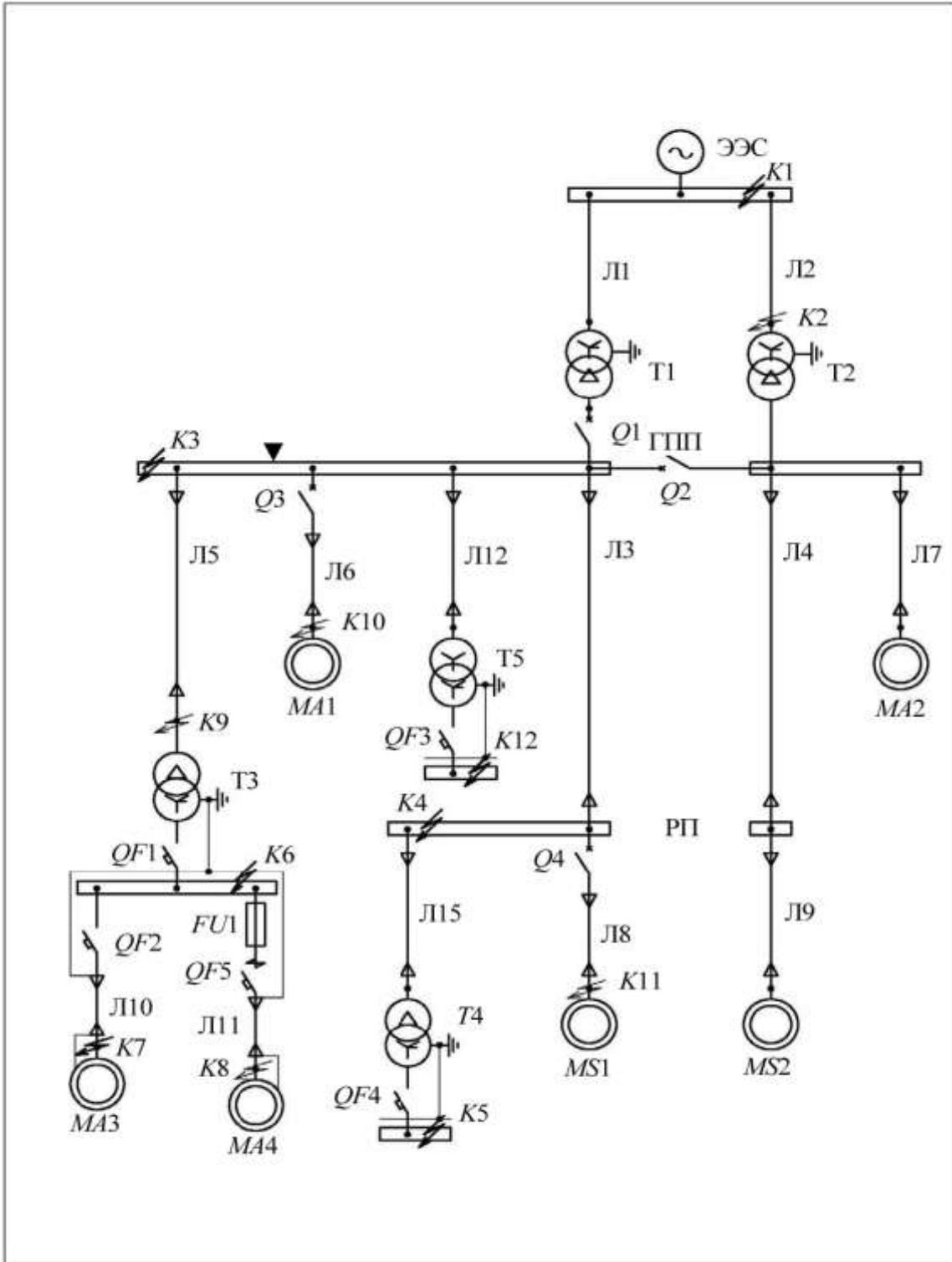


Рис. П1.4. Расчетная схема СЭС № 4



Приложение 2

СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Объектом курсовой работы являются принципиальные схемы системы электроснабжения предприятия, изображенные на рис. П1.1–П1.4. Непосредственно задания на КР представлены в табл. П2.1 и П2.2, в которых для каждой схемы указаны точки коротких замыканий, виды КЗ и кратко описаны условия их расчета. Табл. П2.1 и П2.2 имеют общее Примечание, которое расположено в конце табл. П2.2. Более подробные пояснения по особенностям рассчитываемых режимов обсуждаются в разд. 4 и 5.

Таблица П2.1

Задание на курсовую работу для схем СЭС № 1, 2

Точка КЗ	Вид КЗ	Элементы схемы, в которых необходимо определить протекающий ток короткого замыкания	
		Схема № 1	Схема № 2
$K1$	$K^{(3)}$	от ЭЭС	–
$K2$	$K^{(3)}, K^{(2)}$	LR2	от ЭЭС
$K3$	$K^{(3)}$ Состояние схемы: послеаварийный режим	Л2, Л4, Л5, Л6, Л7, в месте КЗ: $I_{k\Sigma}^{(3)}, i_{уд\Sigma}$	Л2, Л3, Л4, Л6, Л7, в месте КЗ: $I_{k\Sigma}^{(3)}, i_{уд\Sigma}$
	$K^{(2)}$	Л1	Л1
	$K^{(1)}$ Состояние схемы: послеаварийный режим	в месте КЗ: $I_{k\Sigma}^{(1)}$	в месте КЗ: $I_{k\Sigma}^{(1)}$
$K4$	$K^{(3)}$	Л3	Л3, Л8, в месте КЗ: $I_{k\Sigma}^{(3)}, i_{уд\Sigma}$
	$K^{(2)}$	Л3	Л3, Л8, в месте КЗ: $I_{k\Sigma}^{(2)}$
$K5$	$K^{(3)}$	Л13	$T2_{нн}^{*1)}, Л15$
	$K^{(2)}$	Л13	$T2_{нн}^{*1)}$ с учетом R_F , $Л15^{*2)}$
	$K^{(1)}$	–	$T2_{нн}^{*1)}$ с учетом R_F , $Л15^{*2)}$



Окончание табл. П2.1

Точка КЗ	Вид КЗ	Элементы схемы, в которых необходимо определить протекающий ток короткого замыкания	
		Схема № 1	Схема № 2
К6	$K^{(3)}$	Т1 _{нн} * ¹), Л3, Л9, Л10, в месте КЗ: $I_k^{(3)}$, $i_{уд\Sigma}$; $U_{ост}$ – остаточное напряжение в узле «▼»	Т1 _{нн} * ¹), Л5, Л10, Л11, в месте КЗ: $I_k^{(3)}$, $i_{уд\Sigma}$; $U_{ост}$ – остаточное напряжение в узле «▼»
	$K^{(2)}$, $K^{(1)}$	Т1 _{нн} * ¹) с учетом R_F , подпитка двигателей МА3, МА4 не учитывается, Л3* ²)	Т1 _{нн} * ¹) с учетом R_F , подпитка двигателей МА3, МА4 не учитывается, Л5* ²)
К7	$K^{(3)}$, $K^{(2)}$, $K^{(1)}$	Л9 с учетом R_F , подпитка двигателя МА4 не учитывается	Л10 с учетом R_F , подпитка двигателя МА4 не учитывается
К8	$K^{(3)}$, $K^{(2)}$, $K^{(1)}$	Л10 с учетом R_F , подпитка двигателя МА3 не учитывается	Л11 с учетом R_F , подпитка двигателя МА3 не учитывается
К9	$K^{(3)}$	Л13	Л5
	$K^{(2)}$	Л13* ²) с учетом R_F	Л5
	$K^{(1)}$	Л13* ²) с учетом R_F	–
К10	$K^{(3)}$, $K^{(2)}$	Л4	Л6
К11	$K^{(3)}$, $K^{(2)}$	Л5	Л8
К12	$K^{(3)}$	Т3 _{нн} * ¹), Л8, в месте КЗ: $I_k^{(3)}$, $i_{уд}$	Т3 _{нн} * ¹), Л12, в месте КЗ: $I_k^{(3)}$, $i_{уд}$
	$K^{(1)}$	Т3 _{нн} * ¹) с учетом R_F , Л8* ²)	Т3 _{нн} * ¹) с учетом R_F , Л12* ²)

Таблица П2.2

Задание на курсовую работу для схем СЭС № 3, 4

Точка КЗ	Вид КЗ	Элементы схемы, в которых необходимо определить протекающий ток короткого замыкания	
		Схема № 3	Схема № 4
К1	$K^{(3)}$	от ЭЭС	от ЭЭС
К2	$K^{(3)}, K^{(2)}$	Л2	Л2
К3	$K^{(3)}$ Состояние схемы: послеаварийный режим	$T2_{HH}^{*1)}$, Л4, Л5, Л6, Л7, в месте КЗ: $I_{k\Sigma}^{(3)}, i_{уд\Sigma}$	$T2_{HH}^{*1)}$, Л3, Л4, Л6, Л7, в месте КЗ: $I_{k\Sigma}^{(3)}, i_{уд\Sigma}$
	$K^{(2)}$	$T1_{HH}^{*1)}$, Л1 ^{*2)}	$T1_{HH}^{*1)}$, Л1 ^{*2)}
	$K^{(1)}$ Состояние схемы: послеаварийный режим	в месте КЗ: $I_{k\Sigma}^{(1)}$	в месте КЗ: $I_{k\Sigma}^{(1)}$
К4	$K^{(3)}$	Л3	Л3, Л8, в месте КЗ: $I_{k\Sigma}^{(3)}, i_{уд\Sigma}$
	$K^{(2)}$	Л3	Л3, Л8, в месте КЗ: $I_{k\Sigma}^{(2)}$
К5	$K^{(3)}$	Л13	$T4_{HH}^{*1)}$, Л15
	$K^{(2)}$	Л13	$T4_{HH}^{*1)}$ с учетом R_F , Л15 ^{*2)}
	$K^{(1)}$	–	$T4_{HH}^{*1)}$ с учетом R_F , Л15 ^{*2)}
К6	$K^{(3)}$	$T3_{HH}^{*1)}$, Л3, Л9, Л10, в месте КЗ: $I_{k\Sigma}^{(3)}, i_{уд\Sigma}$; $U_{ост}$ – остаточное напряжение в узле «▼»	$T3_{HH}^{*1)}$, Л5, Л10, Л11, в месте КЗ: $I_{k\Sigma}^{(3)}, i_{уд\Sigma}$; $U_{ост}$ – остаточное напряжение в узле «▼»
	$K^{(2)}, K^{(1)}$	$T3_{HH}^{*1)}$ с учетом R_F , подпитка двигателей МА3, МА4 не учитывается, Л3 ^{*2)}	$T3_{HH}^{*1)}$ с учетом R_F , подпитка двигателей МА3, МА4 не учитывается, Л5 ^{*2)}
К7	$K^{(3)}, K^{(2)}, K^{(1)}$	Л9 с учетом R_F , подпитка двигателя МА4 не учитывается	Л10 с учетом R_F , подпитка двигателя МА4 не учитывается



Окончание табл. П2.2

Точка КЗ	Вид КЗ	Элементы схемы, в которых необходимо определить протекающий ток короткого замыкания	
		Схема № 3	Схема № 4
K8	$K^{(3)}, K^{(2)}, K^{(1)}$	Л10 с учетом R_F , подпитка двигателя МА3 не учитывается	Л11 с учетом R_F , подпитка двигателя МА3 не учитывается
K9	$K^{(3)}$	Л13	Л5
	$K^{(2)}$	Л13* ²⁾ с учетом R_F	Л5
	$K^{(1)}$	Л13* ²⁾ с учетом R_F	–
K10	$K^{(3)}, K^{(2)}$	Л4	Л6
K11	$K^{(3)}, K^{(2)}$	Л5	Л8
K12	$K^{(3)}$	$T5_{HH}^{*1)}$, Л8, в месте КЗ: $I_k^{(3)}, i_{уд}$	$T5_{HH}^{*1)}$, Л12, в месте КЗ: $I_k^{(3)}, i_{уд}$
	$K^{(1)}$	$T5_{HH}^{*1)}$ с учетом R_F , Л8* ²⁾	$T5_{HH}^{*1)}$ с учетом R_F , Л12* ²⁾

Примечания:

1. $T1_{HH}^{*1)}$, $T3_{HH}^{*1)}$ и т.д. указывает на то, что необходимо определить ток в цепи соответствующего трансформатора на стороне низкого напряжения.

2. Л1*²⁾, Л3*²⁾ и т.д. указывает на то, что необходимо определить ток в цепи соответствующей линии с учетом фазовых поворотов векторов симметричных составляющих токов при их трансформации.

3. Токи для $K^{(3)}$ и $K^{(1)}$ на шинах ГРП (точка короткого замыкания КЗ) рассчитываются для наиболее тяжелых условий, когда схема находится в послеаварийном режиме вследствие отключения поврежденной линии Л1 вводным выключателем Q1. Секционный выключатель Q2 включен, благодаря чему обеспечивается бесперебойное электроснабжение потребителей первой секции шин. Это условие отмечено в табл. П2.1 и П2.2. Во всех остальных случаях схема находится в нормальном состоянии: секционный выключатель отключен; первая секция шин ГРП получает питание по Л1, вторая секция шин – по Л2.

4. Сопротивлением предохранителей (FU) пренебречь. Сопротивление неподвижных контактных соединений и переходные сопротивления подвижных контактов коммутационных аппаратов в электроустановках до 1000 В учесть приближенно, принимая для автоматических выключателей (QF) активное сопротивление, равное $R_F = 10-15$ мОм.



Приложение 3

ОБРАЗЕЦ ТИТУЛЬНОГО ЛИСТА КУРСОВОЙ РАБОТЫ

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**



Институт – Электротехнический (ЭНИН)

Направление 140400 – Электроэнергетика и электротехника

Специальность 140610 – Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений

Кафедра – « Электрических сетей и электротехники»

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА К КУРСОВОЙ РАБОТЕ

РАСЧЕТ РЕЖИМОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

по дисциплине «Переходные процессы в системах электроснабжения»
вариант (например Б, 3,2)

Выполнил студент гр. 7А82 И.И. Иванов

Принял доц. каф. ЭСС

Томск 200__ г.



ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Готман В.И. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008, 2009. – 240 с.
2. Готман В.И. Короткие замыкания и несимметричные режимы в электроэнергетических системах: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – 240 с.
3. Готман В.И. Режимы коротких замыканий в электроэнергетических системах. Сборник задач: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – 98 с.
4. Готман В.И. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах: учебное пособие по курсовому проектированию. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 42 с.
5. Мастерова О.А. Переходные процессы в системах электроснабжения: учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 167 с.
6. Кабышев А.В. Электроснабжение объектов. Ч. 2. Расчет токов короткого замыкания в электроустановках до 1000 В: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – 168 с.

Дополнительная

7. Андреев В.А., Шишкин В.Ф. Короткие замыкания и перегрузки в сетях напряжением до 1 кВ и защита от них: учебное пособие. – Ульяновск: УлГТУ, 1996. – 88 с.
8. Андреев В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: учебное пособие. – Ульяновск: УлГТУ, 2000. – 284 с.
9. ГОСТ 28249–93. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ. – М.: Изд-во стандартов, 1994. – 64 с.
10. Куликов Ю.А. Переходные процессы в электрических системах: учебное пособие. – Новосибирск: НГТУ; М.: Мир: ООО «Издательство АСТ», 2003. – 283 с.
11. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах: учебник для электротехнических и энергетических вузов и факультетов. – М.: Энергия, 1970. – 520 с.



Учебное издание

ГОТМАН Владимир Иванович

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Расчет режимов короткого замыкания в системе электроснабжения промышленного предприятия

Учебно-методическое пособие

Научный редактор
*доктор технических наук,
профессор кафедры ЭСиЭ
Ю.В. Хрущев*

Редактор *Н.Т. Синельникова*

Верстка *Л.А. Егорова*

**Отпечатано в Издательстве ТПУ в полном соответствии
с качеством предоставленного оригинал-макета**

Подписано к печати Формат 60×84/16.

Бумага «Снегурочка». Печать Хероx.

Усл. печ. л. 4,07. Уч.-изд. л. 3,68.

Заказ . Тираж экз.



Национальный исследовательский
Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Издательства Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту BS EN ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  **ТПУ**. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru