

Министерство образования и науки Российской Федерации
Нижекамский химико-технологический институт (филиал)
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего профессионального образования
«Казанский национальный исследовательский технологический университет»

**РАСЧЕТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ
И ТОКОВ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В СИСТЕМЕ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО
ПРЕДПРИЯТИЯ**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ
«Электромагнитные переходные процессы
в электроэнергетических системах»**

**Нижекамск
2013**

УДК 621.3

Д 79

Печатаются по решению редакционно-издательского совета Нижнекамского химико-технологического института (филиала) ФГБОУ ВПО «КНИТУ».

Рецензенты:

Абдуллин А. М., кандидат технических наук;

Тумаева Е.В., кандидат технических наук.

Дубов, А.Л.

Д 79 Расчет токов короткого замыкания и токов замыкания на землю в системе электроснабжения промышленного предприятия : методические указания по выполнению курсовой работы по дисциплине «Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах» / А.Л. Дубов, Р.Н. Ганиев. - Нижнекамск. - Нижнекамский химико-технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО «КНИТУ», 2013. - 40 с.

Составлены в соответствии с программой курса «Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах».

В настоящих указаниях рассматривается методика расчета токов в системе электроснабжения промышленного предприятия при возникновении аварийных режимов: трехфазных, двухфазных, однофазных коротких замыканий, а также замыканий одной фазы на землю в сети с изолированной нейтралью. Рассмотрены принципы составления схемы замещения для расчета токов короткого замыкания и расчет ее параметров в относительных и именованных единицах. Предназначены для студентов очной и заочной форм обучения, обучающихся по направлению «Электротехника и электроэнергетика».

Работа подготовлена на кафедре электротехники и энергообеспечения предприятий.

УДК 621.3

© Дубов А.Л., Ганиев Р.Н., 2013

© Нижнекамский химико-технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО «КНИТУ», 2013

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ЗАДАНИЕ НА КУРСОВУЮ РАБОТУ	5
1.1. Основные сокращения и обозначения	5
1.2. Выбор параметров элементов расчетной схемы	7
2. СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ПРЯМОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ	9
2.1. Расчет параметров схемы замещения в относительных единицах	9
2.2. Расчет параметров схемы замещения в именованных единицах.....	14
3. РАСЧЕТ ТОКОВ ТРЕХФАЗНЫХ КЗ	15
3.1. Расчет токов трехфазных КЗ в сетях напряжением выше 1 кВ	16
3.2. Расчет токов трехфазных КЗ в сетях напряжением до 1кВ.....	18
4. РАСЧЕТ ТОКОВ ДВУХФАЗНЫХ КЗ.....	18
5. РАСЧЕТ ТОКОВ ОДНОФАЗНЫХ КЗ	21
6. РАСЧЕТ ТОКОВ ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ	24
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	25
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	26
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	39
ЛИТЕРАТУРА.....	40

ВВЕДЕНИЕ

Расчет аварийных режимов системы электроснабжения необходим для выяснения истинных параметров режима при различных видах повреждений. Эти расчетные значения применяются при выборе параметров электрооборудования, устройств релейной защиты и автоматики электрической сети.

Система электроснабжения промышленного предприятия (СЭС ПП) - это совокупность электроустановок, предназначенных для обеспечения потребителей промышленного предприятия электрической энергией. Подстанции, распределительные устройства, токопроводы, воздушные и кабельные линии электропередачи, работающие на территории промышленного предприятия, составляют электрическую сеть промышленного предприятия.

Режим работы системы – это совокупность процессов, характеризующих работу систему электроснабжения (СЭС) и ее состояние в любой момент времени. Различают установившиеся и переходные режимы СЭС, которые подразделяются на нормальные и аварийные режимы.

Аварийные режимы возникают вследствие повреждения элементов электрической сети. Наиболее опасными и частыми повреждениями в СЭС ПП являются короткие замыкания (КЗ) между фазами элемента электрической сети или электроустановки и короткие замыкания фазы на землю в сетях с глухозаземленными нейтралью. Вследствие КЗ нарушается нормальная работа СЭС ПП, кроме того, представляет опасность термическое и динамическое действие тока КЗ как в месте повреждения, так и при прохождении его по неповрежденным элементам СЭС. Для предотвращения развития аварии необходимо знать значения токов всех возможных видов КЗ.

В сетях с изолированной нейтралью или заземленной через дугогасящие реакторы нейтралью к повреждениям относятся и однофазные замыкания на землю. Эти повреждения не являются короткими замыканиями, т. к. токи замыкания на землю циркулируют в контурах, основными составляющими сопротивления которых являются электрические емкости неповрежденных фаз, соответственно при возникновении таких замыканий токи, протекающие по элементам сети, электрически связанным с местом замыкания, возрастают незначительно (или совсем не возрастают). Но при возникновении таких замыканий возрастает напряжение, приложенное к изоляции неповрежденных фаз относительно земли, что может привести к ее пробое. Кроме того, выделение тепла за счет протекания тока замыкания через поврежденную изоляцию фазы может привести к разрушению междуфазной изоляции и переходу однофазного замыкания в междуфазные короткие замыкания, к пожару, к поражению людей и животных электрическим током.

1. ЗАДАНИЕ НА КУРСОВУЮ РАБОТУ

В рамках курсовой работы необходимо произвести расчет начальных сверхпереходных токов при авариях в характерных точках СЭС. В качестве аварийных режимов следует принять: трехфазные, двухфазные, однофазные короткие замыкания в сетях с глухозаземленной нейтралью (220, 110, 0,69, 0,4 кВ); трехфазные, двухфазные КЗ и однофазные замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью (35, 10, 6 кВ).

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

Тем студентам, чьи фамилии начинаются с букв А до О включительно при выборе типов элементов СЭС ПП следует пользоваться таблицами П1.1 и П1.2 (Приложение 1). Тем, чьи фамилии начинаются с букв П до Я - таблицами П1.3 и П1.4 (Приложение 1).

Параметры элементов выбираются исходя из их типов по таблицам П1.5 - П1.15.

Также по варианту задания выбирается и номер расчетной типовой схемы СЭС ПП (см. таблицы П1.1, П1.3 и рисунки П1.1 - П1.4 Приложения 1).

Содержание курсовой работы зависит от номера расчетной схемы СЭС ПП, который соответствует варианту задания (Приложение 2).

1.1 Основные сокращения и обозначения

ЭЭС - электроэнергетическая система:

$S_k^{(3)}$ - поступающая от ЭЭС мощность короткого замыкания при трехфазном КЗ на шинах ЭЭС, (МВА).

U_{cp} - среднее номинальное (междуфазное) напряжение (см.таблица 1.1)

Каждая строка таблицы соответствует одной ступени напряжения (или одному классу напряжения).

$U_{с.ном}$ - номинальное напряжение сети, в которой располагаются шины ЭЭС, (кВ).

Т - силовые трансформаторы:

$S_{Т.ном}$ - номинальная мощность трансформатора, МВА;

$U_{ВН}$, $U_{НН}$ - соответственно номинальное напряжение обмоток высшего и низшего напряжения трансформатора, кВ;

u_k - напряжение короткого замыкания трансформатора, %;

ΔP_k - потери короткого замыкания трансформатора, МВт;

$R_{0Т}$, $X_{0Т}$ - соответственно активное и индуктивное сопротивления нулевой последовательности трансформатора, мОм.

Таблица 1.1. Номинальные значения напряжений элементов СЭС

Номинальные напряжения сети и электроприемников, кВ	Номинальные напряжения генераторов и синхронных компенсаторов, кВ	Номинальные напряжения силовых трансформаторов (основных ответвлений), кВ	Средние номинальные (междуфазные) напряжения, кВ
0,38	0,4	0,4	0,4
0,66	0,69	0,69	0,69
6	6,3	6; 6,3; 6,6	6,3
10	10,5	10; 10,5; 11	10,5
35		35; 36,75; 38,5	37
110		110; 115; 121	115
220		220; 230; 242	230

MS, MA- синхронный и асинхронный двигатель соответственно:

$P_{\partial.ном}$ - номинальная мощность двигателя, МВт;

$U_{\partial.ном}$ - номинальное напряжение двигателя, кВ;

$I_{\partial.ном}$ - номинальный ток двигателя, А;

$I_{пск(*)}$ - начальный пусковой ток (кратность пускового тока), отн.ед.;

$\eta_{ном}$ - номинальный КПД двигателя, отн.ед.;

$\cos \varphi_{НОМ}$ - номинальный коэффициент мощности двигателя, отн.ед.;

$M_{пск(*)}$ - кратность начального пускового момента двигателя, отн.ед.;

$M_{max(*)}$ - кратность максимального вращающего момента, отн.ед.;

L - линия электропередачи (ВЛ - воздушная линия, КЛ - кабельная линия);

F - сечение фазной жилы кабеля (провода), мм²;

m - число кабелей (проводов) в линии;

l - длина линии, км;

R_{lnz} , X_{lnz} - погонные (т. е. на единицу длины) активное и индуктивное сопротивления прямой последовательности, Ом/км;

$I_{\tilde{n}.\tilde{n}\tilde{a}}$ - погонный ток однофазного замыкания на землю (емкостный ток линии), А/км (только для кабелей, проложенных в сетях 6 и 10 кВ с изолированной нейтралью);

$Z_{nm.nz}$ - погонное полное сопротивление петли фаза-нуль, мОм/м (только для кабелей, проложенных в сети до 1 кВ с глухозаземленной нейтралью).

LR - токоограничивающий реактор:

ΔP_p - номинальные потери активной мощности на фазу реактора, кВт;

$I_{p.ном}$ - номинальный ток реактора, А;

$X_{p.ном}$ - номинальное индуктивное сопротивление реактора, Ом.

1.2. Выбор параметров элементов расчетной схемы

Рассмотрим пример расчетной схемы СЭС ПП на рисунке 1.1.

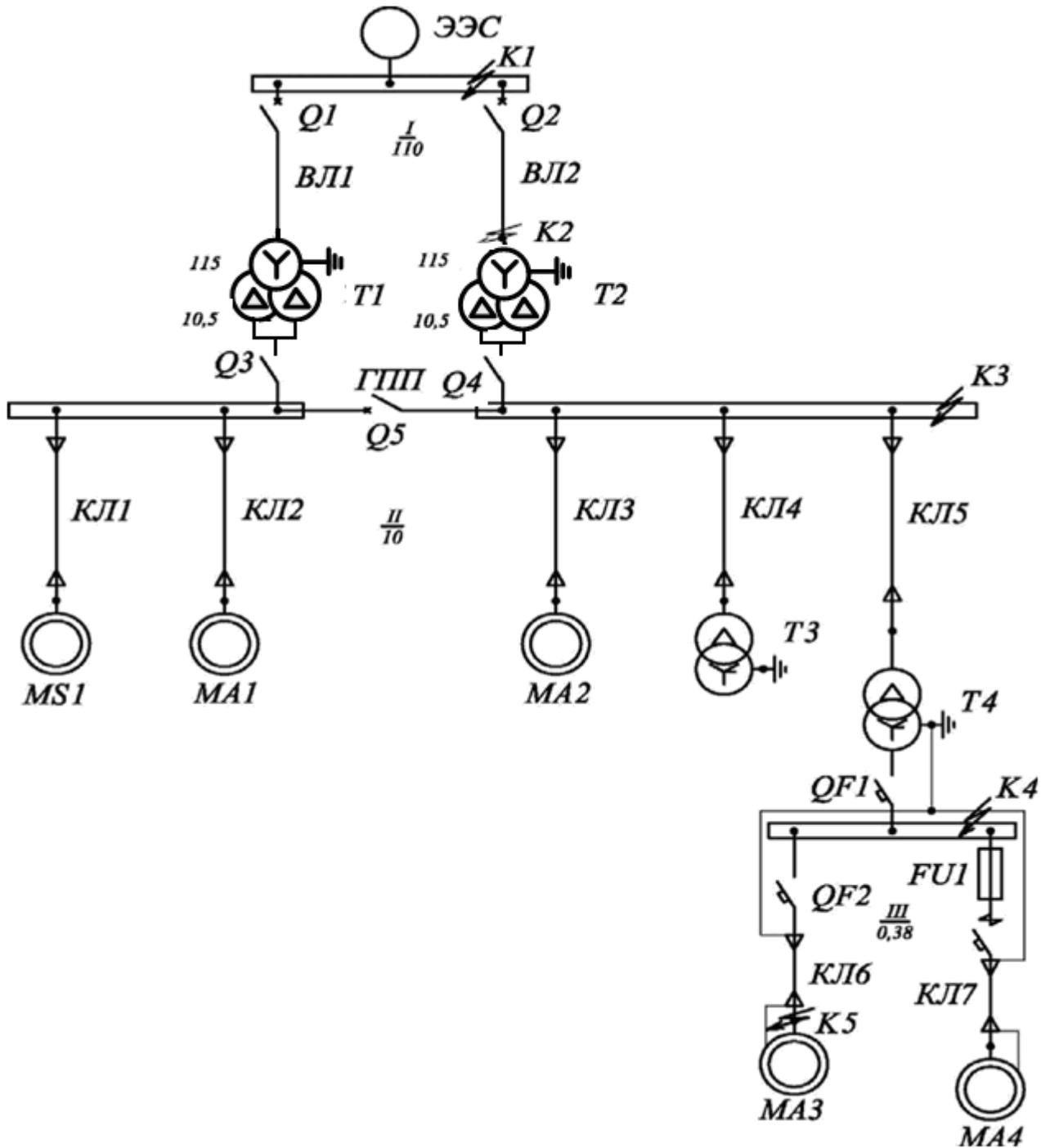


Рис.1.1. Пример расчетной схемы СЭС ПП

На рис.1.1: К1 – К5 – точки предполагаемых КЗ; Q1 – Q5 – выключатели: Q1 – Q2 - линейные выключатели, Q3 – Q4 – вводные выключатели, Q5 – секционный выключатель (секционный выключатель в нормальном режиме отключен).

Римскими цифрами на схеме пронумерованы ступени напряжения (ступени трансформации). Под номером ступени указаны номинальные напряжения данной сети.

Для дальнейшего расчета необходимы определенные исходные данные для большинства элементов расчетной схемы СЭС ПП. Пример перечня таких данных для элементов СЭС ПП расчетной схемы рис.1.1 приведен ниже.

Пример 1. Для расчетной схемы на рисунке 1.1 выберем необходимые для расчета данные элементов СЭС.

Данные элементов СЭС:

ЭЭС:

$$S_k^{(3)} = 2100 \text{ МВА}; U_{с.ном} = 110 \text{ кВ.}$$

T1, T2: (ТРДН-25000/110):

$$S_{T.ном} = 25 \text{ МВА}; U_{BH} = 115 \text{ кВ}; U_{HH} = 10,5 \text{ кВ}; u_k = 10,5 \%; \Delta P_k = 0,12 \text{ МВт.}$$

$$T3, T4: (ТМ-2500/10) S_{T.ном} = 2,5 \text{ МВ-А}; U_{BH} = 10 \text{ кВ}; U_{HH} = 0,4 \text{ кВ}; u_k = 5,5 \%; \Delta P_k = 0,025 \text{ МВт.}$$

$$MS: (СТД-5000) P_{\partial.ном} = 5 \text{ МВт}; U_{\partial.ном} = 10 \text{ кВ}; I_{нск(*)} = 7,22; \eta_{ном} = 0,975;$$

$$\cos \varphi_{ном} = 0,9; M_{нск.(*)} = 2,07.$$

МА1, МА2: (2АЭМ-3200)

$$P_{\partial.ном} = 3,2 \text{ МВт}; U_{\partial.ном} = 10 \text{ кВ}; \eta_{ном} = 0,968; \cos \varphi_{ном} = 0,91; S_{ном} = 0,005;$$

$$M_{\max.(*)} = 2,6.$$

МА3 (аналогично с двигателями МА1 и МА2): (4А355Т2)

$$P_{\partial.ном} = 0,315 \text{ МВт}; U_{\partial.ном} = 0,38 \text{ кВ};$$

$$\eta_{ном}=0,945; \cos \varphi_{ном}=0,92; S_{ном}=0,01; M_{\max.(*)}=2$$

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 (таблицы П. 1.1 - П.1.12) по их длительно допустимым токам с учетом конфигурации расчетной схемы и подключенной нагрузки.

ВЛ1, ВЛ2: АС95

$F=95\text{мм}^2$; $l=40$ км; $R_{lnz}=0,306$ Ом/км; $X_{lnz}=0,434$ Ом/км.

КЛ1:

$m=2$; $F=150\text{мм}^2$; $l=0,45$ км; $R_{lnz}=0,206$ Ом/км; $X_{lnz}=0,079$ Ом/км; $I_{c.nz}=1,36$ А/км.

КЛ2, КЛ3:

$m=1$; $F=185\text{мм}^2$; $l=0,4$ км; $R_{lnz}=0,167$ Ом/км; $X_{lnz}=0,077$ Ом/км; $I_{c.nz}=1,5$ А/км.

КЛ4, КЛ5:

$m=1$; $F=120\text{мм}^2$; $l=0,5$ км; $R_{lnz}=0,258$ Ом/км; $X_{lnz}=0,081$ Ом/км; $I_{c.nz}=1,23$ А/км.

КЛ6:

$m=2$; $F=185\text{мм}^2$; $l=0,045$ км; $R_{lnz}=0,167$ Ом/км; $X_{lnz}=0,063$ Ом/км; $Z_{пт.пт}=0,37$ МОм/м.

Для своего варианта аналогично примеру 1 следует выписать необходимые данные всех элементов расчетной СЭС, пользуясь таблицами Приложения 1.

2 СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ПРЯМОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Для выбора электрических аппаратов и проводников (шин и кабелей) и для проектирования устройств защиты и автоматики, прежде всего, требуется рассчитать токи и напряжения в начальный момент КЗ. Режим СЭС, который возникает в начальный момент КЗ, называется начальным **сверхпереходным режимом**, а действующие значения периодических составляющих токов и напряжений в этот момент называются **начальными сверхпереходными токами и напряжениями**. Значения токов и напряжений в начальный момент КЗ зависят от режима, который ему предшествовал (т. е. был в СЭС до возникновения КЗ), этот режим называется **предшествующим режимом**.

При расчете токов КЗ для выбора аппаратов и проводников в качестве предшествующего для СЭС ПП данного вида (см. рис. 1.1), т. е. с двумя цепями питания, принимают послеаварийный режим. Он получается после отключения одной цепи питания и включения резервного электроснабжения всех потерявших питание электроприемников через оставшуюся в работе цепь, поэтому при таком предшествующем режиме токи КЗ получаются больше.

Расчет начального сверхпереходного режима КЗ производится по схеме замещения, в которую все элементы расчетной СЭС вводятся своими схемами замещения для токов прямой последовательности, а синхронные и асинхронные двигатели вводятся сверхпереходными сопротивлениями и предшествующими сверхпереходными ЭДС. При этом согласно работе [5, п. 1.4.9] принимают, что все двигатели до КЗ работали в номинальном режиме и что ЭДС всех источников совпадают по фазе, т. е. векторы всех ЭДС направлены по мнимой оси в

положительную сторону, следовательно, комплексные ЭДС выражаются положительными мнимыми числами.

2.1. Расчет параметров схемы замещения в относительных единицах

Расчет токов КЗ при КЗ в точках сети номинальным напряжением выше 1 кВ рекомендуется выполнять в относительных единицах. Для выполнения расчета в относительных единицах надо задаться базисными величинами, относительно которых и будут рассчитаны параметры элементов схемы замещения. Этим базисными величинами являются базисная мощность $S_б$ и базисное напряжение, например, первой ступени $U_б$. Значение базисной мощности принимают обычно таким, чтобы удобно было производить расчеты (1, 10, 100 МВ-А). Значение базисного напряжения выбирают исходя из тех же соображений, и обычно принимают его либо равным номинальному напряжению сети $U_{бI} = U_{с.ном.}$, либо на пять процентов выше

$$U_{бI} = 1,05 \cdot U_{н.iii} = U_{н.б.}$$

Базисные напряжения на ступенях II и III:

$$U_{бII} = U_{бI} \cdot n_{II-I} \quad (\text{кВ}), \quad (2.1)$$

$$U_{бIII} = U_{бII} \cdot n_{III-II} \quad (\text{кВ}), \quad (2.2)$$

где n_{II-I} и n_{III-II} – номинальные коэффициенты трансформации двухобмоточных силовых трансформаторов.

Расчет параметров элементов СЭС в относительных единицах при принятых базисных условиях:

Электроэнергетическая система (ЭЭС):

ЭДС ЭЭС:

$$\dot{A}_{(aj)}^* = \frac{U_{н.б.}}{U_{бI}} \quad (2.3)$$

где * и (б) - индексы, обозначающие, что параметр рассчитан в относительных единицах при принятых базисных условиях; j - номер источника ЭДС, соответствующего ЭЭС по схеме замещения.

Индуктивное сопротивление системы:

$$X_{*(a)i} = \frac{S_{a}}{S_{e}^{(3)}} \cdot \left(\frac{U_{н.б.}}{U_{бI}} \right)^2 \quad (2.4)$$

где n - номер сопротивления по схеме замещения, соответствующего данному элементу расчетной схемы. Если об активном сопротивлении системы нет сведений, то его принимают равным нулю.

Трансформатор (Т):

Коэффициент пересчета сопротивлений из собственных относительных единиц в относительные единицы при выбранных базисных условиях:

$$k = \frac{S_{a}}{S_{iii}} \cdot \left(\frac{U_{бI}}{U_{бii}} \right)^2 \quad (2.5)$$

где $U_{\dot{a}i}$ - базисное напряжение i -й ступени напряжения, на которой находится обмотка высшего напряжения рассматриваемого трансформатора, кВ.

Активное сопротивление трансформатора:

$$R_{*(\dot{a})i} = R_{(*)} \cdot k = \frac{\Delta P_{\dot{e}}}{S_{\dot{a}i}} \cdot k \quad (2.6)$$

где $R_{(*)}$ - активное сопротивление трансформатора в его собственных относительных единицах.

У трансформаторов напряжением 110/10(6) кВ и выше активное сопротивление по сравнению с индуктивным мало, поэтому им можно пренебречь. Тогда индуктивное сопротивление трансформатора будет определяться по формуле

$$X_{*(\dot{a})i} \approx Z_{*(\dot{a})i} = Z_{(*)} \cdot k = \frac{u_{\dot{e}}}{100} \cdot k \quad (2.7)$$

Для трансформаторов напряжением 10(6)/0,69(0,4) пренебрегать активным сопротивлением при расчете индуктивного нельзя, поэтому по (2.7) находим полное сопротивление трансформатора, а индуктивное сопротивление определяем по формуле

$$X_{*(\dot{a})i} = \sqrt{Z_{*(\dot{a})i}^2 - R_{*(\dot{a})i}^2} \quad (2.8)$$

Воздушная линия (ВЛ) или кабельная линия (КЛ):

Базисное сопротивление на ступени i :

$$Z_{\dot{a}i} = \frac{U_{\dot{a}i}^2}{S_{\dot{a}}} \quad (\text{ОМ}). \quad (2.9)$$

Активное и индуктивное сопротивление линии электропередачи (ЛЭП):

$$R_{*(\dot{a})i} = \frac{R_{1\dot{a}i} \cdot l}{Z_{\dot{a}i} \cdot m} \quad (2.10)$$

$$X_{*(\dot{a})i} = \frac{X_{1\dot{a}i} \cdot l}{Z_{\dot{a}i} \cdot m} \quad (2.11)$$

где i - номер ступени напряжения сети, в которой проложена ЛЭП.

Синхронный двигатель (MS):

Полная мощность синхронного двигателя:

$$S_{\dot{a}.\dot{a}i} = \frac{P_{\dot{a}.i\dot{a}i}}{\eta_{i\dot{a}i} \cdot \cos \varphi_{i\dot{a}i}} \quad (\text{МВА}) \quad (2.12)$$

Коэффициент пересчета определяем для двигателя аналогично трансформатору по формуле (2.5) только вместо напряжения и мощности трансформатора используем номинальное напряжение $U_{\text{д.ном}}$ и номинальную полную мощность двигателя $S_{\text{д.ном}}$.

Активное сопротивление обмотки статора в собственных относительных единицах:

$$R_{c(*)} = 0,25 \cdot (1 - \eta_{i\dot{a}i}) \cos \varphi_{i\dot{a}i} \quad (2.13)$$

Активное сопротивление обмотки статора при принятых базисных условиях:

$$R_{*(\dot{a})i} = R_{c(*)} \cdot k \quad (2.14)$$

Сверхпереходное индуктивное сопротивление двигателя в его собственных относительных единицах:

$$X''_{(*)} = \frac{1}{I_{\text{н\acute{e}}(*)} \sqrt{1 - \left(\frac{I_{\text{н\acute{e}}(*)} \cdot \cos \varphi_{\text{н\acute{и}}}}{I_{\text{н\acute{е}}}} \right)^2}} \quad (2.15)$$

Индуктивное сопротивление синхронного двигателя при принятых базисных условиях вычисляется аналогично активному по формуле (2.14):

$$X''_{*(\acute{a})n} = X''_{(*)} \cdot k \quad (2.16)$$

Сверхпереходная ЭДС двигателя в номинальном режиме в собственных относительных единицах [1]:

$$X''_{(*)} = \sqrt{\cos \varphi_{\text{н\acute{и}}} + (\cos \varphi_{\text{н\acute{и}}} + X''_{(*)})^2} \quad (2.17)$$

Сверхпереходная ЭДС двигателя в относительных единицах при принятых базисных условиях:

$$E''_{*(\acute{a})j} = E''_{(*)} \cdot \frac{U_{\text{н\acute{и}}}}{U_{\acute{a}i}}, \quad (2.18)$$

где j – номер источника ЭДС по схеме замещения, соответствующего двигателю.

Асинхронные двигатели (МА). Полная мощность асинхронных двигателей и коэффициент пересчета находятся аналогично формулам (2.12) и (2.5) соответственно.

Активное сопротивление обмотки статора асинхронного двигателя в собственных относительных единицах:

$$R_{c(*)} = \frac{S_{\text{н\acute{и}}}}{\eta_{\text{н\acute{и}}}}. \quad (2.19)$$

Активное сопротивление обмотки статора асинхронного двигателя при принятых базисных условиях – по (2.14).

Сверхпереходное индуктивное сопротивление двигателя в его собственных относительных единицах:

$$X''_{(*)} = \frac{0,475}{M_{\text{max}(*)} \cdot \cos \varphi_{\text{н\acute{и}}}}. \quad (2.20)$$

Индуктивное сопротивление асинхронного двигателя при принятых базисных условиях – по (2.16).

Сверхпереходная ЭДС двигателя в номинальном режиме в собственных относительных единицах [1]:

$$E''_{(*)} = \sqrt{(\cos \varphi_{\text{н\acute{и}}} - R_{c(*)})^2 + (\sin \varphi_{\text{н\acute{и}}} - X''_{(*)})^2} \quad (2.21)$$

Сверхпереходная ЭДС двигателя в относительных единицах при принятых базисных условиях – по (2.18).

Активное сопротивление обмотки ротора при скольжении $s=0$, приведенное к обмотке статора в относительных единицах, в собственных относительных единицах:

$$R_{\rho^{(*)}} = S_{\text{нн}} \quad (2.22)$$

а в относительных единицах при выбранных базисных условиях:

$$R_{*(\dot{a})\dot{i}} = R_{\rho^{(*)}} k \quad (2.23)$$

Токоограничивающие реакторы. Если в схеме есть реактор, то его сопротивления в относительных единицах при выбранных базисных условиях определяются по формулам:

$$R_{*(\dot{a})\dot{i}} = \frac{\Delta P_p \cdot 10^3}{I_{\dot{\delta},\text{нн}}^2 \cdot Z_{\dot{a}\dot{i}}}, \quad (2.24)$$

$$X_{*(\dot{a})\dot{i}} = \frac{X_{\dot{\delta},\text{нн}}}{Z_{\dot{a}\dot{i}}} \quad (2.25)$$

где \dot{i} – номер ступени напряжения, на которой находится реактор.

Пример 2. Составим схему замещения для расчета начальных сверхпереходных токов при трехфазных КЗ в точках К1 – К2 для расчетной схемы СЭС ПП на рисунке 1.1 и определим параметры ее элементов (по данным примера 1). При этом примем базисную мощность $S_{\text{б}} = 100$ МВА, базисное напряжение первой ступени $U_{\text{б1}} = 115$ кВ.

В качестве предшествующего принят послеаварийной установившийся режим, получившийся после отключения одной цепи питания, т. е. линии ВЛ1 и трансформатора Т1 включателями Q1 и Q3, и включении секционного выключателя Q5. При таком предшествующем режиме токи КЗ в данной СЭС получаются больше, т.к. двигатели MS и МА1 оказываются электрически связанными с предполагаемыми точками КЗ К1 – К5, и при возникновении КЗ посылают к месту его возникновения ток.

Следует иметь в виду, что в линии КЛ4 и в обмотке ВН трансформатора Т3 протекает ток холостого хода этого трансформатора (т.к. у него нет нагрузки), которым можно пренебречь, следовательно, эти элементы в схему замещения вводить не нужно.

На схеме замещения (рис. 2.1) пронумерованы сопротивления и ЭДС всех элементов (номера обозначены арабскими цифрами над горизонтальной чертой), приведены расчетные параметры всех элементов (под номером сопротивления приведены значения его активного и индуктивного сопротивления).

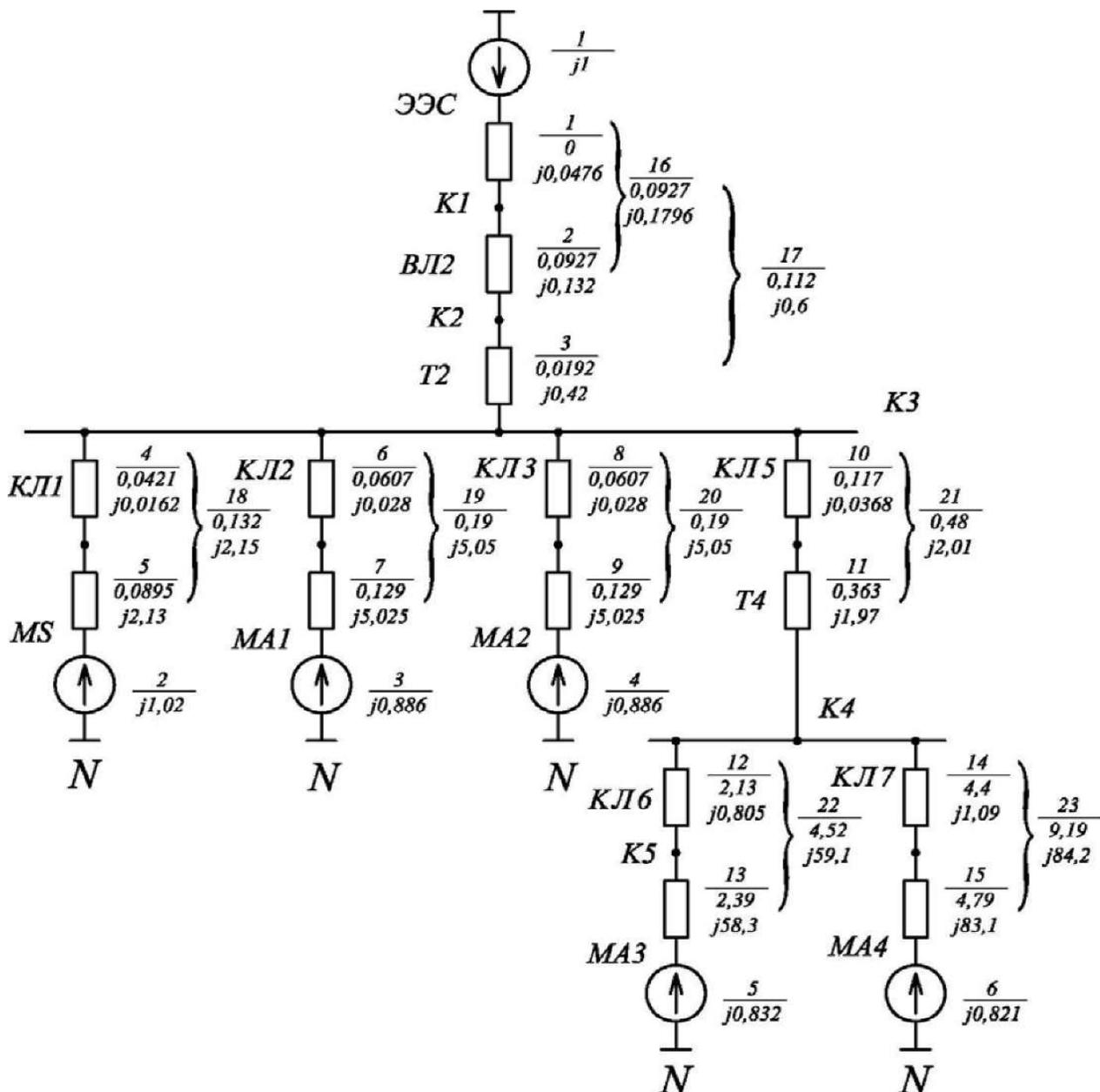


Рис. 2.1. Схема замещения для расчетной схемы рис. 1.1 для расчета начальных сверхпереходных режимов при трехфазных КЗ в точках К1 – К3.

2.2. Расчет параметров схемы замещения в именованных единицах (для электроустановок до 1 кВ)

Расчет режимов КЗ в электроустановках до 1 кВ удобнее всего выполнять в именованных единицах, приводя схему замещения к этой ступени напряжения.

При расчете обязательно должно учитываться сопротивление коммутационных аппаратов и их контактов, а также неподвижных контактов, соединяющих все элементы СЭС напряжением до 1 кВ. Сопротивления автоматических выключателей (Приложение 1, таблица П1.14) зависят от номинального тока автоматического выключателя. Однако в исходных данных на курсовую работу не указаны эти номинальные токи. Их следует принять ориентировочно по параметрам элементов

(Приложения 1), цепи которых коммутируют автоматические выключатели. Сопротивлением предохранителя можно пренебречь, т. к. оно очень мало.

Сопротивлением неподвижных контактов выбирается по тем элементам, между которыми располагается этот контакт (Приложение , таблица П1.15).

Расчет параметров схемы замещения в именованных единицах можно привести:

1) пересчетом из относительных единиц при выбранных базисных условиях соответствующего элемента электрической схемы:

$$\dot{A}_j = E_{(a)j}^* \frac{U_{\dot{a}i}}{\sqrt{3}} \cdot 10^3 \text{ (В)}, \quad (2.26)$$

$$R_n = R_{*(a)i} \cdot Z_{\dot{a}i} \cdot 10^3 \text{ (МОм)}, \quad (2.27)$$

$$X_n = X_{*(a)i} \cdot Z_{\dot{a}i} \cdot 10^3 \text{ (МОм)} \quad (2.28)$$

где $E_{(a)j}^*$ - ЭДС j- го источника при выбранных базисных условиях, $R_{*(a)i}$, $X_{*(a)i}$ - активное и индуктивное сопротивление n- й ветви в относительных единицах при выбранных базисных условиях соответственно;

2) пересчетом из собственных относительных единиц элемента:

$$\dot{A}_j = E_{(*)} \frac{U_{\dot{m}i}}{\sqrt{3}} \cdot 10^3 \text{ (В)}, \quad (2.29)$$

$$R_n = R_{(*)} \cdot Z_{\dot{m}i} \cdot 10^3 \text{ (МОм)}, \quad (2.30)$$

$$X_n = X_{(*)} \cdot Z_{\dot{m}i} \cdot 10^3 \text{ (МОм)}, \quad (2.31)$$

$U_{\dot{m}i}$ - номинальное напряжение элемента, если он находится в сети до 1 кВ, В; $E_{(*)}$, $R_{(*)}$, $X_{(*)}$ – ЭДС, активное и индуктивное сопротивления элемента в собственных относительных единицах; $Z_{\dot{m}i}$ – номинальное сопротивление элемента, приведенное к ступени до 1 кВ, (МОм)

$$Z_{\dot{m}i} = \frac{U_{\dot{m}i}^2}{S_{\dot{m}i}} \text{ (МОм)}. \quad (2.32)$$

3. РАСЧЕТ ТОКОВ ТРЕХФАЗНЫХ КЗ

При расчете режимов КЗ можно не учитывать сопротивления коммутационных аппаратов, трансформаторов тока, шин распределительных устройств (РУ) и различных контактов в электроустановках выше 1 кВ, т. к. их сопротивления очень малы по сравнению с сопротивлениями других элементов СЭС. В электроустановках напряжением до 1 кВ сопротивления указанных элементов необходимо учитывать.

Расчеты режимов КЗ могут выполняться как с учетом, так и без учета электроприемников- в зависимости от назначения расчета. При расчете токов КЗ для выбора электроаппаратов и проводников надо определить наибольшие возможные значения токов, поэтому необходимо учитывать токи, поступающие от двигателей. Расчеты же токов КЗ для проектирования устройств защит от КЗ и автоматики производят обычно без учета электроприемников, а их влияние учитывают с помощью различных коэффициентов при выборе устройств защиты и автоматики.

3.1. Расчет токов трехфазных КЗ в сетях напряжением выше 1 кВ

При расчете режимов трехфазных КЗ в сетях напряжением выше 1 кВ будем использовать метод относительных единиц при выбранных базисных условиях.

Для расчета начального сверхпереходного тока (т. е. периодической составляющей тока в начальный момент КЗ) при трехфазном КЗ используется схема замещения для токов прямой последовательности.

В общем случае начальный сверхпереходный ток n – й ветви в относительных единицах при принятых базисных условиях определяется по выражению:

$$I_{*1\ 0,i} = \frac{E_{(a)j}^*}{Z_{*(a)\Sigma}}, \quad (3.1)$$

$E_{(a)j}^*$ - сверхпереходная ЭДС ЭЭС; j - номер ЭДС ЭЭС по схеме замещения; $Z_{*(a)\Sigma}$ - полное сопротивление короткозамкнутого участка цепи, т. е. суммарное сопротивление ветви КЗ от источника до места КЗ.

$$Z_{*(a)\Sigma} = \sqrt{R_{*(a)\Sigma}^2 + X_{*(a)\Sigma}^2} \quad (3.2)$$

Для нахождения тока, протекающего по k – му элементу расчетной схемы:

$$I_{1\ 0,k} = I_{*1\ 0,i} \cdot I_{ai} \quad (\text{кА}), \quad (3.3)$$

где I_{ai} - базисный ток i -й ступени напряжения, на которой находится k -й элемент расчетной схемы.

$$I_{ai} = \frac{S_{ai}}{\sqrt{3} \cdot U_{ai}} \quad (\text{кА}) \quad (3.4)$$

Пример 3. Рассмотрим короткое замыкание в точке К2 (рис. 1.1 и 2.1).

Начальный сверхпереходный ток ветви 16 (см. рисунок 2.1) при коротком замыкании в точке К2, подтекающий от системы ЭС в относительных единицах при принятых базисных условиях по формуле (3.1):

где Z_{16} - это полное сопротивление току КЗ при КЗ в точке К2.

$$Z_{16} = \sqrt{R_{16}^2 + X_{16}^2}$$

$$R_{16} = R_1 + R_2,$$

$$R_{16} = 0 + 0,0927 = 0,0927,$$

аналогично

$$X_{16} = 0,0476 + 0,132 = 0,1796.$$

$$I_{16} = 4,95.$$

Точка К2 находится на первой ступени напряжения, поэтому базисный ток на ступени I по (3.4):

$$I_{\delta 1} = 0,502 \text{ кА.}$$

Тогда начальный сверхпереходный ток, протекающий по линии ВЛ2 при трехфазном КЗ в точке К2 по (3.3):

$$I_{ВЛ2} = I_{16} \cdot I_{\delta 1} \text{ (кА),}$$

$$I_{ВЛ2} = 4,95 \cdot 0,502 = 2,485 \text{ кА.}$$

При расчете токов КЗ с учетом электродвигателей ток в месте короткого замыкания находится как сумма токов всех независимых ветвей, сходящихся в месте КЗ.

$$I_{\dot{E}\zeta} = \sum_{k=1}^N I_{10,k} \quad (3.5)$$

где N - число независимых ветвей с источниками ЭДС, сходящихся в месте КЗ.

Сверхпереходный ток ветви и элемента находятся по выражениям (3.1) - (3.4), где в качестве E_j берется сверхпереходная ЭДС соответствующей ветви.

Для примера на рисунке 1.1 при трехфазном КЗ в точке К3 ток в месте КЗ будет определяться как сумма токов, поступающих от ЭЭС и от двигателей:

$$I_{КЗ} = I_{\dot{E}\zeta} + I_{МА1} + I_{МА2} + I_{МС} + I_{КЛ5} \text{ (кА),}$$

где ток $I_{КЛ5}$ - ток, подтекающий от низковольтных асинхронных двигателей к месту КЗ, кА.

Для проверки аппаратов и шинных конструкций на электродинамическую стойкость необходимо вычислять ударный ток КЗ. Ударный ток - это наибольшее возможное мгновенное значение тока КЗ.

Ударный ток трехфазного КЗ с учетом электродвигателей определяется аналогично формуле (3.5) по выражению

$$i_{\delta\dot{a},\dot{E}\zeta}^{(3)} = \sum_{k=1}^N i_{\delta\dot{a},k}^{(3)} \text{ (кА),} \quad (3.6)$$

где $i_{\delta\dot{a},k}^{(3)}$ - ударный ток, протекающий по k-му элементу сети, кА.

$$i_{\delta\dot{a},k}^{(3)} = \sqrt{2} \cdot k_{\delta\dot{a},i} \cdot I_{10,k} \text{ (кА),} \quad (3.7)$$

где $k_{\delta\dot{a},i}$ - ударный коэффициент n-й ветви, в состав которой входит k-й элемент, примыкающий к месту КЗ.

В общем случае ударный коэффициент определяется по выражению:

$$k_{\delta\dot{a},i} = a + e^{\frac{-0,01}{\delta\dot{a},i}}, \quad (3.8)$$

где a - коэффициент, зависящий от вида источника ЭДС n-й независимой ветви КЗ.

Если источником ЭДС в n-й независимой ветви является ЭЭС или синхронный двигатель, то $a = 1$.

Если источником ЭДС является асинхронный двигатель, то

$$a = a^{\frac{-0,01}{T_{n,n}}} \quad (3.9)$$

где $T_{n,n}$ - постоянная времени периодической составляющей тока КЗ, с.

Постоянная времени апериодической составляющей тока ветви n.

$$T_{a.n} = \frac{X_i}{\omega_n R_i} \quad (3.10)$$

где X_n и R_n - индуктивное и активное сопротивление ветви n (в относительных или именованных единицах); ω_n - синхронная угловая частота напряжения сети, рад/с.

Действующее значение периодической составляющей тока от асинхронных двигателей затухает по экспоненте с постоянной времени, определяемой по формуле

$$T_{a.n} = \frac{X'' + X_{ai}}{\omega_n R_{\sigma r}} \approx \frac{X_i}{\omega_n R_{\sigma r}} \quad (с), \quad (3.11)$$

где X_{ai} - индуктивное сопротивление внешней по отношению к двигателю цепи, т. е. цепи от выводов двигателя до точки КЗ, отн.ед; $R_{\sigma r}$ - активное сопротивление обмотки ротора асинхронного двигателя по (2.23), отн.ед.

3.2. Расчет токов трехфазных КЗ в сетях напряжением до 1кВ

В электроустановках напряжением до 1 кВ расчет удобнее производить в именованных единицах. Поэтому для расчета применяем схему замещения, приведенную к ступени напряжения до 1 кВ (см. подраздел 2.2). Расчет выполняется без учета двигателей напряжением выше 1кВ, т. к. при КЗ на этой ступени их влияние будет небольшим.

Для расчета начального сверхпереходного тока, протекающего по элементу электрической сети, используется формула (3.1), но входящие в нее параметры подставляются в именованных единицах (ЭДС - в В, а сопротивление - в МОм). Ток при этом получается в именованных единицах (т. е. в кА).

Расчет суммарного тока КЗ и ударного тока при расчете КЗ с учетом электродвигателей производится аналогично расчету в сети выше 1кВ по выражениям (3.5) - (3.13).

4. РАСЧЕТ ТОКОВ ДВУХФАЗНЫХ КЗ

Ток двухфазного КЗ необходим для проверки чувствительности устройств релейной защиты и автоматики, поэтому при его нахождении не учитывается влияние электроприемников.

Расчет несимметричных КЗ производится методом симметричных составляющих, действительный (фактический) режим определяется путем наложения двух или трех несимметричных режимов. Метод направлен на определение токов симметричных составляющих особой фазы. *Особая фаза* - фаза, находящаяся в отличных от двух других фаз условиях при возникновении несимметричного КЗ. В качестве особой фазы обычно принимают фазу А, т. е. при возникновении двухфазного КЗ фаза А остается незамкнутой, а фазы В и С замкнуты между собой.

Режим двухфазного КЗ состоит из режимов прямой и обратной последовательностей. Токи обратной последовательности протекают по тем же путям, что и токи прямой последовательности, поэтому схема обратной последовательности состоит из тех же ветвей, что и схема прямой последовательности, описанная в разделе 2, только в схеме обратной последовательности ЭДС у всех источников отсутствуют. Сопротивления прямой последовательности электроприемников в общем случае отличаются от их сопротивлений обратной последовательности. Но у синхронных и асинхронных машин сопротивления обратной последовательности мало отличаются от сверхпереходных сопротивлений. Для элементов электрической сети, магнитосвязанные цепи которых неподвижны друг относительно друга, сопротивления прямой и обратной последовательности одинаковы. К таким элементам относятся (трансформаторы, автотрансформаторы, линии электропередачи и реакторы). Поэтому при расчете начального сверхпереходного режима КЗ (начального момента КЗ) в системах электроснабжения можно считать сопротивление обратной последовательности равным сопротивлению прямой последовательности $Z_{2\Sigma} = Z_{1\Sigma}$.

Комплексная схема замещения для двухфазного КЗ приведена на рис.4.1.

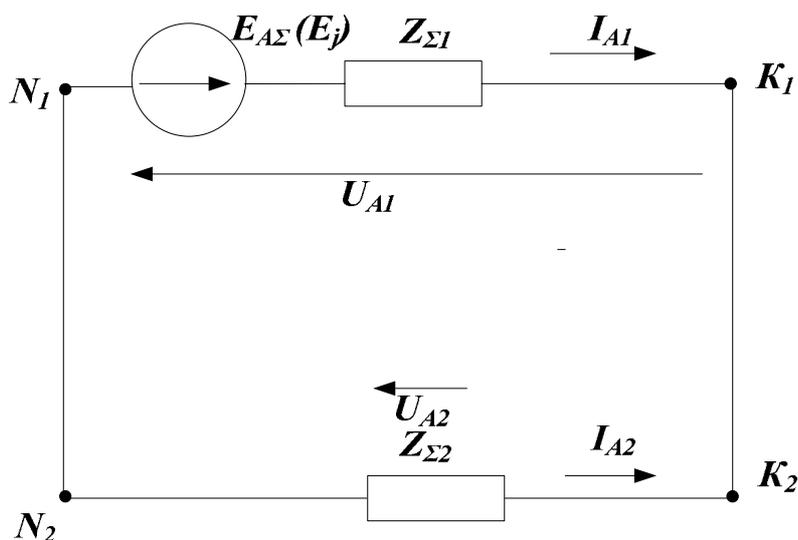


Рис.4.1. Комплексная схема замещения для двухфазного КЗ

Из комплексной схемы замещения получаем токи прямой и обратной последовательностей при $Z_{2\Sigma} = Z_{1\Sigma}$.

$$I_{A1} = I_{A2} = \frac{E_j}{Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma}} = \frac{E_j}{2 \cdot Z_{1\Sigma}} = \frac{I_k^{(3)}}{2} \text{ (кА)}, \quad (4.1)$$

где E_j - ЭДС ЭЭС, кВ; $I_k^{(3)}$ - ток трехфазного КЗ, протекающий в k -й ветви, при КЗ в той же точке, кА.

При двухфазном КЗ токов нулевой последовательности нет, поэтому для токов прямой и обратной последовательности особой фазы А получаем:

$$\underline{I}_{-A1} + \underline{I}_{-A2} = 0 \text{ или } \underline{I}_{-A1} = -\underline{I}_{-A2}.$$

Соответствующая векторная диаграмма токов у места КЗ:

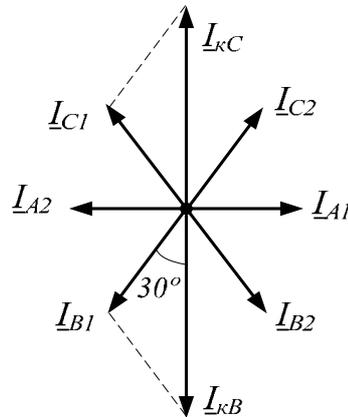


Рис.4.2. Векторная диаграмма токов у места двухфазного КЗ при замыкании фаз В и С.

С учетом равенства модулей токов $I_{A1} = I_{B1} = I_{C1} = I_{A2} = I_{B2} = I_{C2}$ из векторной диаграммы находим выражение для токов в фазах k -го элемента через ток прямой последовательности особой фазы:

$$I_{k.B}^{(2)} = I_{k.C}^{(2)} = 2 I_{A1} \cos 30^\circ = \sqrt{3} I_{A1} \text{ (кА)}, \quad (4.2)$$

а если принять $Z_{2z} = Z_{1z}$, что для начального сверхпереходного тока допустимо, то из (4.1) и (4.2) получаем:

$$I_{k.B}^{(2)} = I_{k.C}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{I0.k}^{(3)} \quad (4.3)$$

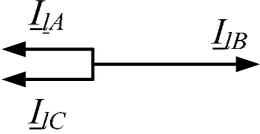
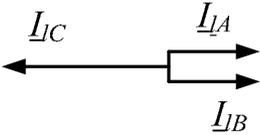
При проектировании и расчете устройств защиты и автоматики не всегда достаточно знать ток в месте КЗ, иногда необходимо знать значение тока на стороне высшего напряжения трансформатора при КЗ на стороне низшего напряжения, а также и в более удаленных ветвях СЭС. При несимметричных КЗ, к которым относится и двухфазное КЗ, за трансформаторами из-за различия схем соединения фазных обмоток высшего и низшего напряжения этих трансформаторов векторные диаграммы токов со стороны источника питания имеют другой вид и состав, нежели векторные диаграммы токов на ступени напряжения и в цепи, где произошло КЗ.

Анализ работы трансформаторов позволяет сформулировать правило: при соединении обмоток трансформатора по 11 группе Δ / Y_0 (Y_0 / Δ) при переходе со стороны звезды на сторону треугольника, векторы прямой последовательности поворачиваются на 30° в направлении вращения векторов (против часовой стрелки), а векторы обратной последовательности - на 30° в противоположном направлении. При переходе через трансформатор в обратном направлении угловые смещения симметричных составляющих меняют свой знак на противоположный.

При переходе через трансформатор с 12 группой соединения обмоток Y / Y_0 (Y_0 / Y) токи прямой и обратной последовательности изменяются только по величине, а по фазе не изменяются.

Если применить рассмотренное правило к векторной диаграмме токов у места КЗ (см. рис.4.2), то получим соотношения для полных фазных токов в цепи, отделенной от поврежденного участка силовым трансформатором, или при переходе токов через трансформатор (таблица 4.1).

Таблица 4.1 Значения токов на ступени, отделенной от места КЗ трансформатором, при двухфазном КЗ фаз ВС

Схема соединения обмоток, за которыми произошло КЗ	Векторные диаграммы токов со стороны источника питания	Значения токов после перехода через трансформатор на стороне обмотки высокого напряжения
$\Delta/Y_0 - 11$		$\Delta : I_{L.A}^{(2)} = I_{L.C}^{(2)} = \frac{1}{2} \cdot I_{I 0.k}^{(3)} \cdot \frac{1}{n};$ $I_{L.A}^{(2)} = I_{I 0.k}^{(3)} \cdot \frac{1}{n}.$
$Y_0/\Delta - 11$		$Y_0 : I_{L.A}^{(2)} = I_{L.B}^{(2)} = \frac{1}{2} \cdot I_{I 0.k}^{(3)} \cdot \frac{1}{n};$ $I_{L.C}^{(2)} = I_{I 0.k}^{(3)} \cdot \frac{1}{n}.$

Примечание: n - коэффициент трансформации соответствующих трансформаторов; 1 - элемент, по которому протекает ток КЗ после перехода через трансформатор.

5. РАСЧЕТ ТОКОВ ОДНОФАЗНЫХ КЗ

Режим однофазного КЗ возможен только в сети с глухо- или эффективно заземленной нейтралью.

В рамках курсовой работы необходимо рассчитать режим однофазного КЗ в характерных точках на ступени напряжения до 1 кВ. В сетях такого напряжения, как было отмечено, ощутимое влияние на значение тока КЗ оказывают сопротивления контактных соединений и коммутационных аппаратов. Поэтому при расчете КЗ рекомендуется учесть сопротивления следующих контактных соединений: присоединение к сборным шинам, присоединение к выводам силового трансформатора, присоединение кабеля к электроприемнику, присоединение нулевого проводника к корпусу или нейтрали электроприемника и т. д., в зависимости от конфигурации цепи.

Однофазное КЗ является несимметричным режимом. Поскольку особой фазой является, как было отмечено ранее, фаза А, то в качестве однофазного КЗ рассматривается однофазное КЗ фазы А. Расчет однофазного КЗ производится методом симмет-

ричных составляющих. Этот режим представляется совокупностью режимов прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Из граничных условий для однофазного КЗ соотношения между токами прямой, обратной и нулевой последовательности особой фазы:

$$I_{A1} = I_{A2} = I_{A0}. \quad (5.1)$$

Исходя из этого соотношения строим комплексную схему замещения для однофазного КЗ, а также векторную диаграмму токов у места КЗ.

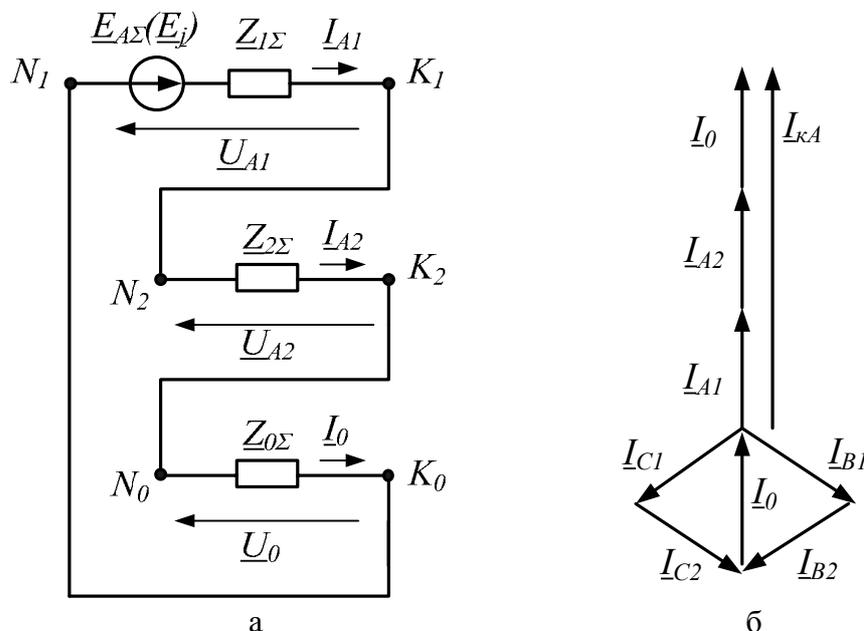


Рис.5.1. Комплексная схема замещения для однофазного КЗ (а) и векторная диаграмма токов у места КЗ (б)

Из комплексной схемы замещения однофазного КЗ получаем выражение для тока однофазного КЗ, протекающего по к-му элементу сети:

$$I_{k.A}^{(1)} = \frac{3 \cdot E_j}{Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}} = \frac{3 \cdot E_j}{2 \cdot Z_{1\Sigma} + Z_{0\Sigma}} (\hat{e}A), \quad (5.2)$$

$$I_{k.B}^{(1)} = I_{k.C}^{(1)} = 0.$$

Токи нулевой последовательности не циркулируют в линейных цепях электрической сети, присоединенных к выводам обмоток трансформаторов, соединенных в треугольник или звезду с изолированной нейтралью. Токи прямой и обратной последовательности протекают по всей электрически связанной цепи от источника питания до места КЗ. Поэтому если КЗ происходит на выводах обмотки трансформатора, соединенной в звезду с заземленной нейтралью, то выражение (5.2) можно представить в виде:

$$I_{k.A}^{(1)} = \frac{3 \cdot E_j}{2(Z_{1C3C} + Z_{1T}) + Z_{0T} + Z_{K\Sigma}} (\kappa A), \quad (5.3)$$

где $Z_{1\dot{N}\dot{Y}\dot{N}} = Z_{\dot{N}\dot{Y}\dot{N}}$ - суммарное сопротивление сети от источника ЭДС до трансформатора с заземленной обмоткой низшего напряжения, мОм; Z_{1T} и Z_{0T} - соответственно сопротивление прямой и нулевой последовательности трансформатора, за которым произошло КЗ, мОм; $Z_{K\Sigma}$ - суммарное сопротивление контактных соединений и коммутационных аппаратов, мОм. Для трансформаторов со схемами соединения обмоток Δ/Y_0 :

$$Z_{0T} = Z_{1T}. \quad (5.4)$$

Тогда из формул (5.4) и (5.3) получаем:

$$I_{k.A}^{(1)} = \frac{3 \cdot E_j}{2Z_{1\dot{N}\dot{Y}\dot{N}} + 3Z_{1T} + Z_{K\Sigma}} = \frac{3 \cdot \dot{A}_j}{Z_{CT}^{(1)}} (\dot{e}\dot{A}), \quad (5.5)$$

где $Z_{CT}^{(1)}$ - эквивалентное сопротивление системы электроснабжения и трансформатора при однофазном КЗ.

При практических расчетах можно принять:

$$I_{CT}^{(1)} = \sqrt{(2R_{\dot{N}\dot{Y}\dot{N}} + 3R_T + R_{K\Sigma})^2 + (2X_{\dot{N}\dot{Y}\dot{N}} + 3X_T + X_{K\Sigma})^2} \text{ (мОм)}. \quad (5.6)$$

Для трансформаторов со схемами соединения обмоток Y/Y_0 активное R_{0T} и индуктивное X_{0T} сопротивления нулевой последовательности приводятся в паспортных данных (см. таблицу П 1.5). Тогда ток однофазного КЗ при КЗ на выводах низшего напряжения трансформатора с 12 группой соединения обмоток:

$$I_{CT}^{(1)} = \frac{3 \cdot E_j}{\sqrt{(2(R_{C\Sigma C} + R_T) + R_{0T} + R_{K\Sigma})^2 + (2(X_{C\Sigma C} + X_T) + X_{0T} + X_{K\Sigma})^2}} (\kappa A). \quad (5.7)$$

Если КЗ происходит в точке сети не на выводах низшего напряжения трансформатора, а за линией (К5 на рис. 1.1), то выражение (5.2) примет вид

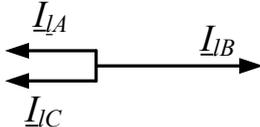
$$I_{k.A}^{(1)} = \frac{3 \cdot E_j}{2 \cdot Z_{1\Sigma} + Z_{0\Sigma}} = \frac{3 \cdot K_j}{2 \cdot (Z_{1\dot{N}\dot{Y}\dot{N}} + Z_{1T} + Z_{1\dot{E}}) + Z_{0T} + Z_{0\dot{E}}} = \frac{E_j}{Z_{\dot{n}\dot{o}}^1 + Z_{i\dot{o}}} (\dot{e}\dot{A}), \quad (5.8)$$

где $Z_{\text{лп}}$ - эквивалентное сопротивление линии (или сопротивление петли фаза-нуль). Значение этого сопротивления можно найти по справочным данным линии, за которой происходит однофазное КЗ.

$$Z_{\text{лп}} = \frac{Z_{\text{лп.лп}} \cdot l}{m} \text{ (мОм)}. \quad (5.9)$$

Если необходимо найти токи КЗ при переходе через трансформатор (таблица 5.1), то можно воспользоваться правилом, изложенным в разделе 4, при этом учитывая, что токи нулевой последовательности за пределы обмотки трансформатора, соединенной в Δ , не выходят, а в обмотке, соединенной в Y , не протекают.

Таблица 5.1. Значения токов на ступени, отделенной от места КЗ трансформатором, при однофазном КЗ фазы А

Схема соединения обмотки, за которой произошло КЗ	Векторные диаграммы токов со стороны источника питания	Значения токов после перехода через трансформатор на стороне обмотки, dscjrjuj yfghz;tybz
$\Delta/Y_0 - 11$		$: I_{L.A}^{(1)} = I_{L.C}^{(1)} = \frac{I_{k.A}^{(1)}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{n}; I_{L.B}^{(1)} = 0.$
$Y_0/Y_0 - 12$		$I_A^{(1)} = I_N^{(1)} = (1/3)I_e^1$ $I_A^{(1)} = (2/3)I_e^1$

6. РАСЧЕТ ТОКОВ ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

Нейтрали трансформаторов в сетях 6, 10, 35 кВ не заземляются, поэтому сети такого напряжения называются сетями с изолированной нейтралью. В этих сетях при замыкании одной фазы на землю замкнутый контур циркуляции аварийного тока образуется только за счет естественной емкости сети относительно земли. Практически можно принять эту емкость равной емкости линий электропередачи, т. к. емкости обмоток трансформаторов и двигателей малы по сравнению с ней. Вследствие большого реактивного сопротивления емкостной связи между сетью и землей токи в сети при возникновении такого повреждения изменяются незначительно. Подобное повреждение не является коротким замыканием, т. к. контуры циркуляции аварийного тока не имеют сплошной проводимости активного характера.

Практический интерес представляют токи нулевой последовательности в этом режиме. Кроме того, необходимо знать наибольший возможный ток в рассматриваемой СЭС ПП. Током в месте замыкания на землю является утроенный ток нулевой последовательности в этом месте. Он определяется суммарной емкостью относительно земли всех линий, электрически связанных с местом замыкания, поэтому ток замыкания зависит от числа и длины включенных линий, электрически связанных с местом повреждения, и от схемы СЭС в момент возникновения замыкания.

Утроенный ток нулевой последовательности, обусловленный каждой линией, можно определить практическим методом по справочным данным о значениях погонных емкостных токов кабелей при однофазном замыкании на землю, т. е.

$$I_n = I_{c.nz} l (A), \quad (6.1)$$

где l – длина линии

Тогда суммарный ток в месте короткого замыкания:

$$I = \sum_{n=1}^N I_{l.n} (A), \quad (6.2)$$

где I_{ln} I_{ln} - емкостный ток n -й линии, A ; N - число линий, электрически связанных с местом замыкания.

Теоретические методы расчета тока замыкания на землю можно изучить по работе [2] или [6].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенные сведения о теоретических методах расчета аварийных режимов в СЭС ПП должны помочь студентам в глубоком освоении специальной дисциплины «Переходные процессы в электроэнергетических системах». Приведенные методики применимы в большинстве практических случаев при расчете различных видов коротких замыканий.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

Задания содержатся в четырех таблицах.

Таблица П1.1

Задания для тех, чьи фамилии начинаются с букв от А до О включительно.
Номер Вашего варианта в этой таблице - последняя цифра номера Вашей зачётной книжки.

Вариант	Схема СЭС	Мощность трехфазного КЗ в точке К2, МВ-А	Номинальное напряжение на шинах ЭЭС, кВ	Реакторы	Длина линий Л3 и Л4 в схеме 2, км	Синхронные двигатели MS1 и MS2
1	1	600	10	РБ 10-1000-0,22	-	СТД-800
2	1	650	10	РБ 10-1600-0,35	-	СТД-1000
3	1	400	6	РБ 10-1000-0,14	-	СТД-2000
4	1	500	6	РБ 10-1600-0,20	-	СТД-2500
5	1	550	10	РБ 10-1000-0,22	-	СТД-1250
6	2	250	6	-	6	СТД-1600
7	2	300	10	-	5	СТД-630
8	2	320	10	-	6	СТД-2000
9	2	280	10	-	4	СТД-800
0	2	340	10	-	5	СТД-2500

Примечание: Линии Л3 и Л4 в схеме 2 состоят каждая из трёх кабелей сечением 185 мм². В схеме 1 сечение линии Л3 должно быть примерно в два раза больше сечения линии Л13.

Таблица П1.2

Продолжение заданий для тех, чьи фамилии начинаются с букв от А до О включительно.
Здесь номер Вашего варианта в этой таблице - предпоследняя цифра номера Вашей зачётной книжки.

Вариант	Длина линий Л1 и Л2, км	Номинальное низшее напряжение трансформаторов, кВ		Трансформаторы	Асинхронные двигатели МА1 и МА2	Асинхронные двигатели МА3 и МА5	Асинхронные двигатели МА4 и МА6
		T1-T2	T3				
1	2,5	0,69	0,4	ТМ-1600/10	2А3М1-800	4А315s4	4А200l6
2	3	0,4	0,4	ТМ-1600/10	2А3М-1000	4А280m2	4А200m2
3	3	0,4	0,4	ТМ-1000/10	2А3М-2000	4А280s4	4А250s6
4	3,5	0,69	0,4	ТМ-1000/10	2А3М-2500	4А250m4	4А250m6
5	4	0,4	0,4	ТМ-630/10	2А3М-1250	4А250s2	4А160m4
6	10	0,69	0,4	ТМ-1600/10	2А3М-1600	4А280s4	4А250s2
7	12	0,69	0,4	ТМ-400/10	2А3М1-630	4А200m6	4А250m6
8	10	0,4	0,4	ТМ-1000/10	2А3М-2000	4А315s4	4А132m2
9	11	0,4	0,4	ТМ-630/10	2А3М1-800	4А250s2	4А132s4
0	8	0,4	0,4	ТМ-400/10	2А3М-2500	4А250m6	4А200l6

Примечание: Линии Л1 и Л2 состоят каждая из четырех кабелей сечением 240 мм².

Задания для тех, чьи фамилии начинаются с букв от П до Я включительно.

Номер Вашего варианта в этой таблице - последняя цифра номера Вашей зачётной книжки.

Вариант	Схема СЭС	Мощность трехфазного КЗ в К1, МВ-А	Номинальное напряжение на шинах ЭЭС, кВ	Трансформаторы Т1 и Т2	Длина линий Л3 и Л4 в схеме 4, км	Синхронные двигатели MS1 и MS2
1	3	1500	110	ТДН-16000/110	-	СТД-630
2	3	3000	110	ТДН-10000/110	-	СТД-1000
3	3	3400	110	ТДН-16000/110	-	СТД-1250
4	3	2000	110	ТДН-16000/110	-	СТД-1600
5	3	2500	110	ТДН-10000/110	-	СТД-2000
6	4	3200	110	ТМН-6300/110	6	СТД-630
7	4	1500	110	ТМН-6300/110	5	СТД-800
8	4	2800	110	ТДН-10000/110	6	СТД-1250
9	4	2300	110	ТМН-6300/110	5	СТД-1000
0	4	1000	110	ТДН-16000/110	7	СТД-630

Примечание: Линии Л3 и Л4 в схеме 4 состоят каждая из трёх кабелей сечением 185 мм¹. В схеме 3 сечение линии Л3 должно быть примерно в два раза больше сечения линии Л13. Продолжение - в табл. 1.4.

Таблица П1.4

Продолжение заданий для тех, чьи фамилии начинаются с букв от П до Я включительно.

Номер Вашего варианта в этой таблице - предпоследняя цифра номера Вашей зачётной книжки.

Вариант	Трансформаторы Т3-Т5	Асинхронные двигатели МА1 и МА2	Асинхронные двигатели МА3 и МА5	Асинхронные двигатели МА4 и МА6	Номинальное низшее напряжение трансформаторов, кВ			Длина линий ВЛ1 и ВЛ2, км
					Т1,Т2	Т3- Т4	Т5	
1	ТМ-400/10	2А3М1-630	4А200m6	4А20016	11	0,4	0,4	30
2	ТМ-1000/10	2А3М-1000	4А250s6	4А250s2	6,6	0,69	0,4	25
3	ТМ-1600/10	2А3М-1250	4А315s4	4А20016	11	0,69	0,4	20
4	ТМ-1600/10	2А3М-1600	4А200m2	4А280m2	11	0,4	0,4	18
5	ТМ-630/10	2А3М-2000	4А250m4	4А132m2	6,6	0,4	0,4	22
6	ТМ-630/10	2А3М1-630	4А160m6	4А250s6	6,6	0,69	0,4	35
7	ТМ-400/10	2А3М1-800	4А132m2	4А132s4	11	0,4	0,4	15
8	ТМ-1000/10	2А3М-1250	4А280s4	4А200m2	6,6	0,69	0,4	32
9	ТМ-1600/10	2А3М-1000	4А280m2	4А250s6	11	0,4	0,4	24
0	ТМ-1000/10	2А3М1-630	4А250s2	4А250m6	6,6	0,69	0,4	15

Примечание: Линии Л1 и Л2 выполнены сталеалюминевым проводом сечением 70 мм¹, их погонные активное и индуктивное сопротивления прямой последовательности равны соответственно 0,428 и 0,444 Ом/км.

ТРАНСФОРМАТОРЫ ДВУХОБМОТОЧНЫЕ

Продолжение прил. 1

Данные по двухобмоточным трансформаторам сведены в табл.П1.5-П1.6.

S_H - номинальная мощность, МВ·А.

U_K - напряжение короткого замыкания, %.

ΔP_K - потери короткого замыкания, МВт.

U_{BH} - номинальное напряжение обмотки высшего напряжения, кВ.

U_{HH} - номинальное напряжение обмотки низшего напряжения, кВ.

A - шаг регулирования напряжения, %.

N - число ответвлений обмотки высшего напряжения в каждую сторону от основного ответвления.

$ССО$ - схема соединения обмоток (Y - звезда, Δ - треугольник).

R_{T0} - активное сопротивление нулевой последовательности трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y₀, приведенное к стороне 0,4 кВ, мОм.

X_{T0} - индуктивное сопротивление нулевой последовательности трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y₀, приведенное к стороне 0,4 кВ, мОм.

$F_{каб}$ - сечение кабельной линии для питания трансформатора, мм².

L_K - длина линии, км.

$I_{ном}$ - номинальный ток автоматического выключателя, установленного на стороне НН трансформатора, А.

$I_{ш.ном}$ - номинальный ток шинпровода РУ 0,4 (0,69) кВ, А.

Таблица П1.5

Тип	S_H	U_K	ΔP_K	U_{BH}	U_{HH}	A	N	$ССО$	R_{T0}	X_{T0}
ТМН-6300/110	6,3	10,5	0,044	115	6,6; 11	1,78	9	Y/ Δ	-	-
ТДН-10000/110	10,0	10,5	0,058	115	6,6; 11	1,78	9	Y/ Δ	-	-
ТДН-16000/110	16,0	10,5	0,085	115	6,6; 11	1,78	9	Y/ Δ	-	-
ТРДН-25000/110	25,0	10,5	0,120	115	6,3; 10,5	1,78	9	Y/ Δ	-	-
ТРДН-40000/110	40,0	10,5	0,170	115	6,3; 10,5	1,78	9	Y/ Δ	-	-
ТМ-400/10	0,4	4,5	0,0059	6; 10	0,4; 0,69	2,5	2	Δ /Y; Y/Y	55,6	149
ТМ-630/10	0,63	5,5	0,0085	6; 10	0,4; 0,69	2,5	2	Δ /Y; Y/Y	30,2	95,8
ТМ-1000/10	1,0	5,5	0,0122	6; 10	0,4; 0,69	2,5	2	Δ /Y; Y/Y	19,1	60,6
ТМ-1600/10	1,6	5,5	0,018	6; 10	0,4; 0,69	2,5	2	Δ /Y; Y/Y	16,3	50
ТМ-2500/10	2,5	5,5	0,025	6; 10	0,4; 0,69	2,5	2	Δ /Y; Y/Y	-	-

Таблица П1.6

Тип	$F_{каб}$	L_K	$I_{ном}$	$I_{ном}$
ТМ-400/10	25/16	0,2	630/1000	630/1250
ТМ-630/10	35/25	0,25	1000/1600	1250/1600
ТМ-1000/10	70/50	0,3	1600/2500	1600/2500
ТМ-1600/10	95/70	0,4	2500/4000	2500/4000
ТМ-2500/10	150/120	0,5	-	-

Примечание: Сечение линий в числителе при $U_{BH} = 6$ кВ, в знаменателе при $U_{BH} = 10$ кВ. Номинальные токи автоматических выключателей и шинпроводов в числителе при $U_{HH} = 0,69$ кВ, в знаменателе при $U_{HH} = 0,4$ кВ.

СИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Продолжение прил. 1

Данные по синхронным двигателям сведены в табл. П1.7-П1.8.

P_H - номинальная мощность, МВт.

$\cos \varphi_n$ - номинальный коэффициент мощности.

η_n - номинальный КПД, отн. ед..

M_n^* - начальный пусковой момент, отн. ед.

M_{B^*} - номинальный входной момент в синхронизм, отн. ед.

M_{max^*} - максимальный синхронный вращающий момент, отн. ед.

I_n^* - начальный пусковой ток, отн. ед.

$U_{в.ном}$ - номинальное напряжение возбуждения, кВ.

$I_{в.ном}$ - номинальный ток возбуждения, кА.

M_{θ^*} - начальный момент сопротивления механизма, отн. ед.

α - показатель степени, определяющий зависимость момента сопротивления механизма от скорости вращения.

$n_{ном}$ - номинальная частота вращения, об/мин.

$M_{max}, M_{max.м}$ - маховые моменты двигателя и механизма, Н·м·м.

J_{UF} - признак типа возбудительного устройства (ВУ): 1 - бесщёточное ВУ, 2 - статическое ВУ;

если $J_{UF} > 0$, то подача возбуждения в конце разгона двигателя осуществляется по току статора;

если $J_{UF} < 0$, то возбуждение подается по скольжению.

K_f - коэффициент форсировки возбуждения.

$U_{ном}$ - номинальное напряжение, кВ.

$I_{ном}$ - номинальный ток, А.

$F_{каб}$ - сечение кабельной линии к двигателю, мм².

L_K - длина линии, км.

Таблица П1.7

Тип	P_H	$\cos \varphi_n$	η_n	M_n^*	M_{B^*}	M_{max^*}	I_n^*	$U_{в.ном}$	$I_{в.ном}$
СТД-630	0,63	0,9	0,958	2,03	0,97	2,08	5,66	0,031	0,245
СТД-800	0,8	0,9	0,96	2,01	0,97	2,07	5,58	0,036	0,274
СТД-1000	1,0	0,9	0,963	2,41	1,2	2,49	6,7	0,041	0,284
СТД-1250	1,25	0,9	0,968	2,07	1,27	2,24	6,48	0,046	0,253
СТД-1600	1,6	0,9	0,969	2,16	1,37	2,37	6,79	0,054	0,277
СТД-2000	2,0	0,9	0,969	2,22	1,4	2,45	6,91	0,061	0,291
СТД-2500	2,5	0,9	0,972	1,75	1,34	2,11	6,16	0,077	0,248
СТД-5000	2,5	0,9	0,975	2,07	1,3	2,33	7,22	0,081	0,254

Таблица П1.8

Тип	M_{θ^*}	α	$n_{ном}$	M_{max}	$M_{max.м}$	J_{UF}	K_f	$U_{ном}$	$I_{ном}$	$F_{каб}$	L_K
СТД-630	0,5	2,0	3000	0,212	0,212	2	1,8	6/10	71/42	50/35	0,2
СТД-800	0,5	2,0	3000	0,224	0,224	2	1,8	6/10	89/54	70/50	0,25
СТД-1000	0,5	2,0	3000	0,24	0,24	2	1,8	6/10	112/67	95/50	0,3
СТД-1250	0,5	2,0	3000	0,408	0,408	2	1,8	6/10	135/82	120/70	0,35
СТД-1600	0,5	2,0	3000	0,448	0,448	2	1,8	6/10	178/107	150/95	0,4
СТД-2000	0,5	2,0	3000	0,492	0,492	2	1,8	6/10	220/133	185/120	0,45
СТД-2500	0,5	2,0	3000	0,92	0,92	2	1,8	6/10	276/166	240/150	0,5
СТД-5000	0,5	2,0	3000	0,925	0,925	2	1,8	6/10	-/329	-/2*150	0,45

$P_{ном}$ - номинальная мощность, МВт.

$\cos \varphi_n$ - номинальный коэффициент мощности.

η_n - номинальный КПД, отн. ед..

$S_{ном}$ - номинальное скольжение, отн. ед..

I_n^* - начальный пусковой ток, отн. ед..

M_n^* - начальный пусковой момент, отн. ед..

M_{max}^* - максимальный вращающий момент, отн. ед..

M_{θ^*} - начальный момент сопротивления механизма, отн. ед..

α - показатель степени, определяющий зависимость момента сопротивления механизма от скорости вращения.

$n_{ном}$ - номинальная частота вращения, об/мин..

M_{max} , $M_{max.m}$ - маховые моменты двигателя и механизма, Н·м·м.

$U_{ном}$ - номинальное напряжение, кВ.

$I_{ном}$ - номинальный ток, А.

$F_{каб}$ - сечение кабельной линии к двигателю, мм².

L_K - длина линии, км.

R_1 - активное сопротивление обмотки статора, отн. ед..

R_2' - приведённое к обмотке статора активное сопротивление обмотки ротора при скольжении, равно единице, отн. ед.

$I_{ном.в}$ - номинальный ток автоматического выключателя на линии к двигателю, А. В обозначении типа двигателей серии 2АЗМ "А", "З" и "М" - русские буквы. В обозначении типа двигателей серии 4А буква "А" - латинская.

Таблица П1.9

Тип	$P_{ном}$	$\cos \varphi_n$	η_n	$S_{ном}$	I_n^*	M_n^*	M_{max}^*
2АЗМ1-630	0,63	0,9	0,955	0,01	5,2	1,1	1,9
2АЗМ1-800	0,8	0,9	0,958	0,01	5,2	1,1	1,9
2АЗМ-1000	1,0	0,89	0,958	0,01	5,0	1,1	1,9
2АЗМ-1250	1,25	0,89	0,963	0,00833	5,5	1,3	2,1
2АЗМ-1600	1,6	0,9	0,965	0,00833	5,5	1,3	2,1
2АЗМ-2000	2,0	0,91	0,965	0,00833	4,8	0,8	2,1
2АЗМ-2500	2,5	0,92	0,969	0,00833	5,3	0,9	2,3
2АЗМ-3200	3,2	0,91	0,968	0,005	5,2	0,9	2,6
4А132s4	0,0075	0,87	0,95	0,024	7,5	2,2	3,0
4А132m2	0,011	0,9	0,95	0,023	7,5	1,7	2,8
4А160m6	0,015	0,9	0,95	0,026	6,0	1,2	2,0
4А160m4	0,0185	0,9	0,95	0,022	7,0	1,4	2,3
4А200m6	0,022	0,9	0,9	0,023	6,5	1,3	2,4
4А20016	0,030	0,91	0,91	0,021	6,5	1,3	2,4
4А200m2	0,037	0,91	0,915	0,019	7,5	1,4	2,5
4А250s6	0,045	0,91	0,915	0,014	6,5	1,2	2,1
4А250m6	0,055	0,92	0,92	0,013	6,5	1,3	2,1
4А250s2	0,075	0,92	0,9	0,014	7,5	1,2	2,5
4А250m4	0,090	0,92	0,915	0,013	7,0	1,2	2,3
4А280s4	0,110	0,92	0,92	0,023	6,0	1,2	2,0
4А280m2	0,132	0,92	0,92	0,02	7,0	1,2	2,2
4А315s4	0,160	0,92	0,95	0,014	6,5	1,3	2,2
4А355m2	0,315	0,92	0,945	0,01	6,5	1,2	2,2

Таблица П1.10

Тип	M_0^*	α	$n_{ном}$	M_{max}	$M_{max.m}$
2А3М1-630	0,5	2,0	2970	0,035	0,035
2А3М1-800	0,5	2,0	2970	0,045	0,045
2А3М-1000	0,5	2,0	2970	0,073	0,073
2А3М-1250	0,5	2,0	2975	0,09	0,09
2А3М-1600	0,5	2,0	2975	0,102	0,102
2А3М-2000	0,5	2,0	2975	0,1532	0,1532
2А3М-2500	0,5	2,0	2975	0,18	0,18
4А132s4	0,5	2,0	1456,5	0,000112	0,000112
4А132m2	0,5	2,0	2931	0,000092	0,000092
4А160m6	0,5	2,0	974	0,00072	0,00072
4А160m4	0,5	2,0	1467	0,00052	0,00052
4А200m6	0,5	2,0	977	0,0016	0,0016
4А20016	0,5	2,0	979	0,0018	0,0018
4А200m2	0,5	2,0	2943	0,0006	0,0006
4А250s6	0,5	2,0	986	0,048	0,048
4А250m6	0,5	2,0	987	0,0052	0,0052
4А250s2	0,5	2,0	2958	0,00188	0,00188
4А250m4	0,5	2,0	1480,5	0,0048	0,0048
4А280s4	0,5	2,0	1465,5	0,0092	0,0092
4А280m2	0,5	2,0	2940	0,0048	0,0048
4А315s4	0,5	2,0	1479	0,0124	0,0124

Таблица П1.11

Тип	$U_{ном}$	$I_{ном}$	$F_{каб}$	L_K	R_1	R_2'	$I_{ном. в}$
2А3М1-630	6/10	71/42	50/35	0,15	-	-	
2А3М1-800	6/10	90/55	70/50	0,2	-	-	
2А3М-1000	6/10	115/68	95/50	0,25	-	-	
2А3М-1250	6/10	137/84	120/70	0,3	-	-	
2А3М-1600	6/10	180/110	150/95	0,35	-	-	
2А3М-2000	6/10	225/135	185/120	0,4	-	-	
2А3М-2500	6/10	270/162	240/150	0,45	-	-	
2А3М-3200	6/10	350/210	2*150/185	0,4	-	-	
4А132s4	0,38/0,66	14/8	10/6	0,02	0,048	0,040	25/25
4А132m2	0,38/0,66	20/12	16/10	0,025	0,040	0,028	25/25
4А160m6	0,38/0,66	27/16	25/16	0,03	0,062	0,045	50/25
4А160m4	0,38/0,66	34/20	25/16	0,02	0,042	0,037	50/50
4А200m6	0,38/0,66	40/23	35/25	0,025	0,050	0,042	50/50
4А20016	0,38/0,66	55/32	50/25	0,03	0,046	0,040	100/50
4А200m2	0,38/0,66	67/39	50/35	0,035	0,029	0,031	100/50
4А250s6	0,38/0,66	83/48	70/35	0,025	0,037	0,032	100/100
4А250m6	0,38/0,66	100/58	95/50	0,02	0,034	0,030	160/100
4А250s2	0,38/0,66	135/78	120/70	0,025	0,021	0,029	160/100
4А250m4	0,38/0,66	165/96	150/95	0,035	0,024	0,029	250/160
4А280s4	0,38/0,66	200/115	185/95	0,03	0,023	0,048	250/160
4А280m2	0,38/0,66	245/142	2*120/150	0,025	0,017	0,031	400/160
4А315s4	0,38/0,66	290/170	2*150/185	0,03	0,018	0,045	400/250
4А355m2	0,38/0,66	551/317	2*185/240	0,045	-	-	-

ПАРАМЕТРЫ КАБЕЛЕЙ

Продолжение прил. 1

Кабели напряжением выше 1 кВ с алюминиевыми жилами с бумажной изоляцией и вязкой пропиткой.

Кабели напряжением до 1 кВ - четырехжильные в алюминиевой оболочке. Параметры кабелей сведены в табл. П1.12.

$F_{Каб}$ - сечение фазной жилы, мм².

$R_{ног}$ - погонное активное сопротивление прямой последовательности при 20°C, Ом/км.

$X_{ног}$ - погонное индуктивное сопротивление прямой последовательности, Ом/км.

I_c - погонный ёмкостный ток однофазного замыкания на землю, А/км.

$Z_{ног.n}$ - погонное полное сопротивление петли фаза-нуль кабелей напряжением до 1 кВ, мОм/м.

$U_{ном}$ - номинальное напряжение сети, в которой проложен кабель, кВ.

Таблица П1.12

$F_{Каб}$	$R_{ног}$	$X_{ног}$ при $U_{ном}$, кВ			I_c при 6	$U_{ном}$ 10	$Z_{ног.n}$
		до 1	6	10			
6	5,17	0,094	-	-	-	-	7,49
10	3,1	0,088	0,11	0,122	0,33	-	4,73
16	1,94	0,084	0,102	0,113	0,37	0,52	3,08
25	1,24	0,072	0,091	0,099	0,47	0,62	2,1
35	0,89	0,068	0,087	0,095	0,54	0,71	1,57
50	0,62	0,066	0,083	0,09	0,63	0,81	1,16
70	0,443	0,065	0,08	0,086	0,73	0,94	0,87
95	0,325	0,064	0,078	0,083	0,85	1,1	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	1,5	0,37
240	0,129	-	0,071	0,075	1,31	1,67	-

РЕАКТОРЫ ОДИНАРНЫЕ

Параметры одинарных реакторов сведены в табл. П1.13.

$X_{ном}$ - номинальное индуктивное сопротивление, Ом. $I_{ном}$ - номинальный ток, А.

$\Delta P_{ном}$ - номинальные потери активной мощности на фазу, кВт.

Таблица П1.13

Тип	$X_{ном}$	$I_{ном}$	$\Delta P_{ном}$
РБ 10-1000-0,14	0,14	1000	3,5
РБ 10-1000-0,22	0,22	1000	4,4
РБ 10-1600-0,20	0,20	1600	7,5
РБ 10-1600-0,35	0,35	1600	11,0

КОММУТАЦИОННЫЕ АППАРАТЫ И НЕПОДВИЖНЫЕ КОНТАКТЫ

Сопротивления автоматических выключателей (суммарное сопротивление катушек и контактов) и неподвижных контактных соединений приведены в таблицах П1.14 и П1.15 соответственно.

$I_{ном.в}$ - номинальный ток автоматического выключателя, А.

$I_{ш.ном}$ - номинальный ток шинпровода, А.

$R_г$ - активное сопротивление автоматического выключателя, мОм.

$X_г$ - индуктивное сопротивление автоматического выключателя, кВт.

F - сечение кабеля, мм².

R_K - сопротивление контакта, мОм.

Таблица П1.14

$I_{ном.в}$	Автоматический выключатель	
	$R_г$	$X_г$
50	8,3	4,5
70	4,5	2
100	2,9	1,2
140	1,95	0,7
200	1,7	0,5
400	1,05	0,17
600	0,66	0,13
1000	0,37	0,1
1600	0,14	0,08
2500	0,13	0,07
4000	0,1	0,05

Таблица П1.15

Алюминиевый кабель с автоматическим выключателем		Шинопровод с автоматическим выключателем	
F	R_K	$I_{ш.ном}$	R_K
16	0,085	250	0,009
25	0,064	400	0,006
35	0,056	630	0,004
50	0,043	1600	0,0034
70	0,029	2500	0,0024
95	0,027	4000	0,0012
120	0,024		
150	0,021		
240	0,012		

Примечание: При приближенном учете сопротивлений контактов можно принимать эти сопротивления равными 0,1 мОм для кабелей, 0,01 мОм для шинпроводов и 1 мОм для коммутационных аппаратов.

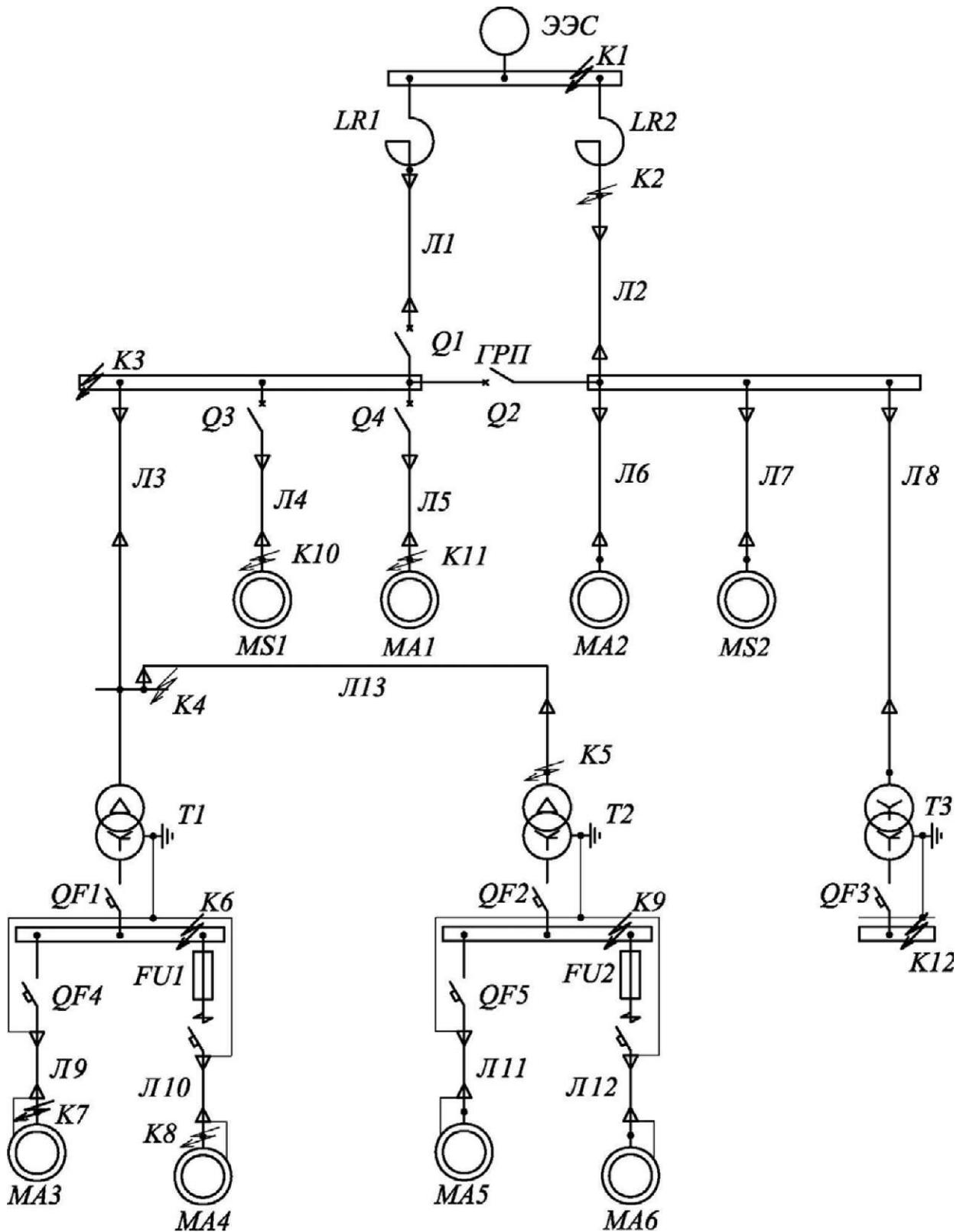


Рис.П 1.3. Расчетная схема СЭС ПП №3

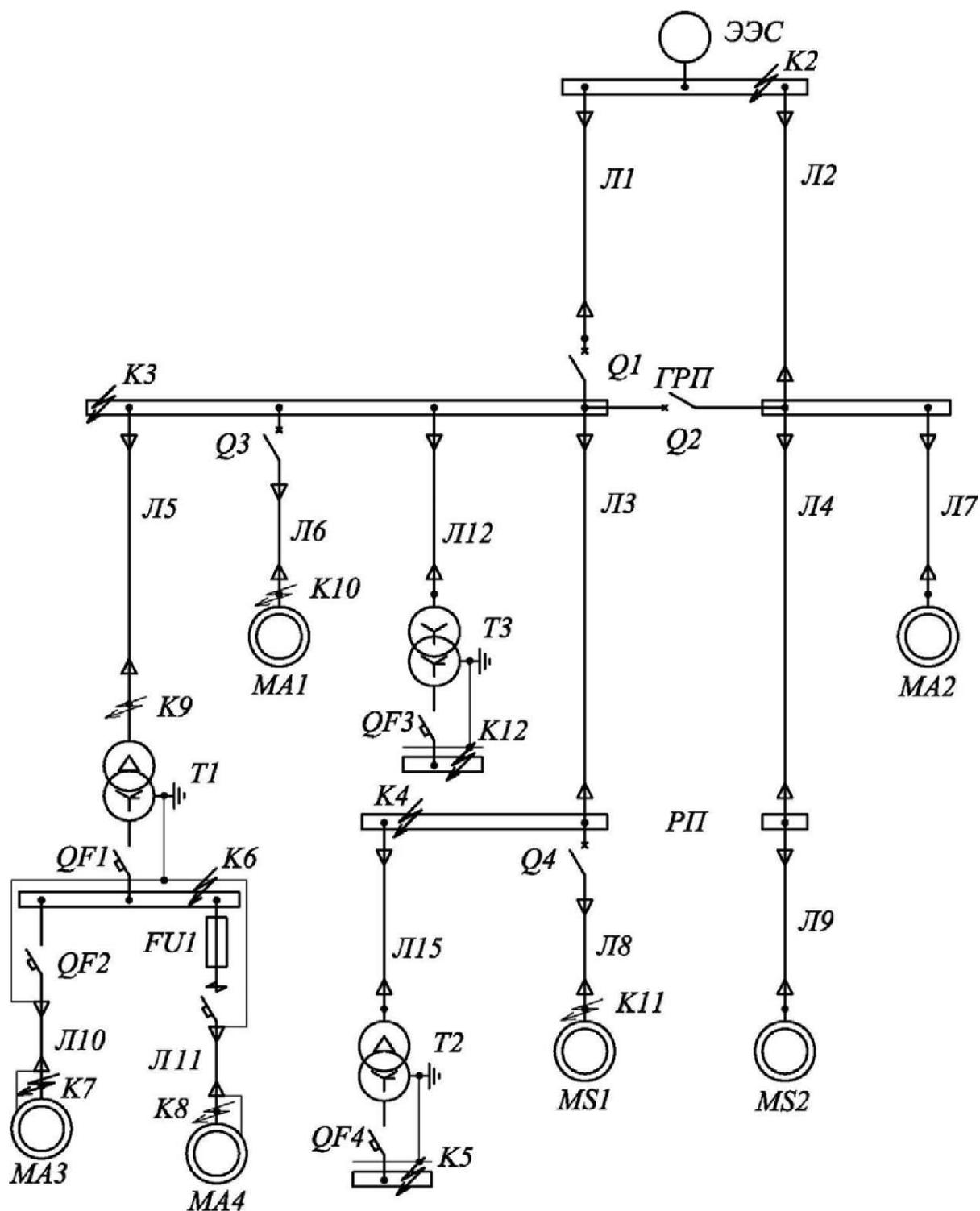


Рис.П 1.3. Расчетная схема СЭС ПП №3

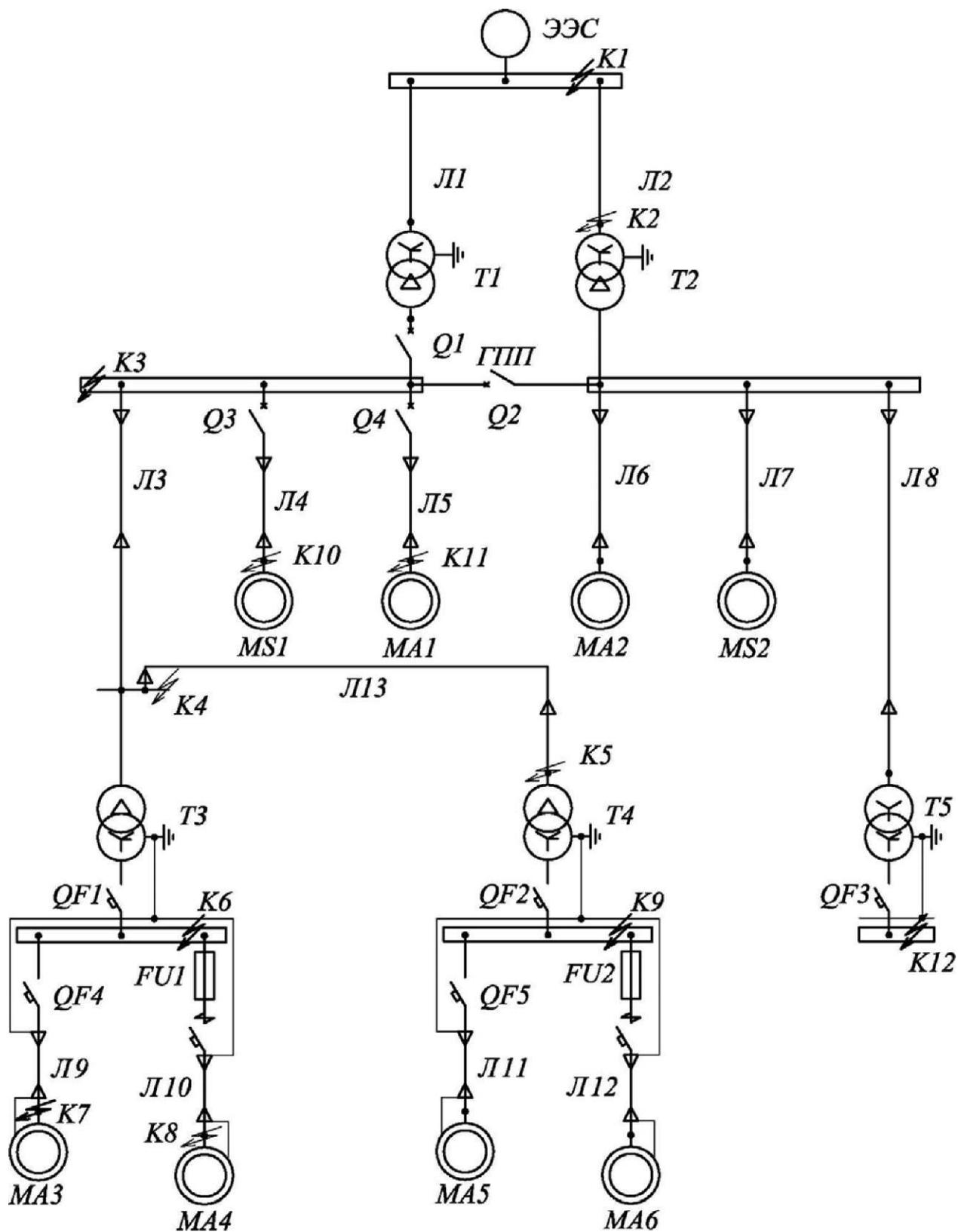


Рис.П 1.3. Расчетная схема СЭС ПП №3

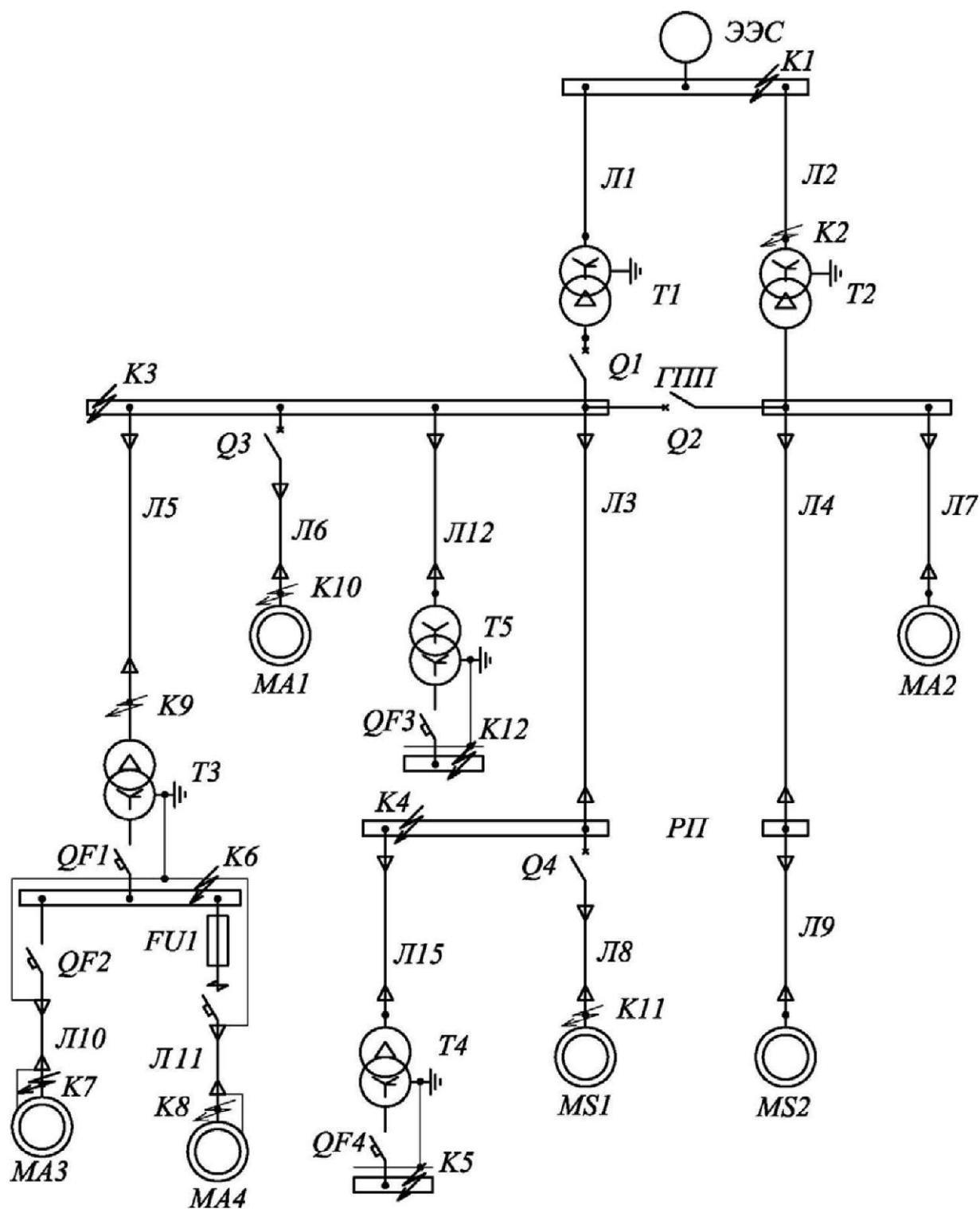


Рис.П1.4. Расчетная схема СЭС ПП №4

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Содержание курсовой работы дано в соответствии с вариантом схемы в табл.П2.1.

Таблица П2.1

Точка КЗ	Вид КЗ	Элемент СЭС ПП, по которому нужно определить протекающий начальный сверхпереходный ток КЗ			
		Схема 1	Схема 2	Схема 3	Схема 4
К1	$K^{(3)}, K^{(2)}$	от ЭЭС	-	от ЭЭС	от ЭЭС
К2	$K^{(3)}, K^{(2)}$	LR2	от ЭЭС	Л2	Л2
K_3^2	$K^{(3)}$	Л2, Л3, Л4, Л5, Л6, Л7, в месте КЗ	Л2, Л3, Л4, Л5, Л6, Л7, в месте КЗ	Т _{2нн} ¹ , Л2, Л3, Л4, Л5, Л6, Л7, в месте КЗ	Т _{2нн} ¹ , Л2, Л3, Л4, Л5, Л6, Л7, в месте КЗ
	$K^{(2)}$	Л2	Л2	Т _{2нн} , Л2	Т _{2нн} , Л2
	3(1) 2)	в месте замыкания	в месте замыкания	в месте замыкания	в месте замыкания
К4	$K^{(3)}, K^{(2)}$	Л3	Л3	Л3	Л3
К5	$K^{(3)}, K^{(2)}$	Л13	Л15	Л13	Л15
	$K^{(1)}$	-	Л15	-	Л15
K_6^3	$K^{(3)}$	Т _{1нн} , Л3, Л9, Л10, в месте КЗ	Т _{1нн} , Л5, Л10, Л11, в месте КЗ	Т _{3нн} , Л3, Л9, Л10, в месте КЗ	Т _{3нн} , Л5, Л10, Л11, в месте КЗ
	$K^{(2)}, K^{(1)}$	Т _{1нн} , Л3	Т _{1нн} , Л5	Т _{3нн} , Л3	Т _{3нн} , Л5
К7	$K^{(3)}, K^{(2)}, K^{(1)}$	Л3, Л9	Л5, Л10	Л3, Л9	Л5, Л10
К8	$K^{(3)}, K^{(2)}, K^{(1)}$	Л3, Л10	Л5, Л11	Л3, Л10	Л5, Л11
К9	$K^{(3)}, K^{(2)}$	Л13	Л5	Л13	Л5
	$K^{(1)}$	Л13	-	Л13	-
К10	$K^{(3)}, K^{(2)}$	Л4	Л6	Л4	Л6
К11	$K^{(3)}, K^{(2)}$	Л5	Л8	Л5	Л8
К12	$K^{(3)} K^{(2)} K^{(1)}$	Т _{3нн} , Л8	Т _{3нн} , Л12	Т _{5нн} , Л8	Т _{5нн} , Л12

Примечание: 1) Т_{2нн} - необходимо определить ток на стороне низшего напряжения соответствующего трансформатора

2 для всех схем найти суммарные ударные токи при трехфазных КЗ в точках КЗ и К6.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев, В. А. Короткие замыкания и перегрузки в сетях напряжением до 1кВ и защита от них: учебное пособие / В. А. Андреев, В. Ф. Шишкин. - Ульяновск : УлГТУ, 1996. - 88 с.
2. Андреев, В. А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: учебное пособие / В. А. Андреев. - Ульяновск : УлГТУ, 2000. - 284 с.
3. ГОСТ 28249-93. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ. - М. : Изд-во стандартов, 1994. - 64 с.
4. Куликов, Ю. А. Переходные процессы в электрических системах : учебное пособие / Ю. А. Куликов. - Новосибирск : НГТУ, М. : Мир : ООО «Издательство АСТ», 2003. - 283 с.
5. Правила устройства электроустановок (седьмое издание). - М. : Омега-Л, 2007. - 268 с.
6. Ульянов, С. А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах : учебник для электротехнических и энергетических вузов и факультетов / С. А. Ульянов. - М. : Энергия, 1970. - 520 с.

Учебное издание

**Дубов А.Л.
Ганиев Р.Н.**

РАСЧЕТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ И ТОКОВ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ
«Электромагнитные переходные процессы
в электроэнергетических системах»**

Корректор Габдурахимова Т.М.
Худ. редактор Федорова Л.Г.

Сдано в набор 15.04.2013.
Подписано в печать 12.06.2013.
Бумага писчая. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 2,5. Тираж 100.
Заказ №27.

НХТИ (филиал) ФБГОУ ВПО «КНИТУ», г. Нижнекамск, 423570,
ул. 30 лет Победы, д. 5а

