

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РФ
ДЕПАРТАМЕНТ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ И ОБРАЗОВАНИЯ
ФГБОУ ВПО КОСТРОМСКАЯ ГСХА

Д.М. ОЛИН, Н.М. ПОПОВ

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Учебное пособие

Караево
Костромская ГСХА
2013

УДК 658.26 : 621.311

ББК 40.7 : 31.279

О 54

Авторы: сотрудники кафедры электроснабжения Костромской ГСХА к.т.н., доцент, зав. кафедрой электроснабжения *Д.М. Олин* и д.т.н., профессор кафедры электроснабжения *Н.М. Попов*.

Рецензент: д.т.н., профессор, зав. кафедрой информационных технологий в электроэнергетике *В.А. Солдатов*

Рекомендовано к изданию методической комиссией факультета электрификации и автоматизации сельского хозяйства, протокол № 2 от 6 марта 2013 г.

О 54 **Олин, Д.М.** Переходные процессы в электрических сетях : учебное пособие / Д.М. Олин, Н.М. Попов. — Караваево : Костромская ГСХА, 2013. — 103 с.

В издании рассмотрены расчёты токов короткого замыкания в электроэнергетических системах в рабочих и аварийных режимах, расчёты электрических и электромагнитных переходных процессов. Показаны определения электродинамического и термического воздействий на оборудование электрических сетей.

Учебное пособие предназначено для студентов 3-4 курсов направления подготовки 110800.62 «Агроинженерия» и 140400.62 «Электроэнергетика и электротехника» очной и заочной форм обучения.

УДК 658.26 : 621.311

ББК 40.7 : 31.279

© ФГБОУ ВПО Костромская ГСХА, 2013

© Д.М. Олин, Н.М. Попов, 2013

© РИО Костромской ГСХА, оформление, 2013

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	5
1. Общие сведения о переходных процессах.....	6
2. Установившееся трёхфазное короткое замыкание в сети без учёта тока нагрузки.....	10
2.1. Первый установившийся режим.....	10
2.2. Второй установившийся режим.....	12
3. Переходный процесс при внезапном коротком замыкании.....	14
3.1. Ударный ток короткого замыкания.....	18
3.2. Переходный процесс в сети при коротком замыкании с учётом тока нагрузки.....	19
3.3. Изменение тока в индуктивной нагрузке при коротком замыкании на выводах.....	21
4. Методы преобразования и упрощения схем замещения.....	23
5. Расчёт сопротивлений трёхобмоточного трансформатора.....	26
6. Расчёт токов короткого замыкания в именованных единицах.....	28
6.1. Короткое замыкание на удалённом участке линии.....	28
6.2. Короткое замыкание за трансформатором.....	28
6.3. Короткое замыкание в цепи, содержащей трансформатор и линию.....	29
6.4. Расчёт токов короткого замыкания в цепях с трансформаторными связями.....	30
6.5. Расчёт тока двухфазного короткого замыкания.....	32
7. Расчёт токов короткого замыкания в относительных единицах.....	34
7.1. Определение относительных номинальных величин.....	34
7.2. Ограничители токов короткого замыкания.....	34
7.3. Определение относительных базисных сопротивлений.....	36
7.4. Методика расчёта токов короткого замыкания в относительных единицах.....	38
8. Короткое замыкание вблизи генератора.....	41
8.1. Расчёт токов короткого замыкания по расчётным кривым.....	45
8.2. Особенности расчёта токов короткого замыкания в точках, питающихся от генераторов с АВР.....	46
8.3. Порядок определения тока короткого замыкания по расчётным кривым.....	46
9. Электродинамическое действие токов короткого замыкания.....	47
9.1. Электродинамические силы, действующие на проводники линии электропередачи.....	47
9.2. Проверка проводов линии электропередач на схлёстывание.....	49
9.3. Проверка шин на электродинамическую стойкость.....	49
9.4. Проверка на электродинамическую устойчивость электрических аппаратов.....	50
10. Термическое действие токов нагрузки и токов короткого замыкания.....	51
10.1. Тепловые процессы в проводнике при нагревании и охлаждении.....	51
10.2. Определение температуры проводника при коротком замыкании.....	53
10.3. Проверка коммутационных аппаратов на термическую устойчивость.....	55
11. Применение теории симметричных составляющих для рассмотрения установившихся рабочих и аварийных режимов.....	56
11.1. Метод симметричных составляющих.....	56
11.2. Сопротивление элементов сети токам различных последовательностей.....	59
11.3. Однофазное короткое замыкание в сетях с глухозаземленной нейтралью.....	61

11.4. Расчёт токов однофазного короткого замыкания в сетях 0,38 кВ с глухозаземленной нейтралью.....	64
11.5. Изменение напряжения в сети при однофазном коротком замыкании.....	65
11.6. Способы увеличения величины тока однофазного короткого замыкания.....	67
11.7. Влияние повторных заземлений на процесс однофазного короткого замыкания.....	67
11.8. Изменение напряжения вдоль линии при однофазном коротком замыкании.....	69
11.9. Изменение тока в трансформаторе при однофазном коротком замыкании.....	71
11.10. Обрывы фазных проводов.....	73
11.11. Влияние обрыва фазы на работу неэлектродвигательной нагрузки.....	78
11.12. Работа электродвигателя при обрыве фазы.....	78
11.13. Двухфазное короткое замыкание.....	80
12. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью.....	83
12.1. Металлическое замыкание на землю.....	83
12.2. Обнаружение замыканий на землю.....	85
12.3. Замыкание на землю через переходное сопротивление.....	87
12.4. Последствия замыканий на землю.....	88
12.5. Отыскание замыкания на землю.....	90
12.6. Пути снижения токов замыкания на землю.....	90
13. Переходный процесс при включении трансформатора на холостом ходу.....	93
Список рекомендуемых источников.....	99
Приложения.....	100

ПРЕДИСЛОВИЕ

Основу учебного пособия составили конспекты лекций по дисциплине «Переходные процессы», которые читают авторы в Костромской государственной сельскохозяйственной академии в течение нескольких лет.

В учебном пособии рассмотрены общие сведения о переходных процессах токов и напряжений, возникающих в аварийных режимах электрических сетей. Дана классификация аварийных режимов в сетях разного класса напряжения.

Приведённая теория позволяет сформировать общие представления о расчёте токов и напряжений в рабочих и аварийных режимах методами именованных и относительных единиц. Рассматриваются особенности расчёта токов короткого замыкания при питании от генераторов мощностью до 150 МВА.

Также рассмотрены вопросы теории нагрева проводников и аппаратов при коротком замыкании и возникающие при этом электродинамические силы.

Часть учебного пособия посвящена рассмотрению коротких замыканий и обрывов фазных проводов с применением теории симметричных составляющих.

Рассмотрена теория по замыканиям на землю, их последствия, а также отыскание замыканий на землю и пути снижения токов замыкания на землю.

С целью самостоятельной проверки изучаемого материала в конце каждой главы представлены контрольные вопросы.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССАХ

Переходные процессы возникают в сетях в результате аварийных режимов, перегрузок и резком изменении нагрузочных режимов.

Переходным процессом называется изменение токов и напряжений при переходе системы из одного установившегося состояния в другое.

Аварийным режимом называется такое, не предусмотренное эксплуатационными характеристиками, изменение состояния сети, результатом которого является резкое изменение токов или напряжений, из-за чего создаётся угроза выхода из строя потребителей или участков сети, а также создаётся угроза для жизни людей и животных. Аварийные режимы — это, чаще всего, короткие замыкания (КЗ) или обрывы проводов.

Короткое замыкание — это режим, при котором происходит соединение разнополярных проводников, находящихся под напряжением, через малое переходное сопротивление, не предусмотренное режимом работы электрической сети.

Перегрузка — это режим, при котором в проводниках линий электропередачи, машин и аппаратов возникают токи, превышающие величины, допускаемые нормами.

Основным признаком, по которому КЗ отличается от перегрузки, является момент нарушения изоляции в процессе режима работы. При коротком замыкании нарушение изоляции предвещает начало аварийного режима, а при перегрузке является возможным следствием.

В зависимости от исполнения сети возможны различные виды как металлических коротких замыканий, так и замыканий через переходные сопротивления (рис. 1.1) [1].



Рис. 1.1. Виды повреждений в сетях 0,38...35 кВ

В сетях с изолированной нейтралью замыкания на землю не являются аварийным режимом, требующим немедленного отключения участка с повреждением (рис. 1.2).

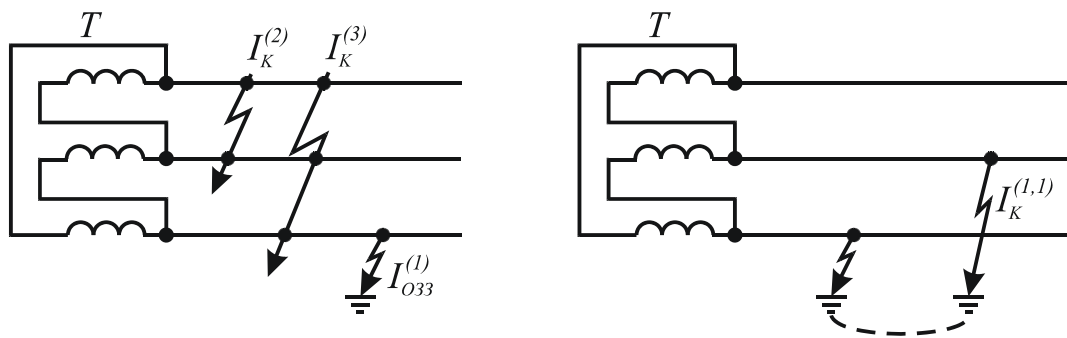


Рис. 1.2. Короткие замыкания в сетях с изолированной нейтралью 6, 10, 35 кВ

В электрических сетях 0,38 кВ, а также 110 кВ и выше, работающих с глухим заземлением нейтрали, возможны междуфазные и однофазные короткие замыкания (рис. 1.3).

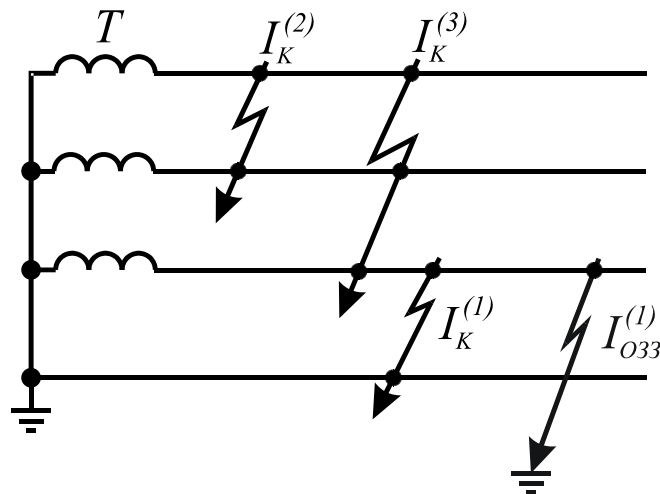


Рис. 1.3. Короткие замыкания в сетях с глухим заземлением нейтрали 110 кВ и выше, а также 0,38 кВ

Причинами аварийных режимов в основном являются:

- ошибочное действие персонала при оперативных и ремонтных переключениях;
- дефекты монтажа;
- падение деревьев на линии электропередачи (ЛЭП);
- нарушение габаритов ЛЭП в процессе эксплуатации (габарит для воздушной линии (ВЛ) 0,38 кВ составляет не менее 6 м);
- умышленное нарушение работы оборудования;
- схлёстывание проводов под действием ветра;
- механические повреждения опор и обрывы проводов транспортными средствами;
- пробой изоляции, причинами которых являются:
 - повышение сетевого напряжения;
 - грозовые перенапряжения;
 - заводские дефекты изготовления;
 - механические повреждения из-за резких перегибов;
 - старение изоляции;
 - внешний или внутренний перегрев изоляции;
 - загрязнение изоляции бытовыми и промышленными выбросами.

Причины обрыва проводов:

- приложение к проводам усилий, превышающих пределы прочности;
- ослабление контактного давления в месте соединения проводников;
- увеличение оксидной пленки на контактных поверхностях;
- электрохимическая коррозия при соединении медных и алюминиевых проводников без промежуточных специальных клемм или шайб.

Контрольные вопросы

1. Что называется переходным процессом?
2. Что называется аварийным режимом?
3. Что называется коротким замыканием?
4. Что называется перегрузкой?
5. Чем отличается режим перегрузки от режима короткого замыкания?
6. Какие виды коротких замыканий возможны в сети с изолированной нейтралью?
7. Какие виды коротких замыканий возможны в сети с глухозаземлённой нейтралью?
8. Назовите основные причины возникновения аварийных режимов.

2. УСТАНОВИВШЕЕСЯ ТРЁХФАЗНОЕ КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ В СЕТИ БЕЗ УЧЁТА ТОКА НАГРУЗКИ

Обычно короткое замыкание рассматривается в месте подключения нагрузки или аппарата (рис. 2.1).

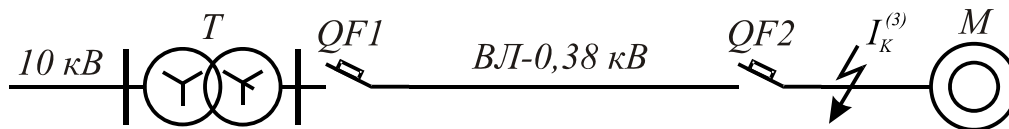


Рис. 2.1. Короткое замыкание перед потребителем

При расчёте токов короткого замыкания без учёта тока нагрузки состояние токов и напряжений в сети можно разделить на два режима:

- 1) первый установившийся режим, при котором протекает ток нагрузки;
- 2) второй установившийся режим, при котором протекает ток короткого замыкания.

2.1. Первый установившийся режим

Рассмотрим простейшую сеть, включающую трансформатор и линию электропередачи. Эта сеть обеспечивает питание потребителей (см. рис. 2.1).

Для сети 0,38 кВ и нагрузки составим схему замещения (рис. 2.2). В схеме замещения трансформатор представлен активным R_T и реактивным X_T сопротивлениями, линия электропередачи соответственно сопротивлениями R_L и X_L , нагрузка — R_H и X_H .

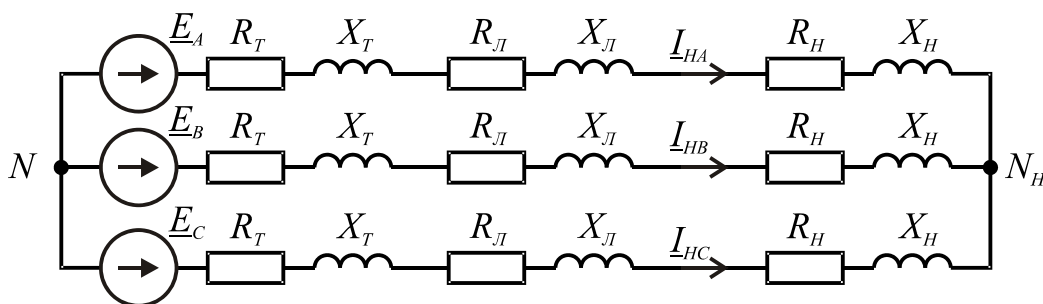


Рис. 2.2. Схема замещения

В трёхфазных сетях любые режимы удобно анализировать в виде векторных диаграмм токов и напряжений. Векторная диаграмма первого установившегося режима представлена на рисунке 2.3.

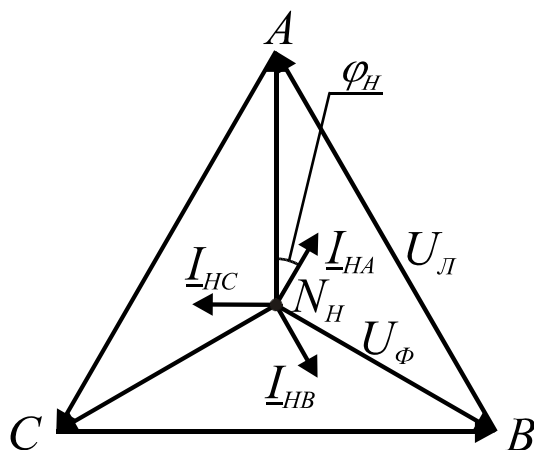


Рис. 2.3. Векторная диаграмма токов и напряжений первого установившегося режима

Ток нагрузки можно определить:

$$I_H = \frac{U_L}{\sqrt{3} \sqrt{(R_L + R_H)^2 + (X_L + X_H)^2}} = \frac{U_\phi}{\sqrt{(R_L + R_H)^2 + (X_L + X_H)^2}},$$

где U_L, U_ϕ — линейное и фазное напряжение, В;

R_L, R_H — активное сопротивление линии электропередачи и нагрузки, Ом;

X_L, X_H — реактивное сопротивление линии электропередачи и нагрузки, Ом.

Если необходимо учесть влияние трансформатора на ток нагрузки, то нужно учесть его сопротивление в расчётах (см. рис. 2.2).

Ток нагрузки протекает в каждой фазе под действием разности потенциалов (фазного напряжения) между точками A и N_H, B и N_H, C и N_H :

$$I_H = \frac{U_L}{\sqrt{3} Z_\Sigma},$$

где Z_Σ — полное сопротивление трансформатора.

Суммарное сопротивление определится:

$$Z_\Sigma = \sqrt{(R_T + R_L + R_H)^2 + (X_T + X_L + X_H)^2}.$$

Для приближённых расчётов можно использовать сложение модулей сопротивлений:

$$Z_\Sigma = Z_T + Z_L + Z_H.$$

Сопротивление трансформатора при этом необходимо определять на стороне низшего напряжения.

Итоговая схема замещения значительно упрощается (рис. 2.4, а).

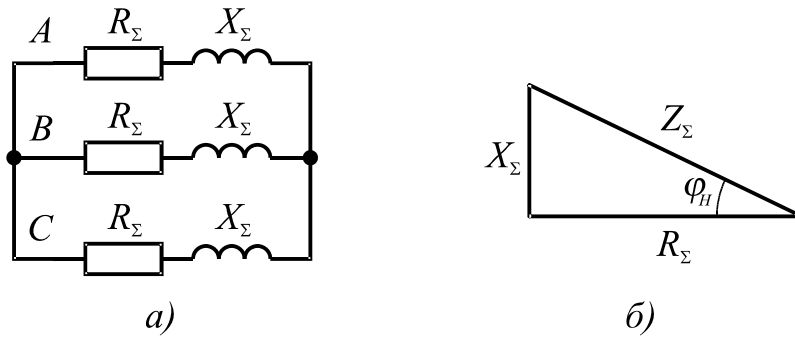


Рис. 2.4. Итоговая схема замещения (а) и векторная диаграмма (б)

Из треугольника сопротивлений угол между током в фазе и фазным напряжением (см. рис. 2.4, б), под действием которого протекает ток, определится по формуле

$$\varphi_H = \arctg \frac{X_T + X_L + X_H}{R_T + R_L + R_H}.$$

2.2. Второй установившийся режим

При коротком замыкании на шинах нагрузки ток короткого замыкания будет ограничиваться только сопротивлениями трансформатора и линии (рис. 2.5):

$$I_K = \frac{U_L}{\sqrt{3}(Z_T + Z_L)}.$$

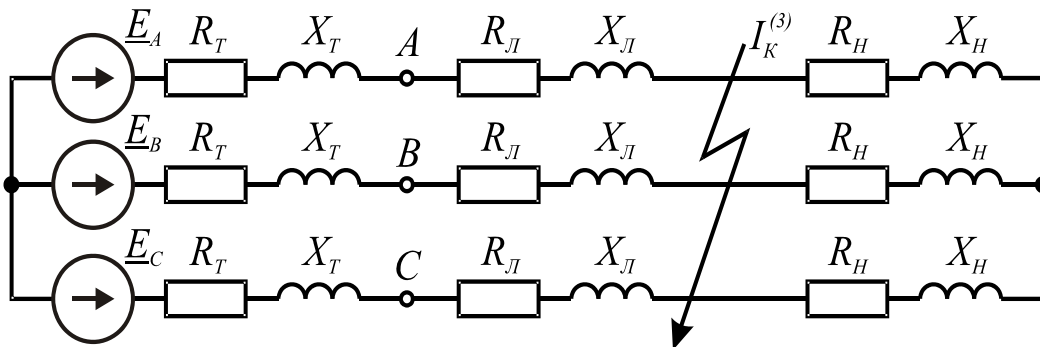


Рис. 2.5. Схема замещения второго установившегося режима

Угол между током и напряжением будет зависеть от соотношения реактивного и активного сопротивлений до точки КЗ (рис. 2.6):

$$\varphi_K = \arctg \frac{X_T + X_L}{R_T + R_L} = \arctg \frac{X_K}{R_K},$$

где X_K, R_K — реактивное и активное сопротивления от источника до точки КЗ.

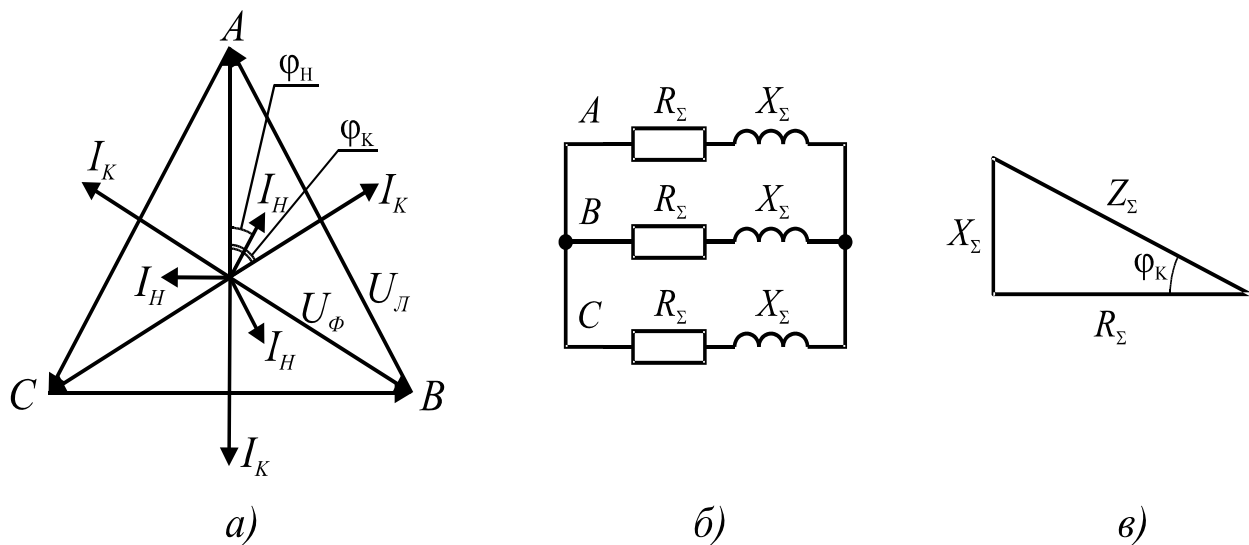


Рис. 2.6. Второй установившийся режим:
 а — векторная диаграмма; б — свёрнутая схема замещения;
 в — треугольник сопротивлений

Контрольные вопросы

1. Что показывает угол тока нагрузки?
2. От чего зависит величина угла тока нагрузки?
3. В каких режимах рассматривается взаимное расположение векторов токов и напряжений в электрической сети?
4. Как вычислить угол между напряжением и током при коротком замыкании?

3. ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС ПРИ ВНЕЗАПНОМ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ

При рассмотрении переходных процессов в электрических сетях принимаются следующие допущения:

- точка КЗ питается от источника неограниченной мощности;
- все фазы имеют одинаковое активно-индуктивное сопротивление;
- частота тока в сети при КЗ не изменяется.

При рассмотрении коротких замыканий часто принимается, что точка КЗ получает питание от источника неограниченной мощности.

Источником неограниченной мощности называется такая точка в сети, в которой при любом режиме работы потребителя напряжение изменяется не более чем на 5%.

Напряжение в сети изменяется по синусоидальному закону, тогда мгновенное значение напряжения в любой момент времени определится [2]:

$$u = U_m \sin \omega t,$$

где U_m — амплитудное значение напряжения сети.

Напряжение сети в любой момент времени можно вычислить:

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_K),$$

где ω — угловая скорость поворота ротора турбогенератора или угловая скорость поворота вектора тока или напряжения против часовой стрелки, рад/с;

ωt — угол поворота ротора турбогенератора за время t ;

ψ_K — начальная фаза короткого замыкания по напряжению (рис. 3.1).

Начальная фаза — это угол от момента перехода синусоиды через нуль при возрастании мгновенных значений до момента возникновения КЗ (рис. 3.1).

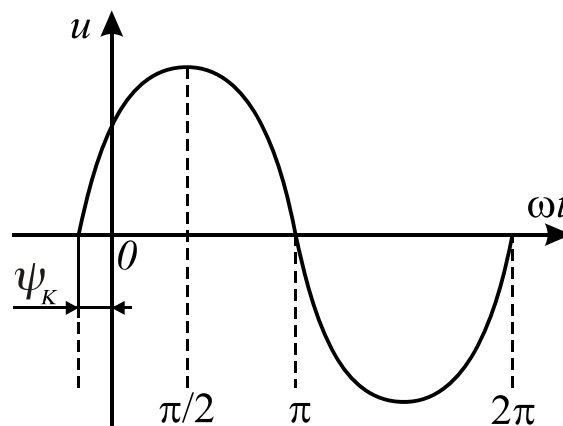


Рис. 3.1. Начальная фаза короткого замыкания по напряжению

В любой момент времени напряжение источника уравнивается падением напряжения на активном сопротивлении нагрузки и напряжением самоиндукции индуктивного сопротивления:

$$U_m \sin(\omega t + \psi_K) = i_K R_K + L_K \frac{di_K}{dt},$$

где i_K — мгновенное значение полного тока КЗ в любой момент времени;
 L_K — индуктивность цепи короткого замыкания.

Получим неоднородное дифференциальное уравнение с левой частью, решение которого ищется в виде:

$$i_K = i_{KП} + i_{КА},$$

где $i_{KП}$ — периодическая (установившаяся) составляющая тока КЗ;
 $i_{КА}$ — аperiodическая (свободная) составляющая тока КЗ.

Найдём значение каждой составляющей тока короткого замыкания.

Периодическая составляющая устанавливается после завершения переходного процесса:

$$\begin{aligned} i_{KП} &= \frac{U_m}{Z_K} \sin(\omega t + \psi_K - \varphi_K) = \frac{U_m}{\sqrt{R_K^2 + X_K^2}} \sin(\omega t + \psi_K - \varphi_K) = \\ &= I_m \sin(\omega t + \psi_K - \varphi_K), \end{aligned}$$

где U_m, I_m — амплитудные значения напряжения и тока в сети;

φ_K — угол между током КЗ и напряжением, учитывает, что ток отстаёт от напряжения.

В итоге периодическую составляющую тока КЗ можно найти из выражения

$$i_{KП} = \sqrt{2} I_K^{(3)} \sin(\omega t + \psi_K - \varphi_K),$$

где $I_K^{(3)}$ — действующее значение трёхфазного тока короткого замыкания.

Аperiodическая (свободная) составляющая ищется из решения правой части однородного дифференциального уравнения путём приравнивания её к нулю:

$$i_K R_K + L_K \frac{di_K}{dt} = 0.$$

Уравнение решаем методом разделения переменных:

$$\frac{di_K}{dt} + \frac{R_K}{L_K} i_K = 0; \quad \frac{di_K}{dt} = -\frac{R_K}{L_K} i_K; \quad \frac{di_K}{i_K} = -\frac{R_K}{L_K} dt.$$

Проинтегрируем левые и правые части, принимая за постоянную интегрирования $\ln C$:

$$\int \frac{di_K}{i_K} = -\frac{R_K}{L_K} \int dt; \quad \ln i_K - \ln C = -\frac{R_K}{L_K} t; \quad \ln \frac{i_K}{C} = -\frac{R_K}{L_K} t; \quad \frac{i_K}{C} = e^{-\frac{R_K}{L_K} t}.$$

Апериодическая составляющая тока КЗ ищется из выражения

$$i_{KA} = C e^{-\frac{R_K}{L_K} t},$$

где C — постоянная интегрирования.

Значение постоянной интегрирования найдем в момент времени $t = 0$ из выражения полного тока КЗ, подставив в него выражение периодической составляющей тока КЗ:

$$\sqrt{2} I_K^{(3)} \sin(\omega t + \psi_K - \varphi_K) + C e^{-\frac{R_K}{L_K} t} = 0.$$

При $t = 0$ получим:

$$\sqrt{2} I_K^{(3)} \sin(\psi_K - \varphi_K) + C = 0 \quad \Rightarrow \quad C = -\sqrt{2} I_K^{(3)} \sin(\psi_K - \varphi_K).$$

Выражение полного тока КЗ будет выглядеть следующим образом:

$$i_K = \sqrt{2} I_K^{(3)} \sin(\omega t + \psi_K - \varphi_K) - \sqrt{2} I_K^{(3)} \sin(\psi_K - \varphi_K) e^{-\frac{R_K}{L_K} t}.$$

Преобразуем показатель степени числа e , умножив числитель и знаменатель на ω :

$$-\frac{R_K}{L_K} t = -\frac{R_K \omega}{L_K \omega} t = -\frac{R_K}{X_K} \omega t.$$

Запишем основное уравнение переходного процесса для тока короткого замыкания в любой момент времени без учёта тока нагрузки:

$$i_K = \sqrt{2} I_K^{(3)} \sin(\omega t + \psi_K - \varphi_K) - \sqrt{2} I_K^{(3)} \sin(\psi_K - \varphi_K) e^{-\frac{R_K}{X_K} \omega t}.$$

Рассмотрим два предельных случая начальной фазы короткого замыкания.

1. Угол тока короткого замыкания совпадает с начальной фазой (рис. 3.2) $\psi_K = \varphi_K$, при этом:

$$i_K = \sqrt{2} I_K^{(3)} \sin(\omega t).$$

На практике такой случай бывает редко.

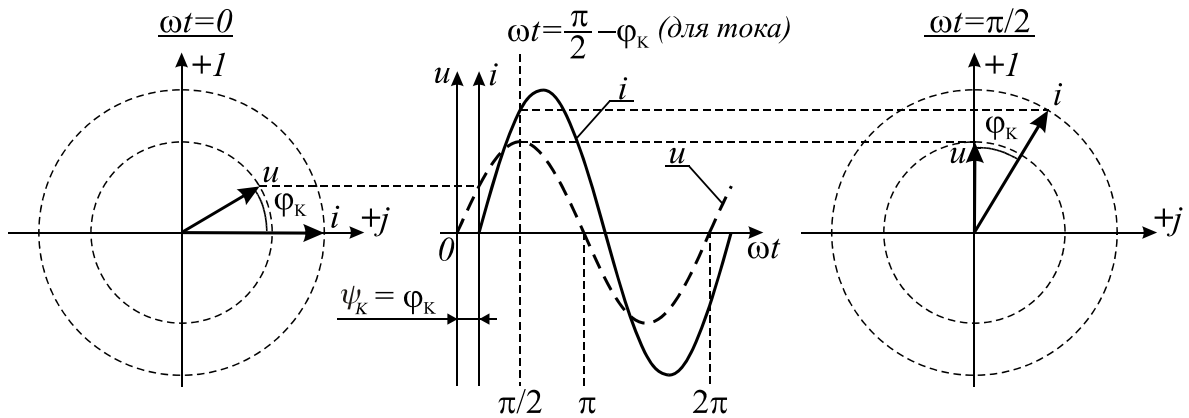


Рис. 3.2. Временная и векторные диаграммы при первом предельном случае

2. Угол тока короткого замыкания отличается от начальной фазы 90° :

$$\psi_K = \varphi_K + \frac{\pi}{2},$$

при этом (рис. 3.3)

$$i_K = \sqrt{2} I_K^{(3)} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) - \sqrt{2} I_K^{(3)} \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) e^{-\frac{R_K}{X_K} \omega t}.$$

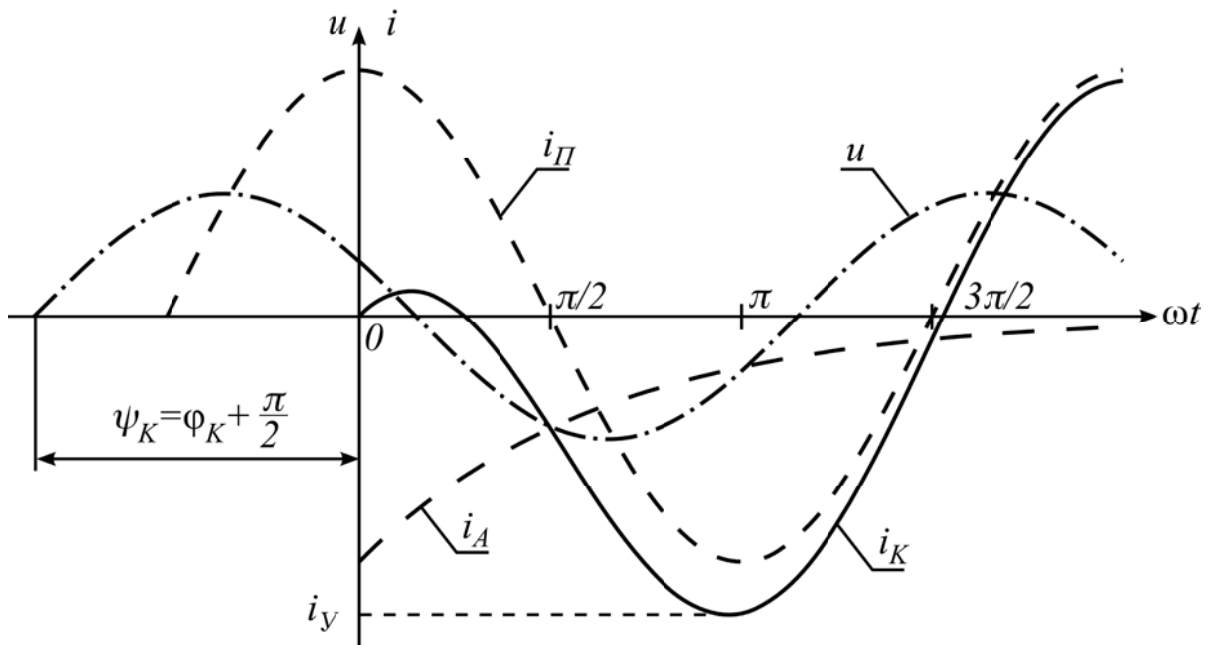


Рис. 3.3. Временная диаграмма второго предельного случая

3.1. Ударный ток короткого замыкания

Ударный ток — это максимальное амплитудное значение тока короткого замыкания, наступающее через половину периода после его начала. Ударный ток рассчитывается для наиболее тяжёлого случая короткого замыкания:

$$i_K = \sqrt{2} I_K^{(3)} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) - \sqrt{2} I_K^{(3)} \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) e^{-\frac{R_K}{X_K} \omega t}.$$

Поскольку частота тока в сети обратно пропорциональна периоду изменения тока во времени, то с учётом

$$f = \frac{1}{T}; \quad T = \frac{1}{f} = 0,02 \text{ с}; \quad t = \frac{T}{2} = 0,01 \text{ с}; \quad \omega t = 2\pi f t = \pi$$

уравнение тока короткого замыкания запишется как

$$i_K = \sqrt{2} I_K^{(3)} \sin\left(\frac{3\pi}{2}\right) - \sqrt{2} I_K^{(3)} \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) e^{-\frac{R_K}{X_K} 3,14}.$$

Учитывая, что

$$\sin\left(\frac{3\pi}{2}\right) = -1; \quad \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) = 1,$$

получим уравнение ударного тока трёхфазного КЗ:

$$i_Y = -\sqrt{2} I_K^{(3)} \left(1 + e^{-\frac{R_K}{X_K} 3,14}\right); \quad K_Y = 1 + e^{-\frac{R_K}{X_K} 3,14},$$

где K_Y — ударный коэффициент.

Ударный коэффициент изменяется в пределах от 1 до 2. Для сетей промышленного назначения его принимают равным 1,8. Для сетей сельскохозяйственного назначения — 1,2...1,4.

По ударному току КЗ проверяются аппараты и ЛЭП на электродинамическую стойкость.

Часто при выборе коммутационных и защитных аппаратов требуется определение постоянной времени затухания (действия) аperiodической составляющей тока короткого замыкания:

$$T_A = \frac{X_K}{R_K \omega}.$$

Для систем, связанных с шинами посредством воздушных линий напряжением 35 и 110 кВ, где рассматривается короткое замыкание, значение времени действия аperiodической составляющей тока КЗ можно принимать равным 0,02 с.

3.2. Переходный процесс в сети при коротком замыкании с учётом тока нагрузки

На практике короткое замыкание часто возникает, когда по линии протекает ток нагрузки, что вносит свои коррективы в рассмотрение переходных процессов изменения токов и напряжений (рис. 3.4) [3].

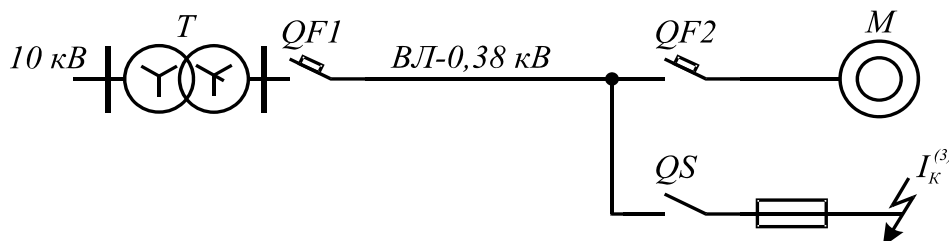


Рис. 3.4. Расчётная схема аварийного режима

Без учёта тока нагрузки начальное значение тока короткого замыкания, в момент времени $t = 0$, также равно нулю, что видно из выражения

$$i_K = \sqrt{2} I_K^{(3)} \sin(\omega t + \psi_K - \varphi_K) + C e^{-\frac{R_K t}{L_K}} = 0;$$

$$i_K = \sqrt{2} I_K^{(3)} \sin(\omega t + \psi_K - \varphi_K) - \sqrt{2} I_K^{(3)} \sin(\psi_K - \varphi_K) e^{-\frac{R_K t}{L_K}}.$$

С учётом тока нагрузки в первый момент времени при $t = 0$ значение тока в сети может быть равно не нулю, а мгновенному значению тока нагрузки:

$$i_{KH} = \sqrt{2} I_K^{(3)} \sin(\psi_K - \varphi_K) + C = i_H.$$

Схема замещения аварийного режима представлена на рисунке 3.5.

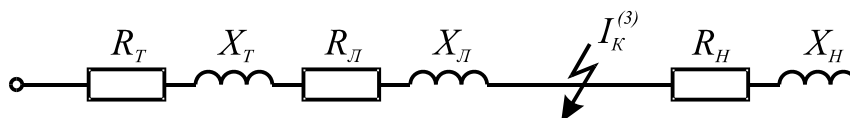


Рис. 3.5. Однолинейная схема замещения аварийного режима

В нормальном режиме угол между током и напряжением φ_H будет зависеть от сопротивлений трансформатора, линии и нагрузки, а в аварийном режиме φ_K — только от сопротивлений трансформатора и линии:

$$\varphi_H = \arctg \frac{X_T + X_L + X_H}{R_T + R_L + R_H}; \quad \varphi_K = \arctg \frac{X_T + X_L}{R_T + R_L}.$$

Мгновенное значение тока нагрузки определится:

$$i_H = \frac{U_m}{Z_K + Z_H} \sin(\omega t + \psi_K) = I_m \sin(\omega t + \psi_K - \varphi_H);$$

$$i_H = \sqrt{2} I_H \sin(\omega t + \psi_K - \varphi_H),$$

где I_m — амплитудное значение тока нагрузки;

I_H — действующее значение тока нагрузки.

Для момента времени $t = 0$ выражение тока нагрузки будет иметь вид:

$$i_H = \sqrt{2} I_H \sin(\psi_K - \varphi_H).$$

Подставим выражение тока нагрузки в выражение определения тока короткого замыкания с учётом тока нагрузки и выразим постоянную интегрирования:

$$i_{KH} = \sqrt{2} I_K^{(3)} \sin(\psi_K - \varphi_K) + C = \sqrt{2} I_H \sin(\psi_K - \varphi_H);$$

$$C = \sqrt{2} I_H \sin(\psi_K - \varphi_H) - \sqrt{2} I_K^{(3)} \sin(\psi_K - \varphi_K).$$

Запишем окончательное выражение тока короткого замыкания с учётом тока нагрузки:

$$i_{KH} = \sqrt{2} I_K^{(3)} \sin(\omega t + \psi_K - \varphi_K) +$$

$$+ \left[\sqrt{2} I_H \sin(\psi_K - \varphi_H) - \sqrt{2} I_K^{(3)} \sin(\psi_K - \varphi_K) \right] e^{-\frac{R_K}{X_K} \omega t}.$$

С учётом тока нагрузки на графике переходного процесса начальное значение свободной составляющей уменьшится, тогда уменьшится и ударный ток, следовательно, ударный ток необходимо рассчитывать без учёта тока нагрузки (рис. 3.6).

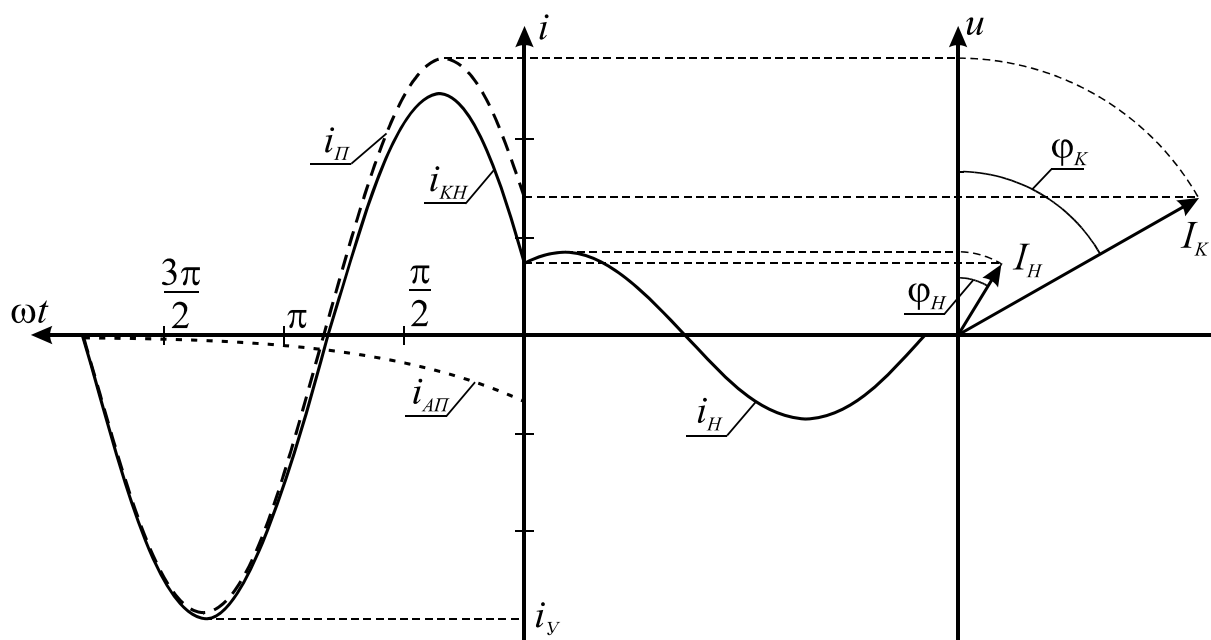


Рис. 3.6. Ток короткого замыкания с учётом тока нагрузки

Рассмотрим порядок построения осциллограмм токов с учётом нагрузки:

1. Разбить ось ωt делением по 30° ($\pi/6$), вправо от оси абсцисс.
2. Справа от графика построить векторные диаграммы тока нагрузки при 30° и ток КЗ при 60° .
3. Спроектировать на ось токов мгновенное значение токов нагрузки и токов КЗ для момента времени $t = 0$.
4. Циркулем снести на вертикальную ось амплитудное значение векторов тока нагрузки и КЗ.

5. Построить синусоиду тока нагрузки с учётом вращения вектора против часовой стрелки. При этом мгновенное значение на оси ωt при вращении вектора как бы движется влево и через 30° ток нагрузки достигает амплитудного значения.
6. Построить синусоиду установившегося тока КЗ с учётом вращения вектора также против часовой стрелки.
7. Отложить для момента времени $t = 0$ ток короткого замыкания с учётом тока нагрузки ($i_{KH} = i_H - i_K$).
8. Провести затухающую экспоненту.
9. Путём сложения ординат периодической и аperiodической составляющих построить график тока короткого замыкания.

3.3. Изменение тока в индуктивной нагрузке при коротком замыкании на выводах

Теоретически при коротком замыкании на выводах нагрузки напряжение равно нулю, соответственно можно записать:

$$L \frac{di}{dt} + iR = 0.$$

В результате ток в нагрузке будет изменяться по следующему закону:

$$i_H = e^{-\frac{R_H}{X_H} \omega t}.$$

Следует иметь в виду, что в закороченных цепях с асинхронными двигателями токи в фазах затухают медленнее из-за того, что остаточное магнитное поле ротора наводит ЭДС в фазах статора и до тех пор, пока не отключится пускатель двигателя, эта ЭДС участвует в изменении тока в закороченной цепи (рис. 3.7).

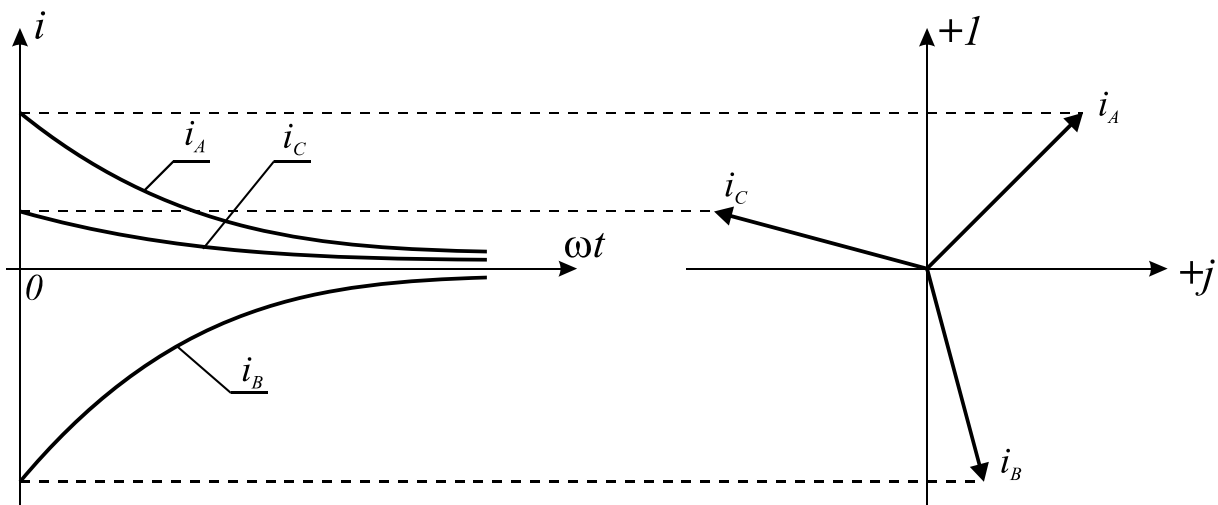


Рис. 3.7. Изменение тока в нагрузке при коротком замыкании на её выводах

Контрольные вопросы

1. Какие допущения принимаются при простейших расчётах токов короткого замыкания?
2. Какой источник называется источником неограниченной мощности?
3. Что такое начальная фаза короткого замыкания?
4. Что показывает начальная фаза короткого замыкания?
5. Что учитывает корень из двух в формуле описания переходного процесса?
6. Зарисуйте и покажите на временной диаграмме мгновенное значение тока.
7. Зарисуйте и покажите на временной диаграмме амплитудное значение напряжения.
8. Зарисуйте и покажите на временной диаграмме действующее значение тока.
9. По какому закону изменяется напряжение на зажимах двигателя при коротком замыкании на его клеммах?
10. Из каких составляющих состоит ток короткого замыкания с точки зрения переходного процесса?
11. От чего зависит затухание апериодической составляющей тока КЗ?
12. По какому закону изменяется апериодическая составляющая тока КЗ?
13. Как изменяется ток короткого замыкания при наличии тока нагрузки?
14. В какой момент времени наступает ударное значение тока КЗ?
15. Для чего необходимо знать ударный ток КЗ?
16. Как вычислить ударный ток КЗ?
17. Для чего необходимо знать ток КЗ?
18. При какой начальной фазе будет наименьший ударный ток?
19. При какой начальной фазе будет наибольший ударный ток?
20. Запишите уравнение, описывающее ток КЗ без учёта тока нагрузки.
21. Запишите уравнение тока КЗ с учётом тока нагрузки.
22. Что показывает угол короткого замыкания?
23. За счёт чего увеличивается угол тока КЗ?
24. За счёт чего уменьшается угол тока КЗ?
25. Как рассчитать трёхфазный ток КЗ на шинах ТП?
26. Как рассчитать двухфазный ток КЗ в конце линии электропередачи?
27. Как рассчитать постоянную времени действия апериодической составляющей тока короткого замыкания?
28. Зачем рассчитывается постоянная времени действия апериодической составляющей тока короткого замыкания?

4. МЕТОДЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И УПРОЩЕНИЯ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ

В процессе расчётов рабочих и аварийных режимов в электрических сетях необходимо использовать формулы для преобразования схем замещения [2, 4].

1. Последовательное соединение элементов сети:

$$Z_{\Sigma} = Z_1 + Z_2 + \dots + Z_n.$$

2. Параллельное соединение элементов сети:

$$\frac{1}{Z_{\Sigma}} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \dots + \frac{1}{Z_n}.$$

3. Преобразование треугольника сопротивлений (рис. 4.1) в эквивалентную звезду:

$$Z_1 = \frac{Z_{12}Z_{13}}{Z_{12} + Z_{13} + Z_{23}}; \quad Z_2 = \frac{Z_{12}Z_{23}}{Z_{12} + Z_{13} + Z_{23}}; \quad Z_3 = \frac{Z_{23}Z_{13}}{Z_{12} + Z_{13} + Z_{23}}.$$

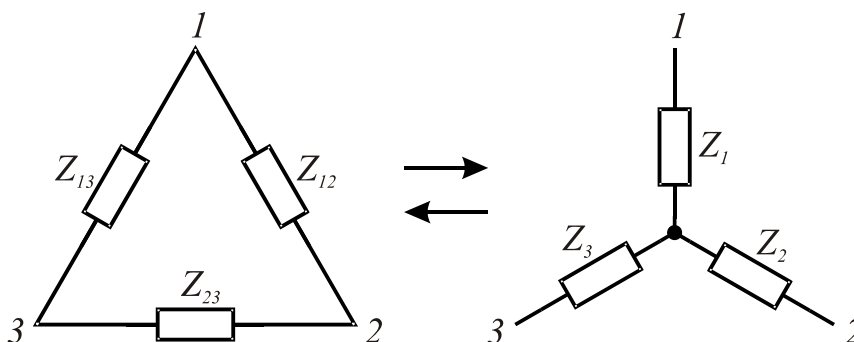


Рис. 4.1. Эквивалентные схемы преобразования сопротивлений

4. Преобразование звезды сопротивлений в эквивалентный треугольник:

$$Z_{12} = Z_1 + Z_2 + \frac{Z_1Z_2}{Z_3}; \quad Z_{23} = Z_2 + Z_3 + \frac{Z_2Z_3}{Z_1}; \quad Z_{13} = Z_1 + Z_3 + \frac{Z_1Z_3}{Z_2}.$$

5. Питание точки КЗ от источников неограниченной мощности.

Если точка короткого замыкания питается от двух источников неограниченной мощности, то сопротивления этих источников можно объединить, так как их ЭДС одинаковы:

$$Z_{\Sigma} = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2}.$$

6. Питание точки КЗ от источников ограниченной мощности.

Если точка короткого замыкания питается от двух генераторов разной мощности, то необходимо вычислять относительное расчётное сопротивление:

$$X_{*P1} = X_1 \frac{S_{H1}}{U_H^2}; \quad X_{*P2} = X_2 \frac{S_{H2}}{U_H^2},$$

где X_{*P1}, X_{*P2} — суммарные реактивные сопротивления первого и второго генераторов до точки КЗ, Ом;

S_{H1}, S_{H2} — номинальные мощности генераторов, ВА.

Относительное расчётное сопротивление используется для определения относительной периодической составляющей тока КЗ по графикам.

Если сопротивления до точки КЗ заданы в относительных базисных единицах, то их необходимо привести к мощности соответствующего генератора:

$$X_{*P1} = X_{*B1} \frac{S_{H1}}{S_B}; \quad X_{*P2} = X_{*B2} \frac{S_{H2}}{S_B}.$$

7. Преобразование трёхлучевой звезды в двухлучевую.

Часто точка короткого замыкания питается от нескольких источников через одну линию электропередачи (рис. 4.2).

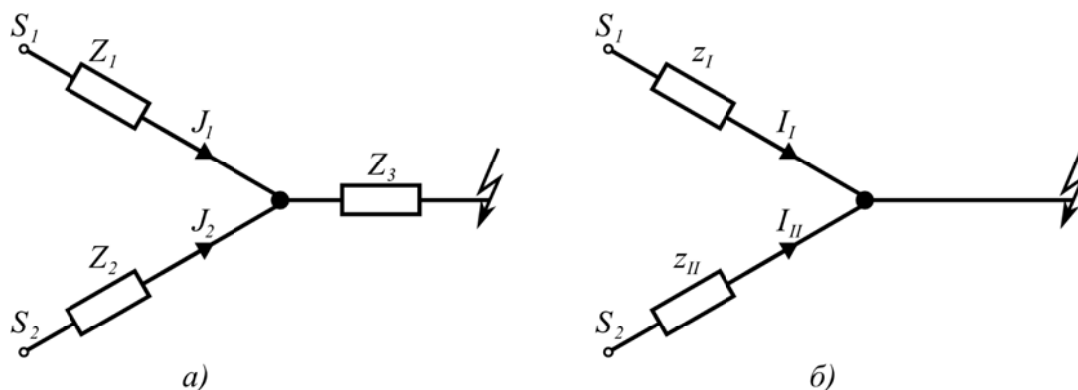


Рис. 4.2. Преобразование трёхлучевой звезды в двухлучевую:
а — трёхлучевая звезда; б — двухлучевая звезда

Будем считать, что сопротивления Z_1, Z_2, Z_3 известны, требуется определить z_1, z_{II} . Условия нахождения:

$$- J_1 = I_1; \quad J_2 = I_{II};$$

$$- Z_{3Л} = Z_{2Л}; \quad Z_{3Л} = Z_3 + \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2}; \quad Z_{2Л} = \frac{z_1 z_{II}}{z_1 + z_{II}}.$$

Введём понятие коэффициента токораспределения, показывающего, какая доля тока протекает по каждому из лучей двухлучевой схемы:

$$C_1 = \frac{J_1}{J_1 + J_2}; \quad C_2 = \frac{J_2}{J_1 + J_2}; \quad C_1 + C_2 = 1; \quad C_2 = 1 - C_1.$$

Если считать, что напряжения источников S_1 и S_2 одинаковы, то

$$J_1 Z_1 = J_2 Z_2; \quad \frac{J_1}{J_2} = \frac{Z_2}{Z_1}; \quad \frac{J_1}{J_2} = \frac{C_1}{C_2}; \quad \frac{C_1}{C_2} = \frac{Z_2}{Z_1};$$
$$\frac{C_1}{1-C_1} = \frac{Z_2}{Z_1}; \quad C_1 Z_1 = Z_2 - C_1 Z_2;$$
$$C_1 = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}; \quad C_2 = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2}.$$

Для второй схемы (см. рис. 4.2) можно записать:

$$I_1 z_1 = (I_1 + I_{II}) Z_{2Л}.$$

Тогда

$$z_1 = \frac{\frac{Z_{2Л}}{I_1}}{\frac{I_1 + I_{II}}{I_1}} = \frac{Z_{2Л}}{C_1}; \quad z_{II} = \frac{Z_{3Л}}{C_2}.$$

Контрольные вопросы

1. В каком случае источники мощности можно объединить?
2. Как рассчитать ток КЗ от двух источников разной мощности?
3. Что означает понятие «эквивалентная звезда» или «эквивалентный треугольник» сопротивлений?
4. Запишите преобразование треугольника сопротивлений в эквивалентную звезду.
5. Запишите преобразование звезды сопротивлений в эквивалентный треугольник.

5. РАСЧЁТ СОПРОТИВЛЕНИЙ Трёхобмоточного трансформатора

Трёхобмоточные трансформаторы устанавливаются на районных подстанциях для питания потребителей на разном удалении. Радиус питания потребителей по линии 10 кВ не должен превышать 15 км, а по линии 35 кВ — 50 км (рис. 5.1).

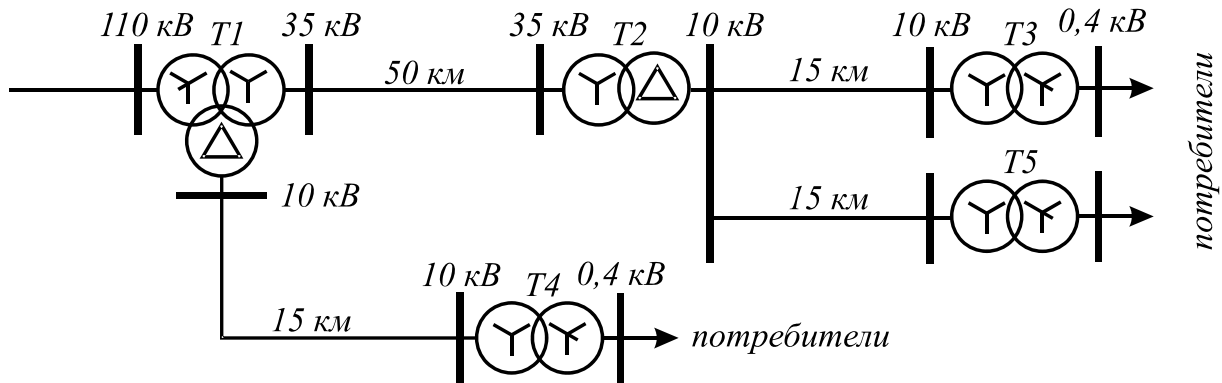


Рис. 5.1. Системообразующие трансформаторы
в электрических сетях

Обмотки трёхобмоточного трансформатора располагаются на магнитопроводе в определённой последовательности с целью минимизации затрат на изоляцию (рис. 5.2).

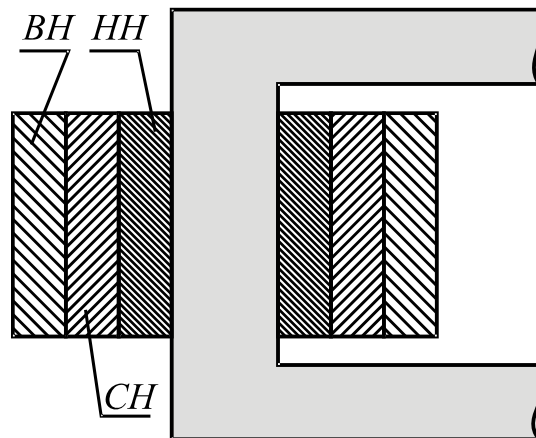


Рис. 5.2. Расположение обмоток
на стержне магнитопровода

Чаще всего распределение напряжения короткого замыкания по обмоткам следующее:

- высшее – низшее: $u_{кВН} = 17\%$;
- высшее – среднее: $u_{кВС} = 10,5\%$;
- среднее – низшее: $u_{кСН} = 6\%$.

По заводским данным напряжений короткого замыкания необходимо найти сопротивление каждой обмотки, для этого необходимо определить долю напряжения короткого замыкания, приходящегося на каждую из обмоток [3]:

$$\begin{aligned}
 u_{KBH} &= u_{KB} + u_{KH}; \\
 u_{KBC} &= u_{KB} + u_{KC}; \quad \Rightarrow \quad u_{KB} = u_{KBC} - u_{KC}; \\
 u_{KCH} &= u_{KC} + u_{KH}; \quad \Rightarrow \quad u_{KH} = u_{KCH} - u_{KC}; \\
 u_{KBH} &= u_{KBC} - u_{KC} + u_{KCH} - u_{KC} = u_{KBC} + u_{KCH} - 2u_{KC}; \\
 u_{KC} &= 0,5(u_{KBC} + u_{KCH} - u_{KBH}); \\
 u_{KB} &= 0,5(u_{KBH} + u_{KBC} - u_{KCH}); \\
 u_{KH} &= 0,5(u_{KBH} + u_{KCH} - u_{KBC}).
 \end{aligned}$$

Сопротивление фазы трансформатора будет рассчитываться через свое напряжение короткого замыкания и мощность, приходящуюся на обмотку:

$$Z_{TB} = \frac{u_{KB\%}}{100} \frac{U_{HB}^2}{S_{HB}}; \quad Z_{TC} = \frac{u_{KC\%}}{100} \frac{U_{HC}^2}{S_{HC}}; \quad Z_{TH} = \frac{u_{KH\%}}{100} \frac{U_{HH}^2}{S_{HH}},$$

где U_{HB}, U_{HC}, U_{HH} —номинальные напряжения каждой из обмоток, В.
 S_{HB}, S_{HC}, S_{HH} —номинальная мощность каждой из обмоток, ВА.

Схема замещения трёхобмоточного трансформатора представляется в виде звезды. Мощности обмоток, трёхобмоточных трансформаторов могут выполняться с расчётом пропускания неполного потока мощности, что является экономически выгодным при приближении потребителя к источнику (табл. 5.1).

Таблица 5.1. Соотношение мощностей обмоток трёхобмоточных трансформаторов

Обмотка	Соотношение мощностей обмоток трансформатора, %			
S_{BH} (110 кВ)	100	100	100	100
S_{CH} (35 кВ)	100	67	100	67
S_{HH} (10 кВ)	100	100	67	67

Аналогичным образом рассчитываются потери активной мощности в обмотках трансформатора и активное сопротивление фаз трансформатора на стороне высшего, среднего и низшего напряжения:

$$\begin{aligned}
 \Delta P_{KB} &= 0,5(\Delta P_{KBH} + \Delta P_{KBC} - \Delta P_{KCH}); \\
 \Delta P_{KC} &= 0,5(\Delta P_{KBC} + \Delta P_{KCH} - \Delta P_{KBH}); \\
 \Delta P_{KH} &= 0,5(\Delta P_{KBH} + \Delta P_{KCH} - \Delta P_{KBC}); \\
 R_{BH} &= \frac{\Delta P_{KB} U_{BH}^2}{S_{BH}^2}; \quad R_{CH} = \frac{\Delta P_{KC} U_{CH}^2}{S_{CH}^2}; \quad R_{HH} = \frac{\Delta P_{KH} U_{HH}^2}{S_{HH}^2}.
 \end{aligned}$$

В представленные выше формулы подставляются тот уровень напряжения, на котором рассчитывается ток короткого замыкания.

6. РАСЧЁТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ИМЕНОВАННЫХ ЕДИНИЦАХ

Расчёт токов короткого замыкания в простых схемах выполняют в основном методом именованных единиц, когда все величины, участвующие в расчётах, имеют свои единицы измерения.

6.1. Короткое замыкание на удалённом участке линии

При питании от источника неограниченной мощности (рис. 6.1) ток трёхфазного короткого замыкания можно вычислить по закону Ома:

$$I_K^{(3)} = \frac{U_{ист}}{\sqrt{3} Z_L},$$

где $U_{ист}$ — междуфазное (линейное) напряжение источника питания;
 Z_L — полное сопротивление участка линии.

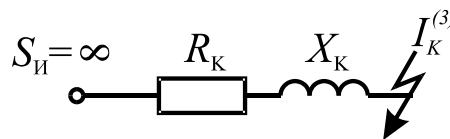


Рис. 6.1. Короткое замыкание на удалённом участке линии

Для каждого участка по справочнику выбирают сечения проводов и определяют его действительные сопротивления через погонные удельные сопротивления:

$$R_L = R_0 L; \quad X_L = X_0 L; \quad Z_L = \sqrt{R_L^2 + X_L^2},$$

где R_L, X_L — активное и реактивное сопротивления участка линии;
 R_0, X_0 — погонное активное и реактивное сопротивления участка линии, Ом/км;
 L — длина участка линии одинакового сечения, км.

6.2. Короткое замыкание за трансформатором

При расчёте короткого замыкания на шинах трансформатора в приближенных расчётах используют полное сопротивление трансформатора:

$$Z_T = \frac{u_{k\%}}{100} \frac{U_H^2}{S_H},$$

где $u_{k\%}$ — напряжение короткого замыкания, %;
 U_H — номинальное напряжение трансформатора, В;
 S_H — номинальная мощность трансформатора, ВА.

В случае, если необходимо знать отдельно активное и реактивное сопротивление трансформатора, то их вычисляют по известным формулам:

$$R_T = \frac{\Delta P_{K3} U_H^2}{S_H^2}; \quad X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}.$$

Ток короткого замыкания на шинах трансформатора определится:

$$I_K^{(3)} = \frac{U_{ист}}{\sqrt{3} Z_T} = \frac{100 U_{ист} S_H}{\sqrt{3} u_{k\%} U_H^2}.$$

Если принять напряжение источника равным номинальному напряжению трансформатора, то

$$I_K^{(3)} = \frac{100 I_H}{u_{k\%}},$$

где I_H — номинальный ток трансформатора, А.

Напряжение короткого замыкания изменяется в пределах 4,5...17% от номинального.

6.3. Короткое замыкание в цепи, содержащей трансформатор и линию

В расчёте токов короткого замыкания на стороне 0,4 кВ удобнее сопротивление трансформатора выносить на сторону 0,4 кВ, т.е. в формуле расчёта Z_T подставляется напряжение 0,4 кВ. При этом влево выносится идеальный трансформатор, у которого сохранилось соотношение витков, не имеющих сопротивления (рис. 6.2).

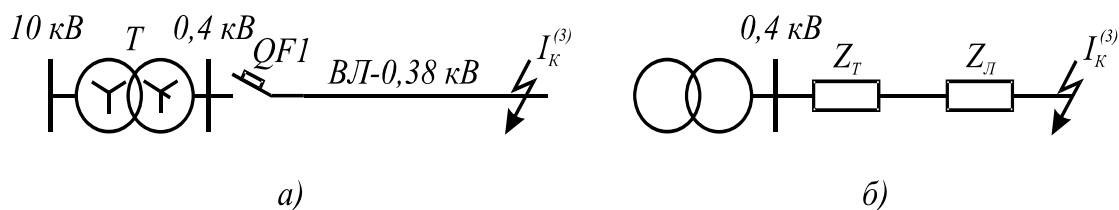


Рис. 6.2. Расчёт тока короткого замыкания на стороне 0,4 кВ:
а — расчётная схема; б — схема замещения

В случае, если точка КЗ находится на стороне низшего напряжения трансформатора, а расчёт тока необходимо произвести на стороне высшего напряжения, то следует сопротивление трансформатора выносить на сторону высшего напряжения, т.е. в формуле для Z_T подставляется напряжение 10 кВ (рис. 6.3).

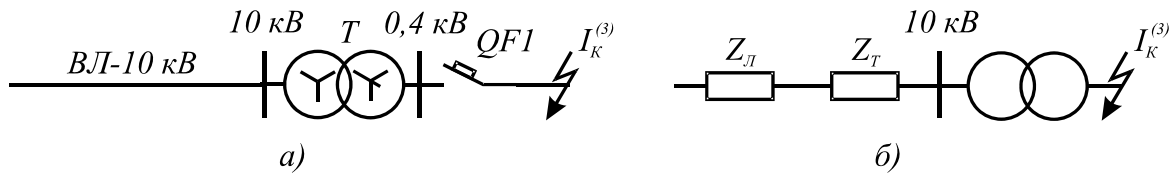


Рис. 6.3. Расчёт тока короткого замыкания на стороне 10 кВ:
а — расчётная схема; б — схема замещения

6.4. Расчёт токов короткого замыкания в цепях с трансформаторными связями

В начале любого расчёта составляется расчётная схема (рис. 6.4).

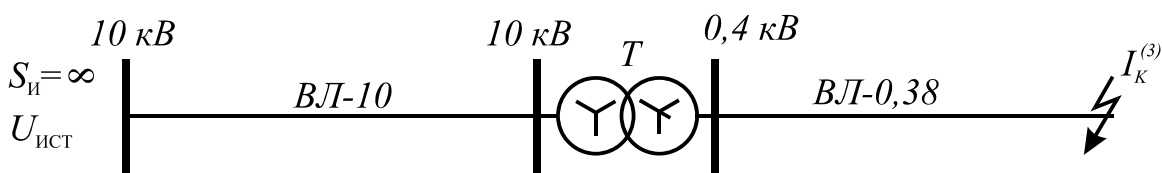


Рис. 6.4. Расчётная схема сети

Исходя из расчётной схемы, составляется схема замещения (рис. 6.5).

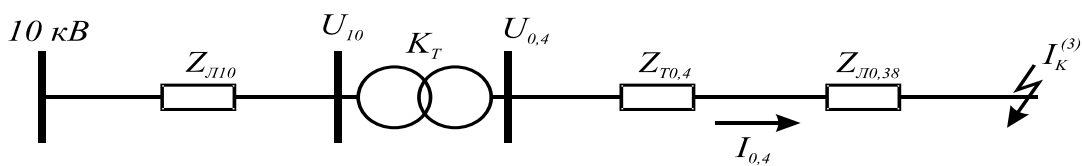


Рис. 6.5. Схема замещения

Из рисунка 6.5 видно, что напряжение источника при трёхфазном КЗ перераспределяется на три составляющие потери напряжения на соответствующих сопротивлениях:

$$U_{ист} = \Delta U_{10} + (\Delta U_{Т0,4} + \Delta U_{Л0,38}) K_T,$$

где ΔU_{10} — потеря напряжения в линии 10 кВ, В;

$\Delta U_{Т0,4}$ — потеря напряжения в трансформаторе, В;

$\Delta U_{Л0,38}$ — потеря напряжения в линии 0,38 кВ, В;

K_T — коэффициент трансформации трансформатора.

Предположим, что известно значение тока на шинах низшего напряжения трансформатора $I_{0,4}$, тогда линейное напряжение на стороне 0,4 кВ определится:

$$U_{0,4} = \Delta U_{Т0,4} + \Delta U_{Л0,38} = \sqrt{3} I_{0,4} (Z_{Т0,4} + Z_{Л0,38}),$$

где $I_{0,4}$ — ток на шинах 0,4 кВ трансформатора, А;

$Z_{Т0,4}$ — сопротивление трансформатора на стороне 0,4 кВ, Ом.

$Z_{Л0,38}$ — сопротивление линии 0,38 кВ, Ом.

Известно, что напряжения и токи сторон высшего и низшего напряжения трансформатора связаны через коэффициент трансформации:

$$U_{10} = U_{0,4} K_T; \quad I_{0,4}^{10} = \frac{I_{0,4}}{K_T},$$

где $I_{0,4}^{10}$ — ток на стороне 0,4 кВ, приведённый к стороне 10 кВ, А.

Потерю напряжения в линии 10 кВ выразим через приведённый ток и сопротивление линии:

$$\Delta U_{10} = \sqrt{3} I_{0,4}^{10} Z_{Л10}.$$

Перепишем выражение для напряжения источника с учётом изложенного:

$$\begin{aligned} U_{ИСТ} &= \Delta U_{10} + U_{0,4} K_T = \sqrt{3} I_{0,4}^{10} Z_{Л10} + \left[\sqrt{3} I_{0,4} (Z_{Т0,4} + Z_{Л0,38}) \right] K_T = \\ &= \sqrt{3} \frac{I_{0,4}}{K_T} Z_{Л10} + \left[\sqrt{3} I_{0,4} (Z_{Т0,4} + Z_{Л0,38}) \right] K_T; \\ \frac{U_{ИСТ}}{\sqrt{3} K_T} &= I_{0,4} \frac{Z_{Л10}}{K_T^2} + I_{0,4} (Z_{Т0,4} + Z_{Л0,38}). \end{aligned}$$

Окончательно получаем выражение для расчёта тока в любой точке сети 0,4 кВ с учётом сопротивлений линии 10 кВ, трансформатора 10/0,4 кВ и линии 0,38 кВ:

$$I_{0,4} = \frac{U_{ИСТ}}{\sqrt{3} K_T (Z_{Л10}^{0,4} + Z_{Т0,4} + Z_{Л0,38})} = \frac{U_{0,4}}{\sqrt{3} (Z_{Л10}^{0,4} + Z_{Т0,4} + Z_{Л0,38})}.$$

Выражение $Z_{Л10}^{0,4} = \frac{Z_{Л10}}{K_T^2}$ означает, что сопротивление линии 10 кВ приведено к напряжению 0,4 кВ.

Выражение $\frac{U_{ИСТ}}{\sqrt{3} K_T}$ говорит о том, что трансформатор вынесен за точку короткого замыкания (рис. 6.6).

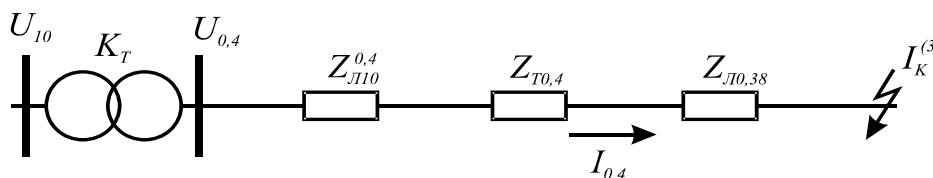


Рис. 6.6. Схема замещения с учётом сети 10 кВ

Для расчёта тока короткого замыкания в именованных единицах сопротивления всех элементов расчётной схемы приводят к той ступени напряжения, на которой вычисляется ток КЗ. Приведение всех сопротивлений осуществляется через квадрат коэффициента трансформации. Если в пути прохождения тока КЗ имеется несколько ступеней трансформации, то все их необходимо учесть в расчётах.

6.5. Расчёт тока двухфазного короткого замыкания

Если проследить путь тока при двухфазном замыкании, то видно, что он протекает только через две ветви или только по двум фазам под действием междуфазной ЭДС трансформатора (рис. 6.7).

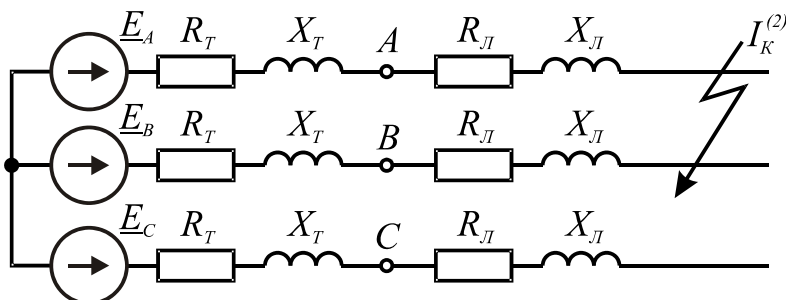


Рис. 6.7. Двухфазное короткое замыкание

Угол тока короткого замыкания будет зависеть от сопротивлений до точки короткого замыкания (рис. 6.8):

$$\varphi_K = \arctg \frac{2 X_T + 2 X_{Л}}{2 R_T + 2 R_{Л}} = \arctg \frac{X_T + X_{Л}}{R_T + R_{Л}}.$$

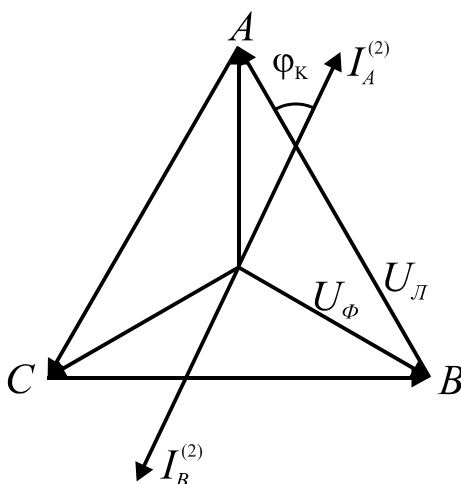


Рис. 6.8. Векторная диаграмма токов и напряжений при двухфазном КЗ

Ток двухфазного КЗ будет протекать по двум сопротивлениям трансформатора и линии 0,38 кВ под действием линейного напряжения $U_{Л}$:

$$I_K^{(2)} = \frac{U_{Л}}{2(Z_{T0,4} + Z_{Л0,38})}.$$

В случае, если точка КЗ расположена за трансформатором и линией 10 кВ, то сопротивление линии 10 кВ также необходимо учесть:

$$I_K^{(2)} = \frac{U_L}{2(Z_{Л10}^{0,4} + Z_{Т0,4} + Z_{Л0,38})} = \frac{U_L}{2Z_\Sigma},$$

где Z_Σ — суммарное сопротивление до точки КЗ с учётом приведения сопротивления линии 10 кВ к расчётному напряжению.

Ток трёхфазного короткого замыкания:

$$I_K^{(3)} = \frac{U_L}{\sqrt{3}(Z_{Л10}^{0,4} + Z_{Т0,4} + Z_{Л0,38})} = \frac{U_L}{\sqrt{3}Z_\Sigma}.$$

В сетях, питающихся от источников неограниченной мощности, всегда ток двухфазного КЗ меньше тока трёхфазного КЗ:

$$I^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I^{(3)} \approx 0,86 I^{(3)}.$$

Контрольные вопросы

1. Как рассчитать ток трёхфазного короткого замыкания в линии 10 кВ с питающим трансформатором 35/10 кВ?
2. Как рассчитать ток двухфазного короткого замыкания?
3. Как вычислить активное, реактивное и полное сопротивления трёхфазного двухобмоточного трансформатора?
4. Каким образом можно учесть сопротивление линии 10 кВ при расчёте тока КЗ на шинах 0,4 кВ?

7. РАСЧЁТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ЕДИНИЦАХ

7.1. Определение относительных номинальных величин

Напряжение электроустановки может определяться в относительных (безразмерных) величинах:

$$U_{*H} = \frac{U}{U_H} = \frac{350}{380},$$

где U — фактическое напряжение электроустановки;
 U_H — номинальное напряжение электроустановки.

За номинальное напряжение принимается тот уровень, на котором вычисляется ток КЗ.

Аналогичным образом находятся токи, мощности и сопротивления:

$$I_{*H} = \frac{I}{I_H}; \quad S_{*H} = \frac{S}{S_H}; \quad Z_{*H} = \frac{Z}{Z_H}.$$

Относительное номинальное сопротивление удобнее выражать через мощность и номинальное напряжение электроустановки:

$$U_H = \sqrt{3} I_H Z_H; \quad Z_H = \frac{U_H}{\sqrt{3} I_H} \frac{U_H}{U_H} = \frac{U_H^2}{S_H}.$$

Окончательно получаем выражение для расчёта относительного номинального сопротивления:

$$Z_{*H} = Z \frac{S_H}{U_H^2}.$$

7.2. Ограничители токов короткого замыкания

Ограничителями токов короткого замыкания в электрических сетях являются обмотки генераторов, трансформаторов, линии электропередачи и реакторы. В сетях высокого напряжения в основном ограничиваются учётом только реактивного сопротивления элементов ввиду значительного превосходства последнего над активным сопротивлением. Например, трансформатор ТМН-6300/35 имеет на стороне 10 кВ $X = 1,19$ Ом и $R = 1,17 \cdot 10^{-4}$ Ом, а провод АС-150/24 линии 10 кВ имеет $X_0 = 0,42$ Ом и $R_0 = 0,198$ Ом [5], поэтому активным сопротивлением трансформаторов можно пренебречь. Рассмотрим вычисление относительного номинального сопротивления для каждого элемента сети.

Генератор

В паспортных данных генератора приводится относительное сверхпереходное сопротивление генератора по продольной оси X_d'' . Оно показывает относительное падение напряжения в обмотках генератора при протекании номинального тока:

$$X_d'' = \frac{X_\Gamma}{X_{НГ}} = X_\Gamma \frac{\sqrt{3} I_{НГ}}{U_{НГ}} = \frac{\Delta U_\Gamma}{U_{НГ}}.$$

Трансформатор

Сопротивление фазы трансформатора вычисляется по известной формуле [6]:

$$Z_T = \frac{u_{кз\%}}{100} \frac{U_H^2}{S_H} = \frac{u_{кз\%}}{100} Z_H.$$

Относительное номинальное сопротивление трансформатора:

$$Z_{*H} = \frac{Z_T}{Z_H} = \frac{u_{кз\%}}{100}.$$

Реактор

Реактор L устанавливается специально в линиях электропередачи для ограничения токов короткого замыкания до 20 кА (рис. 7.1), в этом случае можно использовать для коммутации токов малогабаритные выключатели.

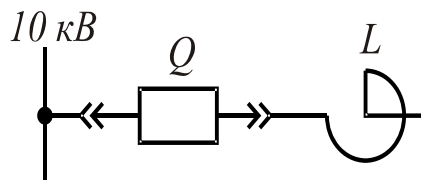


Рис. 7.1. Реактор

Например: РБА-6-150-4 — реактор бетонный, с алюминиевой обмоткой, на напряжение 6 кВ и ток 150 А, с относительным индуктивным сопротивлением $X_{P\%} = 4\%$. Сопротивление реактора в относительных единицах определяется:

$$X_{*HP} = \frac{X_{P\%}}{100 X_{HP}} = \frac{X_{P\%}}{100} \frac{S_H}{U_H^2} = \frac{\Delta U_P}{U_{HP}}.$$

7.3. Определение относительных базисных сопротивлений

Для расчётов в относительных величинах задаются произвольно базисной мощностью, относительно которой и производят все расчёты в сети.

По аналогии с именованными величинами рассчитываются и базисные величины [6]:

$$I_B = \frac{S_B}{\sqrt{3} U_B}; \quad Z_B = \frac{U_B}{\sqrt{3} I_B} = \frac{U_B}{\sqrt{3}} \frac{\sqrt{3} U_B}{S_B} = \frac{U_B^2}{S_B},$$

где I_B, U_B, S_B — базисные ток, напряжение и мощность соответственно.

За базисное напряжение принимают среднее напряжение на участке сети.

Аналогичным образом производят расчёт относительных базисных величин:

$$U_{*B} = \frac{U}{U_B}; \quad I_{*B} = \frac{I}{I_B}; \quad S_{*B} = \frac{S}{S_B}; \quad Z_{*B} = \frac{Z}{Z_B}.$$

Порядок перехода к относительным базисным сопротивлениям осуществляется по следующему алгоритму:

- 1) вычислить сопротивление элемента сети в Омах;
- 2) привести сопротивление к базисному напряжению той ступени, на которой рассчитывается ток короткого замыкания (приведение осуществляется через квадрат коэффициента трансформации);
- 3) отнести сопротивление к базисному сопротивлению.

Рассмотрим на примере переход от сопротивлений в именованных единицах к относительным базисным сопротивлениям.

Линия электропередачи

Сопротивление линии в именованных единицах, Ом, вычисляется по известным выражениям:

$$R_{Л} = R_0 L; \quad X_{Л} = X_0 L; \quad Z_{Л} = \sqrt{R_{Л}^2 + X_{Л}^2},$$

где R_0, X_0 — погонное активное и реактивное сопротивления линии электропередачи, Ом/км;

L — длина линии электропередачи, км.

Так как при расчётах базисное напряжение, равное среднему номинальному напряжению на участке сети, может отличаться от номинального напряжения элемента сети, то необходимо привести сопротивление в именованных единицах, рассчитанное при номинальном напряжении, к базисному напряжению. Поскольку все приведения сопротивлений в электрических сетях производятся через квадрат коэффициента трансформации, а за основное принимается базисное напряжение, то коэффициентом трансформации является отношение квадратов номинального напряжения к базисному:

$$Z_{БЛ} = Z_{Л} \frac{U_B^2}{U_H^2}.$$

Для получения относительного базисного сопротивления линии отнесём полученное базисное сопротивление линии к базисному сопротивлению:

$$Z_{*БЛ} = \frac{Z_{БЛ}}{Z_B} = Z_{Л} \frac{U_B^2}{U_H^2} \frac{S_B}{U_B^2} = Z_{Л} \frac{S_B}{U_H^2}.$$

Генератор

Сопротивление генератора X_G , Ом:

$$X_G = Xd'' \frac{U_H^2}{S_H}.$$

Базисное сопротивление генератора:

$$X_{BG} = X_G \frac{U_B^2}{U_H^2} = Xd'' \frac{U_H^2}{S_H} \frac{U_B^2}{U_H^2} = Xd'' \frac{U_B^2}{S_H}.$$

Относительное базисное сопротивление генератора:

$$X_{*BG} = \frac{X_{BG}}{X_B} = Xd'' \frac{U_B^2}{S_H} \frac{S_B}{U_B^2} = Xd'' \frac{S_B}{S_H}.$$

Трансформатор

Сопротивление трансформатора Z_T , Ом:

$$Z_T = \frac{u_{кз\%}}{100} \frac{U_H^2}{S_H}.$$

Базисное сопротивление трансформатора:

$$X_{BT} = X_T \frac{U_B^2}{U_H^2} = \frac{u_{кз\%}}{100} \frac{U_H^2}{S_H} \frac{U_B^2}{U_H^2} = \frac{u_{кз\%}}{100} \frac{U_B^2}{S_H}.$$

Относительное базисное сопротивление трансформатора:

$$X_{*BT} = \frac{X_{BT}}{X_B} = \frac{u_{кз\%}}{100} \frac{U_B^2}{S_H} \frac{S_B}{U_B^2} = \frac{u_{кз\%}}{100} \frac{S_B}{S_H}.$$

Реактор

Сопротивление реактора X_P , Ом:

$$X_P = \frac{X_{P\%}}{100} \frac{U_H^2}{S_H}.$$

Базисное сопротивление реактора:

$$X_{BP} = X_P \frac{U_B^2}{U_H^2} = \frac{X_{P\%}}{100} \frac{U_H^2}{S_H} \frac{U_B^2}{U_H^2} = \frac{X_{P\%}}{100} \frac{U_B^2}{S_H}.$$

Относительное базисное сопротивление реактора:

$$X_{*BP} = \frac{X_{BP}}{X_B} = \frac{X_{P\%}}{100} \frac{U_B^2}{S_H} \frac{S_B}{U_B^2} = \frac{X_{P\%}}{100} \frac{S_B}{S_H}.$$

7.4. Методика расчёта токов короткого замыкания в относительных единицах

Рассмотрим методику расчёта токов короткого замыкания в относительных единицах на примере схемы, представленной на рисунке 7.2.

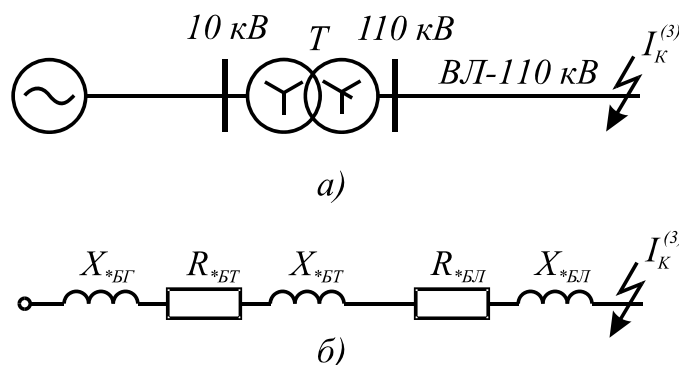


Рис. 7.2. Расчётная схема и схема замещения

Методика расчёта тока короткого замыкания:

1. Вычислить сопротивление необходимых элементов в Омах.
2. Вычислить относительные базисные сопротивления элементов сети, отдельно для активных и реактивных составляющих.
3. Рассчитать суммарные относительные базисные сопротивления до точек КЗ:

$$R_{*Б} = R_{*БТ} + R_{*БЛ}; \quad X_{*Б} = X_{*БГ} + X_{*БТ} + X_{*БЛ}; \quad Z_{*Б} = \sqrt{R_{*Б}^2 + X_{*Б}^2}.$$

Все сопротивления будут пропорциональны заданной базисной мощности.

4. Привести сопротивления к мощности генератора (рассчитать относительные расчётные сопротивления):

$$Z_{*P} = Z_{*Б} \frac{\sum S_{НГ}}{S_{Б}},$$

где $S_{НГ}$ — мощность генератора, ВА.

Если относительное расчётное сопротивление меньше трёх, то использовать *алгоритм 1*, если больше трёх, то использовать *алгоритм 2*.

Алгоритм 1 «Использование расчётных кривых генератора»

1. Вычислить номинальный ток генератора.
2. Используя расчётные кривые, по расчётному сопротивлению (до точки КЗ) определить относительную периодическую составляющую тока короткого замыкания.
3. Вычислить значение тока трёхфазного КЗ:

$$I_K^{(3)} = I_{*КП} I_{Г},$$

где $I_{*П}^{(3)}$ — относительная периодическая составляющая тока короткого замыкания;

$I_{Г}$ — номинальный ток генератора, А.

Алгоритм 2 «Вычисление через относительную ЭДС генератора»

1. Задаться значением относительной базисной ЭДС генератора:

$$E_{*BG} = \frac{E_G}{U_H}.$$

Поскольку ЭДС генератора равна номинальному напряжению генератора, то относительная базисная ЭДС генератора принимается равной единице.

2. Вычислить базисный ток на той ступени, на которой вычисляется ток короткого замыкания:

$$I_{Bi} = \frac{S_B}{\sqrt{3} U_{Bi}},$$

где I_{Bi} , U_{Bi} — базисный ток и напряжение на i ступени напряжения;
 S_B — базисная мощность.

Базисный ток рассчитывается для удобства определения тока короткого замыкания. При определении базисного тока за базисное напряжение принимается среднее напряжение ступеней трансформации.

3. Вычислить относительный базисный ток короткого замыкания:

$$I_{*B}^{(3)} = \frac{E_{*BG}}{Z_{*B}}.$$

4. Вычислить значение тока трёхфазного короткого замыкания в амперах:

$$I_{Ki}^{(3)} = I_{*B}^{(3)} I_{Bi}.$$

Если увеличить базисную мощность S_B в десять раз, то суммарные базисные сопротивления Z_{*B} возрастут в 10 раз, а относительный базисный ток I_{*B} уменьшится в 10 раз, но при этом базисный ток I_B увеличится в 10 раз, следовательно, реальный ток короткого замыкания не изменится. Отсюда можно сделать вывод, что базисной мощностью можно задаваться произвольно.

Контрольные вопросы

1. Как вычислить сопротивление линии электропередачи в именованных единицах?
2. Как вычислить сопротивление реактора?
3. Как вычислить сопротивление генератора?
4. Как вычислить номинальный ток генератора?
5. Как вычислить относительный номинальный ток и напряжение электроустановки?
6. Для чего используются базисные величины токов и напряжений?
7. Как вычислить полное относительное базисное сопротивление трансформатора?
8. Как вычислить полное относительное базисное сопротивление резистора?
9. Как вычислить полное относительное базисное сопротивление линии?
10. Что называется источником неограниченной мощности?

11. Почему величину базисной мощности можно выбирать произвольно?
12. Чему равны базисные напряжения, принимаемые в расчётах методом относительных единиц?
13. Опишите методику расчёта токов КЗ в относительных базисных единицах.
14. Опишите методику расчёта токов КЗ в относительных базисных единицах при питании от источника ограниченной мощности (генератора).
15. Опишите методику расчёта токов КЗ в относительных базисных единицах при питании от источника неограниченной мощности (генератора).
16. Что произойдёт с током короткого замыкания, если базисную мощность увеличить в 10 раз?

8. КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ ВБЛИЗИ ГЕНЕРАТОРА

Обмотка генератора и близлежащие цепи при коротком замыкании являются в основном индуктивным сопротивлением (активное сопротивление мало), соответственно ток в обмотке отстаёт от фазного напряжения на угол 90° (рис. 8.1).

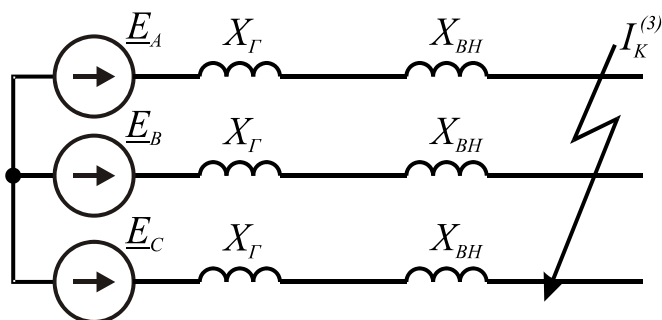


Рис. 8.1. Короткое замыкание на шинах генератора

Мгновенные значения токов и напряжений на векторной диаграмме обозначим строчными буквами, векторы-проекции подчеркнём снизу (рис. 8.2).

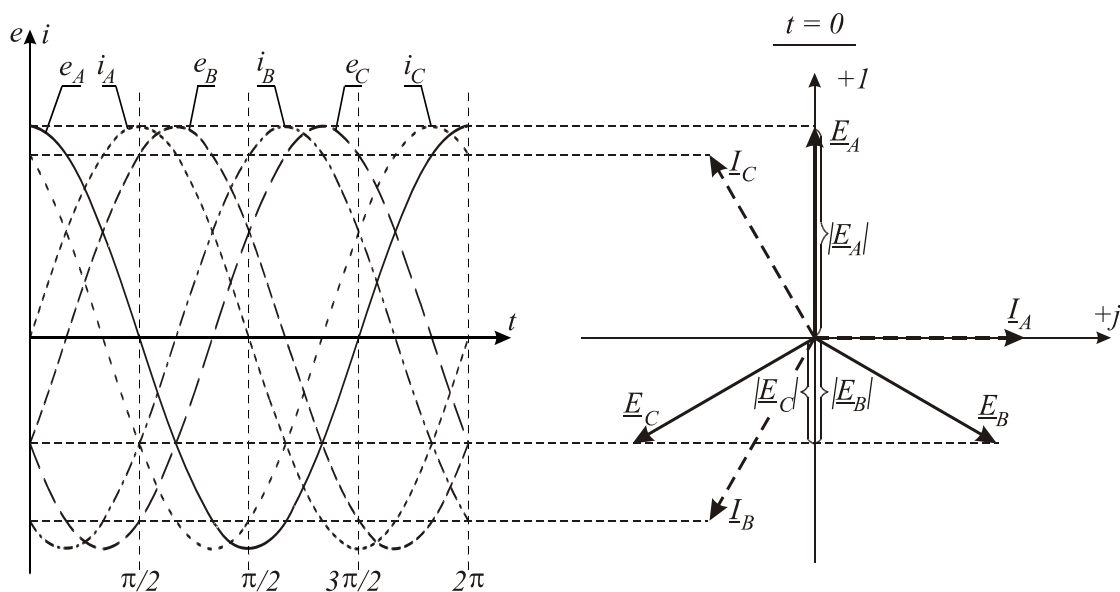


Рис. 8.2. Картина токов и ЭДС в обмотке статора генератора

Ток в фазе С имеет положительное направление от начала обмотки к концу, ток в фазе В имеет отрицательное направление от конца к началу (рис. 8.3).

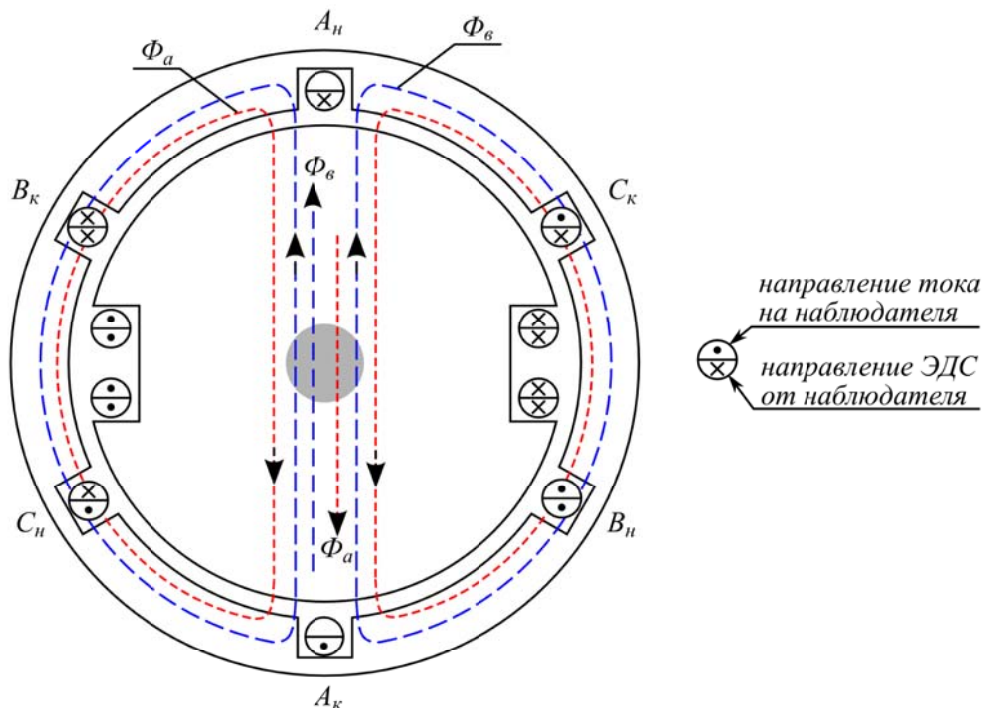


Рис. 8.3. Картина магнитных полей в синхронном генераторе при коротком замыкании ($t=0$)

По правилу правоугового винта токи в фазах В и С создают суммарный магнитный поток Φ_a , который направлен встречно потоку возбуждения. Поток Φ_a называется потоком реакции якоря, т.е. это реакция тока нагрузки или тока КЗ на магнитный поток возбуждения Φ_ϵ . Тогда магнитный поток в воздушном зазоре между статором и ротором Φ_δ будет равен:

$$\Phi_\delta = \Phi_\epsilon - \Phi_a,$$

где Φ_ϵ — магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения (обмоткой ротора).

В этом случае магнитный поток реакции якоря или реакция якоря размагничивающая (рис. 8.4).

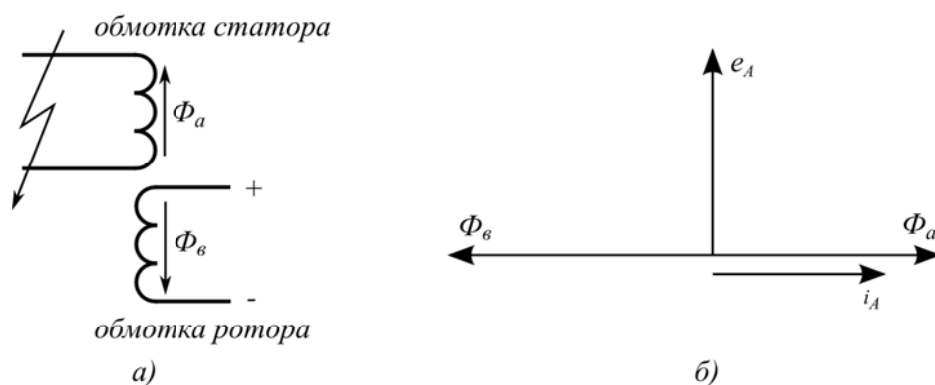


Рис. 8.4. Расположение магнитных потоков: а — схематическое расположение; б — векторная диаграмма

Поток реакции якоря стремится снизить ЭДС генератора:

$$E_{ГА} = 4,44 f w_1 K_{ОБ} \Phi_{\delta},$$

где $E_{ГА}$ — ЭДС фазы генератора;

w_1 — число витков фазной обмотки генератора;

$K_{ОБ}$ — обмоточный коэффициент, учитывает укорочение шага обмотки, позволяющее исключить высшие гармоники из ЭДС.

При снижении ЭДС генератора снижается ток короткого замыкания, установившееся значение которого будет определяться следующим образом:

$$I_K^{(3)} = \frac{E_{Gi}}{X_d + X_{ВН}},$$

где E_{Gi} — ЭДС i -й фазы генератора;

X_d — индуктивное сопротивление генератора по продольной оси в установившемся режиме;

$X_{ВН}$ — внешнее индуктивное сопротивление цепи короткого замыкания, от зажимов генератора до места КЗ.

В реальном генераторе в первый момент времени магнитный поток реакции якоря не может проникнуть в тело ротора из-за большой индуктивности цепи возбуждения и из-за того, что в обмотках статора в первый момент времени появляется апериодическая составляющая тока короткого замыкания, которая наводит в обмотке ротора и в стальной бочке ротора токи, магнитные потоки которых не пропускают поток реакции якоря в тело индуктора, т.е. ротора. По мере затухания магнитного потока поток реакции якоря проникает в тело ротора, и ЭДС генератора снижается. Изменение магнитных потоков и, соответственно, сопротивлений генератора делят на три ступени.

1. От момента времени возникновения КЗ до затухания токов в бочке ротора и в успокоительных обмотках у гидрогенераторов (рис. 8.5, 8.6).

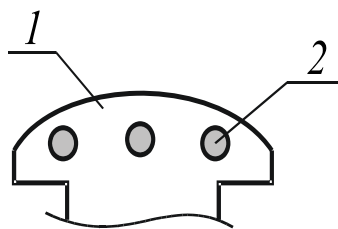


Рис. 8.5. Успокоительные обмотки гидрогенераторов:
1 — тело ротора; 2 — успокоительные короткозамкнутые обмотки

Эта стадия называется сверхпереходным процессом, а индуктивное сопротивление генератора при этом называют сверхпереходным индуктивным сопротивлением генератора по продольной оси X_d'' .

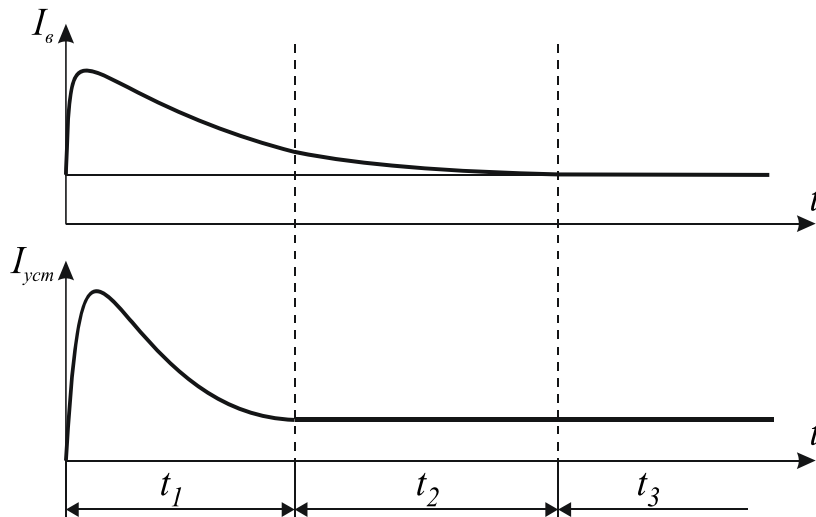


Рис. 8.6. Токи в обмотке возбуждения и обмотке статора генератора:
 t_1 — сверхпереходный режим; t_2 — переходный режим;
 t_3 — установившийся режим

2. Стадия от момента затухания индукционных токов в бочке ротора до момента затухания апериодического тока в обмотке возбуждения называется переходным процессом, а сопротивление генератора — переходным индуктивным сопротивлением генератора по продольной оси и обозначается Xd' .

3. Установившийся режим КЗ от момента затухания дополнительных токов в обмотке возбуждения до бесконечности. В этом режиме сопротивление генератора обозначается Xd и называется индуктивное сопротивление генератора по продольной оси в установившемся режиме.

Продолжительность переходного процесса составляет 3...5 секунд (см. рис. 8.6).

Сопротивление в рассмотренных режимах:

$$Xd'' < Xd' < Xd.$$

Токи при этом:

$$I^{(3)''} > I^{(3)'} > I^{(3)}.$$

По этой причине для выбора электрооборудования вычисляют сверхпереходный ток КЗ, в этом случае имеет место наибольшее значение ударного тока в первый момент времени ($t = 0$).

Для момента времени 0,2 с и при сопротивлении Xd' проверяют электрические аппараты на отключающую способность.

Для момента времени $t = \infty$ и при сопротивлении Xd проверяют чувствительность релейной защиты к токам короткого замыкания и выполняют проверку аппаратуры на термическую устойчивость.

8.1. Расчёт токов короткого замыкания по расчётным кривым

Расчёт токов короткого замыкания начинается с определения относительного расчётного сопротивления до точки КЗ, что отражается на расчётной схеме (рис. 8.7).

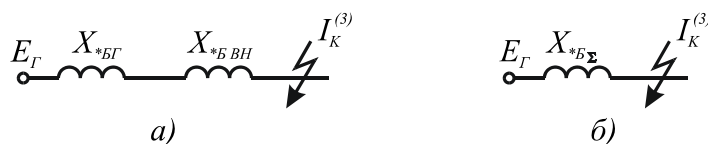


Рис. 8.7. Расчётные схемы:
а — полная; б — свернутая

При расчёте токов короткого замыкания в цепях, питающихся от генераторов, используются расчётные кривые, показывающие зависимость относительной периодической составляющей тока короткого замыкания $I_{*П}^{(3)}$ от расчётного сопротивления до точки короткого замыкания X_{*P} .

Для определения тока КЗ по расчётным кривым (рис. 8.8) следует суммарное относительное базисное сопротивление привести к номинальной мощности генераторов, питающих точку КЗ:

$$X_{*P} = X_{*B} \frac{\sum S_H}{S_B},$$

где S_H — номинальная мощность генератора.

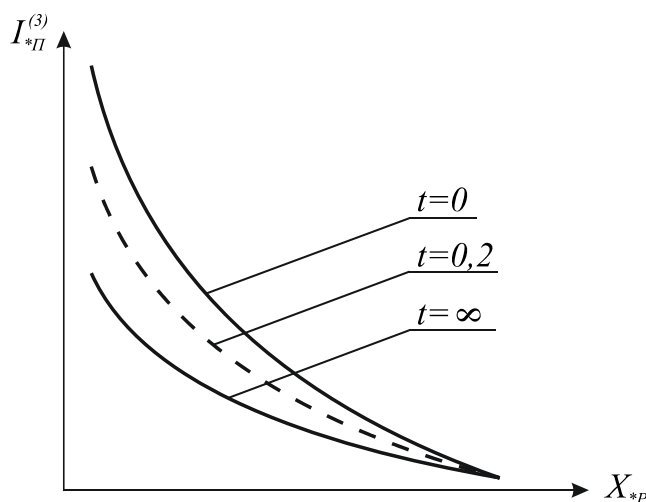


Рис. 8.8. Расчётные кривые генераторов

Чем удалённее КЗ от генератора, тем больше X_{*B} и тем больше X_{*P} .

Когда $X_{*P} \geq 3$, тогда считается, что напряжение на выводах генератора при КЗ не изменяется и генератор можно принять за источник неограниченной мощности.

Относительное значение периодической составляющей тока КЗ и абсолютное значение тока на шинах генератора связаны соотношением

$$I_K^{(3)} = I_{*П}^{(3)} I_G.$$

8.2. Особенности расчёта токов короткого замыкания в точках, питающихся от генераторов с АВР

Все генераторы в нашей стране работают с автоматическим регулированием возбуждения (АВР). АВР увеличивает ток ротора и, соответственно, поток возбуждения спустя некоторое время после начала КЗ. В установившемся режиме поток возбуждения $\Phi_{В.УСТ}$ всегда больше, чем поток возбуждения начальный $\Phi_{В.НАЧ}$. Поэтому расчётные кривые периодической составляющей тока КЗ для моментов времени $t = 0,2$ и $t = \infty$ могут проходить выше, чем для $t = 0$, и взаимно пересекаться.

8.3. Порядок определения тока короткого замыкания по расчётным кривым

1. Изобразить расчётную схему сети, в которой участвуют все элементы, влияющие на величину тока КЗ.
2. Задаться базисной мощностью и для каждого элемента сети определить относительное базисное сопротивление.
3. Изобразить полную схему замещения, на которой отображаются все элементы, представленные в расчётной схеме.
4. Методами преобразований перейти от полной схемы замещения к одно- или двухлучевой, при этом источники неограниченной мощности объединяются, генераторы одинаковой мощности также объединяются.
5. Для луча, который питается от источника ограниченной мощности, вычислить относительное расчётное сопротивление.
6. По расчётным кривым для требуемого момента времени найти относительное значение периодической составляющей тока КЗ (приложение 1).
7. Найти абсолютное значение периодической составляющей тока КЗ. Если требуется, то по найденному значению тока КЗ определить ударный ток.

Контрольные вопросы

1. В чём состоит особенность расчёта токов короткого замыкания от источника ограниченной мощности (генератора)?
2. Что такое АВР и для чего используется?
3. В какой момент времени наблюдается наибольшее значение тока при КЗ шинах генератора?
4. В какие моменты времени и для чего определяются токи короткого замыкания?
5. Почему ток КЗ на шинах генератора определяется для разных моментов времени?
6. Как называется сопротивление генератора в начальный момент времени?
7. Что отражают расчётные кривые генератора?

9. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

9.1. Электродинамические силы, действующие на проводники линии электропередачи

В соответствии с законом Био-Савара-Лапласа и законом Ампера на проводник с током действует электромагнитная сила [6]:

$$F = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2i_1 i_2}{a} L,$$

где μ_0 — магнитная постоянная, $\mu_0 = 1,25663706 \cdot 10^{-6} \text{ H/A}^2$.

i_1, i_2 — мгновенные токи в проводниках, А;

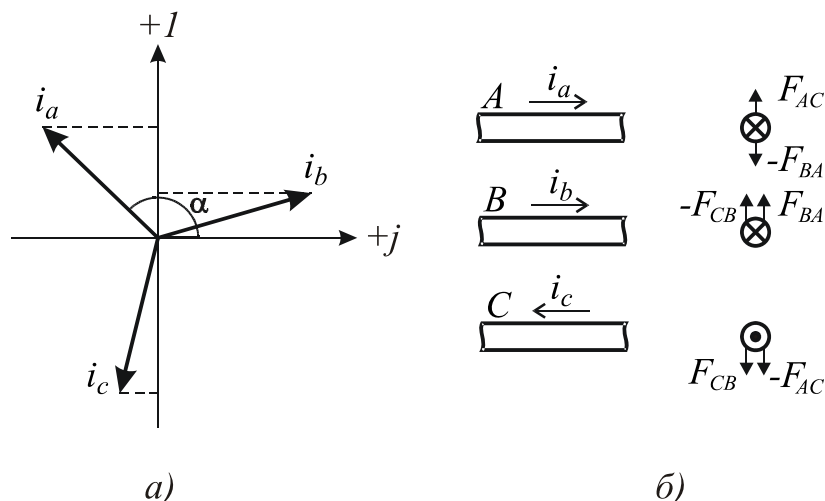
a — расстояние между проводниками, м;

L — длина проводников, м;

После упрощения выражения получим:

$$F = 2i_1 i_2 \frac{L}{a} 10^{-7}.$$

При расположении фаз в одной плоскости проводники крайней и средней фаз находятся в различных условиях. Для определения наибольшей силы, действующей на проводники, необходимо сравнить силы, действующие на каждый из проводников. При трёхфазном КЗ, в соответствии с законом Кирхгофа, токи в двух фазах всегда направлены в одну сторону, а в третьей фазе ток направлен в противоположную сторону. Протекающие токи создают соответствующие силы, действующие на проводники (рис. 9.1).



а) б)
 Рис. 9.1. Электродинамическое воздействие токов КЗ:
 а — векторная диаграмма мгновенных токов;
 б — электродинамические силы проводников

Оценивая качественно картину распределения сил, видно, что наибольшее изгибающее воздействие будет приходиться на фазу В.

Для упрощения примем длину проводника, равную одному метру:

$$F_B = F_{BA} - F_{CB};$$

$$i_A = I_m \sin \alpha; \quad i_B = I_m \sin(\alpha - 120^\circ); \quad i_C = I_m \sin(\alpha - 240^\circ).$$

Подставим выражения токов в формулу силы:

$$F_{BA} = \frac{2L}{a} 10^{-7} i_B i_A; \quad F_{CB} = \frac{2L}{a} 10^{-7} i_C i_B; \quad \Rightarrow \quad F_B = \frac{2L}{a} 10^{-7} (i_B i_A - i_C i_B).$$

Выразим отдельно произведения соответствующих токов:

$$i_B i_A = I_m^2 [\sin(\alpha - 120^\circ) \sin \alpha]; \quad i_C i_B = I_m^2 [\sin(\alpha - 240^\circ) \sin(\alpha - 120^\circ)].$$

Из геометрии известно, что:

$$\sin \alpha \cdot \sin \beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)].$$

Соответственно:

$$i_B i_A = I_m^2 \frac{1}{2} [\cos(-120^\circ) - \cos(2\alpha - 120^\circ)];$$

$$i_C i_B = I_m^2 \frac{1}{2} [\cos(-120^\circ) - \cos(2\alpha - 360^\circ)];$$

$$i_A i_B - i_C i_B = I_m^2 \frac{1}{2} [\cos(2\alpha - 360^\circ) - \cos(2\alpha - 120^\circ)].$$

Упростим полученное выражение, учитывая, что:

$$\cos \alpha - \cos \beta = -2 \sin\left(\frac{\alpha + \beta}{2}\right) \sin\left(\frac{\alpha - \beta}{2}\right);$$

$$i_B i_A - i_C i_B = -I_m^2 \sin(2\alpha - 240^\circ) \sin(-120^\circ) = \frac{\sqrt{3}}{2} I_m^2 \sin(2\alpha - 240^\circ).$$

Запишем выражение для определения силы, действующей на проводник:

$$F_B = \frac{2L}{a} 10^{-7} \frac{\sqrt{3}}{2} I_m^2 \sin(2\alpha - 240^\circ) = 1,73 I_m^2 \frac{L}{a} 10^{-7} \sin(2\alpha - 240^\circ).$$

Соответственно, сила будет иметь максимальное значение при следующих условиях:

$$\sin(2\alpha - 240^\circ) = 1 \quad \Rightarrow \quad \alpha = 165^\circ; \quad I_m = i_{yД}.$$

В конечном итоге выражение определения максимальной изгибающей силы, действующей на одну фазу, можно записать:

$$F_{\max} = 1,73 \cdot 10^{-7} (i_{yД}^{(3)})^2 \frac{L}{a}.$$

9.2. Проверка проводов линии электропередач на схлёстывание

Для проверки проводов воздушных ЛЭП на схлёстывание необходимо выполнить условие

$$\frac{m_{np} L_{np}}{1000} g > F_{np}^{(2)},$$

где m_{np} — масса провода, кг;

L_{np} — длина провода в пролёте, м;

g — ускорение свободного падения, м/с²;

$F_{np}^{(2)}$ — сила, действующая на проводники при минимальном токе короткого замыкания (двухфазном), Н.

Обычно схлёстывание проводов определяют для одного пролёта:

$$F_{np}^{(2)} = 1,73 \cdot 10^{-7} (i_{уд}^{(2)})^2 \frac{L_{np}}{a},$$

где $i_{уд}^{(2)}$ — ударный ток двухфазного короткого замыкания, А.

Если возможно схлёстывание проводов, то следует увеличивать расстояние между ними.

9.3. Проверка шин на электродинамическую стойкость

Как правило, шины прямоугольного сечения имеют большое число точек крепления, ввиду этого изгибающий момент, действующий на шины, определяется:

$$M_{изгб} = \frac{F L^2}{10},$$

где F — удельная сила, действующая на шину, Н/м;

L — расстояние между точками крепления шины, м.

Напряжение в материале шины определяется:

$$\sigma = \frac{M_{изгб}}{W},$$

где W — момент сопротивления изгибу, Н.

Момент сопротивления изгибу зависит от расположения шин и определяется следующим образом (рис. 9.2) [7]:

горизонтально

$$W = \frac{h^2 b}{6},$$

вертикально

$$W = \frac{h b^2}{6}.$$

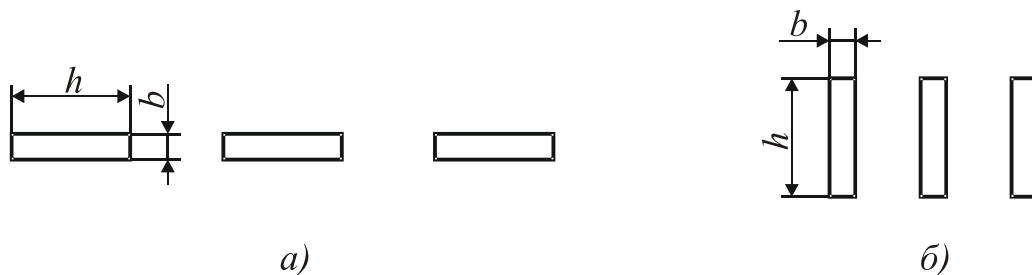


Рис. 9.2. Шины прямоугольного сечения:

a — горизонтальное расположение; *б* — вертикальное расположение

При проверке шин на электродинамическую устойчивость должно выполняться условие:

$$\sigma_{\text{доп}} > \sigma,$$

где $\sigma_{\text{доп}}$ — допустимое напряжение в материале шины, Н.

9.4. Проверка на электродинамическую устойчивость электрических аппаратов

Для электрических аппаратов проверка производится посредством сравнения заводской предельно допустимой амплитуды тока с расчётным максимальным ударным током короткого замыкания в месте установки аппарата:

$$i_{\text{доп}} > i_{\text{уд}}^{(3)}.$$

Контрольные вопросы

1. Как вычисляется максимальная сила, воздействующая на проводник при КЗ?
2. Зарисуйте и покажите направление сил, воздействующих на фазные проводники при трёхфазном КЗ.
3. Как определить направление силы, действующей на проводник с током, находящийся в магнитном поле?
4. Как проверить на схлёстывание провода линии электропередачи?
5. Как проверить шины подстанции на электродинамическую устойчивость?
6. Как проверить аппараты на электродинамическую устойчивость?
7. При каком виде короткого замыкания проверяются проводники ЛЭП на схлёстывание?

10. ТЕРМИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ТОКОВ НАГРУЗКИ И ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

10.1. Тепловые процессы в проводнике при нагревании и охлаждении

Уравнение теплового баланса проводника при нагревании запишется в виде [8]

$$dQ_{ВД} = dQ_{ВН} + dQ_{РС},$$

где $dQ_{ВД}$ — энергия, выделившаяся в проводнике, Дж;

$dQ_{ВН}$ — энергия, затрачиваемая на повышение температуры проводника, Дж;

$dQ_{РС}$ — энергия, рассеиваемая в окружающую среду, Дж.

Развернутое уравнение теплового баланса проводника:

$$I^2 R dt = C m d(\Theta_{ПР} - \Theta_{ОС}) + \alpha S (\Theta_{ПР} - \Theta_{ОС}) dt,$$

где C — удельная теплоёмкость среды, Дж/кг·°С;

m — масса проводника, кг;

$\Theta_{ПР}$ — температура проводника, °С;

$\Theta_{ОС}$ — температура окружающей среды, °С;

α — коэффициент теплоотдачи поверхности, Вт/м²·°С;

S — площадь поверхности проводника, м².

Превышение температуры проводника над температурой окружающей среды:

$$\tau = \Theta_{ПР} - \Theta_{ОС}.$$

Перепишем уравнение теплового баланса в следующем виде:

$$\frac{I^2 R}{\alpha S} dt = \frac{C m}{\alpha S} d\tau + \tau dt.$$

Обозначим постоянную времени нагрева проводника:

$$T = \frac{C m}{\alpha S}.$$

Постоянная времени нагрева характеризует скорость нарастания температуры проводника и показывает, за какое время температура в проводнике достигнет установившегося значения без теплоотдачи в окружающую среду.

Когда температура проводника достигает установившегося значения, т.е. $\Theta_{ПР} - \Theta_{ОС} = \text{const}$, то вся энергия, выделившаяся в проводнике, рассеивается в окружающую среду. Тогда можно записать:

$$\frac{I^2 R}{\alpha S} dt = \tau dt \quad \Rightarrow \quad \tau_{уст} = \frac{I^2 R}{\alpha S}.$$

$$\tau_{уст} dt = T d\tau + \tau dt; \quad \tau_{уст} dt - \tau dt = T d\tau; \quad \frac{dt}{T} = \frac{d\tau}{\tau_{уст} - \tau}.$$

Проинтегрируем полученное выражение:

$$\int \frac{dt}{T} = \int \frac{d\tau}{\tau_{ycm} - \tau}; \quad \frac{t}{T} = -\ln(\tau_{ycm} - \tau) + \ln C; \quad -\frac{t}{T} = \ln(\tau_{ycm} - \tau) - \ln C.$$

При $t = 0$, $\tau = \tau_0$. τ_0 — начальное превышение температуры провода над окружающей средой. Соответственно постоянная интегрирования определится:

$$C = \tau_{ycm} - \tau_0.$$

Перепишем предыдущее выражение с учётом постоянной интегрирования:

$$-\frac{t}{T} = \ln(\tau_{ycm} - \tau) - \ln(\tau_{ycm} - \tau_0); \quad -\frac{t}{T} = \ln\left(\frac{\tau_{ycm} - \tau}{\tau_{ycm} - \tau_0}\right); \quad e^{-\frac{t}{T}} = \frac{\tau_{ycm} - \tau}{\tau_{ycm} - \tau_0};$$

$$\tau_{ycm} - \tau = \tau_{ycm} e^{-\frac{t}{T}} - \tau_0 e^{-\frac{t}{T}}.$$

В итоге получим уравнение нагрева проводника:

$$\tau = \tau_{ycm} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) - \tau_0 e^{-\frac{t}{T}}.$$

В случае $\tau = \tau_0$ уравнение нагрева проводника упрощается:

$$\tau = \tau_{ycm} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right).$$

В обоих случаях изменение температуры идёт по экспоненте (рис. 10.1).

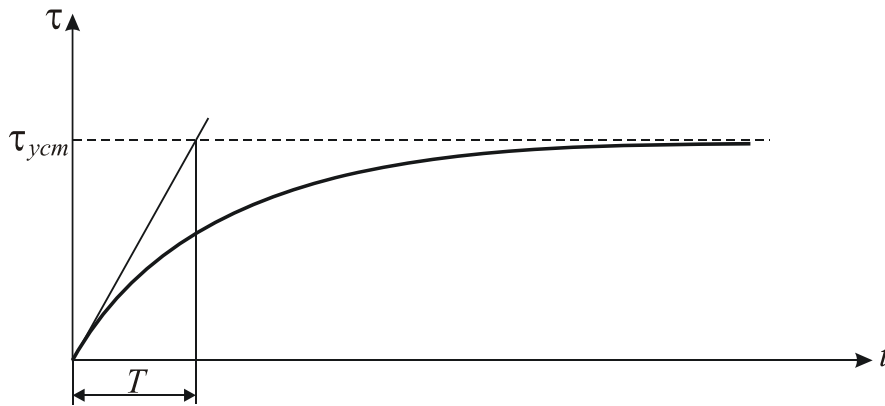


Рис. 10.1. Изменение температуры проводника при нагреве

При отсутствии тока в проводнике уравнение теплового баланса будет иметь вид:

$$0 = Cm d(\Theta_{\text{ПР}} - \Theta_{\text{ОС}}) + \alpha S(\Theta_{\text{ПР}} - \Theta_{\text{ОС}}) dt;$$

$$0 = T d\tau + \tau dt; \quad -T d\tau = \tau dt; \quad -\frac{d\tau}{\tau} = \frac{dt}{T}.$$

После интегрирования получим:

$$\int -\frac{d\tau}{\tau} = \int \frac{dt}{T}; \quad -\ln \tau + \ln C = \frac{t}{T}; \quad \ln \tau - \ln C = -\frac{t}{T}.$$

При $t = 0$ постоянная интегрирования определится:

$$C = \tau_0.$$

Подставим постоянную интегрирования в предыдущее выражение:

$$\ln \tau - \ln \tau_0 = -\frac{t}{T}; \quad \ln\left(\frac{\tau}{\tau_0}\right) = -\frac{t}{T}; \quad \frac{\tau}{\tau_0} = e^{-\frac{t}{T}}.$$

В итоге получим уравнение охлаждения проводника:

$$\tau = \tau_0 e^{-\frac{t}{T}}.$$

10.2. Определение температуры проводника при коротком замыкании

При коротком замыкании процесс нагрева проводника рассматривается как адиабатический, т.е. без теплоотдачи в окружающую среду:

$$I^2 R_t t = C_t m d\tau.$$

Масса проводника определяется:

$$m = \gamma FL,$$

где γ — плотность проводника, кг/м³;

F — поперечное сечение проводника, м²;

L — длина проводника, м.

Температура проводника и теплоемкость определяются:

$$R_t = R_{20} \left(1 + \alpha (\Theta_{\text{ПР}} - 20)\right); \quad C_t = C_0 \left(1 + \beta (\Theta_{\text{ПР}} - \Theta_0)\right); \quad R_{20} = \frac{\rho L}{F},$$

где R_{20} — сопротивление проводника при температуре 20 °С;

α — температурный коэффициент сопротивления, 1/К;

β — температурный коэффициент теплоёмкости, 1/К.

Перепишем уравнение нагрева проводника с учётом вышеизложенного:

$$I^2 R_{20} \left[1 + \alpha (\Theta_{\text{ПР}} - 20)\right] dt = C_0 \left[1 + \beta (\Theta_{\text{ПР}} - \Theta_0)\right] \gamma FL d\tau;$$

$$I^2 \frac{\rho L}{F} \left[1 + \alpha (\Theta_{\text{ПР}} - 20)\right] dt = C_0 \left[1 + \beta (\Theta_{\text{ПР}} - \Theta_0)\right] \gamma FL d\tau.$$

После упрощения проинтегрируем полученное выражение:

$$\int_{t_0}^{t_{\text{КЗ}}} \frac{I^2}{F^2} dt = \int_{\Theta_1}^{\Theta_2} \frac{C_0 \left[1 + \beta (\Theta_{\text{ПР}} - \Theta_0)\right] \gamma}{\rho \left[1 + \alpha (\Theta_{\text{ПР}} - 20)\right]} d\tau.$$

Левая часть выражения представляет из себя отношение интеграла Джоуля к поперечному сечению проводника, а правая часть является функцией удельной теплоемкости материала проводника, его удельного сопротивления и температуры нагрева (рис. 10.2):

$$\frac{I^2}{F^2} t_{КЗ} = A_{КОН} - A_{НАЧ},$$

где $A_{КОН}$, $A_{НАЧ}$ — величина, являющаяся функцией удельной теплоемкости материала проводника, его удельного сопротивления и температуры нагрева, соответствующая начальному и конечному моментам времени, $\frac{A^2 c}{мм^4}$.

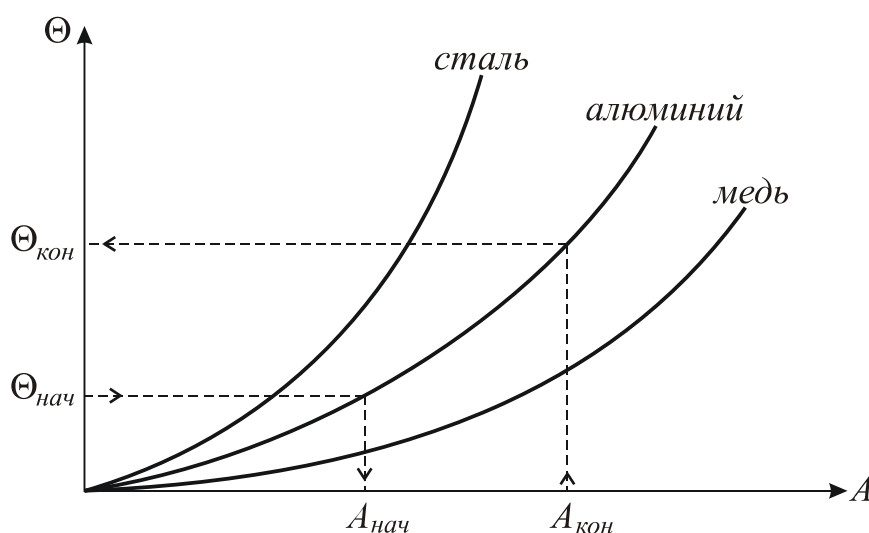


Рис. 10.2. Определение температуры проводников при КЗ

Порядок определения температуры по расчётным кривым следующий.

1. Определить по графику значение $A_{НАЧ}$, соответствующее известной начальной температуре проводника (прил. 2).

2. Определить $A_{КОН} = A_{НАЧ} + \frac{I^2}{F^2} t_{КЗ}$.

3. Зная $A_{КОН}$, по графику определить конечную температуру проводника.

10.3. Проверка коммутационных аппаратов на термическую устойчивость

Коммутационный аппарат (выключатель, разъединитель) считается термически устойчив, если выполняется следующее условие:

$$(k_{TEP} I_H)^2 t_{TEP} \geq I_{KЗ}^2 (t_{O.B.} + t_{PЗ} + T_A),$$

где k_{TEP} — коэффициент термической устойчивости, при котором проверяется аппарат на заводе-изготовителе;

I_H — номинальный ток аппарата, А;

t_{TEP} — время проверки аппарата на термическую устойчивость на заводе-изготовителе, с;

$t_{O.B.}$ — собственное время отключения электрического аппарата, с;

$t_{PЗ}$ — время срабатывания релейной защиты, с;

T_A — постоянная времени затухания апериодической составляющей тока КЗ, с.

Контрольные вопросы

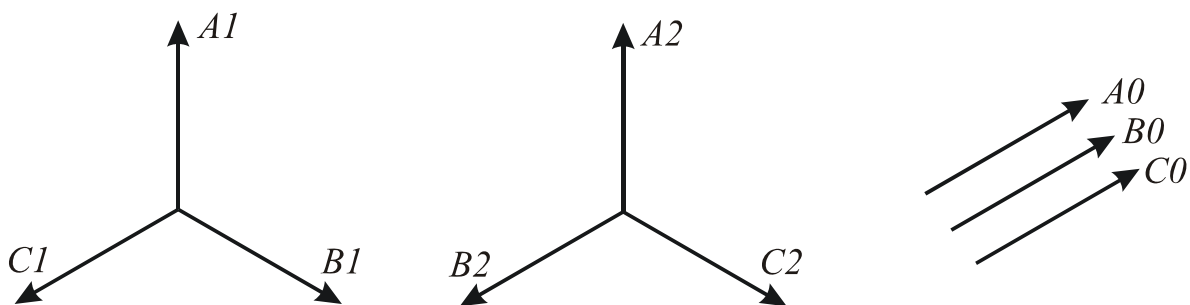
1. Запишите и поясните уравнение теплового баланса проводника.
2. Что показывает коэффициент теплоотдачи поверхности?
3. Как рассчитывается энергия, рассеиваемая в окружающую среду, для проводника с током?
4. Что показывает постоянная времени нагрева, поясните это на рисунке.
5. Запишите уравнение изменения температуры проводника при нагреве.
6. Запишите уравнение изменения температуры проводника при остывании.
7. Как рассчитывается температура проводника с током в условиях эксплуатации?
8. Что показывает температурный коэффициент сопротивления?
9. Что показывает температурный коэффициент теплоёмкости?
10. Как проверить электрический аппарат на термическую устойчивость?

11. ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ СИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ДЛЯ РАССМОТРЕНИЯ УСТАНОВИВШИХСЯ РАБОЧИХ И АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ

11.1. Метод симметричных составляющих

Сущность метода симметричных составляющих заключается в том, что любой несимметричный режим можно представить в виде трёх симметричных составляющих: прямой, обратной и нулевой последовательности [9].

Реальная сеть заменяется сопротивлениями прямой, обратной и нулевой последовательности, по которым протекают соответствующие токи, под действием напряжений и ЭДС прямой, обратной и нулевой последовательностей. Для получения реальных электрических величин геометрически складываются значения симметричных составляющих (рис. 11.1).



*Рис. 11.1. Взаимное расположение векторов:
A1, B1, C1 — прямой последовательности;
A2, B2, C2 — обратной последовательности;
A0, B0, C0 — нулевой последовательности*

Взаимное расположение векторов прямой, обратной и нулевой последовательностей зависит от вида несимметрии. Обычно за особенную фазу принимается фаза А:

$$\begin{aligned} A &= A_1 + A_2 + A_0; \\ B &= B_1 + B_2 + B_0; \\ C &= C_1 + C_2 + C_0. \end{aligned}$$

Для уменьшения количества неизвестных вводится фазный множитель, который соответствует повороту единичного вектора против часовой стрелки на угол 120° :

$$a = e^{-j120^\circ}.$$

Тогда предыдущую систему уравнений можно записать:

$$\begin{aligned} A &= A_1 + A_2 + A_0; \\ B &= A_1 a^2 + A_2 a + A_0; \\ C &= A_1 a + A_2 a^2 + A_0. \end{aligned}$$

Для нахождения симметричных составляющих по фазным значениям токов или напряжений суммируем левые и правые части системы уравнений:

$$A+B+C = A1(1+a^2+a) + A2(1+a+a^2) + A0(1+a^3+a^3);$$

$$A0 = \frac{1}{3}(A+B+C).$$

Домножим уравнения системы уравнений на 1, a и a^2 соответственно:

$$A+Ba+Ca^2 = A1(1+a^3+a^3) + A2(1+a^2+a^4) + A0(1+a+a^2);$$

$$A1 = \frac{1}{3}(A+Ba+Ca^2).$$

Домножим уравнения системы уравнений на 1, a^2 и a соответственно:

$$A+Ba^2+Ca = A1(1+a^4+a^2) + A2(1+a^3+a^3) + A0(1+a^2+a);$$

$$A2 = \frac{1}{3}(A+Ba^2+Ca).$$

В итоге для токов и напряжений можно записать по несколько систем уравнений (табл. 11.1).

Таблица 11.1. Вычисление симметричных составляющих токов и напряжений

Применительно к токам		Применительно к напряжениям	
$\underline{I}_A = \underline{I}_{A1} + \underline{I}_{A2} + \underline{I}_{A0};$ $\underline{I}_B = \underline{I}_{B1} + \underline{I}_{B2} + \underline{I}_{B0};$ $\underline{I}_C = \underline{I}_{C1} + \underline{I}_{C2} + \underline{I}_{C0};$	(1)	$\underline{U}_A = \underline{U}_{A1} + \underline{U}_{A2} + \underline{U}_{A0};$ $\underline{U}_B = \underline{U}_{B1} + \underline{U}_{B2} + \underline{U}_{B0};$ $\underline{U}_C = \underline{U}_{C1} + \underline{U}_{C2} + \underline{U}_{C0};$	(2)
$\underline{I}_A = \underline{I}_{A1} + \underline{I}_{A2} + \underline{I}_{A0};$ $\underline{I}_B = \underline{I}_{A1}a^2 + \underline{I}_{A2}a + \underline{I}_{A0};$ $\underline{I}_C = \underline{I}_{A1}a + \underline{I}_{A2}a^2 + \underline{I}_{A0};$	(3)	$\underline{U}_A = \underline{U}_{A1} + \underline{U}_{A2} + \underline{U}_{A0};$ $\underline{U}_B = \underline{U}_{A1}a^2 + \underline{U}_{A2}a + \underline{U}_{A0};$ $\underline{U}_C = \underline{U}_{A1}a + \underline{U}_{A2}a^2 + \underline{U}_{A0};$	(4)
$\underline{I}_{A0} = \frac{1}{3}(\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C);$ $\underline{I}_{A1} = \frac{1}{3}(\underline{I}_A + \underline{I}_B a + \underline{I}_C a^2);$ $\underline{I}_{A2} = \frac{1}{3}(\underline{I}_A + \underline{I}_B a^2 + \underline{I}_C a);$	(5)	$\underline{U}_{A0} = \frac{1}{3}(\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C);$ $\underline{U}_{A1} = \frac{1}{3}(\underline{U}_A + \underline{U}_B a + \underline{U}_C a^2);$ $\underline{U}_{A2} = \frac{1}{3}(\underline{U}_A + \underline{U}_B a^2 + \underline{U}_C a);$	(6)
		$\underline{E}_{A1} = \underline{I}_{A1} Z_1 + \underline{U}_{A1};$ $0 = \underline{I}_{A2} Z_2 + \underline{U}_{A2};$ $0 = \underline{I}_{A0} Z_0 + \underline{U}_{A0}.$	(7)

Под действием источника ЭДС через сопротивления прямой последовательности протекают токи прямой последовательности. ЭДС прямой последовательности существует только у источника. Кроме того, все генераторы в энер-

госистеме вращаются в одну сторону, поэтому у них не может быть ЭДС обратной последовательности. При рассмотрении аварийных режимов в место несимметрии вводится источник напряжения прямой последовательности (например, короткое замыкание через переходное сопротивление) (рис. 11.2).

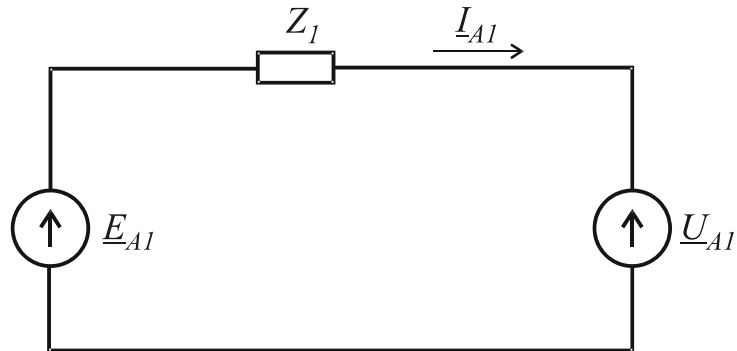


Рис. 11.2. Схема замещения прямой последовательности

В схему замещения обратной последовательностей в место несимметрии вводится источник напряжения обратной последовательности. Обратная последовательность появляется, например, при обрыве одной из фаз питающей линии, хоть это и искусственный приём, но тем не менее он хорошо подтверждается практикой. Источник напряжения нулевой последовательности вводится в место несимметрии при коротких замыканиях (рис. 11.3).

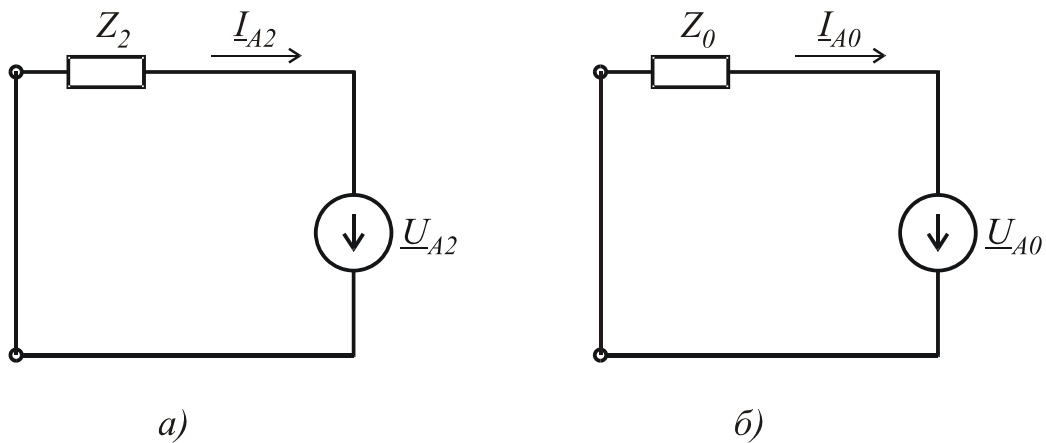


Рис. 11.3. Схемы замещения обратной и нулевой последовательностей:
 а — схема замещения обратной последовательности;
 б — схема замещения нулевой последовательности

11.2. Сопротивление элементов сети токам различных последовательностей

Для невращающихся элементов сети чередование фаз не имеет значения, сопротивления прямой и обратной последовательностей таких элементов рассчитываются одинаково. Одним из таких элементов является линия электропередачи:

$$Z_1 = Z_2; \quad Z_1 = (R_0 + X_0)L,$$

где R_0, X_0 — погонное активное и реактивное сопротивления проводника, Ом/км.
 L — длина проводника, км.

Погонное активное сопротивление зависит от сечения и материала проводника. Погонное реактивное сопротивление зависит от расстояния между проводниками, радиуса провода и материала и расстояния от проводника до земли.

Например для неизолированных проводов марки А35, при расстоянии между проводами 400 мм, $R_0 = 0,83$ Ом/км, $X_0 = 0,34$ Ом/км. А для самонесущих изолированных проводов марки СИП-4 4Н×35 $R_0 = 0,986$ Ом/км, $X_0 = 0,1$ Ом/км.

Сопротивление ЛЭП токам нулевой последовательности определяется типом нейтрали электрической сети. В сетях 0,38 кВ его величина намного больше, чем токам прямой и обратной последовательностей. Токи нулевой последовательности в сети 0,38 кВ с глухозаземлённой нейтралью возникают при различных несимметричных режимах работы. В сетях с изолированной нейтралью токи нулевой последовательности протекают при замыканиях на землю (рис. 11.4).

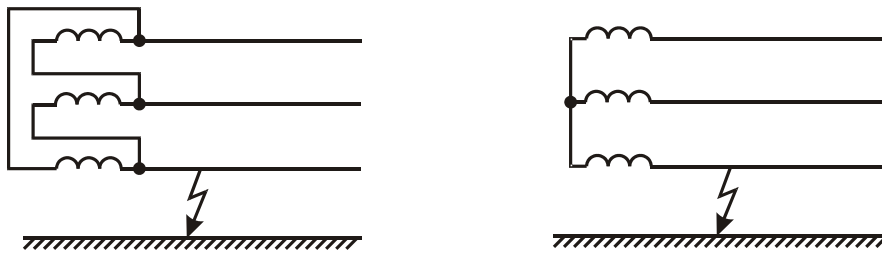


Рис. 11.4. Сети с изолированной нейтралью

Для трансформаторов, работающих в системах с изолированной нейтралью, учитывается только сопротивление токам прямой и обратной последовательностей:

$$Z_1 = Z_2; \quad Z_1 = \frac{u_{k\%}}{100} \frac{U_H^2}{S_H}.$$

Для сетей 0,38 кВ, работающих с глухозаземленной нейтралью, в месте возникновения несимметрии вводят источник напряжения нулевой последовательности, под действием которого в каждой фазе протекает ток нулевой последовательности, а в нейтрали утроенный ток нулевой последовательности $3I_0$. От взаимодействия токов в фазных проводах и в земле индуктивное сопротивление нулевой последовательности отличается от индуктивного сопротивления прямой последовательности.

Токи нулевой последовательности в обмотках трансформатора протекают в одну сторону. Эти три тока создают потоки нулевой последовательности, также направленные в одну сторону (рис. 11.5).

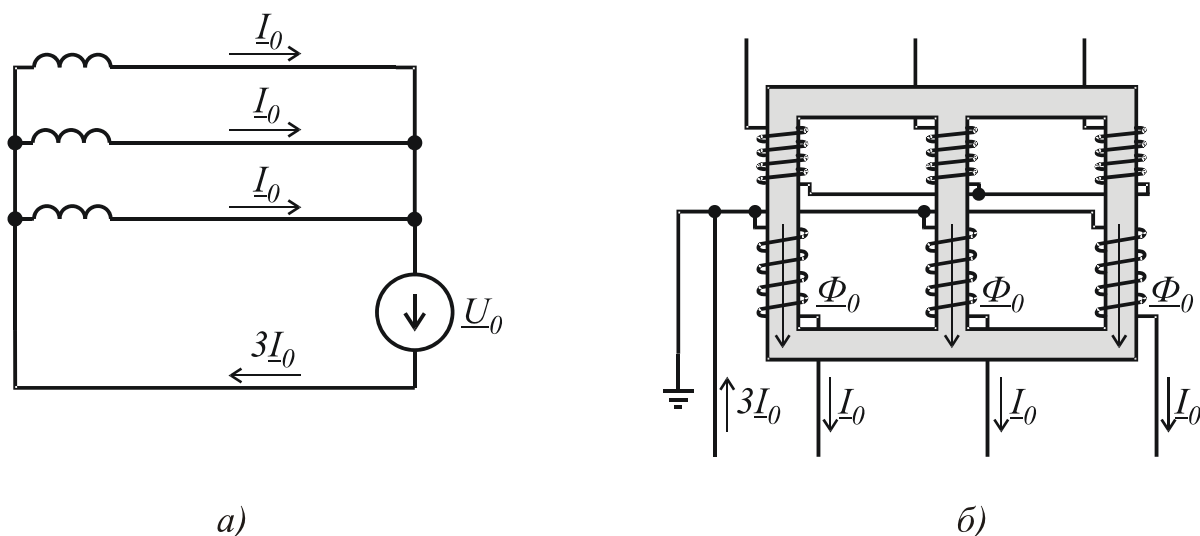


Рис. 11.5. Протекание токов нулевой последовательности в сети с глухозаземленной нейтралью

Потоки нулевой последовательности замыкаются через масло и бак трансформатора, поэтому сопротивление трансформаторов с глухозаземленной нейтралью токам нулевой последовательности значительно больше, чем токам прямой последовательности, при схеме соединения обмоток трансформатора «звезда — звезда с нулём» $Z_0 \gg Z_1$.

Кроме того, потоками нулевой последовательности бак трансформатора разогревается. Сопротивление трансформатора токам нулевой последовательности не рассчитывается, а определяется опытным путём на заводе-изготовителе. В справочниках приводится сопротивление трансформатора току однофазного короткого замыкания, обозначается как $Z_T^{(1)}$. Например, для трансформатора мощностью 160 кВА $Z_T^{(1)} = 0,487 \text{ Ом}$ [5].

11.3. Однофазное короткое замыкание в сетях с глухозаземленной нейтралью

При рассмотрении однофазного короткого замыкания, по теории симметричных составляющих, в место несимметрии вводят источники напряжения прямой, обратной и нулевой последовательностей (рис. 11.6).

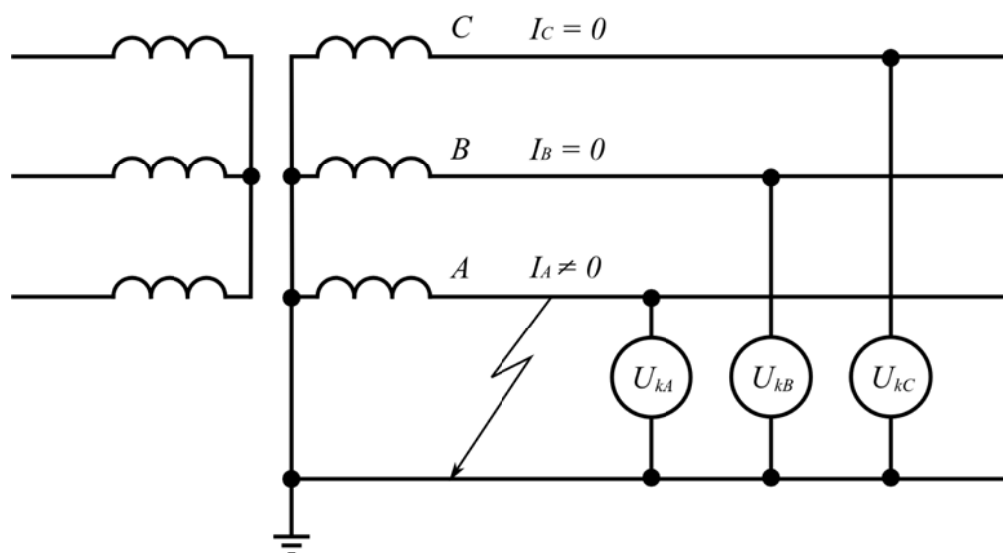


Рис. 11.6. Схема при однофазном коротком замыкании

Из представленной схемы можно записать граничные условия:

$$I_{kA} \neq 0; \quad I_{kB} = 0; \quad I_{kC} = 0; \quad U_{kA} = 0; \quad U_{kB} \neq 0; \quad U_{kC} \neq 0.$$

Подставив граничные условия в систему уравнений 5 (см. табл. 11.1), получим:

$$\underline{I}_{A1} = \frac{1}{3} \underline{I}_A; \quad \underline{I}_{A2} = \frac{1}{3} \underline{I}_A; \quad \underline{I}_{A0} = \frac{1}{3} \underline{I}_A.$$

В соответствии с системой уравнений (1) (см. табл. 11.1):

$$\begin{aligned} \underline{I}_A &= \underline{I}_{A1} + \underline{I}_{A2} + \underline{I}_{A0} \neq 0; \\ \underline{I}_B &= \underline{I}_{B1} + \underline{I}_{B2} + \underline{I}_{B0} = 0; \\ \underline{I}_C &= \underline{I}_{C1} + \underline{I}_{C2} + \underline{I}_{C0} = 0; \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad \underline{I}_A^{(1)} = 3 \underline{I}_{A1} = 3 \underline{I}_{A2} = 3 \underline{I}_{A0}.$$

Поскольку нулевая последовательность возникает только при однофазном КЗ, то чаще говорят, что ток однофазного КЗ равен утроенному току нулевой последовательности (рис. 11.7):

$$\underline{I}_A^{(1)} = 3 \underline{I}_{A0}.$$

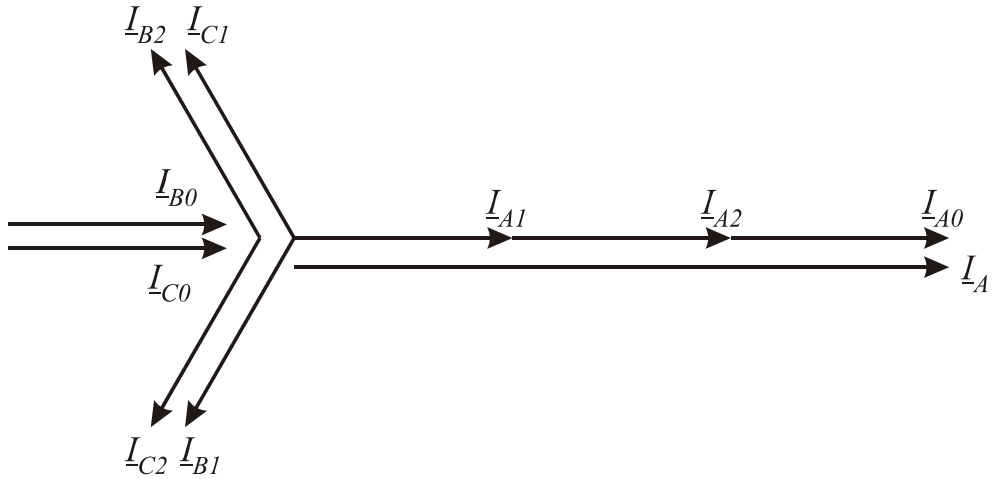


Рис. 11.7. Векторная диаграмма при ОКЗ

При однофазном КЗ под действием ЭДС прямой последовательности E_1 через сопротивление прямой последовательности Z_1 протекает ток прямой последовательности I_1 . ЭДС обратной и нулевой последовательности у генератора отсутствует. Сложим левые и правые части уравнения 7 (см. табл. 11.1):

$$\begin{aligned} \underline{E}_{A1} &= \underline{I}_{A1} Z_{A1} + \underline{U}_{A1}; \\ 0 &= \underline{E}_{A2} = \underline{I}_{A2} Z_{A2} + \underline{U}_{A2}; \\ 0 &= \underline{E}_{A0} = \underline{I}_{A0} Z_{A0} + \underline{U}_{A0}; \end{aligned}$$

$$\underline{E}_{A1} = \underline{I}_{A1} Z_{A1} + \underline{I}_{A2} Z_{A2} + \underline{I}_{A0} Z_{A0} + \underline{U}_{A1} + \underline{U}_{A2} + \underline{U}_{A0}.$$

Учитывая, что при однофазном КЗ

$$\underline{U}_{\kappa A} = \underline{U}_{A1} + \underline{U}_{A2} + \underline{U}_{A0}; \quad \underline{I}_{A1} = \underline{I}_{A2} = \underline{I}_{A0}.$$

можем записать:

$$\underline{E}_{A1} = \underline{I}_{A1} (Z_1 + Z_2 + Z_0) \Rightarrow \underline{I}_{A1} = \frac{\underline{E}_{A1}}{Z_1 + Z_2 + Z_0}.$$

Соответственно, ток в фазе А определится:

$$\underline{I}_A = \frac{3 \underline{E}_{A1}}{Z_1 + Z_2 + Z_0}.$$

Токи однофазного и трёхфазного короткого замыкания определяются:

$$I^{(1)} = \frac{3 U_\Phi}{Z_1 + Z_2 + Z_0}; \quad I^{(3)} = \frac{U_\Delta}{\sqrt{3} Z_1}.$$

Если $Z_1 = Z_2 = Z_0$, то:

$$I^{(1)} = I^{(3)} = \frac{U_\Phi}{Z_1}.$$

Все сети 110 кВ имеют глухозаземлённую нейтраль и имеют непосредственную гальваническую связь друг с другом, т.е. закольцованы, ввиду этого суммарно сопротивление сети току нулевой последовательности может быть меньше, чем току прямой последовательности. Если $Z_0 < Z_1$, то $I^{(1)} > I^{(3)}$.

Чтобы не допустить такого сочетания токов в сетях 110 кВ, часть нейтралей трансформаторов 110/35/10 кВ, 110/10 кВ, 110/6 кВ разземляют. Для этого нулевую точку трансформаторов соединяют с заземляющим устройством через разъединитель QS (рис. 11.8). Разземление нейтралей трансформаторов выполняют до тех пор, пока ток однофазного КЗ будет составлять величину, не более 60% от тока трёхфазного КЗ.

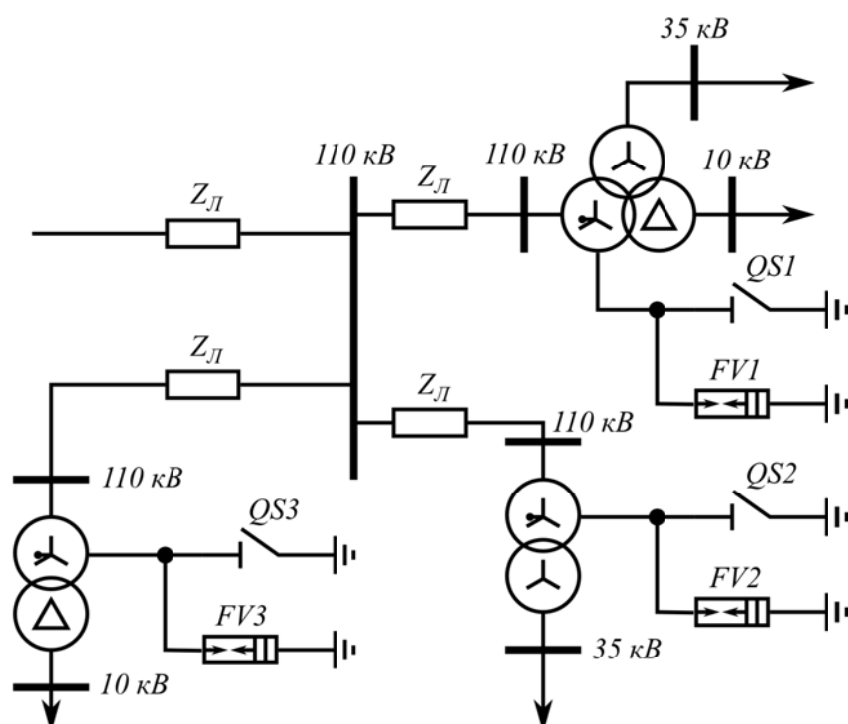


Рис. 11.8. Сеть 110 кВ с эффективно заземлённой нейтралью

В трансформаторах 110 кВ, работающих с разземлённой нейтралью, нулевую точку защищают от перенапряжения разрядниками FV и при однофазных КЗ в первую очередь отключают трансформаторы, работающие с разземлённой нейтралью. Сети 110 кВ, имеющие частичное разземление нейтрали, защищённой от перенапряжения разрядниками, называют сетями с эффективным заземлением нейтрали.

11.4. Расчёт токов однофазного короткого замыкания в сетях 0,38 кВ с глухозаземленной нейтралью

В соответствии с теорией симметричных составляющих, ток однофазного КЗ рассчитывается:

$$I_A^{(1)} = \frac{3U_\phi}{Z_{1T} + Z_{2T} + Z_{0T} + Z_{1Л} + Z_{2Л} + Z_{0Л}} = \frac{3U_\phi}{Z_T^{(1)} + Z_{1Л} + Z_{2Л} + Z_{0Л}}$$

где $Z_T^{(1)}$ — сопротивление трансформатора току однофазного КЗ.

$Z_T^{(1)}$ не рассчитывается, а определяется на заводе-изготовителе:

$$Z_T^{(1)} = Z_{1T} + Z_{2T} + Z_{0T} \gg Z_{1T}.$$

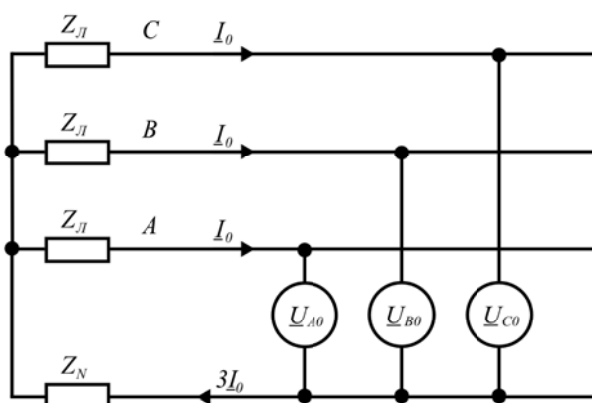


Рис. 11.9. Схема замещения ЛЭП

По нулевому проводу протекает утроенный ток нулевой последовательности под действием трёх напряжений нулевой последовательности (рис. 11.9).

Векторы напряжения нулевой последовательности равны по величине и по направлению, поэтому их можно представить одним U_0 (рис. 11.10).

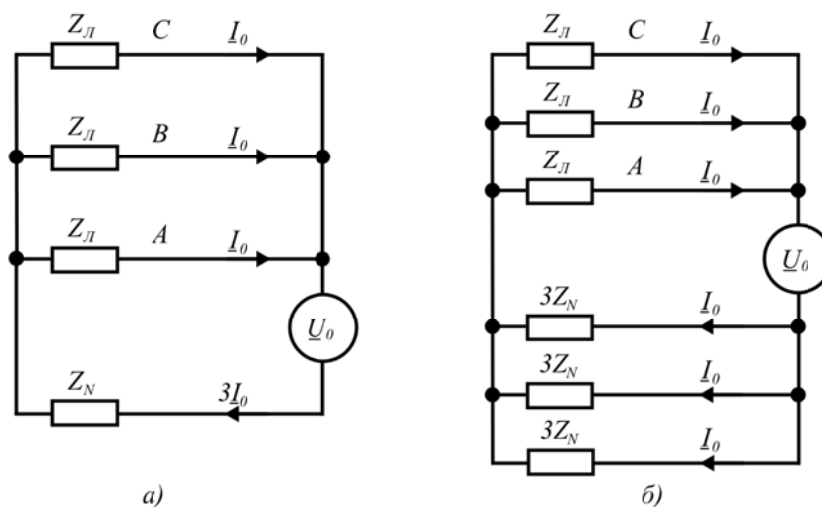


Рис. 11.10. Схема замещения трёх фаз

Из трёхфазной схемы замещения выделим схему замещения одной фазы. В схеме замещения одной фазы нулевой провод или заземляющее устройство вводится утроенной величиной (рис. 11.11).

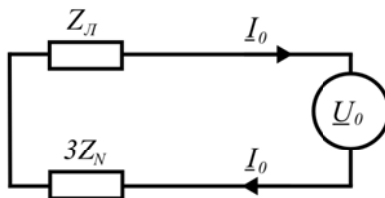


Рис. 11.11. Схема замещения одной фазы

Тогда ток однофазного короткого замыкания определится:

$$I_A^{(1)} = \frac{3U_\phi}{Z_T^{(1)} + Z_{1Л} + Z_{1Л} + Z_{1Л} + 3Z_N};$$

$$3Z_{1Л} + 3Z_N = 3(Z_{1Л} + Z_N) = 3Z_{нетл};$$

$$I_A^{(1)} = \frac{3U_\phi}{Z_T^{(1)} + 3Z_{нетл}} = \frac{U_\phi}{Z_T^{(1)}/3 + Z_{нетл}};$$

$$Z_{нетл} = \sqrt{(R_\phi + R_N)^2 + X_{нетл}^2};$$

$$R_\phi = R_{0\phi}L; \quad R_N = R_{0N}L; \quad X_{нетл} = X_{0нетл}L.$$

Для ВЛ 0,38 кВ $X_{0нетл} = 0,6$ Ом/км.

Для трансформатора мощностью 100 кВА $Z_T^{(1)} = 1,07$ Ом, для трансформатора 160 кВА $Z_T^{(1)} = 0,487$ Ом.

11.5. Изменение напряжения в сети при однофазном коротком замыкании

Наряду с увеличением тока в одной из фаз и в нулевом проводе, однофазное КЗ искажает фазные и линейные напряжения. Уже из граничных условий (см. рис. 11.6) ясно, что напряжения неповрежденных фаз $U_{кВ}$, $U_{кС}$ не равны нулю. В принципе для определения этих напряжений можно вычислить ток в нулевом проводе и падение напряжения на нем. Тогда определить смещение нулевой точки приемников электрической энергии относительно нулевой точки источника не представит особого труда.

Но проще получить значения симметричных составляющих напряжений. Для этого воспользуемся уравнениями (7) (см. табл. 11.1). Из них нетрудно найти значения составляющих напряжений обратной и нулевой последовательности:

$$0 = I_{A2}Z_2 + \underline{U}_{A2}; \quad \underline{U}_{A2} = -I_{A2}Z_2; \quad 0 = I_{A0}Z_0 + \underline{U}_{A0}; \quad \underline{U}_{A0} = -I_{A0}Z_0.$$

Поскольку при однофазном КЗ

$$I_{A1} = I_{A2} = I_{A0} = \frac{\underline{E}_{A1}}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \Rightarrow \underline{U}_{A2} = -\frac{\underline{E}_{A1} Z_2}{Z_1 + Z_2 + Z_0};$$

$$\underline{U}_{A0} = -\frac{\underline{E}_{A1} Z_0}{Z_1 + Z_2 + Z_0}.$$

Учитывая, что

$$Z_1 = Z_2 = Z_L; \quad Z_0 = Z_L + 3Z_N.$$

Тогда напряжения обратной и нулевой последовательностей определяются

$$\underline{U}_{A2} = -\frac{\underline{E}_{A1} Z_L}{3Z_L + 3Z_N}; \quad \underline{U}_{A0} = -\frac{\underline{E}_{A1}(Z_L + 3Z_N)}{3Z_L + 3Z_N}.$$

Поскольку в месте КЗ напряжение в фазе А:

$$\underline{U}_A = \underline{U}_{A1} + \underline{U}_{A2} + \underline{U}_{A0} = 0; \Rightarrow \underline{U}_{A1} = -(\underline{U}_{A2} + \underline{U}_{A0}) = \frac{\underline{E}_{A1}(2Z_L + 3Z_N)}{3Z_L + 3Z_N}.$$

Для животноводческих помещений $Z_L = Z_N$ тогда

$$\underline{U}_{A1} = -\frac{5\underline{E}_{A1}}{6}; \quad \underline{U}_{A2} = -\frac{\underline{E}_{A1}}{6}; \quad \underline{U}_{A0} = -\frac{4\underline{E}_{A1}}{6}.$$

Данные напряжения можно показать на векторной диаграмме (рис. 11.12).

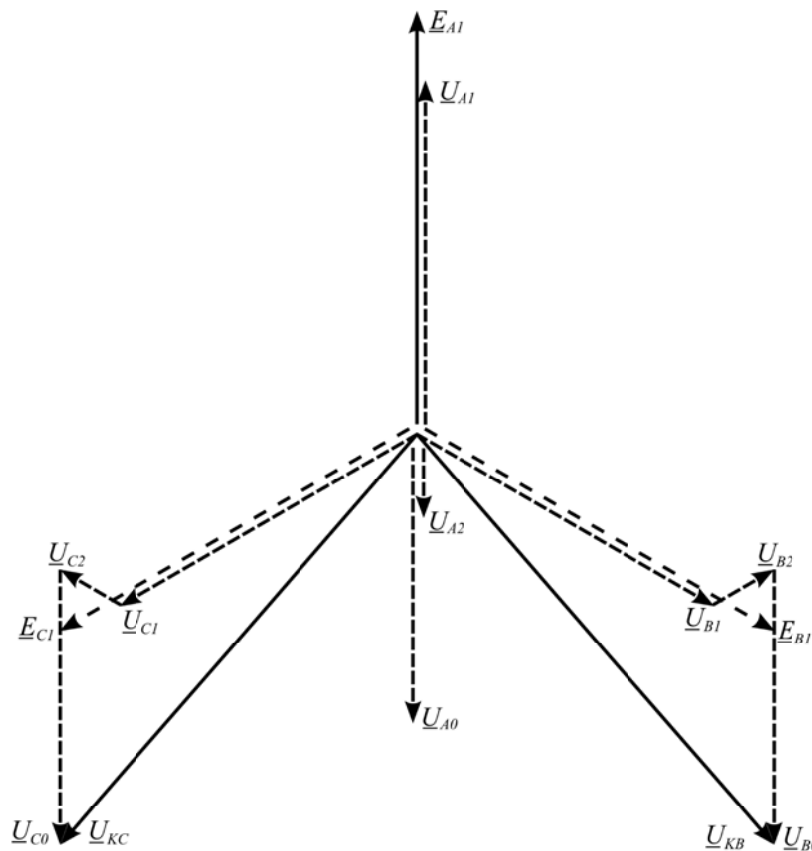


Рис. 11.12. Изменение фазного напряжения в сети

Абсолютное значение напряжений фаз В и С находится по проекциям векторов \underline{U}_1 , \underline{U}_2 , \underline{U}_0 на ось абсцисс и ось ординат. До тех пор, пока однофазное КЗ не отключится, напряжение на неповреждённых фазах вблизи точки КЗ превышает фазное, что приводит к выходу из строя однофазных электроприёмников. В сетях с разделением функций нулевого и защитного проводника, при замыкании одной из фаз на нулевой защитный проводник, искажение напряжений неповрежденных фаз снижается.

11.6. Способы увеличения величины тока однофазного короткого замыкания

Величина тока однофазного короткого замыкания ограничивается сопротивлениями линии и трансформатора, соответственно для увеличения тока КЗ и увеличения чувствительности к ним защиты, установленной на подстанции, на стадии проектирования можно выполнить следующие технические мероприятия.

1. Увеличить сечения фазных проводников.
2. Использовать самонесущие изолированные провода (СИП). Реактивное сопротивление таких проводов в несколько раз меньше неизолированных ввиду близкого расположения фазных и нулевого проводников СИП.
3. Увеличить сечения нулевого провода.
4. Выполнить прокладку шины заземления параллельно нулевому проводу.
5. Разделить нулевой проводник на рабочий нулевой N и защитный PE.
6. Уменьшить сопротивление трансформатора применением трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда – зигзаг с нулём».
7. Разместить внутри бака трансформатора короткозамкнутую обмотку на высоту стержня магнитопровода, для замыкания потоков нулевой последовательности.
8. Разместить дополнительную третью обмотку на каждом стержне магнитопровода, с соединением их в треугольник.

11.7. Влияние повторных заземлений на процесс однофазного короткого замыкания

Рассмотрим сеть 0,38 кВ, в которой происходит замыкание одной из фаз на корпус электроприёмника (рис. 11.13).

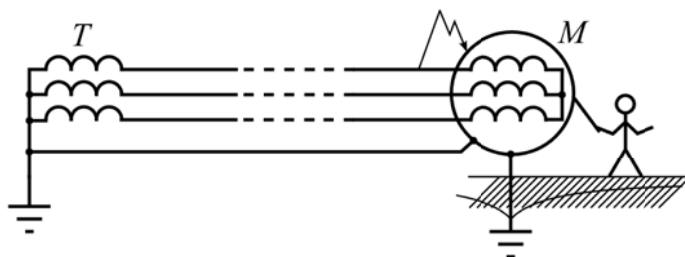


Рис. 11.13. Замыкание одной из фаз на корпус электроприёмника

При этом схема замещения будет выглядеть как показано на рисунке 11.14.

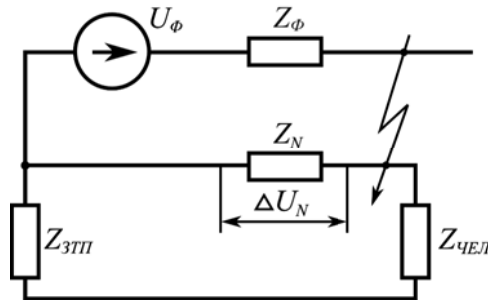


Рис. 11.14. Схема замещения

Возьмём для примера:

$$Z_N = 1 \text{ Ом}; \quad Z_\phi = 1 \text{ Ом}; \quad U_\phi = 220 \text{ В}; \quad Z_T^{(1)} \ll Z_{\text{нетл}}.$$

Тогда ток однофазного КЗ без учёта сопротивления трансформатора определится:

$$I^{(1)} = \frac{U_\phi}{Z_\phi + Z_N} = \frac{220}{2} = 110 \text{ А}.$$

Сопротивление тела человека $Z_{\text{ЧЕЛ}}$, включенного в цепь, составляет примерно 1 кОм, а сопротивление заземления подстанции $Z_{\text{ЗТП}}$ по нормативным документам должно быть не менее 4 Ом, тогда всё напряжение ΔU_N приложится к человеку. Напряжение прикосновения в этом случае определится:

$$U_{\text{ПР}} = \Delta U_N = I^{(1)} Z_N = 110 \text{ В}.$$

Произведём повторное заземление корпуса машины (рис. 11.15), тогда потенциал распределится по гиперboloиду.

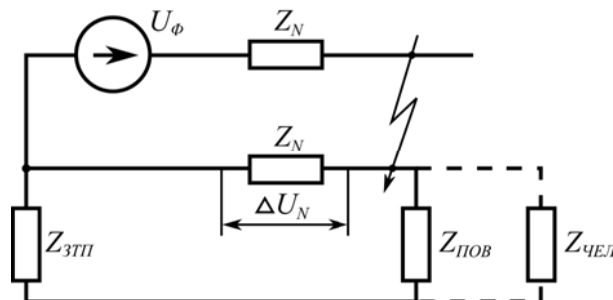


Рис. 11.15. Схема замещения с учётом повторного заземления

По требованиям нормативных документов сопротивление повторного заземления нулевого проводника $Z_{\text{ПОВ}}$ должно быть не более 30 Ом.

Падение напряжение на повторном заземлении:

$$\Delta U_{\text{ПОВ}} = \frac{\Delta U_N Z_{\text{ПОВ}}}{Z_{\text{ПОВ}} + Z_{\text{ЗТП}}} = \frac{110 \cdot 30}{34} = 97 \text{ В.}$$

Если человек удалён от места повреждения изоляции на 20 м и касается корпуса, то он попадает под 97 В. Если стоит на расстоянии вытянутой руки

$$U_{\text{ПР}} = \Delta U_{\text{ПОВ}} \alpha_{\text{ПР}},$$

где $\alpha_{\text{ПР}}$ — коэффициент прикосновения, $\alpha_{\text{ПР}} \approx 0,6$.

Тогда напряжение прикосновения составит 58 В.

Повторное заземление снижает напряжение прикосновения и незначительно влияет на величину токов КЗ. Несмотря на наличие повторных заземлений, напряжение на корпусах электрооборудования представляет опасность для жизни людей и животных.

Для снижения напряжения прикосновения до безопасного значения устанавливают устройство выравнивания электрических потенциалов. Такое выравнивание потенциалов осуществляется на всех подстанциях. На них заземляющее устройство выполняют из вертикальных и горизонтальных электродов.

При отсутствии нулевого провода ток замыкания при однофазном повреждении изоляции определится:

$$I^{(1)} = \frac{U_{\Phi}}{Z_{\Phi} + Z_{\text{ПОВ}} + Z_{\text{ЗТП}}}.$$

При принятых сопротивлениях величина его составит 6,3 А.

При этом к телу человека приложится напряжение:

$$U_{\text{ПР}} = \Delta U_{\text{ПОВ}} \alpha_{\text{ПР}} = I^{(1)} Z_{\text{ПОВ}} \alpha_{\text{ПР}} = 6,3 \cdot 30 \cdot 0,6 = 113,4 \text{ В.}$$

Ток, протекающий через тело человека, составит 113 мА, который является смертельным.

11.8. Изменение напряжения вдоль линии при однофазном коротком замыкании

Учитывая, что при однофазном КЗ

$$\underline{E}_{A1} = \underline{I}_{A1} Z_1 + \underline{U}_{A1}; \quad 0 = \underline{I}_{A2} Z_2 + \underline{U}_{A2}; \quad 0 = \underline{I}_{A0} Z_0 + \underline{U}_{A0},$$

а также, что

$$\underline{U}_{A1} = -\frac{5 \underline{E}_{A1}}{6}; \quad \underline{U}_{A2} = -\frac{\underline{E}_{A1}}{6}; \quad \underline{U}_{A0} = -\frac{4 \underline{E}_{A1}}{6}.$$

Зарисуем диаграмму изменения напряжений прямой, обратной и нулевой последовательностей вдоль линии (рис. 11.16).

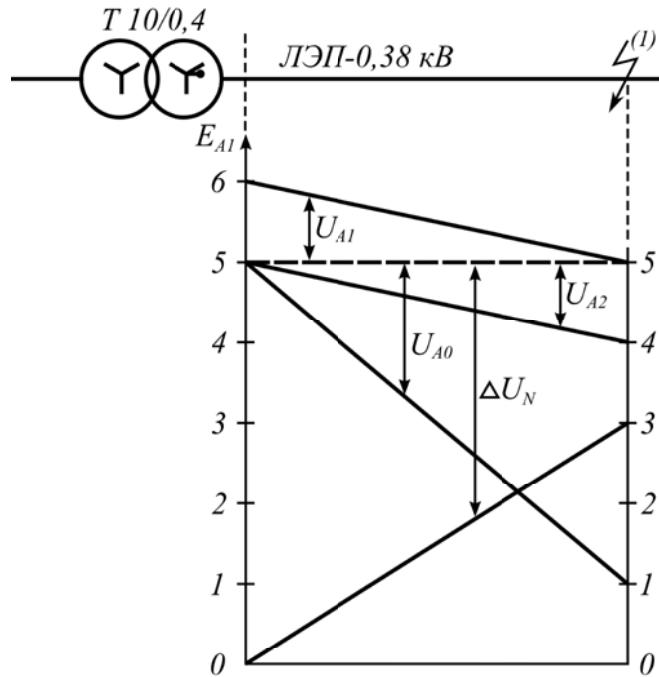


Рис. 11.16. Изменение напряжений в сети при однофазном КЗ вдоль ЛЭП

По мере приближения к источнику от точки КЗ напряжение прямой последовательности возрастает, а нулевой и обратной — уменьшается. Напряжение на нулевом проводе относительно земли также уменьшается, а соответственно, уменьшается и напряжение прикосновения на корпусах электрооборудования. По мере приближения к источнику напряжения симметрируются.

Выводы:

1. Однофазные КЗ приводят к значительному увеличению фазного тока и тока в нулевом проводе, следствием которых является опасный перегрев токоведущих частей и воспламенение горючих изоляционных материалов.
2. Однофазные КЗ приводят к увеличению напряжения неповрежденных фаз, следствием этого является выход из строя однофазных потребителей.
3. Увеличение тока в фазах может перегреть, расплавить и сварить электрические контакты коммутационных аппаратов.
4. Однофазные КЗ могут перейти в многофазные, которые усугубляют размеры повреждений. При многофазных КЗ создаются значительные механические усилия в проводах и электрических контактах.
5. В процессе протекания однофазного КЗ напряжение на занулённых корпусах электрооборудования возрастает и может достигать значений, опасных для жизни людей и животных.
6. По мере удаления от точки КЗ по направлению к источнику неограниченной мощности несимметрия напряжений уменьшается. У самого источника удалённые однофазные КЗ не ощущаются по напряжению, а фиксируются по увеличению тока.

11.9. Изменение тока в трансформаторе при однофазном коротком замыкании

Изменение токов в трансформаторе следует рассматривать в зависимости от того, где произошло замыкание: на шинах 0,4 кВ трансформаторной подстанции (ТП) или за защитой отходящей линии (рис. 11.17).

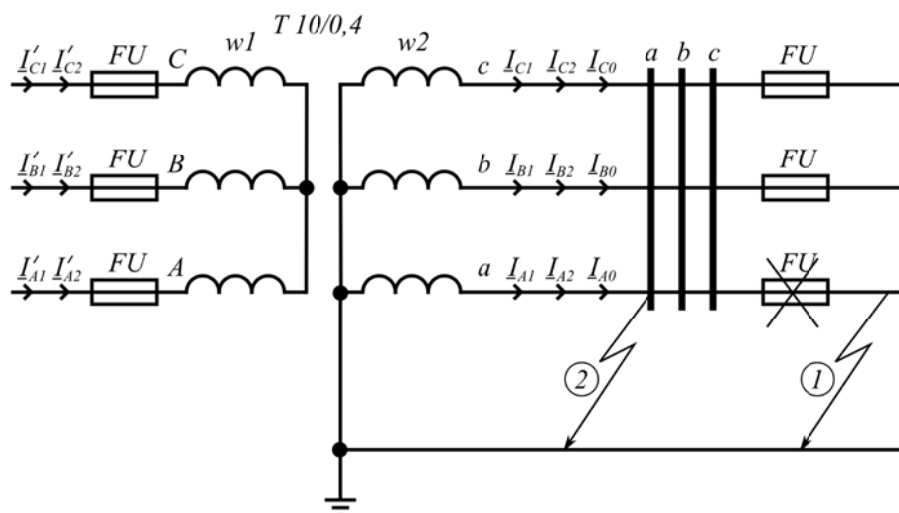


Рис. 11.17. Однофазное короткое замыкание:
1 — за защитой отходящей линии;
2 — на шинах трансформаторной подстанции

Рассмотрим первый случай, когда однофазное КЗ происходит за точкой установки защиты. В этом случае ток однофазного КЗ определится:

$$I^{(1)} = \frac{U_{\phi}}{Z_T^{(1)}/3}.$$

При защите отходящих линий предохранителями с плавкими вставками или автоматическим выключателем защита должна удовлетворять условию:

$$\frac{I^{(1)}}{I_{ПВ}} \geq 3; \quad \frac{I^{(1)}}{I_{ТР}} \geq 3,$$

где $I_{ПВ}$ — номинальный ток плавкой вставки предохранителя, А;

$I_{ТР}$ — номинальный ток теплового расцепителя выключателя, А.

Во втором случае замыкание происходит перед точкой установки защиты, т.е. непосредственно на шинах ТП. Рассмотрим определение тока на стороне низкого напряжения и как токи различных последовательностей будут трансформироваться на сторону высшего напряжения. Для схемы соединения обмоток трансформатора «звезда – звезда с нулём»:

$$K_T = \frac{w_1}{w_2} = \frac{U_{ЛВН}}{U_{ЛНН}} = \frac{I_{ЛНН}}{I_{ЛВН}}.$$

В соответствии с формулой:

$$\underline{I}^{(1)} = \underline{I}_{A1} + \underline{I}_{A2} + \underline{I}_{A0},$$

получаем распределение токов на стороне низшего напряжения (НН):

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{A1} + \underline{I}_{A2} + \underline{I}_{A0};$$

$$\underline{I}_B = \underline{I}_{B1} + \underline{I}_{B2} + \underline{I}_{B0};$$

$$\underline{I}_C = \underline{I}_{C1} + \underline{I}_{C2} + \underline{I}_{C0}.$$

Векторная диаграмма токов выглядит как представлено на рисунке 11.18.

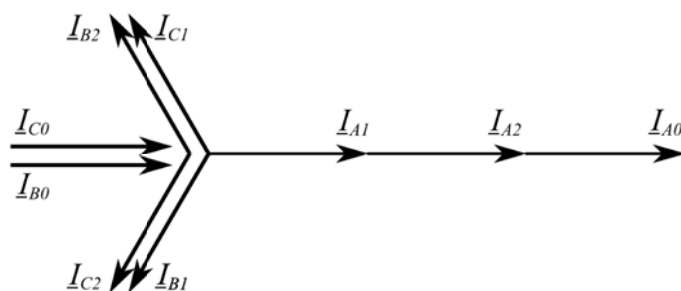


Рис. 11.18. Векторная диаграмма токов на стороне низшего напряжения

На стороне высшего напряжения отсутствует контур для протекания токов нулевой последовательности (земля или нулевой провод), поэтому на стороне высшего напряжения (ВН) токи нулевой последовательности не протекают, трансформируются только токи прямой и обратной последовательностей (рис. 11.19). Токи прямой и обратной последовательностей на стороне ВН меньше токов НН в K_T раз.

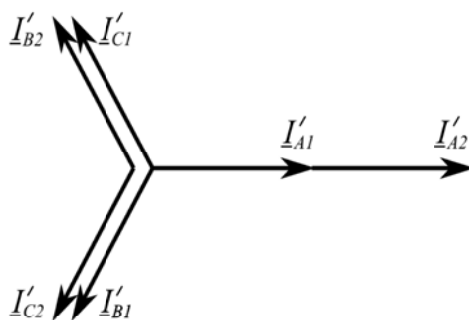


Рис. 11.19. Векторная диаграмма токов на стороне высшего напряжения

Токи прямой и обратной последовательностей на стороне ВН и НН:

$$I'_{A1} = I'_{A2} = \frac{I_{0,4}^{(1)}}{3 K_T}; \quad I_{A1} = I_{A2} = \frac{I_{0,4}^{(1)}}{3}.$$

Ток в фазе А на стороне ВН определится:

$$I_{A10}^{(1)} = \frac{2 I_{0,4}^{(1)}}{3 K_T}.$$

Соответственно токи на стороне ВН в фазе В и С определяются:

$$I_{B10}^{(1)} = I_{C10}^{(1)} = \frac{I_{0,4}^{(1)}}{3 K_T}.$$

Рассмотрим пример, в котором ТП имеет трансформатор мощностью 100 кВА, сопротивление трансформатора току однофазного КЗ 1,07 Ом, тогда ток однофазного КЗ в фазе А определится:

$$I_a^{(1)} = \frac{U_\phi}{\frac{Z_T^{(1)}}{3}}; \quad I_a^{(1)} = \frac{220}{\frac{1,07}{3}} = 617 \text{ А}.$$

Ток в фазе А на стороне высшего напряжения:

$$I_{A10}^{(1)} = \frac{2}{3} \cdot \frac{617}{25} = 16,5 \text{ А}.$$

Плавкая вставка на стороне высшего напряжения выбирается из условия двукратной перегрузки трансформатора и отстройки от бросков намагничивающего тока:

$$I_{ПВ} = 2 I_{НТ}; \quad I_{ПВ} = 2 \cdot \frac{100}{\sqrt{3} 10} = 11,4 \text{ А}.$$

Ближайшее большее стандартное значение плавкой вставки 15 А. От тока 16,5 А плавкая вставка на 15 А будет перегорать длительное время. За это время изоляция на стороне 0,4 кВ повреждается и однофазное КЗ переходит в межфазное, при котором сгорают 2 и 3 вставки на стороне 10 кВ. По числу сгоревших вставок предохранителей на стороне 10 кВ трудно определить, что явилось причиной КЗ.

11.10. Обрывы фазных проводов

Причинами обрыва фазных проводов являются:

- механические повреждения;
- повышенное тепловыделение в контактных соединениях.

Причины интенсивного тепловыделения:

- ослабление контактного давления в месте соединения проводов, что является результатом изменения нагрузки и колебаниями наружного воздуха;
- электрохимическая коррозия, например, в результате соединения алюминиевых и медных проводников.

Рассмотрим изменение напряжений различных последовательностей при обрыве фазы А и питании трёх однофазных нагрузок (рис. 11.20).

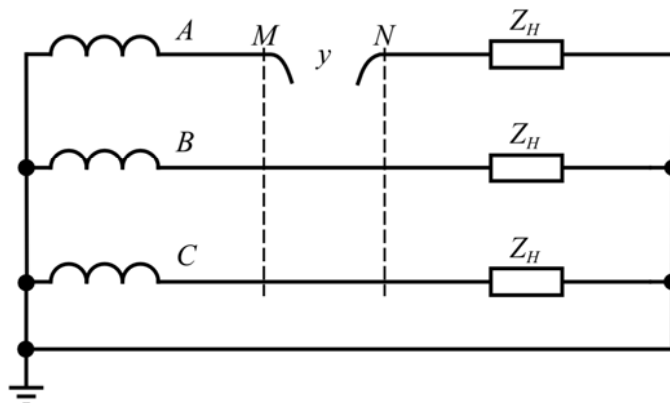


Рис. 11.20. Обрыв фазного провода в фазе А

Искомым является напряжение в месте обрыва между точками М – N или участок «у», а также ток в нулевом проводе. Запишем основные граничные условия:

$$I_A = 0; \quad \underline{U}_{By} = \underline{U}_{B1} + \underline{U}_{B2} + \underline{U}_{B0} = 0; \quad \underline{U}_{Cy} = \underline{U}_{C1} + \underline{U}_{C2} + \underline{U}_{C0} = 0.$$

Выразим напряжения \underline{U}_{By} и \underline{U}_{Cy} через фазу А, используя оператор поворота:

$$\underline{U}_{By} = \underline{U}_{A1} a^2 + \underline{U}_{A2} a + \underline{U}_{A0}; \quad \underline{U}_{Cy} = \underline{U}_{A1} a + \underline{U}_{A2} a^2 + \underline{U}_{A0}.$$

Учитывая, что $\underline{U}_{By} = \underline{U}_{Cy}$, можем записать:

$$\underline{U}_{A1} a^2 + \underline{U}_{A2} a + \underline{U}_{A0} = \underline{U}_{A1} a + \underline{U}_{A2} a^2 + \underline{U}_{A0};$$

$$\underline{U}_{A1} (a^2 - a) = \underline{U}_{A2} (a^2 - a).$$

Разделив обе части последнего выражения на $(a^2 - a)$, получим:

$$\underline{U}_{A1} = \underline{U}_{A2}.$$

Учитывая последнее выражение, для \underline{U}_{By} можно записать:

$$\underline{U}_{By} = \underline{U}_{A1} a^2 + \underline{U}_{A1} a + \underline{U}_{A0}; \quad \underline{U}_{A0} = -\underline{U}_{A1} (a^2 + a).$$

Поскольку $(a^2 + a) = -1$, то:

$$\underline{U}_{A1} = \underline{U}_{A2} = \underline{U}_{A0}.$$

В соответствии с последним выражением векторная диаграмма напряжений в месте обрыва выглядит как показано на рисунке 11.21.

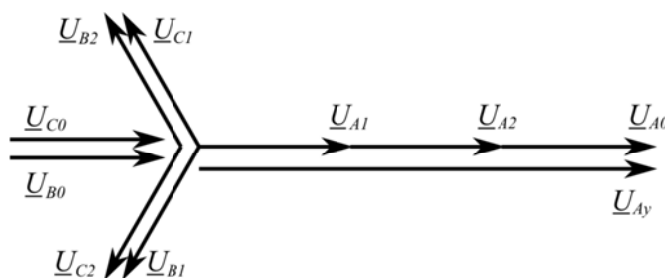


Рис. 11.21. Векторная диаграмма напряжений в месте обрыва

А напряжение в месте обрыва:

$$\underline{U}_{Ay} = 3 \underline{U}_{A1} = 3 \underline{U}_{A2} = 3 \underline{U}_{A0}.$$

Из системы уравнений (7) (см. табл. 11.1) найдём токи нулевой и обратной последовательностей:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{A2} &= -\frac{\underline{U}_{A2}}{Z_2}; & \underline{I}_{A0} &= -\frac{\underline{U}_{A0}}{Z_0}; & \underline{I}_{Ay} &= \underline{I}_{A1} + \underline{I}_{A2} + \underline{I}_{A0} = 0; \\ \underline{I}_{A1} &= -(\underline{I}_{A2} + \underline{I}_{A0}); & \underline{I}_{A1} &= \frac{\underline{U}_{A2}}{Z_2} + \frac{\underline{U}_{A0}}{Z_0} = \frac{\underline{U}_{A1}}{Z_2} + \frac{\underline{U}_{A1}}{Z_0} = \underline{U}_{A1} \left(\frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_0} \right). \end{aligned}$$

В итоге получим:

$$\underline{I}_{A1} = \underline{U}_{A1} \frac{Z_0 + Z_2}{Z_0 Z_2}; \quad \underline{U}_{A1} = \underline{I}_{A1} \frac{Z_0 Z_2}{Z_0 + Z_2}.$$

Подставим полученные уравнения в первое уравнение системы (7) (см. табл. 11.1):

$$\begin{aligned} \underline{E}_{A1} &= \underline{U}_{A1} + \underline{I}_{A1} Z_1 = \underline{I}_{A1} \frac{Z_0 Z_2}{Z_0 + Z_2} + \underline{I}_{A1} Z_1 = \underline{I}_{A1} \frac{Z_0 Z_2 + Z_0 Z_1 + Z_1 Z_2}{Z_0 + Z_2}; \\ \underline{I}_{A1} &= \frac{\underline{E}_{A1} (Z_0 + Z_2)}{Z_0 Z_2 + Z_0 Z_1 + Z_1 Z_2}. \end{aligned}$$

Из второго уравнения системы (7) (см. табл. 11.1):

$$\begin{aligned} \underline{I}_{A2} &= -\frac{\underline{U}_{A2}}{Z_2} = -\frac{\underline{U}_{A1}}{Z_2} = -\underline{I}_{A1} \frac{Z_0 Z_2}{Z_0 + Z_2} \cdot \frac{1}{Z_2} = -\underline{I}_{A1} \frac{Z_0}{Z_0 + Z_2}; \\ \underline{I}_{A2} &= -\frac{\underline{E}_{A1} (Z_0 + Z_2) Z_0}{(Z_0 Z_2 + Z_0 Z_1 + Z_1 Z_2)(Z_0 + Z_2)} = -\frac{\underline{E}_{A1} Z_0}{Z_0 Z_2 + Z_0 Z_1 + Z_1 Z_2}. \end{aligned}$$

Подставим значение \underline{U}_{A1} в уравнение третье системы (7) (см. табл. 11.1), в итоге получим:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{A0} &= -\frac{\underline{U}_{A0}}{Z_0} = -\frac{\underline{U}_{A1}}{Z_2} = -\underline{I}_{A1} \frac{Z_0 Z_2}{Z_0 + Z_2} \cdot \frac{1}{Z_0} = -\underline{I}_{A1} \frac{Z_2}{Z_0 + Z_2}; \\ \underline{I}_{A0} &= -\frac{\underline{E}_{A1} (Z_0 + Z_2) Z_2}{(Z_0 Z_2 + Z_0 Z_1 + Z_1 Z_2)(Z_0 + Z_2)} = -\frac{\underline{E}_{A1} Z_2}{Z_0 Z_2 + Z_0 Z_1 + Z_1 Z_2}. \end{aligned}$$

Обозначим:

$$C = Z_0 Z_2 + Z_0 Z_1 + Z_1 Z_2.$$

Токи прямой, обратной и нулевой последовательностей определяются:

$$\underline{I}_{A1} = -\frac{\underline{E}_{A1} (Z_2 + Z_0)}{C}; \quad \underline{I}_{A2} = -\frac{\underline{E}_{A1} Z_0}{C}; \quad \underline{I}_{A0} = -\frac{\underline{E}_{A1} Z_2}{C}.$$

Рассмотрим пример, в котором происходит обрыв линии, у которой сопротивления фазного Z_L и нулевого Z_N проводников одинаковы и равны по 1 Ом. Сопротивление нагрузки Z_H составляет 4 Ома.

Для вычисления сопротивления нулевой последовательности в место обрыва каждой фазы необходимо включить напряжение нулевой последовательности (рис. 11.22, а). Из трехфазной схемы замещения выделим одну фазу (рис. 11.22, б).

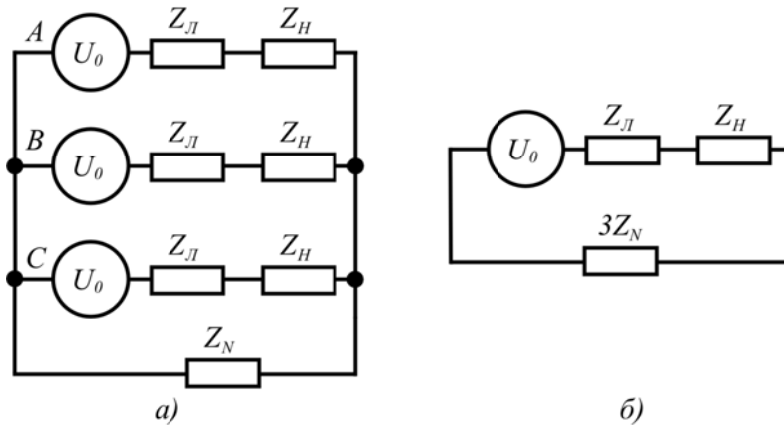


Рис. 11.22. Схема замещения при обрыве

Тогда сопротивление нулевой последовательности определится:

$$Z_0 = Z_L + Z_H + 3Z_N.$$

Численное значение сопротивления составит 8 Ом. Определим токи прямой, обратной и нулевой последовательностей:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{A1} &= -\frac{\underline{E}_{A1}(5 + 8)}{105} = 0,123 \underline{E}_{A1}; \\ \underline{I}_{A2} &= -\frac{8 \underline{E}_{A1}}{105} = 0,0761 \underline{E}_{A1} \Rightarrow \approx 0,62 \underline{I}_{A1}; \\ \underline{I}_{A0} &= -\frac{5 \underline{E}_{A1}}{105} = 0,0476 \underline{E}_{A1} \Rightarrow \approx 0,38 \underline{I}_{A1}. \end{aligned}$$

Векторная диаграмма токов будет выглядеть как показано на рисунке 11.23.

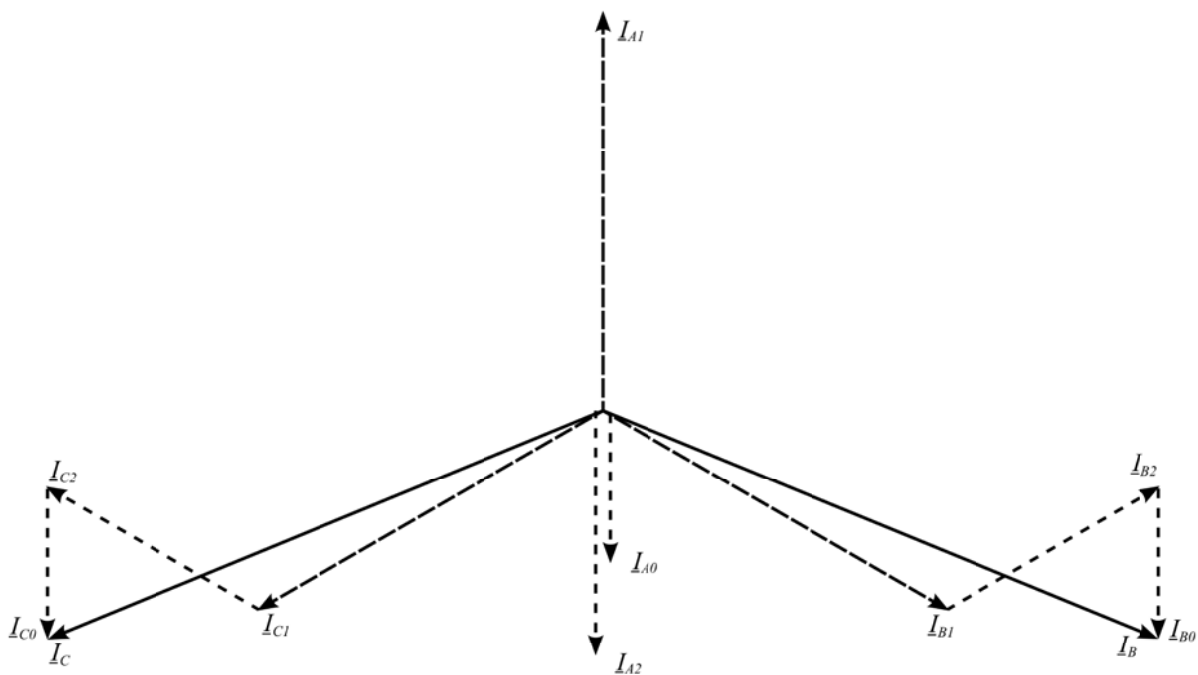


Рис. 11.23. Векторная диаграмма токов при обрыве фазного провода

Напряжение между точками М и N в месте обрыва:

$$\underline{U}_{A1} = 0,123 \underline{E}_{A1} \frac{8 \cdot 5}{8 + 5} = 0,37 \underline{E}_{A1}; \quad \underline{U}_{Ay} = 3 \cdot 0,37 \underline{E}_{A1} = 1,11 \underline{E}_{A1} = 1,11 \underline{E}_A.$$

Выводы:

1. Электрические аппараты должны разрывать ток нагрузки при напряжении больше номинального при пофазной коммутации токов.
2. Контролировать целостность любой из фаз можно по наличию тока в нулевом проводнике.
3. Появление напряжения между нулевой точкой трансформатора и всеми занулёнными корпусами электрооборудования. Такой режим возникает при наличии в сети мощных трехфазных потребителей, нулевая точка которых соединена с нулевым проводом. В этом случае при обрыве любой из фаз по нулевому проводу потечёт ток, что приведёт к падению напряжения на нем. Поэтому нулевые точки трехфазных электроприёмников нельзя соединять с нулевым рабочим проводником из условий безопасной эксплуатации.

11.11. Влияние обрыва фазы на работу неподвижной нагрузки

Часто для обогрева помещений в сельском хозяйстве используются ТЭНы, нагревательные элементы которых соединяются по схеме «звезда». Мощность нагревателя в трёхфазном режиме определится:

$$P^{(3)} = 3 U_{\phi} I_{\phi} = 3 \frac{U_{\phi}^2}{R_H} = \frac{U_L^2}{R_H}.$$

В случае обрыва одной фазы:

$$P^{(2)} = 2 \frac{U_L}{2} I^{(2)} = 2 \frac{U_L}{2} \frac{U_L}{2 R_H} = \frac{U_L^2}{2 R_H}.$$

При этом соотношение токов в нормальном и аварийном режиме будет:

$$I^{(2)} = I^{(3)} \frac{\sqrt{3}}{2}.$$

Выводы:

1. При обрыве фазы мощность трёхфазного нагревателя снижается в два раза по сравнению с трёхфазным режимом.
2. По амперметру, установленному в одной фазе, можно оценить исправность работы трёхфазного нагревателя.

11.12. Работа электродвигателя при обрыве фазы

Пусковой ток двигателя в трёхфазном режиме определится:

$$I_{\Pi}^{(3)} = \frac{U_L}{\sqrt{3}(Z_L + Z_{\text{дп}})},$$

где Z_L — сопротивление питающей линии;

$Z_{\text{дп}}$ — сопротивление двигателя при пуске (при заторможенном роторе).

Сопротивление двигателя при пуске определится:

$$Z_{\text{дп}} = \frac{U_H}{\sqrt{3} I_{\Pi}^{(3)}} = \frac{U_H}{\sqrt{3}(I_H k_i)},$$

где k_i — кратность пускового тока.

При обрыве фазы в работе участвуют только два сопротивления линии и двигателя (рис. 11.24).

Пусковой ток в неполнофазном режиме определится:

$$I_{\Pi}^{(2)} = \frac{U_L}{2(Z_L + Z_{\text{дп}})} = I_{\Pi}^{(3)} \frac{\sqrt{3}}{2}.$$

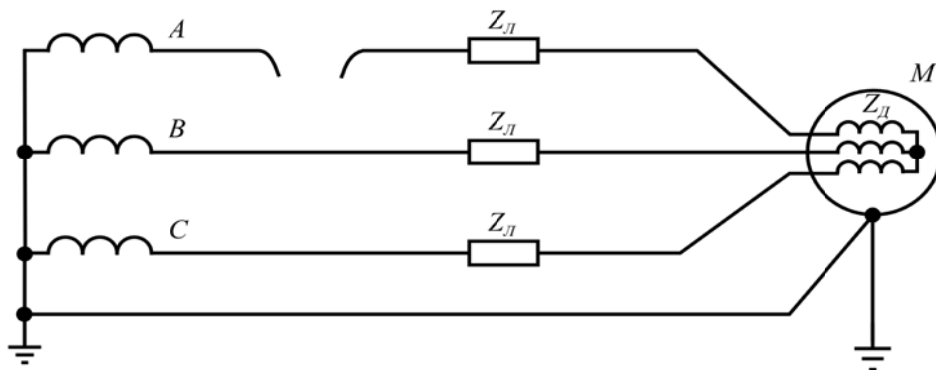


Рис. 11.24. Обрыв линейного провода у двигательной нагрузки

Соответственно необходимые граничные условия для определения токов различных последовательностей будут выглядеть следующим образом (рис. 11.25):

$$\underline{I}_B^{(2)} = -\underline{I}_C^{(2)}; \quad \underline{I}_A^{(2)} = 0.$$

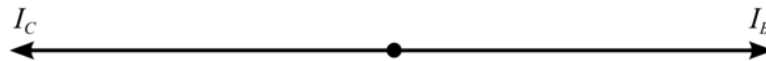


Рис. 11.25. Векторная диаграмма линейных токов

Подставим найденные граничные условия в систему уравнений (5) (см. табл. 11.1), получим:

$$\underline{I}_{A1} = \frac{1}{3}(\underline{I}_A + \underline{I}_B a + \underline{I}_C a^2) = \underline{I}_B(a - a^2);$$

$$\underline{I}_{A2} = \frac{1}{3}(\underline{I}_A + \underline{I}_B a^2 + \underline{I}_C a) = \underline{I}_B(a^2 - a);$$

$$\underline{I}_{A0} = 0.$$

Токи прямой и обратной последовательностей направлены в противофазе (рис. 11.26), поэтому ток прямой последовательности создаёт положительный момент, а ток обратной последовательности — отрицательный момент:

$$\underline{M}_\Sigma = \underline{M}_1 - \underline{M}_2 = 0.$$

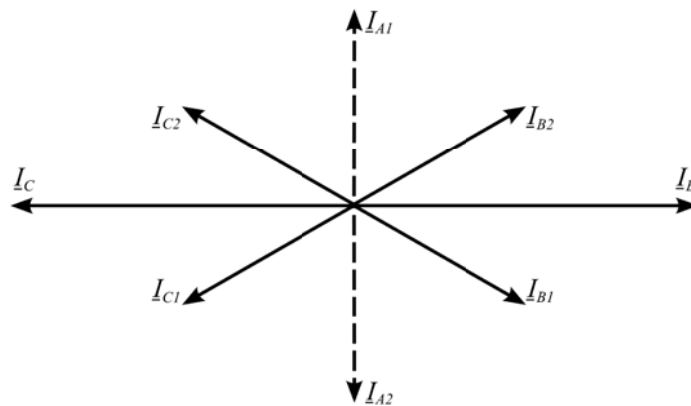


Рис. 11.26. Векторная диаграмма токов

Если обрыв фазы произошёл на работающем двигателе, то он остановится, если его нагрузка превышает 57% от номинальной. Если нагрузка меньше 57% от номинальной, то двигатель остаётся в работе, но будет перегреваться и в конечном итоге выйдет из строя.

11.13. Двухфазное короткое замыкание

Рассмотрим двухфазное короткое замыкание между двумя фазными проводниками с точки зрения теории симметричных составляющих (рис. 11.27).

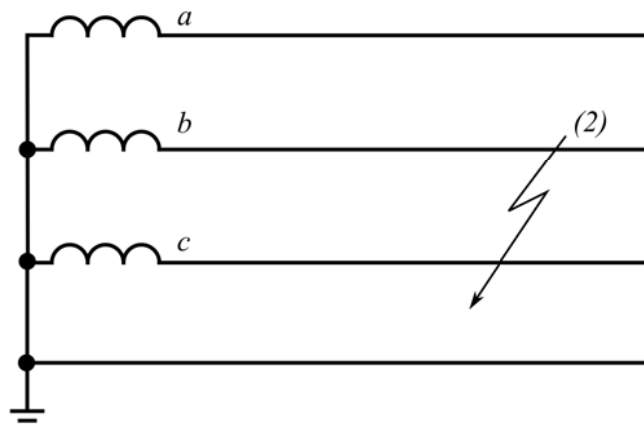


Рис. 11.27. Схема сети при двухфазном КЗ

Граничные условия для токов и напряжений в рассматриваемой точке сети:

$$\underline{I}_A = 0; \quad \underline{I}_B \neq 0; \quad \underline{I}_C \neq 0; \quad \underline{I}_B = -\underline{I}_C;$$

$$\underline{U}_B = \underline{U}_C = 0; \quad \underline{U}_A \neq 0.$$

В соответствии с теорией симметричных составляющих при данном аварийном режиме:

$$\underline{I}_{A0} = \underline{I}_{B0} = \underline{I}_{C0} = 0; \quad \underline{U}_{A0} = \underline{U}_{B0} = \underline{U}_{C0} = 0.$$

При этом:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{A1} + \underline{I}_{A2} + \underline{I}_{A0} = 0 \quad \Rightarrow \quad \underline{I}_A = \underline{I}_{A1} + \underline{I}_{A2} = 0; \quad \Rightarrow \quad \underline{I}_{A1} = -\underline{I}_{A2}.$$

Из системы уравнений (4) (см. табл. 11.1) можно записать:

$$\underline{U}_B = \underline{U}_{A1} a^2 + \underline{U}_{A2} a = 0; \quad \underline{U}_C = \underline{U}_{A1} a + \underline{U}_{A2} a^2 = 0;$$

$$\underline{U}_{A1} a^2 + \underline{U}_{A2} a = \underline{U}_{A1} a + \underline{U}_{A2} a^2;$$

$$\underline{U}_{A1} (a^2 - a) = \underline{U}_{A2} (a^2 - a) \quad \Rightarrow \quad \underline{U}_{A1} = \underline{U}_{A2}.$$

В месте замыкания будут присутствовать напряжения прямой и обратной последовательностей (рис. 11.28), под действием которых будут протекать соответствующие токи.

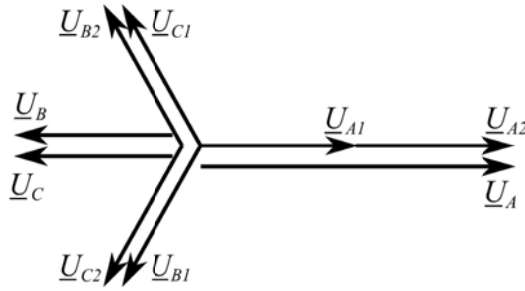


Рис. 11.28. Векторная диаграмма напряжений при КЗ

Из второго уравнения системы уравнений (7) (см. табл. 11.1), а также учитывая предыдущее выражение, можно записать:

$$0 = \underline{I}_{A2} Z_2 + \underline{U}_{A2}; \quad \Rightarrow \quad \underline{U}_{A2} = -\underline{I}_{A2} Z_2 = \underline{I}_{A1} Z_2.$$

Из первого уравнения системы уравнений (7) (табл. 11.1) получаем выражение тока прямой последовательности:

$$\underline{E}_{A1} = \underline{I}_{A1} Z_1 + \underline{U}_{A1} = \underline{I}_{A1} Z_1 + \underline{I}_{A1} Z_2 = \underline{I}_{A1} (Z_1 + Z_2); \quad \Rightarrow \quad \underline{I}_{A1} = \frac{\underline{E}_{A1}}{Z_1 + Z_2}.$$

Токи прямой и обратной последовательностей будут находиться в противофазе (рис. 11.29).

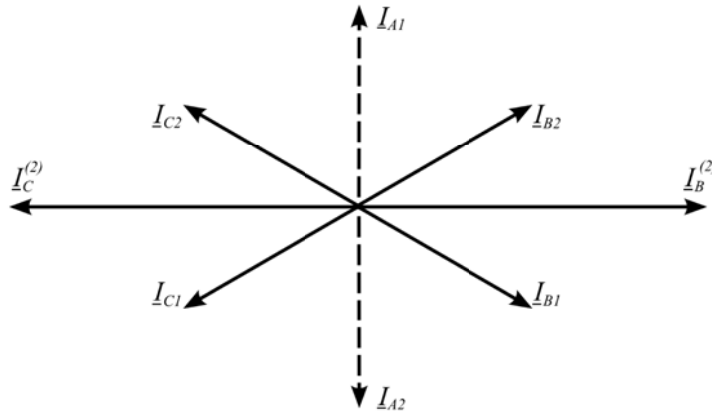


Рис. 11.29. Векторная диаграмма при двухфазном КЗ

Соответственно ток двухфазного КЗ определится:

$$I_B^{(2)} = \cos(30^\circ) 2 |I_{A1}| = \sqrt{3} |I_{A1}|; \quad I_B^{(2)} = \frac{\sqrt{3} |E_{A1}|}{Z_1 + Z_2} = \frac{U_{\text{Л}}}{Z_1 + Z_2}.$$

Учитывая, что для невращающихся элементов сети $Z_1 = Z_2$, запишем:

$$I_B^{(2)} = \frac{U_{\text{Л}}}{2 Z_{\text{Л}}}.$$

Если требуется учесть в расчётах линию 10 кВ и трансформатор, то ток двухфазного КЗ определится:

$$I^{(2)} = \frac{U_{л}}{2 (Z_{л10}^{0,4} + Z_{Т 0,4} + Z_{л0,38})}$$

Контрольные вопросы

1. В чём суть теории симметричных составляющих?
2. При помощи каких симметричных составляющих можно описать любой несимметричный режим?
3. Зарисуйте расположение векторов прямой, обратной и нулевой последовательностей для трёх фаз.
4. Как выразить токи фаз В и С через фазу А?
5. Что показывает оператор поворота?
6. Как вычислить оператор поворота?
7. Как изменятся напряжения фаз В и С при однофазном коротком замыкании фазы А на PEN проводник?
8. Из каких симметричных составляющих состоит ток однофазного КЗ по теории симметричных составляющих?
9. Как выглядит векторная диаграмма тока однофазного КЗ в сети 0,38 кВ?
10. Как изменяется напряжение прямой последовательности при удалении от источника питания?
11. Как изменяется напряжение обратной и нулевой последовательности при приближении к источнику питания?
12. В чем заключается опасность однофазного КЗ?
13. Как рассчитать сопротивление петли фазный-нулевой провод для проводов СИП?
14. Для чего часть нейтралей трансформаторов в сети 110 кВ и выше соединяют с землёй через разрядник?
15. Для чего устанавливаются повторные заземления на линиях 0,38 кВ?
16. Для чего предназначены повторные заземления в сети 0,38 кВ?
17. Назовите разрешённую максимальную величину сопротивления заземления трансформаторного пункта 10/0,4 кВ.
18. Назовите разрешённую максимальную величину сопротивления повторного заземления, устанавливаемого на линии 0,38 кВ.
19. Как рассчитывается напряжение прикосновения?
20. Как распределяется потенциал в точке установки повторного заземления в случае протекания по нему тока?
21. Объясните с точки зрения теории симметричных составляющих влияние обрыва одной из фаз для трёхфазного электродвигателя.
22. Как изменится мощность трёхфазного нагревателя при обрыве линейного провода?
23. Как влияет обрыв линейного провода на работу асинхронного электродвигателя?

12. ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

12.1. Металлическое замыкание на землю

Согласно ПУЭ, замыканием на землю называется случайный электрический контакт между токоведущими частями, находящимися под напряжением, и землёй. Металлическим короткое замыкание называется в том случае, если переходное сопротивление в месте контакта составляет менее 50 мОм.

Рассмотрим металлическое замыкание на землю в сети 10 кВ (рис. 12.1).

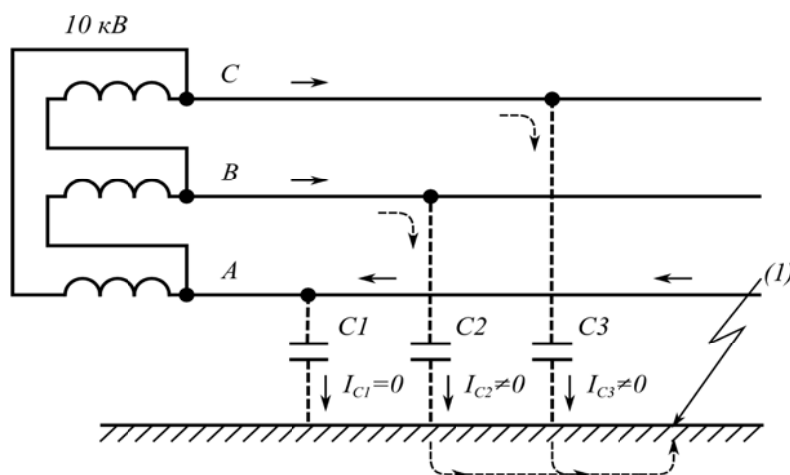


Рис. 12.1. Замыкание на землю в сети 10 кВ

Из рисунка 12.1 видно, что токи замыкания на землю протекают через место повреждения и ёмкости неповреждённых фаз, образованные пространством между фазой и землёй.

В нормальном режиме все ёмкостные токи одинаковы и геометрическая сумма токов равна нулю (рис. 12.2, а).

При металлическом замыкании фазы А на землю потенциал этой фазы в месте замыкания становится равным нулю. При этом напряжение неповреждённых фаз В и С относительно земли увеличивается в $\sqrt{3}$ [10]:

$$U'_C = \sqrt{3} U_C; \quad U'_B = \sqrt{3} U_B,$$

т.е. фазные напряжения увеличиваются до линейных.

Так как ёмкостные токи протекают через ёмкостные сопротивления под действием фазного напряжения, то ёмкостные токи в неповреждённых фазах также увеличиваются в $\sqrt{3}$:

$$I_{C2} = I_{C3} = \frac{U_\Phi}{X_C} = U_\Phi \omega C; \quad I'_{C2} = I'_{C3} = \sqrt{3} U_\Phi \omega C.$$

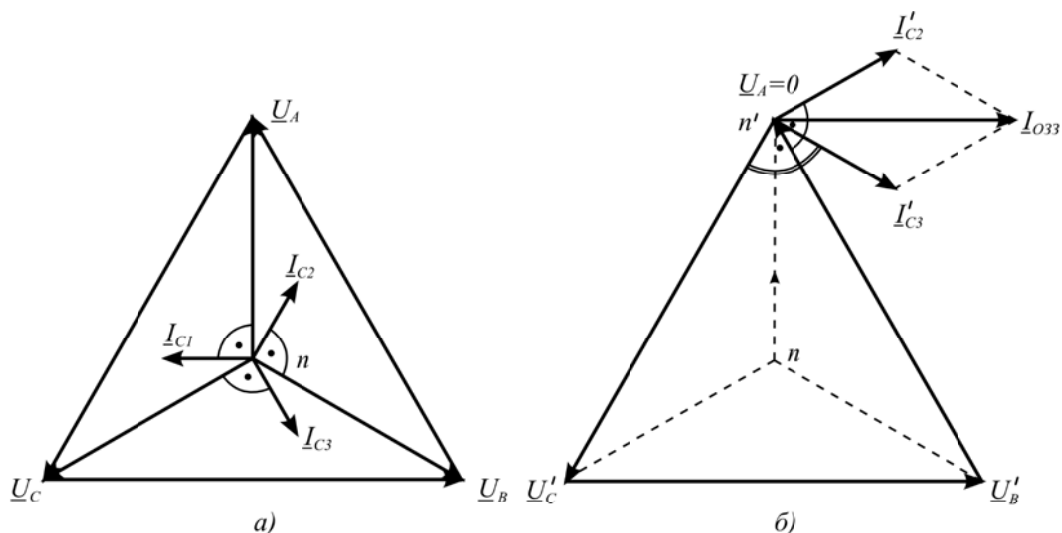


Рис. 12.2. Векторные диаграммы напряжений и токов:
 а — нормального режима; б — режима замыкания на землю

Через место замыкания на землю протекает геометрическая сумма токов I'_{C2} , I'_{C3} , она и является током замыкания на землю I_{O33} .

В случае металлического замыкания через место замыкания будет протекать утроенный ёмкостной ток (см. рис. 12.2), а величина тока определится:

$$I_{O33} = 2 I'_{C2} \cos(30^\circ) = 2\sqrt{3} U_\phi \omega C \cos(30^\circ) = 2\sqrt{3} U_\phi \omega C \frac{\sqrt{3}}{2} = 3 U_\phi \omega C$$

или

$$I_{O33} = \sqrt{3} U_L \omega C_0 L,$$

где C_0 — удельная ёмкость, для ЛЭП $5,1 \dots 5,3 \cdot 10^{-3}$ мкФ/км;

L — длина всех электрически связанных ЛЭП, отходящих от данной ТП, км.

На практике ёмкостные токи замыкания на землю для воздушных и кабельных ЛЭП определяют следующим образом:

$$\text{ВЛ: } I_{СК} = \frac{U L}{350}, \text{ А} \quad \text{КЛ: } I_{СК} = \frac{U L}{10}, \text{ А},$$

где U — линейное напряжение сети, кВ;

L — длина всех линий, подключенных к одной обмотке 10 кВ питающего силового трансформатора, км.

12.2. Обнаружение замыканий на землю

Обнаружение производят по изменению фазных напряжений на подстанции. Для этого устанавливают специальные трансформаторы напряжения, у которых одна из обмоток соединяется в фильтр напряжений нулевой последовательности (ФННП) или в разомкнутый треугольник (рис. 12.3).

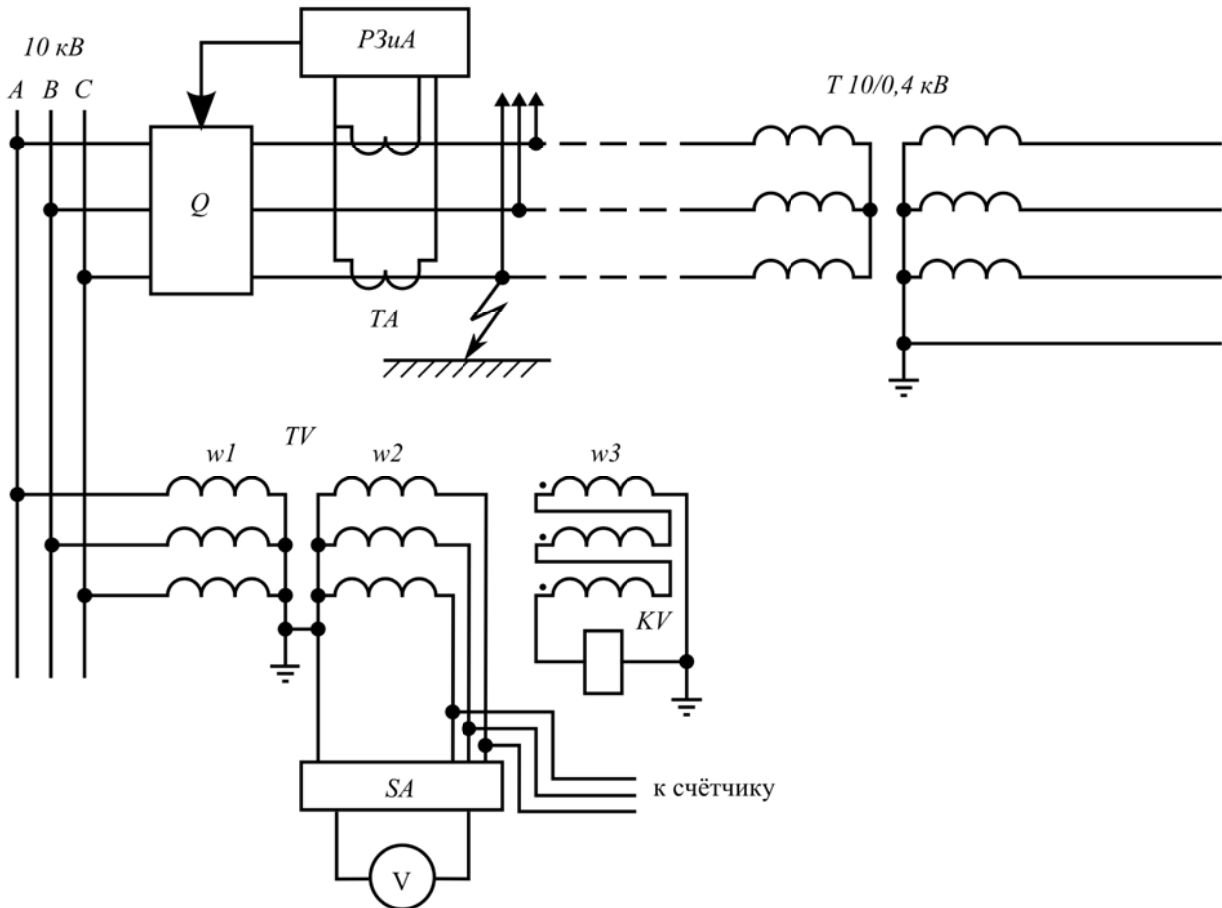


Рис. 12.3. Сигнализация от замыканий на землю на подстанции:
 TA — трансформатор тока; TV — трансформатор напряжения;
 KV — реле максимального напряжения; SA — переключатель контроля напряжений

По переключателю SA можно определить, какая фаза замкнулась на землю. Трансформатор напряжения имеет соотношение витков обмоток:

$$k_{TV} = \frac{10000}{\sqrt{3}} : \frac{100}{\sqrt{3}} : \frac{100}{3}$$

В нормальном режиме к реле KV подводится напряжение небаланса в пределах 5 В (рис. 12.4), обусловленного неидеальностью исполнения обмоток трансформатора.

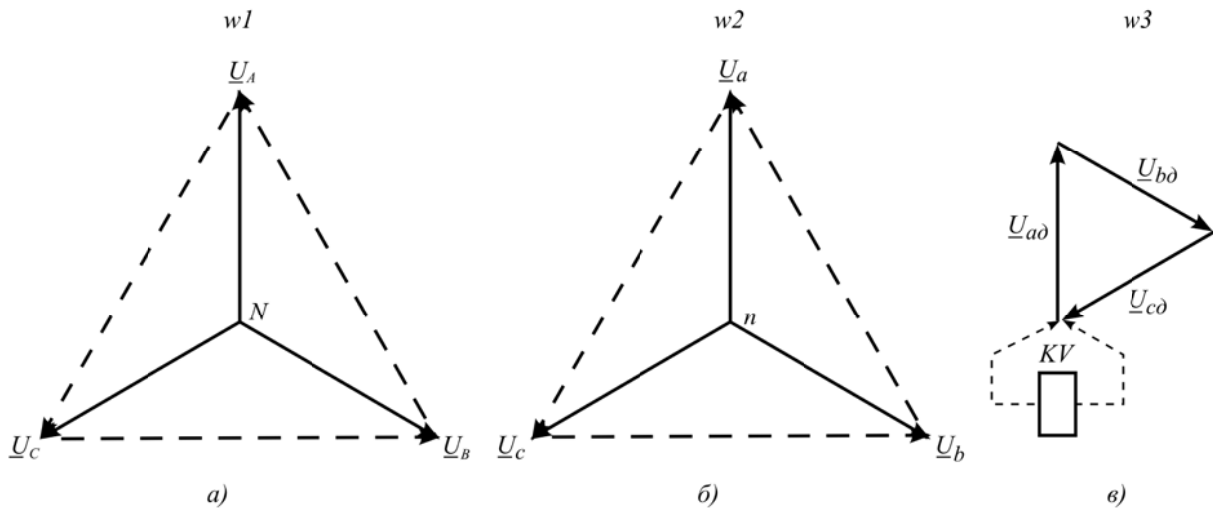


Рис. 12.4. Векторные диаграммы нормального режима:
 а — на первичной обмотке; б — на вторичной обмотке;
 в — на обмотке, соединённой в разомкнутый треугольник

При коротком замыкании фазы А на землю обмотка $w1$ фазы А трансформатора напряжения шунтируется через землю, поэтому по стержню фазы А не будет проходить магнитный поток, тогда фазное напряжение на фазы А вторичной обмотки и фазы А обмотки, соединённой в разомкнутый треугольник, будут равны нулю (рис. 12.5).

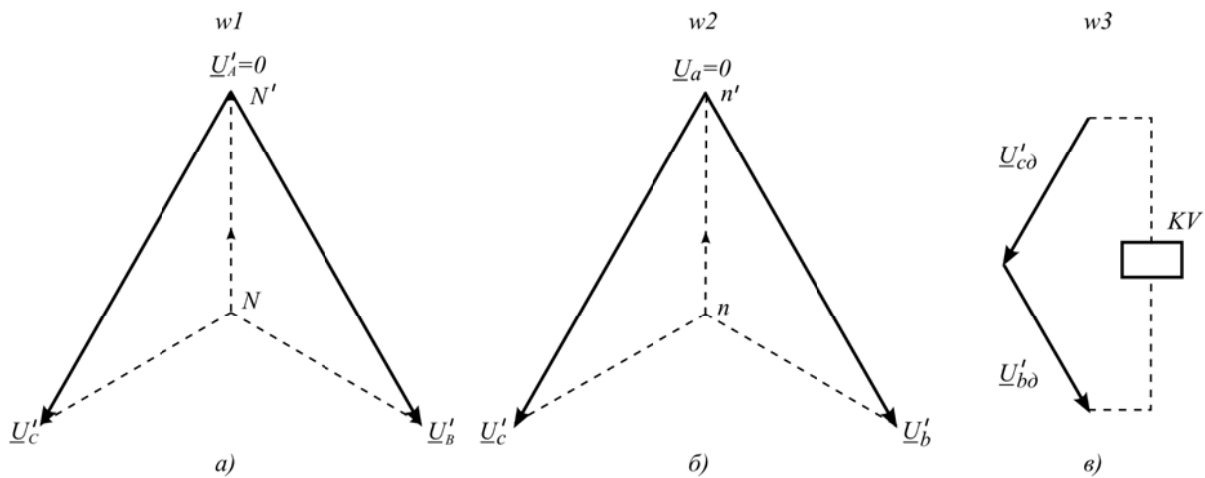


Рис. 12.5. Векторные диаграммы в режиме замыкания на землю:
 а — на первичной обмотке; б — на вторичной обмотке;
 в — на обмотке, соединённой в разомкнутый треугольник

Напряжение на реле KV определится:

$$U_P = U'_{bd} \cos 30^\circ = 2\sqrt{3} U_{bd} \frac{\sqrt{3}}{2} \approx 99 \text{ В.}$$

От напряжения 99 В реле KV замыкает свои контакты и подаёт световой и звуковой сигнал для персонала подстанции. Если подстанция без обслуживающего персонала, то сигнал передаётся диспетчеру с помощью системы автоматики через высокочастотную связь.

12.3. Замыкание на землю через переходное сопротивление

При металлическом замыкании на землю ток однофазного замыкания на землю ограничивается только ёмкостным сопротивлением между фазой и землёй:

$$I_{O33} = 3 U_{\phi} \omega C = \frac{U_{\phi}}{\frac{1}{j3\omega C}} = \frac{U_{\phi}}{3 X_C}$$

При замыкании на землю через переходное сопротивление ток замыкания на землю ограничивается также величиной данного сопротивления (рис. 12.6).

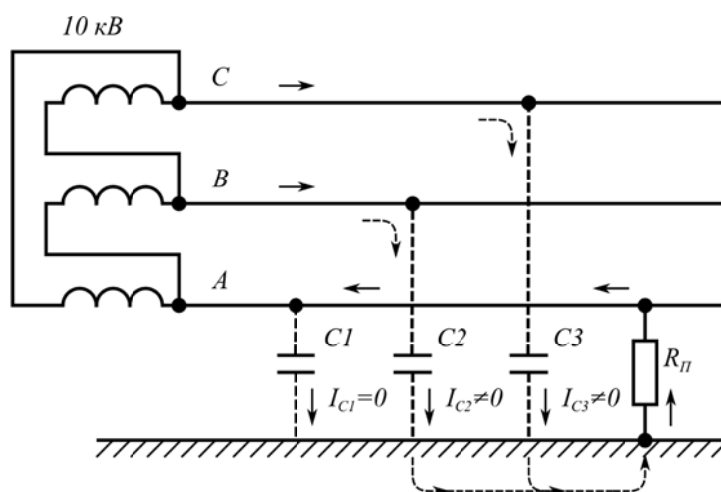


Рис. 12.6. Замыкание на землю через переходное сопротивление

Величина тока определится:

$$I_{O33} = \frac{U_{\phi}}{3 X_C + R_{\Pi}}$$

При этом напряжение неповреждённых фаз распределится (рис. 12.7):

$$U_{\phi} = I_{O33} 3 X_C + I_{O33} R_{\Pi} = \Delta U_C + \Delta U_R$$

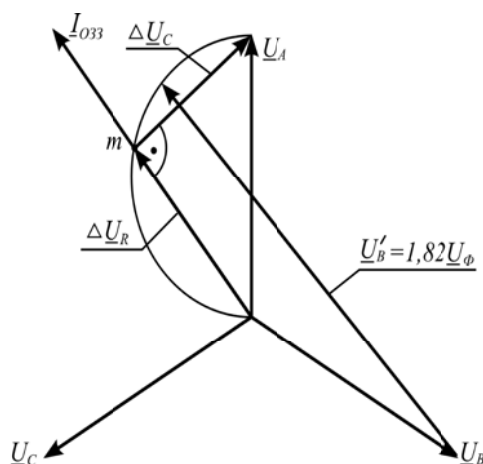


Рис. 12.7. Векторная диаграмма токов и напряжений

При последовательном включении ёмкостного и активного сопротивлений точка m будет скользить по дуге окружности при изменении переходного сопротивления $R_{п}$. Максимальное значение напряжения на неповрежденной фазе (фаза B) составит $1,83U_{\phi}$.

При замыкании на землю через переходное сопротивление (см. рис. 12.7) вольтметры на подстанции покажут разное значение напряжения. Данный вид замыкания составляет 15% от общего количества замыканий.

12.4. Последствия замыканий на землю

1. При некачественном выполнении заземления опоры грунт под железобетонной опорой под действием тока замыкания на землю высыхает и опора стоит на «изоляторе» (рис. 12.8).



Рис. 12.8. Опора ЛЭП

В соответствии ПТЭЭП, наибольшее допустимое значение сопротивления заземления опор 3-35 кВ составляет 10 Ом. Например, при токе замыкания на землю 3 А и сопротивлении заземления опоры 100 Ом на ней выделяется мощность в 900 Вт.

В случае прикосновения к опоре с поврежденной изоляцией человек смертельно поражается электрическим током.

2. При некачественной сварке траверсы с металлом опоры под действием ёмкостного тока место сварки разрушается и траверса держится только на бетоне. При подъеме на опору электромонтёр, если не был пристёгнут к страховочному поясу, взявшись за траверсу, опрокидывается.

3. Замыкание на землю приводит к увеличению напряжения неповрежденных фаз, тогда может возникнуть двойное замыкание на землю (рис. 12.9).

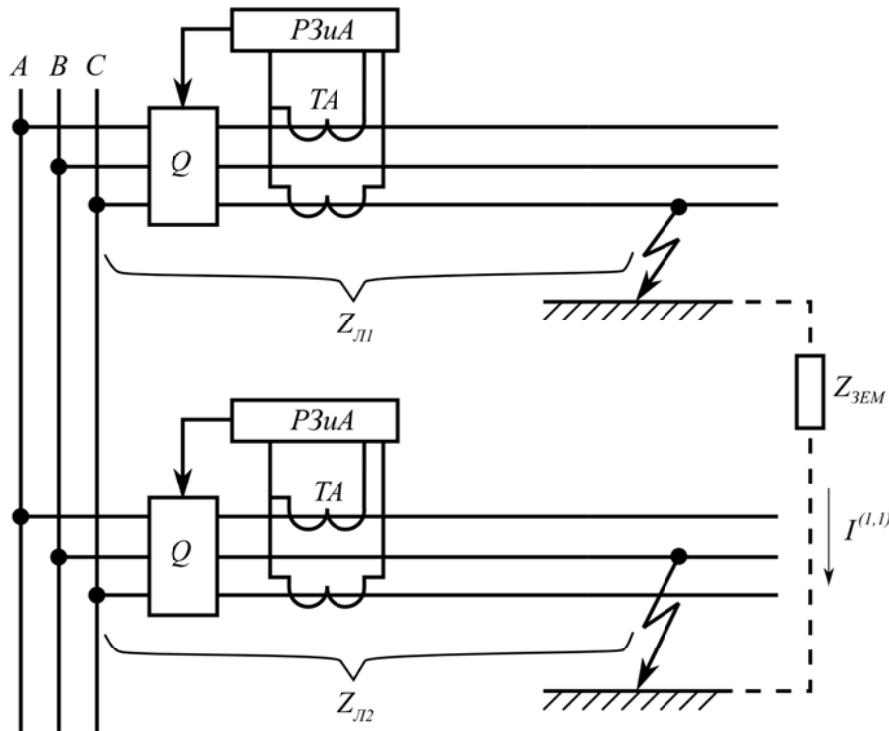


Рис. 12.9. Протекание двойного тока замыкания на землю

Величина тока двойного замыкания на землю определится:

$$I^{(1,1)} = \frac{U_{Л}}{Z_{Л1} + Z_{Л2} + Z_{ЗЕМ}},$$

где $Z_{ЗЕМ}$ — сопротивление земли.

Если ток двойного замыкания на землю меньше тока двухфазного замыкания, то аварийный режим может не отключиться релейной защитой. При этом обычно выплавляется часть опоры с повреждённой изоляцией. После двойного замыкания на землю опоры подлежат выбраковке.

Для отключения двойных замыканий на землю хотя бы одной линии трансформаторы тока на подстанции устанавливаются в одноимённых фазах.

4. Наличие перемежающейся дуги в месте замыкания на землю приводит к резонансу напряжений между ёмкостью сети и индуктивностью трансформатора напряжения на подстанции. В результате амплитуда фазных напряжений достигает четырёхкратных фазных напряжений. Под действием этих перенапряжений повреждаются обмотки трансформаторов напряжений.

5. В точке замыкания на землю присутствуют высшие гармонические составляющие, т.е. на частоту 50 Гц накладываются 150, 250, 350, 550 Гц. Магнитные поля от высших гармоник влияют на работу радиосвязи.

12.5. Отыскание замыкания на землю

От автоматики подстанции через контакты связи КН (рис. 12.10) или по радиорелейным линиям диспетчер электрических сетей получает сигнал о произошедшем замыкании на землю. Далее диспетчер отправляет оперативно-ремонтную бригаду на подстанцию. Бригада в ячейке трансформатора напряжения убеждается в наличии замыкания на землю по величинам фазных напряжений. Линия с повреждённой изоляцией определяется поочерёдным отключением. Оперативно-ремонтный персонал, пользуясь указателем напряжения, узнаёт, на какой фазе произошло замыкание на землю.

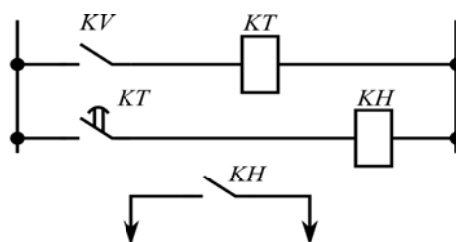


Рис. 12.10. Схема автоматики сигнализации ОЗЗ

Для точного отыскания места замыкания на землю используют специальные переносные радиоприёмники, которые настраиваются на высшие гармоники. При продвижении вдоль линии, по мере приближения к точке замыкания на землю, показания стрелочного прибора увеличиваются, после прохождения места КЗ — резко уменьшаются.

12.6. Пути снижения токов замыкания на землю

1. В сетях с изолированной нейтралью на подстанции специально устанавливают трансформатор с выведенной нулевой точкой, к которой подключают дугогасящую катушку — дугогасительный реактор (рис. 12.11) [10].

Сети с дугогасительными реакторами называют сетями с скомпенсированной нейтралью. При правильной настройке дугогасительного реактора ёмкостной ток через место замыкания не протекает, что исключает повреждение опоры.

2. Автоматическое шунтирование фазы. На подстанции могут устанавливать избиратель повреждённой фазы — ИПФ.

Реагирующий орган ИПФ состоит из трёх реле максимального напряжения $KV1...KV3$, подключаемых ко вторичной обмотке трансформатора напряжения TN . Принцип действия ИПФ основан на шунтировании повреждённой фазы, тем самым исключается протекание ёмкостных токов через место замыкания на линии электропередачи. Устройство работает следующим образом. Например, при замыкании фазы С на землю на одной из отходящих от подстанции линии фазное напряжение неповреждённых фаз (А, В) увеличивается до линейного значения. Соответственно увеличивается фазное напряжение фаз А и В на вторичной обмотке трансформатора напряжения $w2$.

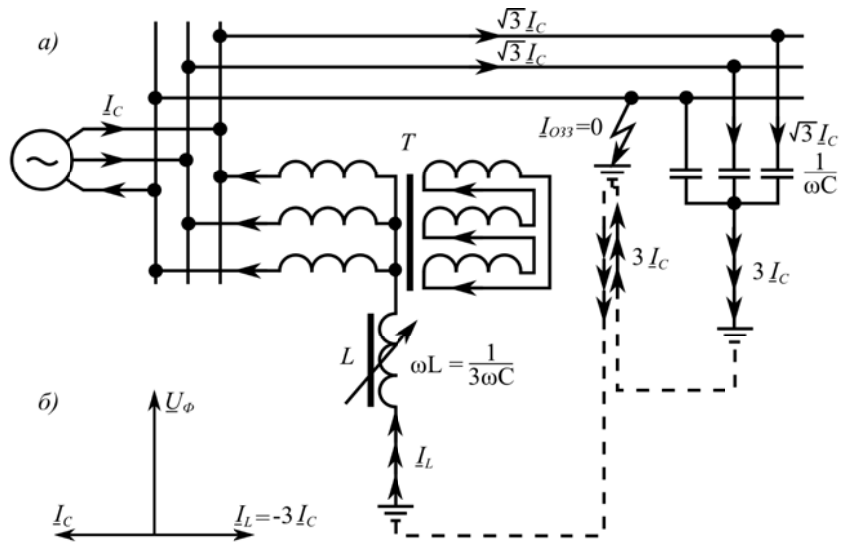


Рис. 12.11. Сеть с компенсированной нейтралью
 а — схема протекания токов замыкания на землю;
 б — векторная диаграмма токов в месте замыкания на землю

От этого увеличения напряжения срабатывают реле максимального напряжения KV2 и KV3 (рис. 12.12, а). В схеме автоматики ИПФ (рис. 12.12, б) KV2 и KV3 замыкают свои контакты и подают питание на промежуточное реле KL1, которое, замыкая свой контакт, подаёт питание на электромагнит включения YAC3 быстродействующего вакуумного выключателя Q3. Выключатель Q3 замыкая свой контакт создаёт искусственное короткое замыкание фазы С на землю на шинах подстанции.

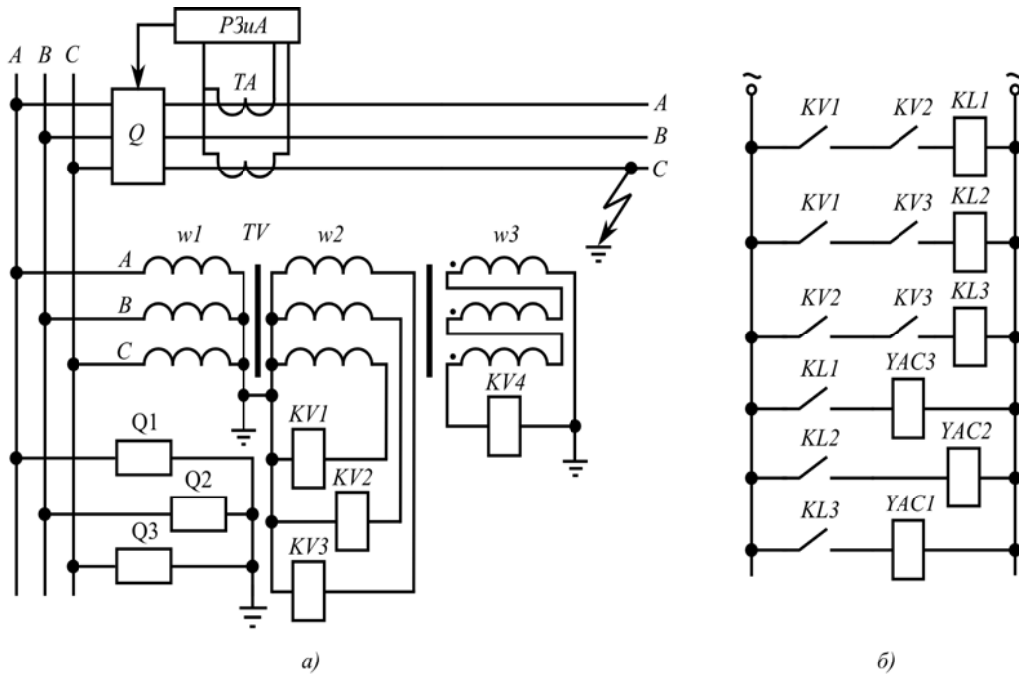


Рис. 12.12. Избиратель повреждённой фазы:
 а — схема силовой постройки избирателя повреждённой фазы;
 б — схема автоматики вторичных цепей ИПФ

В результате ёмкостной ток замыкания на землю протекает по контуру наименьшего сопротивления, т.е. через искусственно созданную точку замыкания на землю на шинах подстанции. Такое мероприятие позволяет исключить протекание ёмкостного тока через элементы электрооборудования с повреждённой изоляцией (падение провода на заземляемую часть арматуры опоры ЛЭП).

Контрольные вопросы

1. В каком классе сетей замыкание на землю не является аварийным режимом?
2. Зарисуйте контур протекания тока замыкания на землю в сети 10 кВ.
3. Что происходит с напряжением неповрежденных фаз относительно земли при замыкании на землю в сети 10 кВ?
4. От чего зависит ёмкость между фазами и землёй?
5. Как определить ток замыкания на землю, исходя из векторной диаграммы?
6. Как вычислить токи замыкания на землю в ВЛ для приближенного расчёта?
7. Как вычислить ток замыкания на землю в КЛ для приближенных расчётов?
8. Можно ли прикасаться к опоре 10 и 35 кВ?
9. Чем опасно прикосновение к опоре 10 и 35 кВ?
10. Каким образом на ТП сигнализируется наличие замыкания на землю?
11. Как определить место замыкания на землю?
12. Зарисуйте схему соединения обмоток трансформатора напряжения на подстанции.
13. Для чего используется схема соединения в разомкнутый треугольник?
14. Зарисуйте схему соединения обмоток в разомкнутый и неполный треугольник.
15. В чём особенность расчёта замыкания на землю через переходное сопротивление?
16. Опишите последствия замыкания на землю.
17. Как снизить ток замыкания на землю?
18. Как определить, в какой фазе произошло замыкание на землю?
19. Какое устройство используется для снижения последствий замыкания на землю?
20. Опишите по схеме работу избирателя повреждённой фазы.

13. ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ ТРАНСФОРМАТОРА НА ХОЛОСТОМ ХОДУ

При установившемся режиме работы ток холостого хода силового трансформатора не превышает 3...5% номинального. При включении трансформатора в сеть под напряжение, близкое к номинальному, могут наблюдаться резкие броски тока, во много раз превышающие номинальные значения тока холостого хода [11].

В режиме холостого хода трансформатор обладает активным и индуктивным сопротивлением, образованными в основном цепью намагничивания (рис. 13.1).

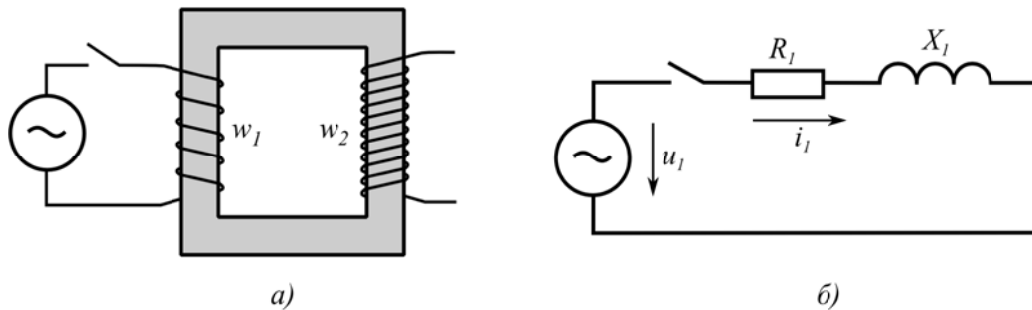


Рис. 13.1. Включение трансформатора на холостом ходу: а — схема включения; б — схема замещения

Уравнение ЭДС при включении трансформатора на синусоидальное, не зависящее от его режима работы напряжение, можно записать в виде

$$u_1 = U_m \sin(\omega t + \psi_0) = U_m \sin \psi_0 = i_1 R_1 + L_1 \frac{di}{dt},$$

где ψ_0 — начальная фаза сетевого напряжения в момент включения (рис. 13.2).

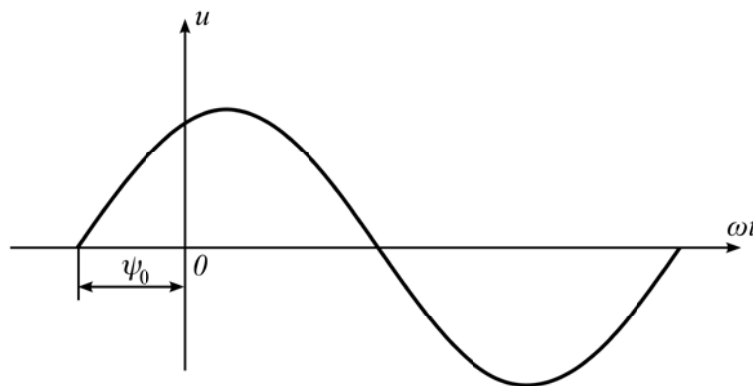


Рис. 13.2. Начальная фаза

Зависимость магнитного потока от тока намагничивания нелинейна, поэтому решение уравнения возможно при упрощающем положении о пропорциональности потокосцепления току:

$$\Psi_1 = i_1 L_1 = \Phi w_1; L_1 \frac{di}{dt} = w_1 \frac{d\Phi}{dt}; i_1 = \frac{w_1}{L_1} \Phi.$$

В результате можно записать:

$$U_m \sin(\omega t + \psi_0) = \frac{w_1}{L_1} \Phi R_1 + w_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

или

$$\frac{d\Phi}{dt} + \frac{R_1}{L_1} \Phi = \frac{U_m}{w_1} \sin(\omega t + \psi_0).$$

Суммарный магнитный поток выражается в виде суммы принуждённой и свободной составляющих:

$$\Phi = \Phi_{IP} + \Phi_{CB}.$$

Принуждённая составляющая циркулирует под действием приложенного напряжения, а поскольку первичная обмотка трансформатора представляет собой практически индуктивное сопротивление, то ток холостого хода и магнитный поток отстают от напряжения на угол, близкий к 90° . Ток холостого хода намного меньше номинального, поэтому магнитопровод не насыщен и вектор потока совпадает с вектором тока холостого хода (рис. 13.3).

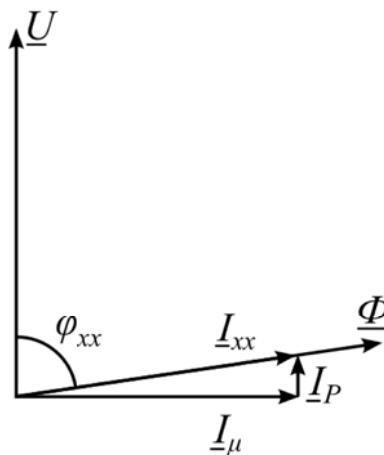


Рис. 13.3. Векторная диаграмма токов, напряжения и магнитного потока

Принуждённая составляющая магнитного потока определится:

$$\Phi_{IP} = \Phi_m \sin\left(\omega t + \psi_0 - \frac{\pi}{2}\right)$$

Учитывая, что

$$\sin\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right) = -\cos \alpha,$$

выражение примет вид:

$$\Phi_{IP} = -\Phi_m \cos(\omega t + \psi_0).$$

Свободная составляющая находится из решения однородного дифференциального уравнения:

$$\frac{d\Phi_{CB}}{dt} + \frac{R_1}{L_1} \Phi_{CB} = 0; \quad \Phi_{CB} = C e^{-\frac{R_1}{L_1} t} = C e^{-\frac{R_1}{X_1} \omega t};$$

$$\Phi = \Phi_{IP} + \Phi_{CB} = -\Phi_m \cos(\omega t + \psi_0) + C e^{-\frac{R_1}{X_1} \omega t};$$

$$\Phi_{t=0} = -\Phi_m \cos \psi_0 + C = \pm \Phi_{ocm}; \quad C = \Phi_m \cos \psi_0 \pm \Phi_{ocm}.$$

Мгновенное значение магнитного потока в любой момент времени может быть определено по выражению

$$\Phi = -\Phi_m \cos(\omega t + \psi_0) + (\Phi_m \cos \psi_0 \pm \Phi_{ocm}) e^{-\frac{R_1}{X_1} \omega t}.$$

Остаточный магнитный поток (намагниченность) остаётся в магнитопроводе трансформатора в момент отключения его от сети, когда синус или косинус в выражении, описывающем переходный процесс, не равен нулю. Остаточный магнитный поток изменится в пределах $0 \dots 0,3 \Phi_m$.

Картина переходного процесса будет зависеть от момента включения трансформатора.

1. Включение трансформатора в момент времени $\psi_0 = \frac{\pi}{2}$.

Изменение магнитного потока будет описываться выражением (рис. 13.4):

$$\Phi = -\Phi_m \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) + \left(\Phi_m \cos \frac{\pi}{2} \pm \Phi_{ocm}\right) e^{-\frac{R_1}{X_1} \omega t};$$

$$\Phi = -\Phi_m \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \pm \Phi_{ocm} e^{-\frac{R_1}{X_1} \omega t}.$$

Максимальное значение магнитного потока будет в момент времени $\frac{\pi}{2}$ или

$$\omega t = \frac{\pi}{2} \Rightarrow t = 0,005 \text{ с.}$$

При $\omega t = 0$,

$$\Phi = \pm \Phi_{ocm} e^{-\frac{R_1}{X_1} \omega t}.$$

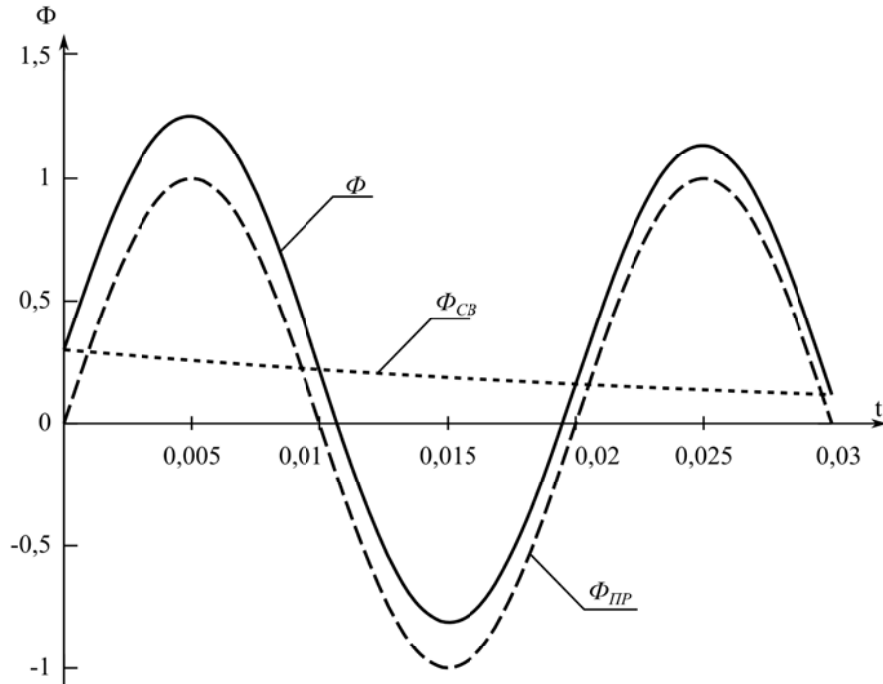


Рис. 13.4. Переходный процесс при включении трансформатора и начальной фазе, равной $\pi/2$

2. Включение трансформатора в момент времени $\psi_0 = 0$.

Изменение магнитного потока будет описываться выражением (рис. 13.5):

$$\Phi = -\Phi_m \cos(\omega t) + (\Phi_m \cos 0 \pm \Phi_{ост}) e^{-\frac{R_1 \omega t}{X_1}}$$

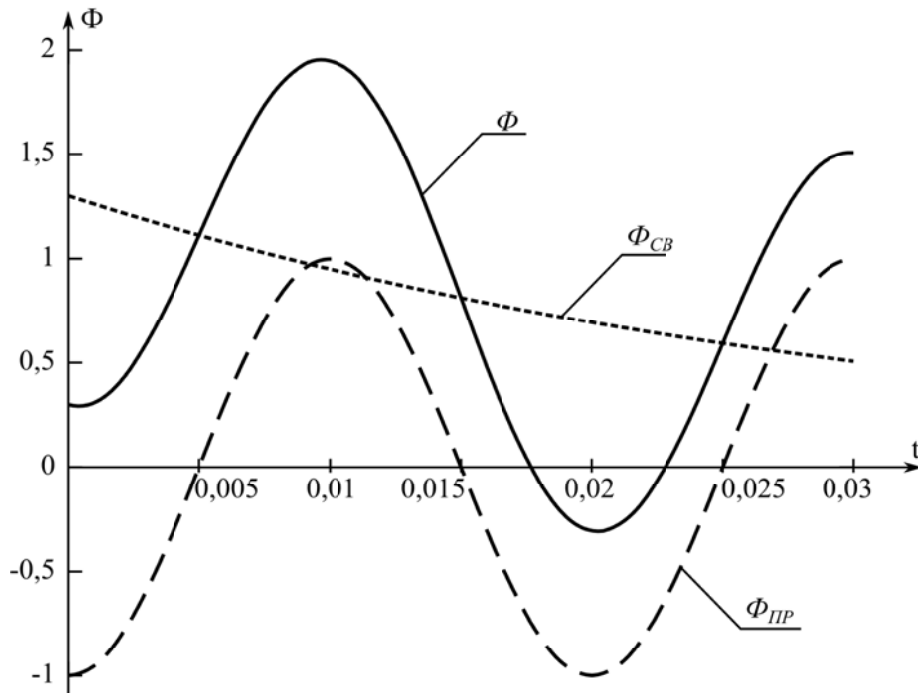


Рис. 13.5. Переходный процесс при включении трансформатора и начальной фазе, равной нулю

Максимальное значение магнитного потока будет в момент времени π или $\omega t = \pi \Rightarrow t = 0,01$ с.

$$\text{При } \omega t = 0, \quad \Phi = -\Phi_m + \left(\Phi_m \pm \Phi_{осм} \right) e^{-\frac{R_1}{X_1} \omega t}.$$

Увеличение магнитного потока приводит к возникновению большого намагничивающего тока, превышающего номинальный в 4...5 раз (рис. 13.6).

Совместим графики: изменения магнитного потока Φ от тока намагничивания $\Phi = f_1(i)$ и изменения магнитного потока во времени $\Phi = f_2(t)$, полученном на рис. 13.5.

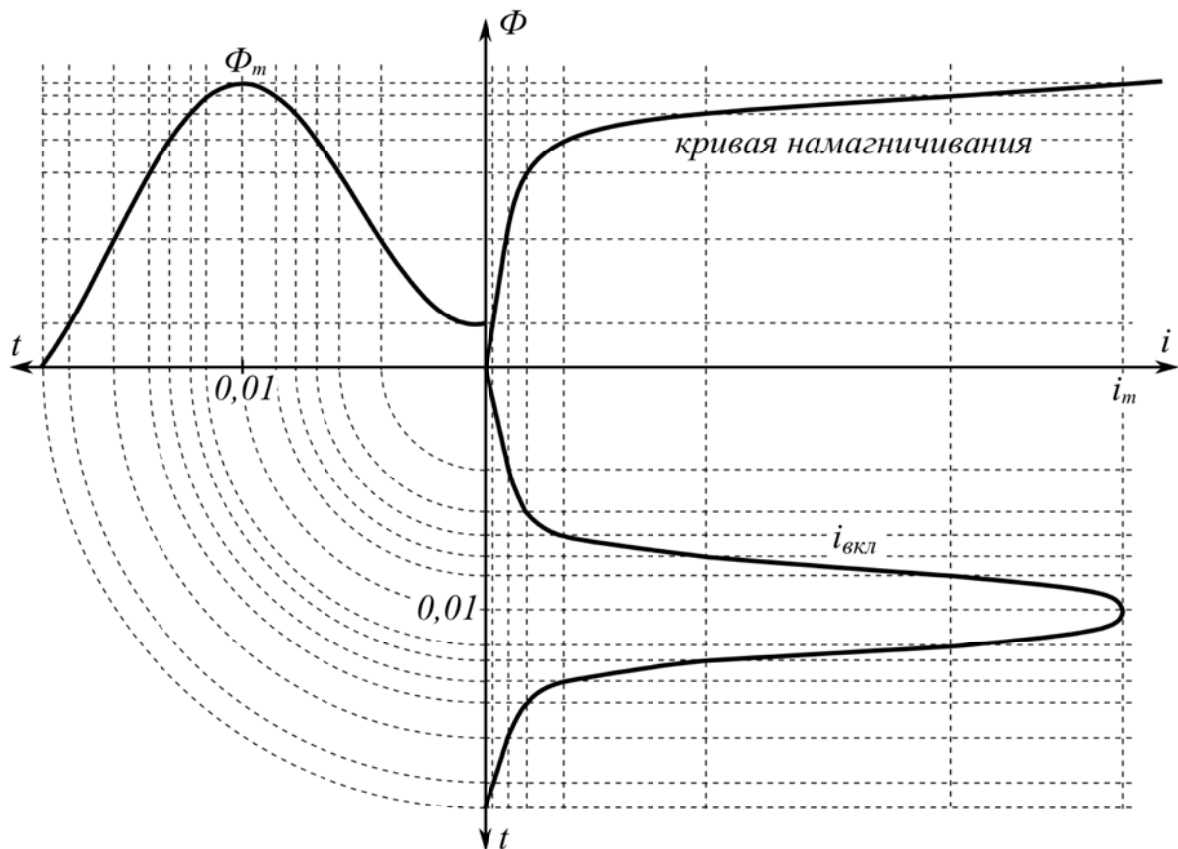


Рис. 13.6. Бросок намагничивающего тока

В нижней части будем строить график изменения тока холостого хода $i_{ВКЛ} = f(t)$. Для построения графика $i_{ВКЛ} = f(t)$ зададимся моментом времени $t = 0,01$ с, при этом магнитный поток на графике $\Phi = f_2(t)$ имеет максимальное значение Φ_m . Эту точку переносим на график $\Phi = f_1(i)$ и по ней находим значение тока i_m . При пересечении значения i_m с временем t на графике $i_{ВКЛ} = f(t)$ получим амплитуду броска намагничивающего тока при включении трансформатора на холостой ход. Аналогично находим другие точки графика $i_{ВКЛ} = f(t)$.

По величине бросок намагничивающего тока сложно отличить от тока короткого замыкания. От амплитудного значения тока включения трансформатора срабатывают быстродействующие защиты: токовая отсечка,

дифференциальные защиты трансформаторов, что необходимо учитывать при проектировании релейной защиты. Именно по этой причине ток плавкой вставки предохранителя, защищающего трансформатор 10/0,4 кВ, завышают в два раза по отношению к номинальному току трансформатора.

Контрольные вопросы

1. Почему при включении лабораторного автотрансформатора на холостом ходу отключается автоматический выключатель?
2. От чего зависит величина броска намагничивающего тока трансформатора?
3. К чему может привести бросок намагничивающего тока трансформатора?
4. Как учесть ток намагничивания при выборе защиты трансформатора 10/0,4 кВ?

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ульянов, С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. — М. : Энергия, 1970. — 520 с.
2. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники. — 9-е изд., доп. и перераб. — М. : Высшая школа, 1996. — 580 с.
3. Баптиданов, Л.Н. Электрические станции и подстанции / Л.Н. Баптиданов, В.И. Тарасов. — М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1958. — 464 с.
4. Бургучёв, С.А. Электрические станции, подстанции и системы / С.А. Бургучёв. — 2-е изд., перераб. и доп. — М., Колос, 1996. — 688 с.
5. Электроснабжение : справочник электрика по электрооборудованию сельского хозяйства для студентов 4, 5, 6 курсов специальности 311400 «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства» очной и заочной форм обучения. — Кострома : КГСХА, 2006. — 102 с.
6. Расчёт коротких замыканий и выбор электрооборудования : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / И.П. Крючков, Б.Н. Неклепаев, В.А. Старшинов и др. ; под ред. И.П. Крюčkова и В.А. Старшинова. — М. : Издательский центр «Академия», 2005. — 416 с.
7. ГОСТ 30323 — 95. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия тока короткого замыкания. — Введ. 1994–01–01. — М. : Изд-во стандартов, 1995.
8. Попов, Н.М. Электроснабжение. Рабочие режимы распределительных сетей 0,38...10 кВ. — Кострома : Изд. Костромской ГСХА, 2010. — 202 с.
9. Попов, Н.М. Однофазные короткие замыкания в электрических сетях сельскохозяйственных потребителей : лекция / Всесоюзн. с.-х. ин-т заоч. образования. — М. : 1988. — 57 с.
10. Электрические сети и системы : учеб. пособие для техникумов / В.А. Боровиков, В.К. Косарев, Г.А. Ходот. — М. : Энергия, 1968. — 431 с.
11. Вольдек, А.И. Электрические машины : учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений. — 3-е изд., перераб. — Л. : Энергия, 1978. — 832 с. : ил.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

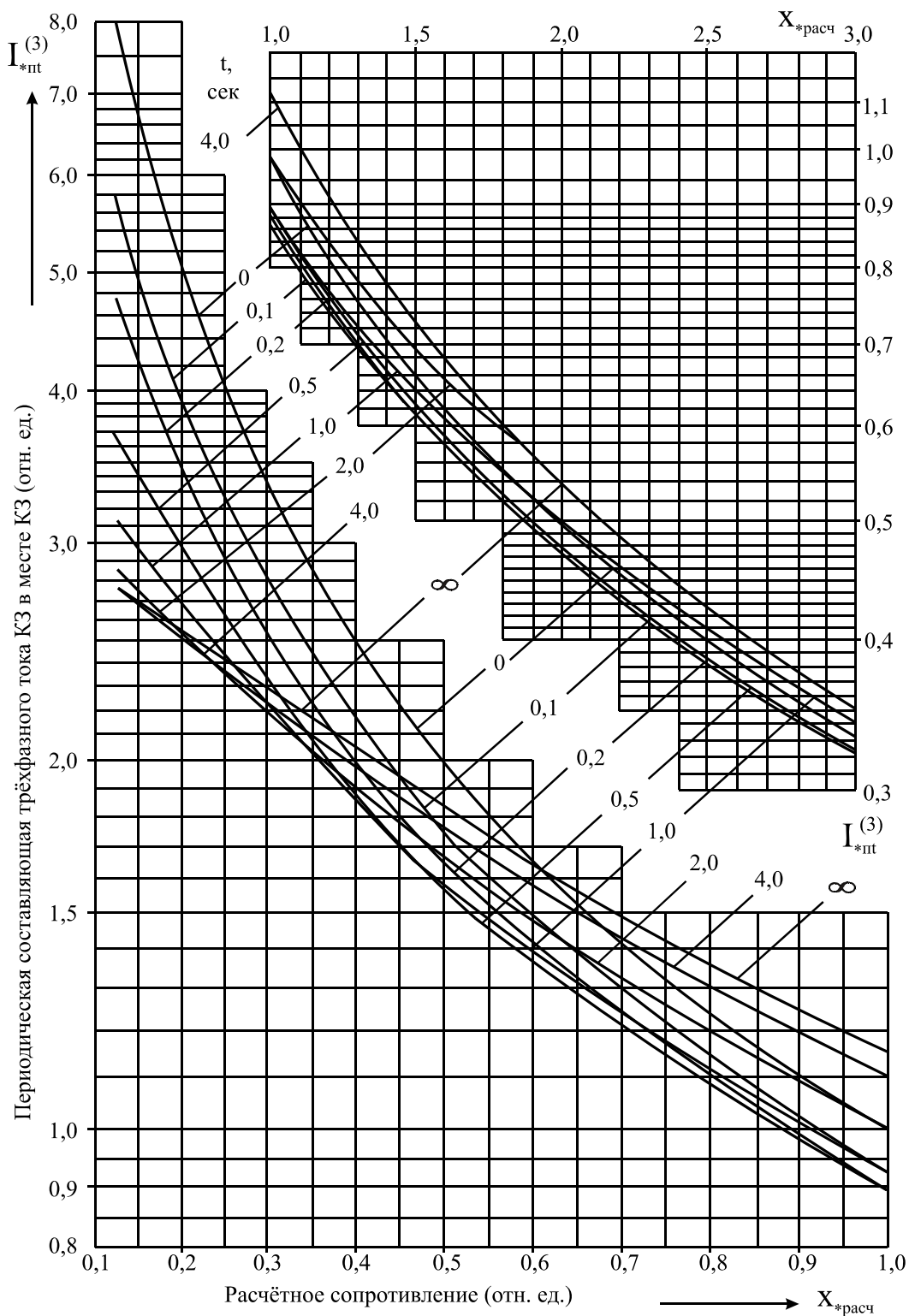


Рис. П-1. Расчётные кривые турбогенераторов мощностью до 150 МВА

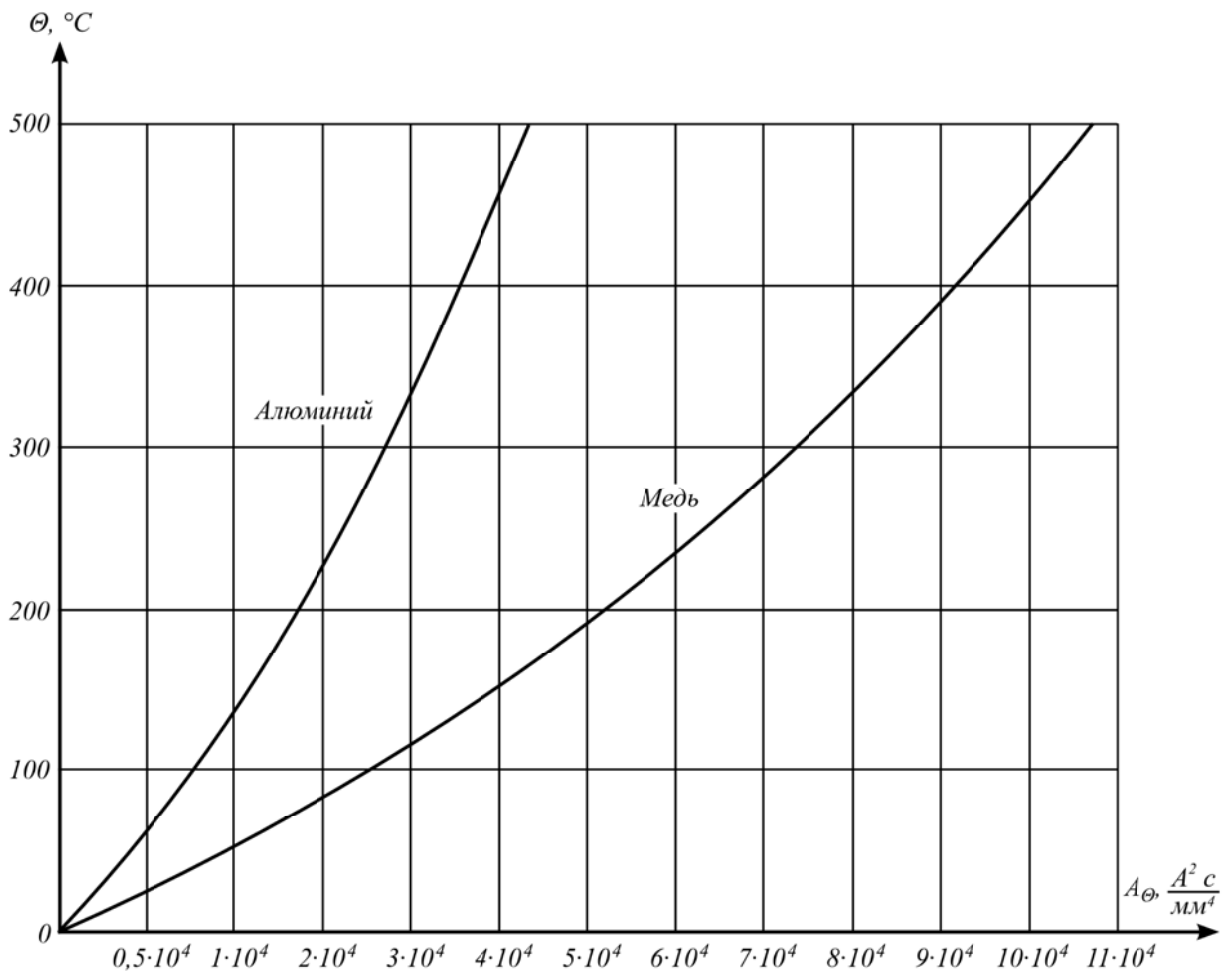


Рис. П-2. Кривые определения температуры проводника

Для заметок

Учебно-теоретическое издание

Олин, Д.М. Переходные процессы в электрических сетях : учебное пособие /
Д.М. Олин, Н.М. Попов. — Караваево : Костромская ГСХА, 2013. — 103 с.

Гл. редактор Н.В. Киселева
Редактор выпуска Т.В. Тарбеева
Корректор Т.В. Кулинич