

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

А.А. КИРИЛИН

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Практикум
для студентов направления подготовки
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»,
профиль «Электроснабжение»
очной и заочной форм обучения

КАРАВАЕВО
Костромская ГСХА
2015

УДК 621.311
ББК 31.279
К 43

Автор: ассистент кафедры электроснабжения Костромской ГСХА
А.А. Кирилин.

Рецензент: к.т.н., доцент кафедры электропривода и электротехнологии
Костромской ГСХА *Ф.А. Новожилков.*

*Рекомендовано к изданию методической комиссией
факультета электрификации и автоматизации сельского хозяйства,
протокол № 6 от 06.07.2015 г.*

К 43 **Кирилин, А.А.** Электромагнитные переходные процессы в электро-
энергетических системах : практикум для студентов направления под-
готовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», профиль
«Электроснабжение» очной и заочной форм обучения / А.А. Кири-
лин. — Караваево : Костромская ГСХА, 2015. — 40 с.

Издание содержит 10 практических работ. Описание каждой работы включает в себя основные теоретические положения и задания для аудиторной и самостоятельной работы. В работах рассмотрены расчёты токов короткого замыкания в электроэнергетических системах в рабочих и аварийных режимах, а также методы определения электродинамического и термического воздействий на оборудование электрических сетей.

Практикум предназначен для аудиторной и самостоятельной работы студентов направления 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», профиль «Электроснабжение» очной и заочной форм обучения.

УДК 621.311
ББК 31.279

Оглавление

Введение	4
Практическое занятие №1 «Общие сведения об аварийных режимах. Расчет сопротивлений элементов электрической сети».....	5
Практическое занятие №2 «Основы работы в пакете Mathcad».....	10
Практическое занятие №3 «Построение временных диаграмм токов и напряжений».....	12
Практическое занятие №4 « Общие сведения о переходных процессах. Расчет токов короткого замыкания в именованных единицах».....	14
Практическое занятие №5 «Переходный процесс при трёхфазном коротком замыкании. Расчет ударного тока короткого замыкания».....	19
Практическое занятие №6 «Уравнения электромагнитных переходных процессов в синхронной машине. Расчет токов короткого замыкания в относительных единицах».....	21
Практическое занятие №7 « Короткие замыкания в электроустановках до 1 кВ. Расчет электродинамических сил при коротком замыкании. Проверка проводников по условиям механической стойкости»	24
7.3. Расчет термического действия тока короткого замыкания.....	28
Практическое занятие №8 «Применение теории симметричных составляющих для расчета не симметричных режимов»	30
Практическое занятие №9 «Расчет токов однофазного замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью»	34
Темы для самостоятельного изучения	36
Список использованных источников.....	37
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	38
Приложение А	38
Приложение Б.....	39

Введение

Рассмотрение процессов, протекающих в электрических сетях при коммутациях, обрывах или коротких замыканиях, является способом понимания режимов работы электрических сетей. В данном издании приведены краткие теоретические сведения об аварийных режимах в электрических сетях, методы расчета токов короткого замыкания и их воздействий на оборудование электрических сетей.

Целями практикума являются:

- формирование у обучающихся знаний о возможных аварийных режимах работы линий электропередачи, причинах их возникновения и способах расчета аварийных режимов с помощью основных законов электротехники;

- приобретение умений рассчитывать ток короткого замыкания в сетях с глухозаземленной и изолированной нейтралью, определять термическое и динамическое действие тока короткого замыкания с использованием основных законов электротехники;

- совершенствование владения навыками составления расчетных схем для использования их в расчетах аварийных режимов при помощи основных законов электротехники.

Практикум предназначен для аудиторной и самостоятельной работы студентов направления 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» очной и заочной форм обучения при изучении дисциплины «Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах».

Практическое занятие №1

«Общие сведения об аварийных режимах. Расчет сопротивлений элементов электрической сети»

Цель занятия: изучить общие сведения о коротких замыканиях, научиться рассчитывать значение тока трехфазного, двухфазного, однофазного короткого замыкания в именованных единицах.

1.1. Виды режимов работы электрических сетей

В процессе эксплуатации электрических сетей токи нагрузки, протекающие по проводам и трансформаторам, непрерывно изменяются. Величина токов определяется сопротивлениями нагрузки, подключенными к участку линии. Различают три вида режимов работы электрической сети:

- рабочий режим, когда токи нагрузки не превышают значений, на которые рассчитаны коммутационные аппараты, провода или трансформаторы;
- режим перегрузки, при котором через коммутационные аппараты, провода линий электропередачи и через трансформаторы протекают токи, не превышающие номинальные величины;
- аварийный режим — это не предусмотренное эксплуатационными характеристиками изменение состояния сети, результатом которого является резкое изменение токов и (или) напряжений, из-за чего создается угроза выхода из строя потребителей или участков сети, а также угроза жизни людей и животных.

Аварийные режимы — это чаще всего короткие замыкания (КЗ) и нарушение контакта в соединениях проводников, сопровождающиеся обычно обрывом проводов. Наиболее часто в электрических сетях возникают КЗ. Для своевременной ликвидации КЗ необходимо знать токи, протекающие при этих аварийных режимах [1].

1.2. Расчет установившихся токов коротких замыканий

Короткое замыкание — режим, при котором происходит соединение разнополярных проводников, находящихся под напряжением, через малое переходное сопротивление. КЗ сопровождается протеканием токов, способных повредить электрические аппараты, линии электропередачи и трансформаторы. Наиболее часто случаются в электрических сетях следующие КЗ:

- замыкания на землю – соединение фазного провода с землей;
- однофазное КЗ – фазный провод соединяется с нулевым проводом;
- двухфазное КЗ – соединение между собой двух фазных проводов;
- трехфазное КЗ – соединение между собой трех фазных проводов;
- двойные замыкания на землю – соединение между собой через сопротивление земли двух фазных проводов в разных точках.

При расчете токов КЗ чаще всего не учитывают токи нагрузки, которые

могут накладываться на токи КЗ. Расчет токов КЗ вычисляется с применением закона Ома в несколько этапов [1].

1. Прежде всего, необходимо изобразить расчетную однолинейную схему. Пример расчетной схемы представлен на рисунке 1.
2. Составить развернутую схему с обозначением контура тока.
3. В соответствии с контуром тока представить схему замещения, в которую входят ЭДС или напряжения, имеющие разность потенциалов, сопротивления, через которые под действием разности потенциалов протекают токи.
4. Методами преобразований схема замещения упростить до одного источника питания и до одного сопротивления (последовательное, параллельное соединений сопротивлений, преобразование треугольника сопротивления в звезду и наоборот)
5. По закону Ома вычислить ток КЗ, протекающий от источника.
6. При необходимости найти ток в каждой ветви расчетной схемы.

В простейших схемах при расчетах токов КЗ используют только последовательное соединение сопротивлений.

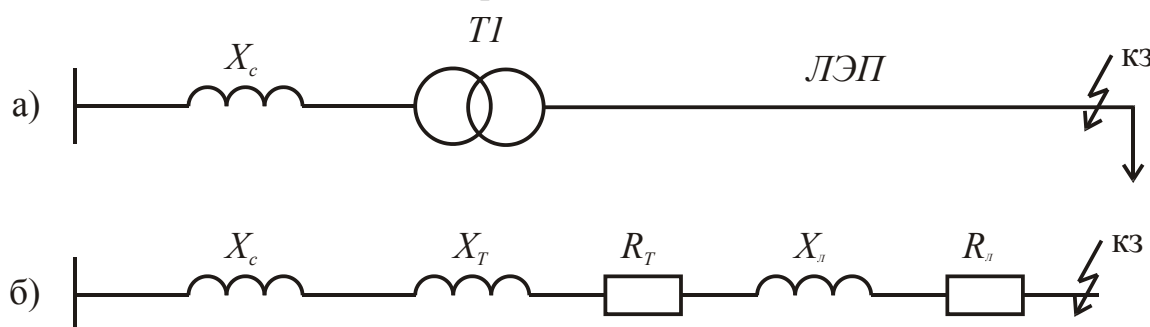


Рис. 1 — Схема участка сети, а) однолинейная, б) замещения

Ток короткого замыкания $I_{кз}$ (А) рассчитывается по закону Ома, при этом необходимо определить напряжение и сопротивление сети:

$$I_{кз} = \frac{U_{кз}}{\sqrt{(\sum R)^2 + (\sum X)^2}}, \quad (1)$$

где $U_{кз}$ — напряжение, при котором происходит короткое замыкание, В;

$\sum R$ — суммарное активное сопротивление до точки короткого замыкания, Ом;

$\sum X$ — суммарное реактивное сопротивление до точки короткого замыкания, Ом.

При рассмотрении переходных процессов в электрических сетях часто принимаются следующие допущения [2]:

– точка КЗ питается от источника неограниченной мощности;

- все фазы имеют одинаковое активно-индуктивное сопротивление; изменение от протекания тока короткого замыкания не учитывается;
- частота тока в сети при КЗ не изменяется;
- в течение всего короткого замыкания ЭДС всех фаз генераторов совпадают по фазе;
- не учитывают насыщение магнитных систем (индуктивные сопротивления постоянны);
- пренебрегают намагничивающими токами силовых трансформаторов и автотрансформаторов;
- не учитывают емкость элементов (практически следует учитывать емкость линий 500 кВ и выше);
- величина переходного сопротивления в месте короткого замыкания стремится к нулю.

1.3. Расчет сопротивлений элементов электрической сети

Сопротивление, ограничивающее ток КЗ, в зависимости от вида короткого замыкания складывается из сопротивлений трансформатора: активного R_T и реактивного X_T [3].

$$Z_T = \frac{u_{кз} \% \cdot U_n^2}{100 \cdot S_n}; \quad R_T = \frac{dP_{кз} \cdot U_n^2}{S_n^2}; \quad X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2},$$

где $u_{кз} \%$ – номинальное напряжение короткого замыкания в процентах, %;

$dP_{кз}$ – потери мощности при коротком замыкании, Вт;

U_n – номинальное напряжение трансформатора, при котором рассчитывается ток короткого замыкания, В;

S_n – номинальная мощность трансформатора, ВА.

Для трансформаторов, работающих с глухозаземленной нейтралью при однофазном коротком замыкании на нулевой провод или на землю, следует учитывать сопротивление трансформатора току однофазного короткого замыкания $Z_T^{(1)}$, определяемое на заводе изготовителе.

Для трехобмоточных трансформаторов с соотношением мощностей обмоток 100/67/67 сопротивление обмотки с меньшей мощностью определяется [2]:

$$r_{67} = 1,5 \cdot r_{100},$$

где r_{100} – сопротивление обмотки высшего напряжения, Ом.

Активное ($R_{л.ф}$) и реактивное ($X_{л.ф}$) сопротивления фазного провода линии электропередачи рассчитываются по формулам:

$$R_{л.ф} = R0_{ф} \cdot L; \quad X_{л.ф} = X0_{ф} \cdot L,$$

где $R0_{ф}$ – удельное активное погонное сопротивление фазного провода,

Ом/км;

$X0_{\phi}$ – удельное реактивное погонное сопротивление фазного провода, Ом/км;

L – Длина линии, км.

Активное ($R_{л.н}$) и реактивное ($X_{л.н}$) сопротивления нулевого провода линии электропередачи рассчитываются по формулам:

$$R_{л.н} = R0_n \cdot L; X_{л.н} = X0_n \cdot L,$$

где $R0_n$ – удельное активное погонное сопротивление нулевого провода, Ом/км;

$X0_n$ – удельное реактивное погонное сопротивление нулевого провода, Ом/км;

L – длина линии, км.

Полное сопротивление фазного провода линии электропередачи рассчитывается по формуле:

$$Z_{л.ф} = \sqrt{R_{л.ф}^2 + X_{л.ф}^2}.$$

Для расчета тока однофазного короткого замыкания необходимо также знать сопротивление петли фаза-нуль, $Z_{пет}$:

$$Z_{пет} = \sqrt{(R_{л.ф} + R_{л.н})^2 + (X_{л.ф} + X_{л.н})^2}.$$

В случае если неизвестно погонное сопротивление проводов, сопротивление линии можно рассчитать через удельное сопротивление и параметры провода:

$$R0 = \frac{l \cdot \rho}{s} \text{ – активное сопротивление провода,}$$

$$R0 = \frac{1000 \cdot \rho}{s} \text{ – активное сопротивление одного километра провода,}$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление материала провода, Ом·м;

s – сечение провода, мм².

Реактивное сопротивление одного километра провода рассчитывается по формуле:

$$X0 = 4,6\omega \cdot \lg \frac{2\sqrt[3]{D12 \cdot D23 \cdot D13}}{dp} \cdot 10^{-4} + 0,5\omega \cdot \mu \cdot 10^{-4},$$

где ω – угловая частота вращения векторов; $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$, рад·с⁻¹;

$D12, D23, D13$ – расстояния между проводами, м;

dp – диаметр провода, м;

μ – магнитная проницаемость материала провода; для меди и алюминия $\mu=1$.

1.4. Задания для практического занятия №1

Задание 1: рассчитайте сопротивление линии электропередачи длиной 400 м выполненной проводом СИП 2А 3×35+54.6.

Задание 2: рассчитайте сопротивление трансформатора ТМ-160/10.

Задание 3: рассчитайте сопротивление линии электропередачи длиной 400 м, выполненной проводом АС-70.

Практическое занятие №2 «Основы работы в пакете Mathcad»

Цель работы: научиться основным операциям с комплексными числами в пакете Mathcad, а также строить векторные диаграммы токов и напряжений.

2.1. Операции с комплексными числами

Комплексные числа состоят из мнимой и действительной частей. Векторы строятся на комплексной плоскости и задаются двумя комплексными числами. В пакете Mathcad комплексное число задаётся посредством любой переменной, умноженной на мнимую единицу, которой присваивается значение, равное $j := \sqrt{-1}$ либо запись $1i$, воспринимаемая пакетом Mathcad, как мнимая единица.

Операция присвоения комплексного числа

Присвоим выбранной переменной произвольное комплексное число:

$$A := 100 + j \cdot 50.$$

Операция отделения действительной и мнимой части

Отделим от заданного комплексного числа действительную и мнимую части посредством встроенных в пакет Mathcad функций:

Действительная часть — $\text{Re}(A) = 100$;

Мнимая часть — $\text{Im}(A) = 50$.

При построении векторных диаграмм по оси ординат откладывают действительную часть, а по оси абсцисс — мнимую.

2.2. Задания для практического занятия №2

Задание 4: постройте на комплексной плоскости комплексное число.

Порядок выполнения задания:

1. Задать произвольное комплексное число.
2. Вызвать X-Y график.
3. По оси ординат задать действительную часть, по оси абсцисс — мнимую.
4. Для отображения точки, дважды щелкнув левой кнопкой мыши в поле графика, вызвать свойства графика. Во вкладке Traces установить отображение символов для первой линии.

Для построения вектора на комплексной плоскости необходимо задать его начальную и конечную точки. В пакете Mathcad вектор (полилиния) задаётся посредством диапазона значений, который включает в себя только целые числа.

Задание 5: постройте вектор на комплексной плоскости.

Порядок выполнения задания:

1. Задать начало и конец вектора в виде двух случайных комплексных чисел.
2. Задать диапазон чисел для вектора-столбца.
3. Задать вектор-столбец, в котором первое число – начало вектора, второе – конец вектора.
4. Построить вектор (полилинию) на графике, отложив по оси x мнимую часть вектора-столбца, а по оси y – действительную.

В электротехнике за положительное направление принято использовать вращение вектора против часовой стрелки. Угол вектора относительно горизонтальной оси можно определить при помощи встроенного в пакете Mathcad оператора "arg":

в радианах $arg(A) = 0.464$;

в градусах двумя способами $arg(A) = 26.565deg$; $arg(A) \cdot \frac{180}{\pi} = 26.565$.

Векторы напряжений и токов в комплексном виде задаются следующим образом:

1. Задать операторы поворота:

$$a := e^{-j120\text{-deg}}; n := e^{\varphi\text{-deg}}.$$

2. Задать векторы напряжения и тока в фазе «А», «В», «С»:

$$U_a := U_{\phi}; I_a := I_{\phi} \cdot n;$$

$$U_b := U_{\phi} \cdot a^2; I_b := I_{\phi} \cdot a^2 \cdot n;$$

$$U_c := U_{\phi} \cdot a; I_c := I_{\phi} \cdot a \cdot n;$$

где φ – угол между током и напряжением: для индуктивной нагрузки положительный, для емкостной нагрузки – отрицательный.

Задание 6: построить векторную диаграмму фазных и линейных напряжений на комплексной плоскости, используя оператор поворота.

Порядок выполнения задания:

1. Задать значения фазных напряжений в комплексном виде.
2. Составить вектор-столбец полилинии.
3. Построить на графике X-Y диаграмму фазных и линейных напряжений.

Задание 7: построить векторную диаграмму фазных напряжений и токов активно-индуктивной нагрузки на комплексной плоскости.

Задание 8: построить векторную диаграмму фазных напряжений и токов активно-емкостной нагрузки на комплексной плоскости.

Практическое занятие №3 «Построение временных диаграмм токов и напряжений»

Цель работы: научиться в пакете Mathcad выполнять построение графиков тока и напряжения.

В математическом пакете Mathcad функции задаются следующим образом:

$$F(t) := 10 \cdot t,$$

где $F(t)$ – функция от переменной t .

В случае изменения функции, например во времени, часто требуется задать шаг изменения аргумента. В пакете Mathcad структура аргумента, содержащего произвольный шаг, имеет вид:

$$t := a, b..c,$$

где a – начальное значение;

b – шаг (второе значение);

c – конечное значение.

Для построения графика напряжения необходимо задать следующую функцию:

$$u(t) := U_m \cdot \sin(\omega \cdot t),$$

где U_m – амплитудное значение напряжения.

3.1. Задания для практического занятия №3

Задание 9: построить график изменения во времени тока и напряжения за два периода.

Порядок выполнения задания:

1. Задать промежуток от 0 до $2T$ с шагом 0,0001.
2. Задать функции изменения тока и напряжения с произвольными амплитудными значениями.
3. Построить график: по оси x – переменная времени, по оси y – переменная тока и напряжения.

В электрических сетях в одной и той же фазе вектор тока редко совпадает с вектором напряжения, поэтому необходимо задавать смещение тока относительно напряжения [1]:

$$i(t) := I_m \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi),$$

где I_m – амплитудное значение напряжения.

Задание 10: построить график изменения во времени напряжения и тока активно-индуктивной нагрузки за два периода в фазе А.

Порядок выполнения задания:

1. Задать промежуток от 0 до $2T$ с шагом 0,0001.
2. Задать угол смещения тока относительно напряжения.
3. Задать функцию изменения тока и напряжения с произвольными амплитудными значениями.
4. Построить график: по оси x – переменная времени, по оси y – переменная тока и напряжения.

Задание 11: построить график изменения во времени трехфазного напряжения за два периода.

Порядок выполнения задания:

1. Задать промежуток от 0 до $2T$ с шагом 0,0001.
2. Задать угол смещения напряжения в фазах В и С относительно фазы А.
3. Задать функцию изменения напряжения.
4. Построить график: по оси x – переменная времени, по оси y – переменная тока и напряжения.

Практическое занятие №4
« Общие сведения о переходных процессах.
Расчет токов короткого замыкания в именованных единицах»

Цель работы: научиться рассчитывать установившееся значение тока трехфазного, двухфазного, однофазного короткого замыкания в именованных единицах.

4.1. Расчет тока трехфазного короткого замыкания

При трехфазном коротком замыкании происходит соединение трех фаз электрической сети через малые переходные сопротивления (рис. 2). Ток при этом будет протекать по всем трем фазным проводам линии (обозначено пунктиром), что аналогично подключению трехфазной нагрузки, соединенной по схеме «звезда», к трансформатору.

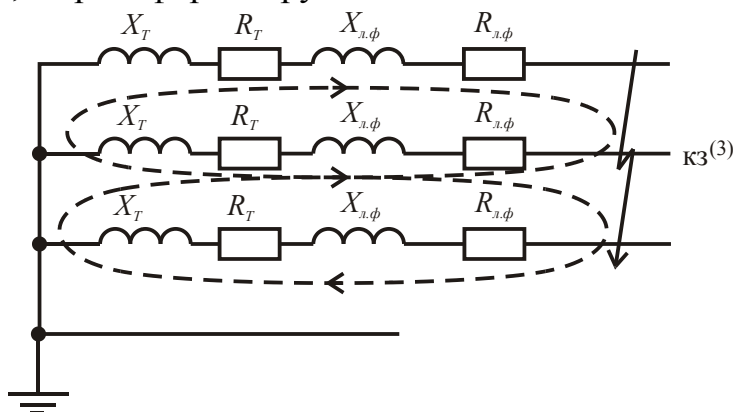


Рис. 2 — Трехфазное короткое замыкание

Следовательно, один и тот же ток протекает по активному и реактивному сопротивлениям одной фазы трансформатора, по активному и реактивному сопротивлениям одного линейного провода под действием фазного напряжения. Тогда уравнение (1) примет вид [3]:

$$I_{кз}^{(3)} = \frac{U_{\phi}}{\sqrt{(R_T + R_{л.ф})^2 + (X_T + X_{л.ф})^2}} = \frac{U_{л}}{\sqrt{3} \times \sqrt{(R_T + R_{л.ф})^2 + (X_T + X_{л.ф})^2}},$$

- где U_{ϕ} – фазное напряжение источника, В;
 $U_{л}$ – линейное напряжение источника, В;
 R_T – активное сопротивление трансформатора, Ом;
 X_T – реактивное сопротивление трансформатора, Ом;
 $R_{л.ф}$ – активное сопротивление линии электропередачи, Ом;
 X – реактивное сопротивление линии электропередачи, Ом.

4.2 Расчет тока двухфазного короткого замыкания

При двухфазном коротком замыкании происходит соединение двух фаз электрической сети через малое переходное сопротивление (рис. 3). Ток при этом будет протекать по одной обмотке трансформатора и одному фазному проводу линии электропередачи, затем через переходное сопротивление в месте короткого замыкания, далее – по другому фазному проводу и по другой обмотке трансформатора (обозначено пунктиром).

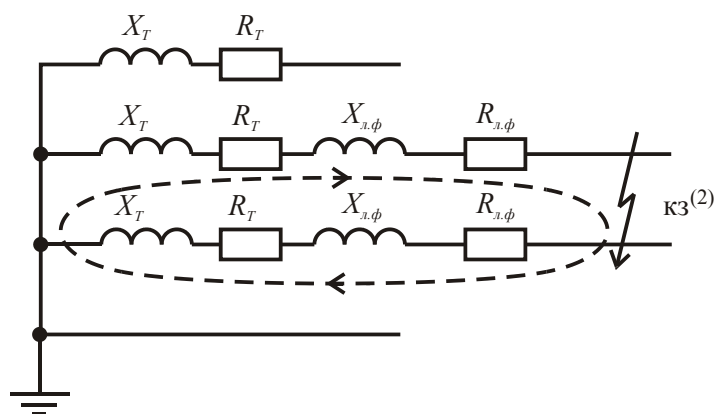


Рис. 3 — Двухфазное короткое замыкание

Следовательно, один и тот же ток протекает по активному и реактивному сопротивлениям двух фаз трансформатора, по активному и реактивному сопротивлениям двух линейных проводов под действием линейного напряжения.

Тогда уравнение (1) примет вид [3]:

$$I_{кз}^{(2)} = \frac{U_{л}}{2 \cdot \sqrt{(R_T + R_{л.ф})^2 + (X_T + X_{л.ф})^2}} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{\phi}}{2 \cdot \sqrt{(R_T + R_{л.ф})^2 + (X_T + X_{л.ф})^2}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{кз}^{(3)}.$$

4.3. Расчет тока однофазного короткого замыкания в сетях с глухозаземленной нейтралью

При однофазном коротком замыкании происходит соединение фазного и нулевого проводов электрической сети через малое переходное сопротивление (рис. 4). Ток при этом протекает по активному и реактивному сопротивлениям одной фазы трансформатора, активному и реактивному сопротивлениям и фазного, и нулевого проводов линии электропередачи. Из теории симметричных составляющих известно, что при однофазном коротком замыкании возникают токи нулевой последовательности, создающие магнитные потоки нулевой последовательности в сердечнике трансформатора, которые замыкаются через бак трансформатора.

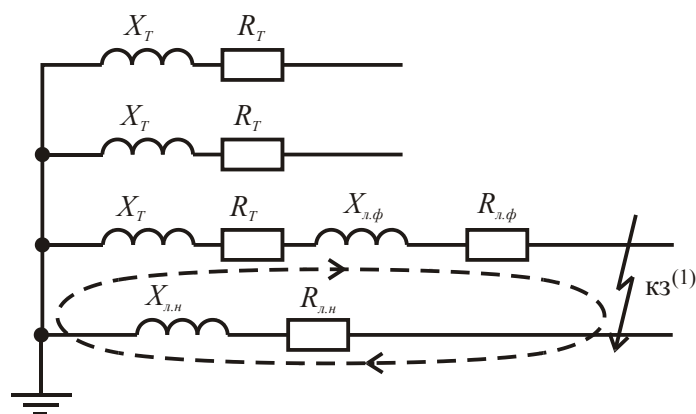


Рис. 4 — Однофазное короткое замыкание на нулевой провод

Сопротивление трансформатора для тока однофазного короткого замыкания будет выше, чем для тока трех- и двухфазных замыканий. Тогда уравнение (1) примет вид [3]:

$$I_{кз}^{(1)} = \frac{U_{\phi}}{\frac{Z_T^{(1)}}{3} \cdot \sqrt{(R_{л.ф} + R_{л.н})^2 + (X_{л.ф} + X_{л.н})^2}} = \frac{U_{л}}{\sqrt{3} \cdot \left(\frac{Z_T^{(1)}}{3} + Z_{нет} \right)},$$

где U_{ϕ} — фазное напряжение источника, В;

$Z_T^{(1)}$ — сопротивление трансформатора току однофазного короткого замыкания, Ом;

$Z_{нет}$ — сопротивление петли фаза нуль, Ом.

4.4. Задания для практического занятия №4

Задание 12: рассчитать токи короткого замыкания трехфазные, двухфазные, однофазные во всех указанных точках на рисунке 5.

Т: ТМ-160-10; L1: СИП2А 3×70+70 длиной 200 м; L2: СИП2А 3×50+54,6 длиной 200 м; L3: СИП2А 3×35+54,6 длиной 300 м.

Порядок выполнения задания:

1. Составить схему замещения участка сети с обозначением всех сопротивлений.
2. Рассчитать сопротивление элементов участка сети, по которым протекает ток короткого замыкания.
3. Рассчитать ток короткого замыкания.

Задание 13: построить векторные диаграммы напряжения и тока трехфазного короткого замыкания для всех точек (рис. 5).

Порядок выполнения задания:

1. Рассчитать ток короткого замыкания.
2. Рассчитать угол φ из треугольника сопротивлений.
3. Построить векторную диаграмму.

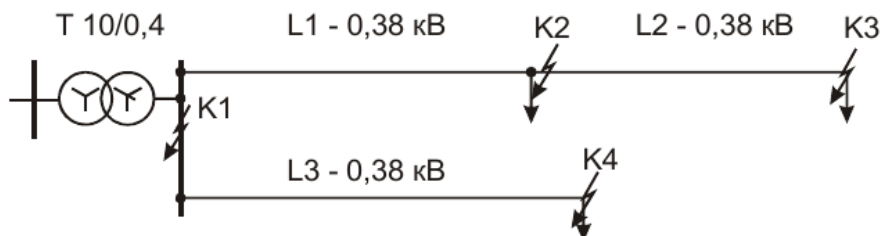


Рис. 5 – Расчетная схема линии

4.4. Расчет токов короткого замыкания в цепях с трансформаторными связями

Часто на практике при расчете тока короткого замыкания необходимо учесть трансформаторные связи на рассчитываемом участке (рис. 6). При этом сопротивление приводят через квадрат коэффициента трансформации.

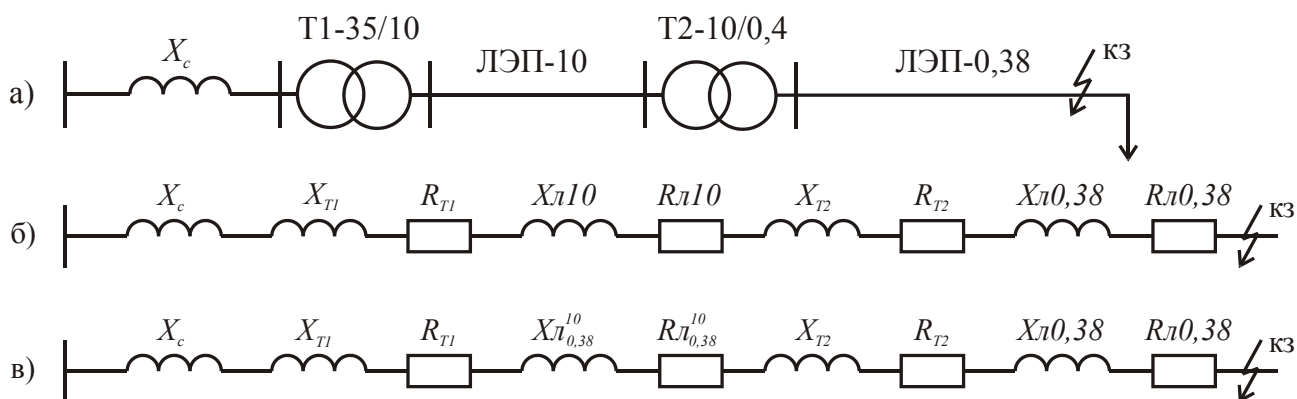


Рис. 6 — Схема участка сети

а) однолинейная, б) замещения, в) приведенная к одному напряжению

Сопротивление линии 0,38 кВ, приведенное к напряжению 10 кВ, можно определить следующим образом[1]:

$$R_{L0,38}^{10} = \frac{R_{L10}}{k_T^2}; \quad k_T = \frac{U_{вн}}{U_{нн}},$$

где R_{L10} – сопротивление линии 10 кВ, приведенное к напряжению 0,38 кВ, Ом;

k_T – коэффициент трансформации;

$U_{вн}$ – номинальное напряжение обмотки высшего напряжения, В;

$U_{нн}$ – номинальное напряжение обмотки низшего напряжения, В.

4.5. Задания для практического занятия №4

Задание 14: рассчитать токи трехфазного и двухфазного короткого замыкания в точке К4. Расчеты вести на напряжении 0,38 кВ, за расчетную точку принять К1.

T1: 160/35; L1: АС-50 длиной 5 км; T2: 160/10; L2: СИП2А 3×50+54,6 длиной 500 м, (рис. 7).

Задание 15: рассчитать токи трехфазного и двухфазного короткого замыкания для точек К1, К2, К3, (рис. 7).

Задание 16: построить векторную диаграмму токов и напряжений при трехфазном коротком замыкании в точках К1, К4, (рис.7).

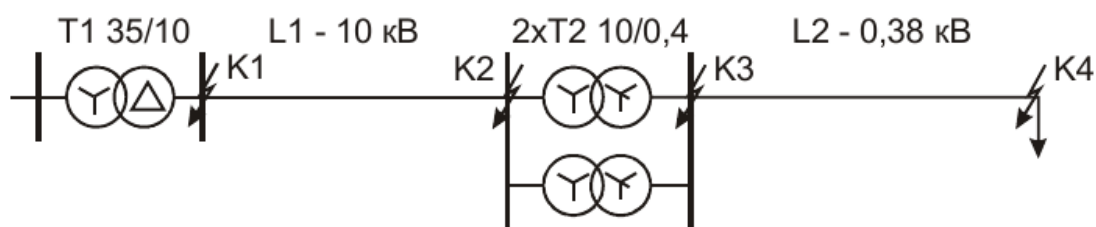


Рис. 7 — Расчетная схема линии

Практическое занятие №5
«Переходный процесс при трёхфазном коротком замыкании.
Расчет ударного тока короткого замыкания»

Цель работы: ознакомиться с методикой расчета ударного тока короткого замыкания, научиться рассчитывать ударный коэффициент.

Рассмотрим изменение тока при коротком замыкании (рис. 8). В начальный момент времени в линии электропередачи ток отсутствует ($I=0$). Затем происходит короткое замыкание, при этом ток в линии многократно увеличивается ($I_1 \gg I$). Из курса ТОЭ известно, что ток на индуктивном сопротивлении мгновенно измениться не может, так как ему противодействует магнитное поле, создавая ЭДС самоиндукции. ЭДС самоиндукции направлена в противоположную сторону относительно тока, протекающего в индуктивности. Следовательно, ток, вызванный ЭДС самоиндукции, направлен противоположно току, протекающему в индуктивности. Ток, вызванный напряжением сети, называют *принужденной составляющей* i_p ; ток, вызванный ЭДС самоиндукции, называют *свободной составляющей* $i_{св}$ тока короткого замыкания (рис. 8). Результирующий ток в линии будет равен сумме принужденной и свободной составляющих.

Поскольку принужденная составляющая изменяется по периодическому закону, а свободная по – экспоненциальному, в начальный момент короткого замыкания действующее значение тока уменьшается, но спустя половину периода увеличивается. Это значение тока короткого замыкания называют *ударным током* i_u .

Ударный ток — это максимальное амплитудное значение тока короткого замыкания, наступающее через половину периода после его начала.

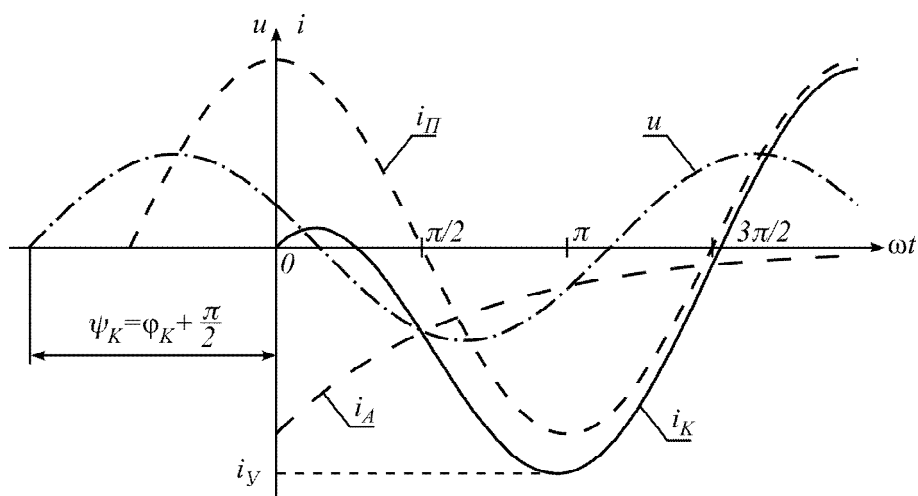


Рис. 8 — Переходный процесс при коротком замыкании

Ударный ток рассчитывается [1]:

$$i_{y0} = \sqrt{2} \cdot I_{кз} \cdot K_y,$$

где $I_{кз}$ – ток короткого замыкания, А;
 K_y – ударный коэффициент.

$$K_y = 1 + e^{-\pi \cdot \frac{R_k}{X_k}},$$

где R_k – активное сопротивление до точки короткого замыкания, Ом;
 X_k – реактивное сопротивление до точки короткого замыкания, Ом.

5.1. Задания для практического занятия №5

Задание 18: определить ударное значение тока короткого замыкания, исходные данные взять из задания 16.

Задание 19: построить график переходного процесса для тока трехфазного короткого замыкания в точке КЗ, исходные данные взять из задания 16.

Практическое занятие №6
«Уравнения электромагнитных переходных процессов в синхронной машине.

Расчет токов короткого замыкания в относительных единицах»

Цель занятия: научиться рассчитывать токи короткого замыкания в относительных единицах.

Относительные единицы — это безразмерные величины, приведенные к одному определенному значению мощности, напряжения и тока. Расчеты в относительных единицах позволяют определять значение тока на участке сети, содержащей несколько трансформаторных связей и генераторы [1].

Напряжение, ток, мощность и сопротивление в относительных (безразмерных) величинах определяются следующим образом:

$$U_{*H} = \frac{U}{U_H} = \frac{350}{380}; \quad I_{*H} = \frac{I}{I_H}; \quad S_{*H} = \frac{S}{S_H}; \quad Z_{*H} = \frac{Z}{Z_H}.$$

Расчет сопротивления некоторых элементов электрических сетей в относительных базисных величинах [1]

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:

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

Линия электропередачи

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

Порядок расчета тока короткого замыкания в относительных единицах следующий:

1. Задается произвольная базисная мощность, отличная от нуля.
2. Вычисляется сопротивление элементов сети (Ом).
3. Сопротивления элементов сети приводятся к базисному напряжению той ступени, на которой рассчитывается ток короткого замыкания (приведение осуществляется через квадрат коэффициента трансформации).
4. Сопротивления элементов сети приводятся к базисному сопротивлению.
5. Рассчитываются суммарные относительные базисные сопротивления до точек КЗ.
6. Сопротивления элементов приводятся к мощности генератора (рассчитываются относительные расчётные сопротивления)

Примечание: если относительное расчётное сопротивление меньше трёх, то необходимо использовать *алгоритм 1*, если больше трёх – *алгоритм 2*.

Алгоритм 1 «Использование расчетных кривых генератора»

1. Вычисляется номинальный ток генератора.
2. Определяется относительная периодическая составляющая тока короткого замыкания по расчётному сопротивлению (до точки КЗ), при этом используются расчётные кривые.
3. Вычисляется значение тока трёхфазного КЗ.

Алгоритм 2 «Вычисление через относительную ЭДС генератора»

1. Принимается значение относительной базисной ЭДС генератора. Поскольку ЭДС генератора принимается равной номинальному напряжению генератора, то относительная базисная ЭДС генератора принимается равной единице.
2. Вычисляется базисный ток на той ступени, что и ток короткого замыкания.
3. Вычисляется относительный базисный ток короткого замыкания.
4. Вычисляется значение тока трёхфазного короткого замыкания в амперах.

6.1. Задания для практического занятия №6

Задание 20: рассчитать токи короткого замыкания трехфазные, двухфазные, однофазные во всех указанных точках рисунок 9, расчеты вести в относительных единицах.

Т: ТМ-160-10; L1: СИП2А 3×70+70 длиной 200 м; L2: СИП2А 3×50+54,6 длиной 200 м; L3: СИП2А 3×35+54,6 длиной 300 м.

Задание 21: рассчитать токи трехфазного и двухфазного короткого замыкания в точке К4, расчеты вести на напряжении 0,38 кВ за расчетную точку принять К1.

Т1: 160/35; L1: АС-50 длиной 5 км; Т2: 160/10. L2: СИП2А 3×50+54,6 длиной 500 м, (рис. 9); расчеты вести в относительных единицах.

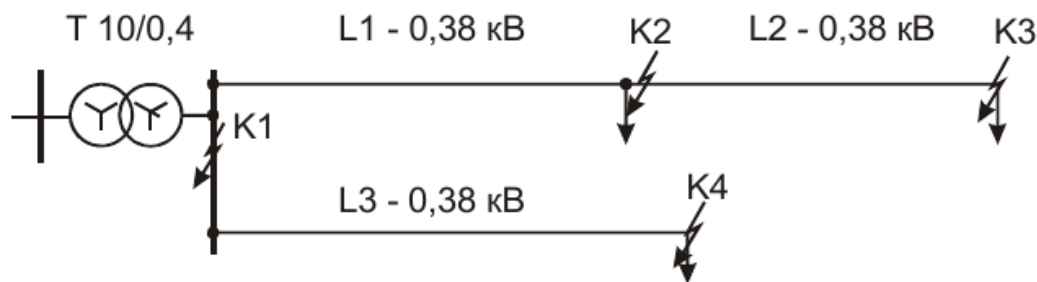


Рис.9 – Расчетная схема линии

Практическое занятие №7
« Короткие замыкания в электроустановках до 1 кВ.
Расчет электродинамических сил при коротком замыкании.
Проверка проводников по условиям механической стойкости»

Цель занятия: получить общие сведения о электродинамических силах при коротком замыкании, научиться проверять провода ВЛ и шины подстанции по условиям механической прочности.

При протекании тока вокруг проводника возникает электромагнитное поле, образованное взаимодействием магнитного и электрического полей. Направление магнитных линий можно определить по правилу правой руки (правило правоходового винта). Если поднести к проводнику с током магнит, то они будут взаимно притягиваться или отталкиваться, и направление силы, действующей на провод, можно будет определить по правилу левой руки.

В трехфазной электрической сети на определенном расстоянии друга от друга расположены три проводника с током, вокруг которых существует электромагнитное поле, вынуждающее их или отталкиваться, или притягиваться (рис. 10).

Рассчитывать динамические нагрузки достаточно только для ударного тока трехфазного короткого замыкания: только в этом случае они максимальны. Средняя фаза при этом находится в наиболее тяжелых условиях [1, 4].

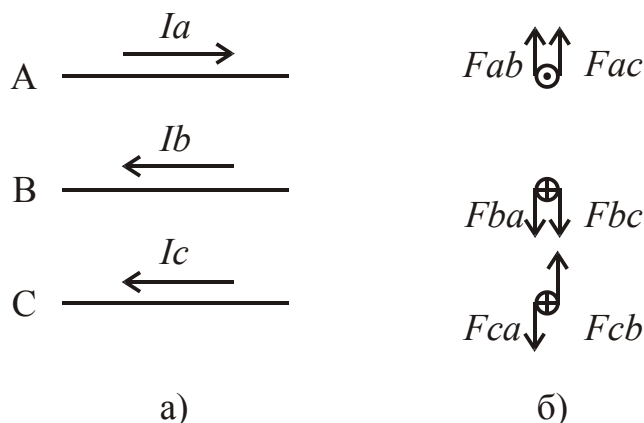


Рис. 10 — Электродинамическое воздействие токов КЗ

а) — направление тока в проводах, б) — электродинамические силы проводников

7.1. Проверка проводов ВЛ и шин подстанции по условиям электродинамической прочности

Силу, действующую при коротком замыкании на провод F определяют по формуле [4]:

$$F = 1,76 \cdot 10^{-8} \cdot k\phi \cdot (i_{y\phi}^3)^2 \cdot \frac{Lp}{a} \text{ – при трехфазном КЗ,}$$

$$F = 2,04 \cdot 10^{-8} \cdot k\phi \cdot (i_{y\phi}^2)^2 \cdot \frac{Lp}{a} \text{ – при двухфазном КЗ,}$$

$$F = 2,04 \cdot 10^{-8} \cdot k\phi \cdot i_1 \cdot i_2 \cdot \frac{Lp}{a} \text{ – для проводов одной фазы,}$$

где $i_{y\phi}$ – ударное значение тока короткого замыкания, А;

Lp – расстояние между точками крепления (опорами, опорными изоляторами), м;

a – расстояние между проводами, м;

$k\phi$ – коэффициент формы (приложение А);

i_1 – ток, протекающий по первой шине одной фазы, А;

i_2 – ток, протекающий по другой шине одной фазы, А.

Коэффициент формы учитывает геометрию проводников, и расстояние между ними определяется по кривым (приложение А). Для проводников круглого и квадратного сечений коэффициент формы равен единице [4].

Для определения возможности возникновения схлестывания проводов воздушных линий при аварийных режимах нужно определить силу Ap , необходимую для схлестывания проводов [1]:

$$Ap = m \cdot Lp \cdot g ,$$

где m – масса провода, кг/м;

Lp – расстояние между опорами, м;

g – ускорение свободного падения, $g = 9,81$ (м/с²).

Если сила, достаточная для схлестывания, больше силы, действующей на провода при коротком замыкании, то схлестывание не произойдет.

Для проверки шин подстанции на устойчивость динамическим силам при коротком замыкании необходимо рассчитать максимальный изгибающий момент M , кГ·см:

$$M = \frac{F \cdot Lp}{8} \text{ – для одного или двух пролетов,}$$

$$M = \frac{F \cdot Lp}{10} \text{ – для трех и более пролетов.}$$

Момент сопротивления шины W :

$$W = \frac{b^2 \cdot h}{6} \text{ – при вертикальном расположении шин,}$$

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6} \text{ – при горизонтальном расположении шин,}$$

$$W = \frac{\pi \cdot Dc^2}{32} \text{ – для шин сплошного круглого сечения,}$$

$$W = \frac{\pi \cdot D^4 - d^4}{32 \cdot D} \text{ – для шин трубчатого сечения,}$$

где b – толщина шины, см;

h – ширина шины, см;

Dc – диаметр сплошной шины, см;

D – внешний диаметр трубчатой шины, см;

d – внутренний диаметр трубчатой шины, см.

Напряжение в материале шины при изгибе σp , кГ/см²:

$$\sigma p = \frac{M}{W}.$$

Для проверки шин по условию динамической стойкости необходимо сравнить расчетное напряжение σp в материале шины с допустимым $\sigma_{дон}$ (приложение А), если: $\sigma p \leq \sigma_{дон}$, шины не разрушатся [1].

7.2. Задания для практического занятия №7

Задание 22: оценить возможность схлестывания проводов в пролете на воздушной линии 0,38 кВ при коротком замыкании, произошедшем на удалении 330 м от ТП. Линия 0,38 кВ выполнена проводом марки А95, расстояние между проводами 400 мм. В ТП установлены два трансформатора ТМ-630/10, включенные на параллельную работу.

Порядок выполнения задания:

1. Рассчитать сопротивления ВЛЭП.
2. Рассчитать сопротивления трансформаторов.
3. Вычислить суммарное сопротивление трансформаторов, работающих параллельно.
4. Произвести расчёт суммарного сопротивления до точки КЗ.
5. Рассчитать ток трёхфазного короткого замыкания.
6. Рассчитать значение трёхфазного ударного тока в точке КЗ.
7. Определить наибольшую силу F , действующую на проводник при коротком замыкании.
8. Определить силу (Ap , Н), достаточную для схлестывания.

Задание 23: найти точку на линии 0,38 кВ с точностью до 1 м, в которой возможно схлестывание проводов при 2-х фазном КЗ. Линия 0,38 кВ выполнена

проводом марки А95, расстояние между проводами 400 мм. В ТП установлены два трансформатора ТМ-630/10, включенные на параллельную работу. Точку схлестывания проводов определить графическим способом через функцию от длины линии и при помощи встроенной в пакете Mathcad функции блока Given-Find.

Задание 24: проверить шины подстанции на электродинамическую устойчивость при 2-х фазном КЗ: а) короткое замыкание произошло на шинах подстанции; б) короткое замыкание произошло на ВЛЭП на расстоянии 200 м от подстанции.

В ТП установлены два трансформатора ТМ-630/10, включенные на параллельную работу. Расположение шин горизонтальное, ширина шины 40 мм, толщина – 10 мм, расстояние между точками крепления 1 м, материал шин – алюминий марки АО, характеристики материалов шин приведены в приложении А.

7.3. Расчет термического действия тока короткого замыкания

Цель занятия: получить общие сведения о термическом действии тока короткого замыкания, научиться проверять провода ВЛ по условиям термической устойчивости.

Ток, протекая по проводам, увеличивает их кинетическую энергию, а значит, увеличивается температура. Особенно сильно возрастает температура при протекании тока короткого замыкания. Следует отметить, что короткое замыкание отключается достаточно быстро, поэтому температура проводов не успевает достичь установившегося значения, а процесс нагрева при коротком замыкании считается адиабатическим, то есть без отдачи тепла в окружающую среду.

При коротком замыкании также возможен отжиг проводов, вызывающий ухудшение механических свойств. Он возникает при резком нагреве материала провода до определенной температуры с последующим плавным охлаждением [2].

Температура проводов, выше которой они не должны нагреваться, определена нормативными документами.

7.4. Проверка проводов ВЛ по условиям термической прочности

Проверка проводников на термическую стойкость при КЗ заключается или в определении их температуры нагрева к моменту отключения КЗ и сравнении этой температуры с предельно допустимой температурой нагрева соответствующих проводников при КЗ, или в определении термически эквивалентной плотности тока КЗ и сравнении этой плотности с допустимой плотностью тока КЗ.

Расчёт температуры нагрева проводников к моменту отключения КЗ производится с использованием интегральных кривых, приложение Б [5].

7.5. Задания для практического занятия №8

Задание 25: определить время, в течение которого температура проводов ВЛ достигнет 250 °С при начальной температуре 35 °С и трехфазном коротком замыкании, исходные данные задания 12.

Порядок выполнения задания:

1. Рассчитать ток трехфазного короткого замыкания.
2. По интегральным кривым определить начальную энергию, а также конечную энергию, выделившуюся при коротком замыкании, по

интегральным кривым (приложение Б).

3. Определить время, за которое температура достигнет 250°C , по формуле:

$$\frac{t \cdot I_k^2}{S^2} = A_{\kappa} - A_n.$$

Задание 26: определить конечную температуру проводов ВЛ, если начальная температура равна 70°C , длительность короткого замыкания – 5 с, исходные данные задания 12.

Практическое занятие №8

«Применение теории симметричных составляющих для расчета несимметричных режимов»

Цель занятия: получить общие сведения о расчетах аварийных несимметричных режимов, научиться рассчитывать ток однофазного короткого замыкания методом симметричных составляющих.

Используя метод симметричных составляющих можно ток и напряжение при любом несимметричном режиме работы электрической сети можно представить в виде суммы трех симметричных составляющих. На рисунке 11 изображены векторы симметричных составляющих прямой, обратной и нулевой последовательностей.

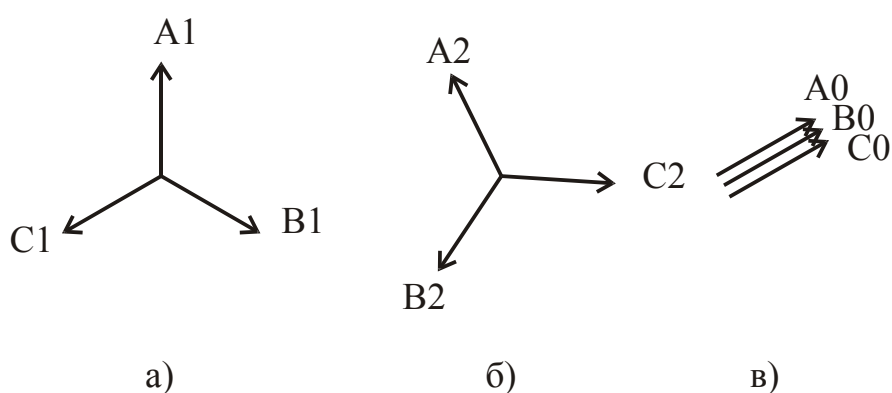


Рис. 11 — Симметричные составляющие
а) прямой; б) обратной; в) нулевой последовательности

Векторы всех фаз прямой последовательности равны между собой и сдвинуты на угол 120 электрических градусов, аналогично — для векторов обратной последовательности. Векторы нулевой последовательности равны между собой и совпадают электрических градусов. Тогда в общем случае токи или напряжения можно записать [1]:

$$A = A_1 + A_2 + A_0,$$

$$B = B_1 + B_2 + B_0,$$

$$C = C_1 + C_2 + C_0.$$

Перепишем эти уравнения относительно одной фазы, например фазы А:

$$A = A_1 + A_2 + A_0,$$

$$B = A_1 a^2 + A_2 a + A_0,$$

$$C = A_1 a + A_2 a^2 + A_0.$$

Выразив симметричные составляющие, получим:

$$A_1 = \frac{1}{3} (A + B a + C a^2),$$

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

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

В таблице 1 приведены уравнения для определения токов напряжений и ЭДС относительно прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Таблица 1— Вычисление симметричных составляющих токов и напряжений

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

Порядок расчета несимметричного режима для общего случая:

1. Составляется схема замещения, где в место несимметрии вводятся источники напряжения прямой, обратной и нулевой последовательностей.
2. Определяются граничные условия.
3. Определяются сопротивления элементов электрической сети, входящих в модель.
4. Рассчитываются токи и напряжения.

8.1. Сопротивления элементов сети токам прямой, обратной и нулевой последовательностей

Линия электропередачи

Сопротивления токам прямой и обратной последовательностей:

$$Z_1 = Z_2; \quad Z_1 = \sqrt{R^2 - X^2}.$$

Сопротивления токам нулевой последовательности определяется в зависимости от типа нейтрали электрической сети.

Трансформатор

Сопротивления токам прямой и обратной последовательностей:

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

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

Реактор

Сопротивления токам прямой, обратной и нулевой последовательностей:

$$Z_1 = Z_2 = Z_0.$$

8.2 Схемы замещения и граничные условия для однофазного короткого замыкания

На рисунке 12 изображена схема четырехпроводной сети для расчетов токов при однофазном коротком замыкании методом симметричных составляющих.

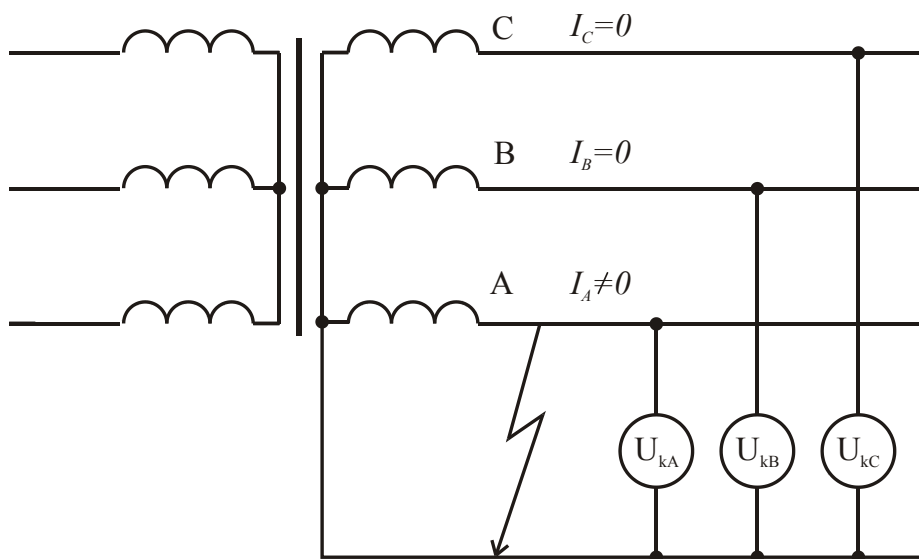


Рис. 12 — Схема четырехпроводной сети при однофазном коротком замыкании

Порядок расчета однофазного короткого замыкания методом симметричных составляющих:

1. Определяются граничные условия для данной схемы:

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

2. Граничные условия, подставляются в систему уравнений (5) (см.

табл. 1):

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

3. Выражается из системы уравнений (1) искомый ток:

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

4. Находится уравнения для расчетов:

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

5. Рассчитывается значение тока однофазного короткого замыкания.

8.3 Коэффициенты несимметрии

Загрузка фаз в трехфазной электрической сети часто бывает неравномерная и неоднородная, это приводит к несимметричности токов или напряжений, выражаемой коэффициентами несимметрии:

$$K2 = \frac{A2}{A1} \cdot 100. \text{ – по обратной последовательности [6]}$$

$$K0 = \frac{A0}{A1} \cdot 100. \text{ – по нулевой последовательности [6].}$$

8.4. Задания для практического занятия №9

Задание 27: рассчитайте коэффициенты несимметрии тока по обратной и нулевой последовательностям, если:

- нагрузка, подключенная к фазе А, равна 10 кВА, коэффициент мощности – 0,6;

- нагрузка, подключенная к фазе В, равна 13 кВА, коэффициент мощности – 0,8;

- нагрузка, подключенная к фазе С, равна 18 кВА, коэффициент мощности – 0,75.

Задание 28: рассчитайте коэффициенты несимметрии тока по обратной и нулевой последовательности если:

- нагрузка подключенная к фазе А, равна 15 кВА, коэффициент мощности – 0,85;

- нагрузка подключенная к фазе В, равна 11 кВА, коэффициент мощности – 0,95;

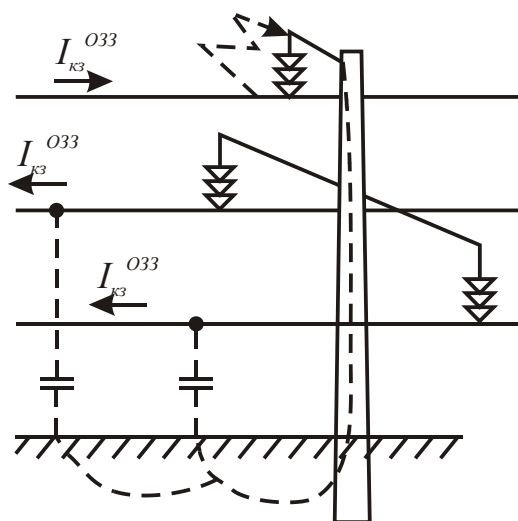
- нагрузка подключенная к фазе С, равна 23 кВА, коэффициент мощности – 0,71.

Практическое занятие №9 «Расчет токов однофазного замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью»

Цель занятия: научиться рассчитывать ток однофазного короткого замыкания в сетях с изолированной нейтралью.

Однофазные короткие замыкания на землю в сетях 10..35 кВ являются наиболее распространенными: 70-90% от всех коротких замыканий. Переход однофазных КЗ на землю в двойные замыкания на землю представляет дополнительную опасность.

В нормальном режиме работы между проводами и землей, которые выступают в качестве обкладок конденсатора, протекают емкостные токи. При соединении провода линии и земли через малое сопротивление возникает короткое замыкание на землю, в воздушных линиях электропередачи оно происходит при нарушении целостности изолятора (рис. 13). При этом ток короткого замыкания ограничивается переходным сопротивлением, сопротивлением проводов, емкостным сопротивлением неповрежденных фаз [1].



*Рис. 13 – Путь тока при однофазном замыкании
в сетях с изолированной нейтралью*

Ток однофазного замыкания на землю для воздушных линий электропередачи с изолированной нейтралью рассчитывается следующим образом:

$$I_{кз}^{O33} = \frac{U_n \cdot L}{350},$$

где U_n – номинальное напряжение источника, кВ;

L – длина до точки короткого замыкания, км.

Ток однофазного замыкания на землю для кабельных линий электропередачи с изолированной нейтралью рассчитывается следующим образом:

$$I_{кз}^{OЗЗ} = \frac{U_n \cdot L}{10}.$$

9.1. Задания для практического занятия №10

Задание 29: определить ток однофазного короткого замыкания на землю воздушной линии 10 кВ при удаленности от подстанции 70 м; 1000 м; 5000 м.

Задание 30: определить ток однофазного короткого замыкания на землю кабельной линии 35 кВ при удаленности от подстанции 70 м; 1000 м; 5000 м.

Темы для самостоятельного изучения

1. Изменение тока в индуктивной нагрузке.
2. Расчёт сопротивлений, генераторов, реакторов.
3. Методы преобразования и упрощения схем замещения.
4. Переходный процесс с учётом тока нагрузки.
5. Короткое замыкание на удалённом участке линии.
6. Вычисление относительных базисных сопротивлений трансформаторов, генераторов, линий электропередачи.
7. Расчёты токов КЗ в цепях с трёхобмоточными трансформаторами.
8. Влияние автоматического регулирования возбуждения на процесс КЗ.
9. Вывод максимальной силы, действующей на проводник.
10. Вывод уравнения изменения температуры проводника из уравнения теплового баланса.
11. Способы увеличения величины тока однофазного КЗ.
12. Влияние повторных заземлителей на процесс однофазного короткого замыкания.
13. Изменение напряжения вдоль линии при однофазном КЗ.
14. Изменение тока в трансформаторе при однофазном КЗ.
15. Влияние обрыва фазы на работу двигательной и недвигательной нагрузки. Двухфазное КЗ по теории симметричных составляющих.
16. Отыскание замыканий на землю.
17. Замыкания на землю через переходное сопротивление.
18. Двойные замыкания на землю.

Список использованных источников.

1. Олин, Д.М. Переходные процессы в электрических сетях [Текст]: учебное пособие / Д.М. Олин, Н.М. Попов. — Каравеево : Костромская ГСХА, 2013. — 128 с.
2. Голубев М.Л. Расчет токов короткого замыкания в электроустановках 0,4—35 кВ. [Текст] : 2-е изд. перераб. и доп. / М.Л. Голубев М.: Энергия, 1980.—88 с. ил. — (Б-ка электромонтера. Вып. 505).
3. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ [Текст]: ГОСТ 28249–93. – Взамен: ГОСТ 28249–89; введ. 21.10.1993 г.
4. Баптиданов Л.Н. Электрооборудование электрических станций и подстанций, том 1. [Текст] / Л.Н. Баптиданов, В.И. Тарасов. — Ленинград : Печатный двор, 1959 г. — 408.
5. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия тока короткого замыкания [Текст]: ГОСТ 30323–95. ; введ. 1994–01–01.
6. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения [Текст]: ГОСТ 13109–97. ; введ. 2014-07-01.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Таблица А1 — основные характеристики материалов шин.

Материал шины	Марка	Временное сопротивление разрыву, МПа		Допустимое напряжение, МПа		Модуль упругости, 10^{10} Па
		материала	в области сварного соединения	материала	в области сварного соединения	
Алюминий	АО, А	118	118	82	82	7
	АДО	59-69	59-69	41-48	41-48	7
Алюминиевый сплав	АД31Т	127	120	89	84	7
	АД31Т1	196	120	137	84	7
	АВТ1	304	152	213	106	7
	1915Т	353	318	247	223	7
Медь	МГМ	245-255	-	171,5-178	-	10
	МП	245-294	-	171,5-206	-	10

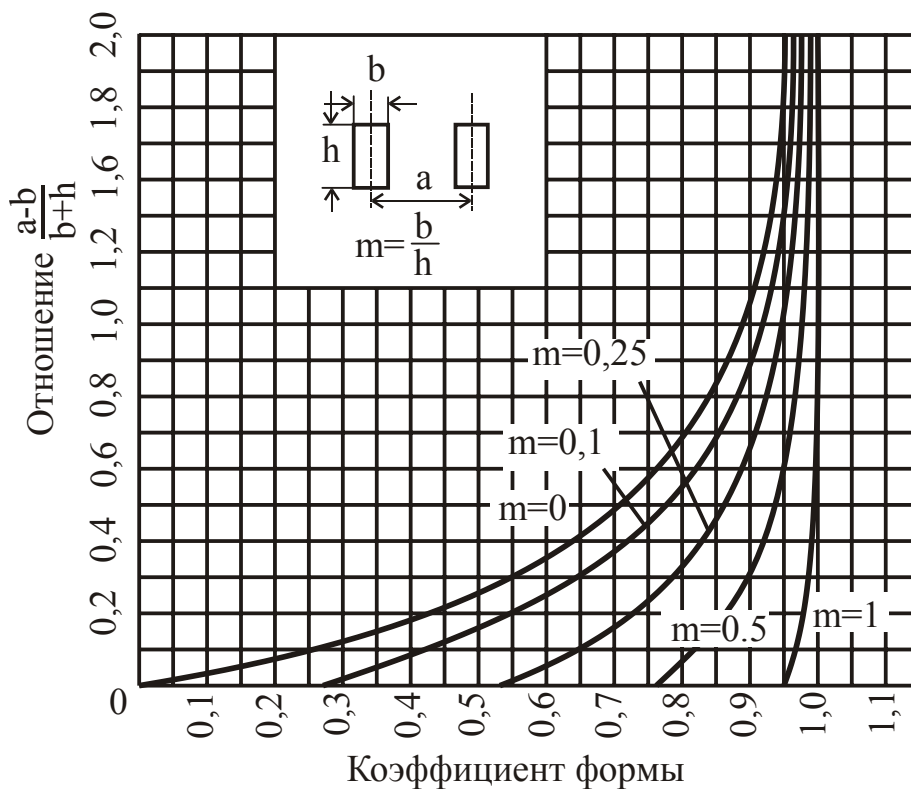


Рис. А1 — Кривые для определения коэффициента формы шин прямоугольного сечения.

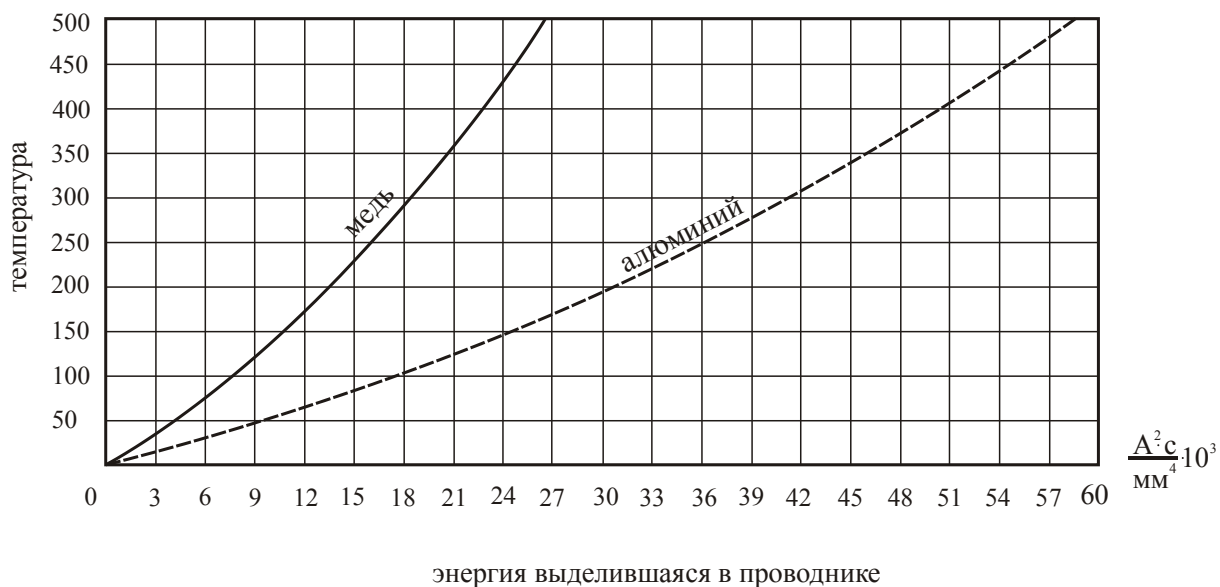


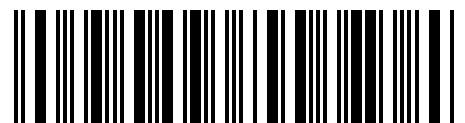
Рис. Б1 — Кривые термического баланса

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Костромская государственная сельскохозяйственная академия" 156530, Костромская обл., Костромской район, пос. Караваяево, уч. городок, д. 34, КГСХА

Компьютерный набор. Подписано в печать 29/09/2015.
 Заказ №869. Формат 84x60/16. Тираж 50 экз. Усл.
 печ. л. 2,64. Бумага офсетная. Отпечатано 23/10/2015.
 Цена 30,00 руб.

Отпечатано с готовых оригинал-макетов в академической типографии на цифровом дубликаторе. Качество соответствует предоставленным оригиналам.
 вид издания: авторская редакция (редакция от 14.08.2015 № 877 тит)

Цена 30,00 руб.



2015*869