

**ФГБОУ ВО «Брянский государственный аграрный университет»**

**Кафедра «Электроэнергетики и автоматики»**

# **ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ**

**Методические указания к выполнению курсовой работы  
студентов направления  
13.03.02 Электрификация и автоматизация сельского хозяйства**

**Брянская область, 2019**

УДК 621.318.3 (076)

ББК 31.2

К 44

Кисель, Ю. Е. Электромагнитные переходные процессы: методические указания к выполнению курсовой работы студентов направления 13.03.02 Электрификация и автоматизация сельского хозяйства / Ю.Е. Кисель – Брянск: Изд-во Брянского ГАУ, 2019. – 32 с.

Методические указания являются руководством к выполнению курсовой работы студентов по курсу “ Электромагнитные переходные процессы” для бакалавров дневного и заочного обучения. В процессе выполнения курсовой работы студенты изучают методы расчета переходных процессов сельских электрических сетях. В методические указания содержат необходимые данные для самостоятельной работы студентов.

**Рецензенты:** д.т.н., профессор Гурьянов Г.В.

*Рекомендовано методической комиссией института энергетики и природопользования Брянского государственного аграрного университета, протокол №7 от 04.03.2019 года.*

© ФГОУ ПО «Брянский ГАУ», 2019

© Ю.Е. Кисель, 2019

## Содержание

Введение .....	4
1 Основные теоретические положения .....	5
2 Порядок расчета токов короткого замыкания .....	8
2 Определение сопротивлений схем замещения.....	10
2.1 Определение сопротивления схемы замещения для силовых трансформаторов .....	10
2.2 Определение сопротивлений схем замещения для коммутационных и защитных аппаратов.....	10
2.3 Определение сопротивлений схем замещения воздушных и кабельных линий и шинопроводов .....	11
2.4 Приведение сопротивлений схемы замещения к базисному напряжению	12
3 Пример выполнения курсовой работы.....	13
Приложение А. Оформление курсовой работы .....	24
Приложение Б Справочные данные для определения сопротивлений схемы замещения .....	27

## Введение

Главная задача, при определении значений токов короткого замыкания (КЗ), состоит в рациональном выборе, устройств грозозащиты и заземления подстанций, эффективности расчета и проверки защит. Расчет токов короткого замыкания преследует цель доведения до минимума отрицательных последствий от возникающих при этом токов. Суть всех методов расчета токов КЗ сводится к приведению любой схемы электрической сети к ее простейшему виду, для которой находятся значения эквивалентных ЭДС и сопротивлений в базисных условиях.

Курсовая работа является одним из важных этапов изучения студентом дисциплины "ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ". Целью работы является закрепление и углубление знаний по эксплуатации электрооборудования сельскохозяйственных предприятий.

Курсовая работа должна состоять из расчётно-пояснительной записки с приложением необходимых таблиц (прил. А), рисунков, схем, графического материала. Написание и оформление работы необходимо производить в соответствии с требованиями ГОСТ (например, ГОСТ 2.105-95 или др.). Курсовая работа выполняется в соответствии с заданием, в объёме и по вариантам, указанным преподавателем.

Оформление пояснительной записки (20-30 листов А4) к курсовой работе приведено в приложении А. Пояснительная записка должна содержать расчет сопротивлений схемы замещения, токов КЗ в точках и «Сводную ведомость токов КЗ».

Графическая часть должна содержать 2 листа формата А3: Лист 1 – Расчетная схема электроснабжения; Лист 2 – Схема замещения СЭС.

## 1 Основные теоретические положения

Расчет токов короткого замыкания необходим для выбора и проверки электрооборудования по условиям короткого замыкания для выбора установок и оценки возможного действия релейной защиты и автоматики; для определения влияния токов нулевой последовательности линий электропередачи на линии связи; для выбора заземляющих устройств.

При расчетах токов КЗ допускается не учитывать:

- 1) сдвиг по фазе ЭДС и изменение частоты вращения роторов синхронных генераторов, компенсаторов и электродвигателей, если продолжительность КЗ не превышает 0,5 с;
- 2) ток намагничивания трансформаторов и автотрансформаторов;
- 3) насыщение магнитных систем электрических машин;
- 4) поперечную емкость воздушных линий электропередачи напряжением 110–220 кВ, если их длина не превышает 200 км, и напряжением 330–500 кВ, если их длина не превышает 150 км.

Короткие замыкания есть случайные события. Совокупность параметров режима короткого замыкания образует множество вероятностных параметров. Расчетные условия КЗ, т.е. наиболее тяжелые, но достаточно вероятные условия КЗ, формируются на основе опыта эксплуатации электроустановок, анализа отказов электрооборудования и последствий КЗ, использования соотношений параметров режима КЗ, вытекающих из теории переходных процессов в электроустановках. Расчетные условия КЗ определяются индивидуально для каждого элемента электроустановки. Для однотипных по параметрам и схеме включения элементов электроустановки допускается использовать аналогичные расчетные условия.

### ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Замыкание - всякое случайное или преднамеренное, не предусмотренное нормальным режимом работы электрическое соединение различных точек электроустановок между собой или с землей.

Короткое замыкание — замыкание, при котором токи в ветвях электроустановки, примыкающих к месту его возникновения, резко возрастают, превышая наибольший допустимый ток продолжительного режима.

Короткое замыкание на землю — короткое замыкание в электроустановке, обусловленное соединением с землей какого-либо ее элемента.

Однофазное короткое замыкание — короткое замыкание на землю в трехфазной электроэнергетической системе с глухо- или эффективно заземленными нейтральными силовых элементов, при котором с землей соединяется только одна фаза.

Двухфазное короткое замыкание — короткое замыкание между двумя фазами в трехфазной электроэнергетической системе.

Двухфазное короткое замыкание на землю — короткое замыкание на землю в трехфазной электроэнергетической системе с глухо- или эффективно заземленными нейтральными силовых элементов, при котором с землей соединяются две фазы.

Двойное короткое замыкание на землю — совокупность двух однофазных коротких замыканий на землю в различных, но электрически связанных частях электроустановки.

Трехфазное короткое замыкание - короткое замыкание между тремя фазами в трехфазной электроэнергетической системе.

Трехфазное короткое замыкание на землю — короткое замыкание на землю в трехфазной электроэнергетической системе с глухо- или эффективно заземленными нейтральными силовых элементов, при котором с землей соединяются три фазы.

Режим короткого замыкания — режим работы электроустановки при наличии в ней короткого замыкания.

Предшествующий режим — режим работы электроустановки непосредственно перед моментом возникновения короткого замыкания.

Установившийся режим короткого замыкания — режим короткого за-

мыкания электроустановки, наступающий после затухания во всех цепях свободных токов и прекращения изменения напряжения возбудителей синхронных машин под действием автоматических регуляторов возбуждения.

Переходный процесс в электроустановке — процесс перехода от одного установившегося режима электроустановки к другому.

Мгновенное значение тока короткого замыкания — значение тока короткого замыкания в рассматриваемый момент времени.

Действующее значение тока короткого замыкания — среднее квадратическое значение тока короткого замыкания за период рабочей частоты, середина которого есть рассматриваемый момент времени.

Установившийся ток короткого замыкания — значение тока короткого замыкания после окончания переходного процесса, характеризуемого затуханием всех свободных составляющих этого тока и прекращением изменения тока от воздействия устройств автоматического регулирования возбуждения источников энергии.

Ударный ток короткого замыкания — наибольшее возможное мгновенное значение тока короткого замыкания.

Расчетная схема электроустановки — электрическая схема электроустановки, при которой имеют место расчетные условия короткого замыкания для рассматриваемого ее элемента.

Расчетная точка короткого замыкания — точка электроустановки, при коротком замыкании в которой для рассматриваемого элемента электроустановки имеют место расчетные условия короткого замыкания.

Сквозной ток короткого замыкания - ток, проходящий через включенный коммутационный электрический аппарат при внешнем коротком замыкании.

Содержание апериодической составляющей в отключаемом токе короткого замыкания — отношение апериодической составляющей отключаемого тока короткого замыкания в заданный момент времени к увеличенному

в раз действующему значению периодической составляющей отключаемого тока короткого замыкания в тот же момент времени.

Постоянная времени затухания апериодической составляющей тока короткого замыкания — электромагнитная постоянная времени, характеризующая скорость затухания апериодической составляющей тока короткого замыкания [1].

## 2 Порядок расчета токов короткого замыкания

Рассчитать токи короткого замыкания (КЗ) — это значит:

по расчетной схеме составить схему замещения, выбрать точки КЗ;

— рассчитать сопротивления;

— определить в каждой выбранной точке 3-фазные, 2-фазные и 1-фазные токи КЗ, заполнить «Сводную ведомость токов КЗ».

Схема замещения представляет собой вариант расчетной схемы, в которой все элементы заменены сопротивлениями, а магнитные связи — электрическими. Точки КЗ выбираются на ступенях распределения и на конечном электроприемнике. Точки КЗ нумеруются сверху вниз, начиная от источника. Для определения токов КЗ используются следующие соотношения:

1) 3-фазного, кА:

$$I_k^{(3)} = \frac{V_k}{\sqrt{3}Z_k}, \quad (1)$$

где  $V_k$  — линейное напряжение в точке КЗ, кВ;

$Z_k$  — полное сопротивление до точки КЗ, Ом;

2) 2-фазного, кА:

$$I_k^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_k^{(3)} = 0.87 I_k^{(3)}, \quad (2)$$

3) 1-фазного, кА:

$$I_k^{(3)} = \frac{V_{k\phi}}{Z_{II} + \frac{z_T^{(1)}}{3}}, \quad (3)$$

где  $V_{k\phi}$  — фазное напряжение в точке КЗ, кВ;

$Z_{II}$  — полное сопротивление петли «фаза-нуль» до точки КЗ, Ом;

$Z_T^{(1)}$  — полное сопротивление трансформатора однофазному КЗ, Ом;

4) ударного, кА:

$$i_y = \sqrt{2} K_y I_k^{(3)}, \quad (4)$$

где  $K_y$  — ударный коэффициент, определяется по графику (рис. 1),

$$K_y = F(R_k/X_k), \quad (5)$$

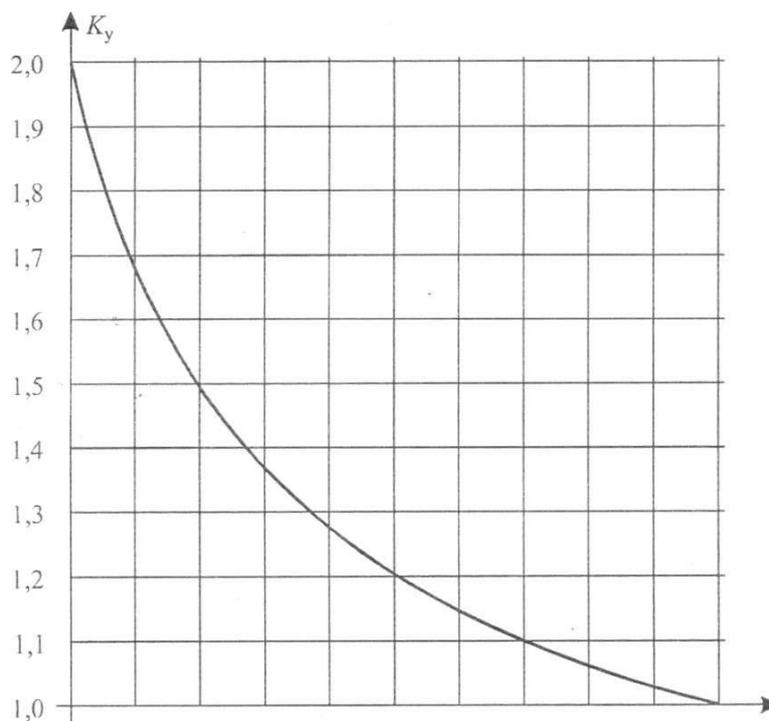


Рисунок 1 – Зависимость  $K_y=F(R_k/X_k)$

5) действующего значения ударного тока, кА:

$$I_y = q I_k^{(3)}, \quad (6)$$

где  $q$  — коэффициент действующего значения ударного тока,

$$q = \sqrt{1 + 2(K_y - 1)^2}. \quad (7)$$

## 2 Определение сопротивлений схем замещения

### 2.1 Определение сопротивления схемы замещения для силовых трансформаторов

Для силовых трансформаторов сопротивления схем замещения определяют по таблице Б.1 или расчетным путем из соотношений:

$$R_T = \Delta P_k \left( \frac{V_{HH}}{S_T} \right)^2 \times 10^6, \quad (8)$$

$$Z_T = u_k \frac{V_{HH}^2}{S_T} \times 10^4, \quad (9)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}, \quad (10)$$

где  $\Delta P_k$  — потери мощности КЗ, кВт;

$u_k$  — напряжение КЗ, %;

$V_{HH}$  — линейное напряжение обмотки НН, кВ;

$S_T$  — полная мощность трансформатора, кВ А.

Для токовых трансформаторов сопротивления схем замещения определяется по таблице Б.2.

### 2.2 Определение сопротивлений схемы замещения для коммутационных и защитных аппаратов

Для коммутационных и защитных аппаратов сопротивления схем замещения определяется по таблице Б.3. Сопротивления зависят от  $I_{н.а.}$  аппарата. Сопротивление предохранителей не учитывается, а у рубильников учитывается только переходное сопротивление контактов.

Для ступеней распределения сопротивления схем замещения определяется по таблице Б.4.

### 2.3 Определение сопротивлений схем замещения воздушных и кабельных линий и шинопроводов

Для линий электроснабжения (ЭСН) кабельных, воздушных и шинопроводов сопротивления схем замещения определяется из соотношений:

$$R_{Л} = r_0 L_{Л}, \quad (11)$$

$$X_{Л} = x_0 L_{Л}, \quad (12)$$

где  $r_0$  и  $x_0$  — удельные активное и индуктивное сопротивления, мОм/м;  
 $L_{Л}$  — протяженность линии, м.

Удельные сопротивления для расчета 3-фазных и 2-фазных токов КЗ определяются по таблицам Б.5-Б.8.

При отсутствии данных  $r_0$  можно определить расчетным путем:

$$r_0 = \frac{10^3}{\gamma S}, \quad (13)$$

где  $S$  — сечение проводника, мм<sup>2</sup>;

$\gamma$  — удельная проводимость материала, м/(Ом · мм).

Принимается:

$\gamma = 30$  м/(Ом · мм<sup>2</sup>) — для алюминия,

$\gamma = 50$  м/(Ом · мм<sup>2</sup>) — для меди,

$\gamma = 10$  м/(Ом · мм<sup>2</sup>) — для стали.

При отсутствии данных  $x_0$  можно принять:

$x_{овл} = 0,4$  мОм/м — для воздушных линий,

$x_{окл} = 0,06$  мОм/м — для кабельных линий,

$x_{опр} = 0,09$  мОм/м — для проводов,

$x_{om} = 0,15$  мОм/м — для шинопроводов.

При расчете 1-фазных токов КЗ значение удельных индуктивных сопротивлений петли «фаза-нуль» принимается равным:

$x_{on} = 0,15$  мОм/м — для КЛ до 1 кВ и проводов в трубах,

$x_{on} = 0,6$  мОм/м — для ВЛ до 1 кВ,

$x_{on} = 0,4$  мОм/м — для изолированных открыто проложенных проводов,

$x_{on} = 0,2$  мОм/м — для шинопроводов.

Удельное активное сопротивление петли «фаза-нуль» определяется для любых линий по формуле

$$r_{0n} = 2 r_0$$

Для неподвижных контактных соединений значения активных переходных сопротивлений определяют по таблице А.8. При расчетах можно использовать следующие значения  $K_y$ :

$K_y = 1,2$  — при КЗ на ШНН трансформаторов мощностью до 400 кВА;

$K_y = 1,3$  — при КЗ на ШНН трансформаторов мощностью более 400 кВА;

$K_y = 1$  — при более удаленных точках;

$K_y = 1,8$  — при КЗ в сетях ВН, где активное сопротивление не оказывает существенного влияния.

## 2.4 Приведение сопротивлений схемы замещения к базисному напряжению

Сопротивления элементов на ВН приводятся к НН по формулам:

$$R_{HH} = R_{BH} \left( \frac{V_{HH}}{V_{BH}} \right)^2, \quad (14)$$

$$X_{HH} = X_{BH} \left( \frac{V_{HH}}{V_{BH}} \right)^2, \quad (15)$$

где  $R_{HH}$  и  $X_{HH}$  — сопротивления, приведенные к низкому напряжению (НН), мОм;

$R_{ВН}$  и  $X_{ВН}$  — сопротивления на высоком напряжении (ВН), мОм;

$V_{НН}$  и  $V_{ВН}$  — напряжения низкое и высокое, кВ.

На величину тока КЗ могут оказать влияние АД мощностью более 100 кВт с напряжением до 1 кВ в сети, если они подключены вблизи места КЗ. Объясняется это тем, что при КЗ резко снижается напряжение, а АД, вращаясь по инерции, генерирует ток в месте КЗ. Этот ток быстро затухает, а поэтому учитывается в начальный момент при определении периодической составляющей и ударного тока.

### 3 Пример выполнения курсовой работы

**Дано:**

Расчетная схема (рис. 2-4)  $L_{ВЛ} = 3$  км

$L_{КЛ1} = 5$  м (длина линии ЭСН от ШНН до ШМА1)

$L_{Ш} = 2$  м (участок ШМА1 до ответвления)

$L_{КЛ2} = 20$  м (длина линии ЭСН от ШМА1 до потребителя)

**Требуется:**

- составить схему замещения, пронумеровать точки КЗ;
- рассчитать сопротивления и нанести их на схему замещения;
- определить токи КЗ в каждой точке и составить «Сводную ведомость токов КЗ».

**Решение:**

1. Составляется схемы замещения (рис. 2 – 4) и нумеруются точки КЗ в соответствии с расчетной схемой.

2. Вычисляются сопротивления элементов и наносятся на схему замещения.

Для системы

$$I_n = \frac{S_T}{\sqrt{3}V_c} = \frac{400}{1,73 \cdot 10} = 23,1 \text{ А} \quad (16)$$

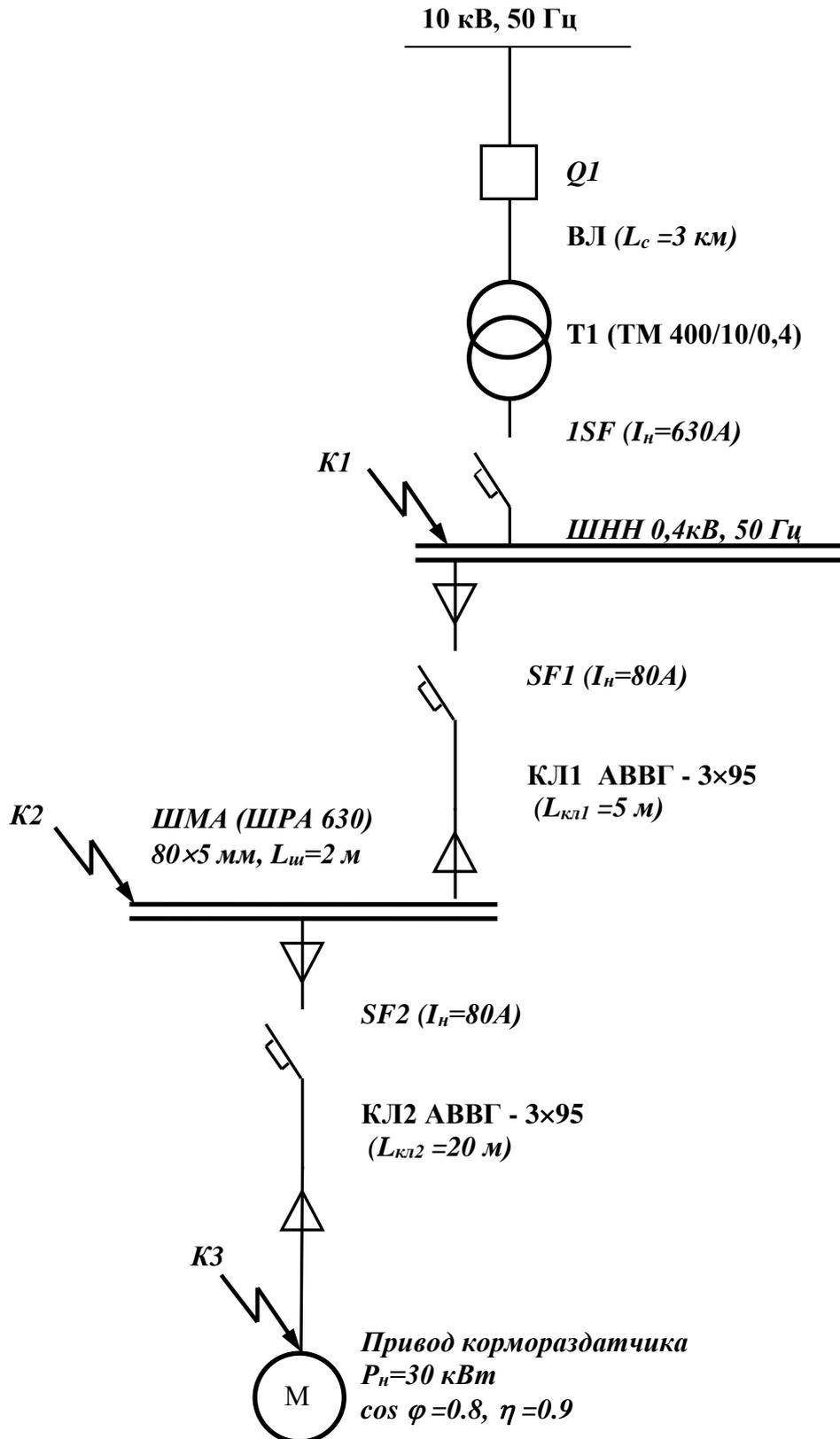


Рисунок 2 – Расчетная схема электроснабжения

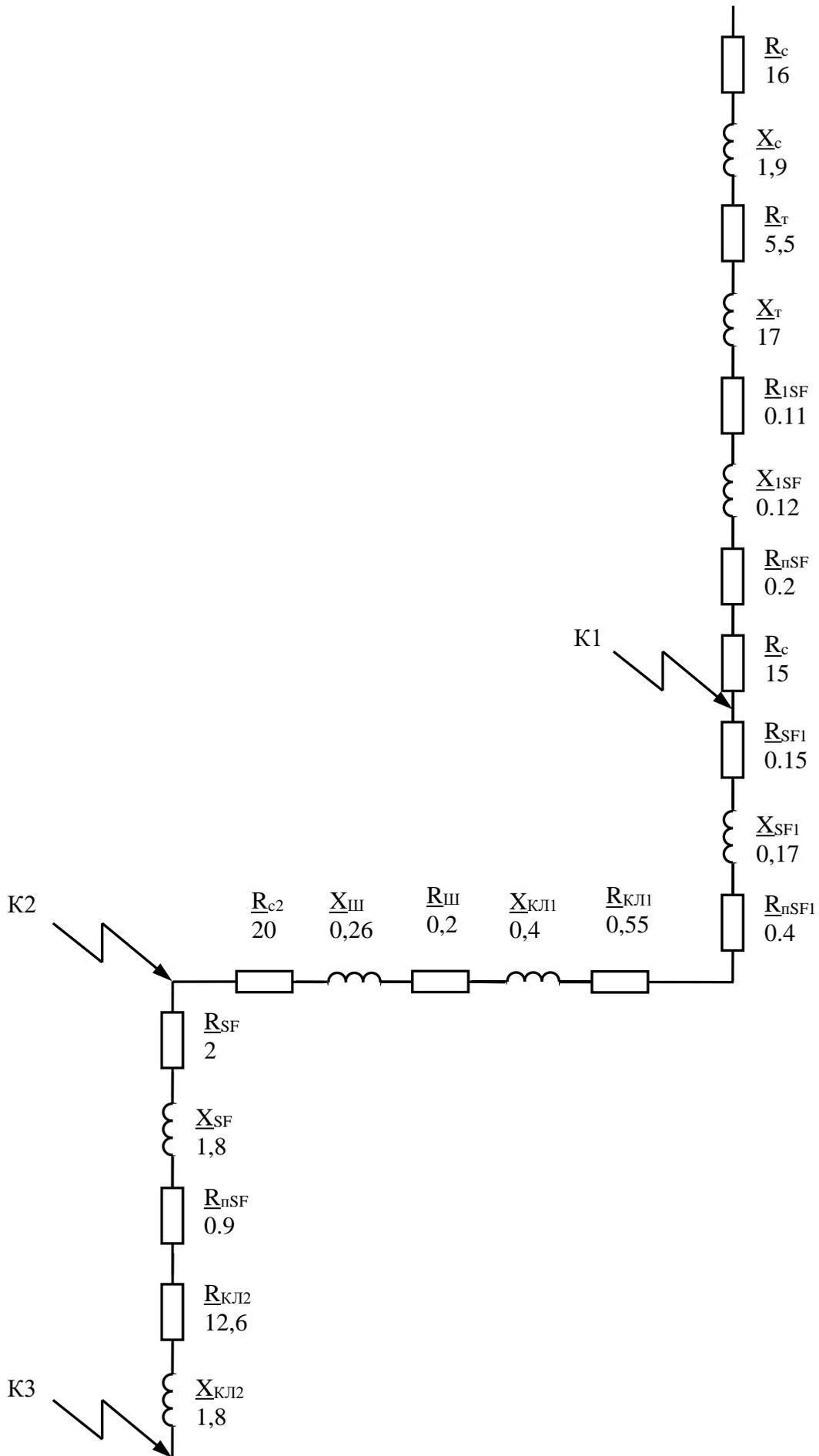


Рисунок 3 – Схема замещения СЭС

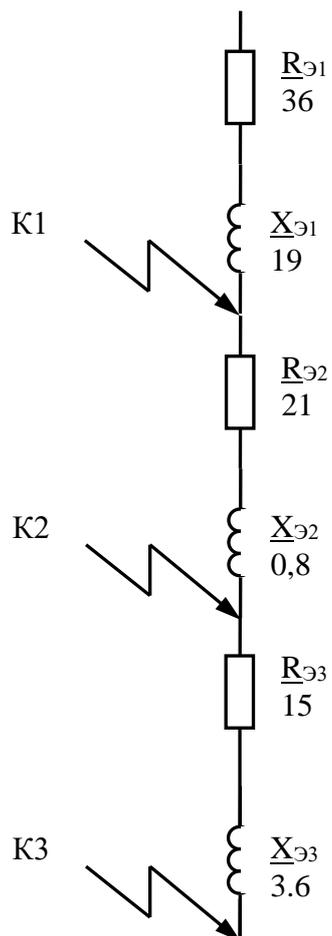


Рисунок 4 – Схема замещения СЭС (упрощенная)

Определение сопротивления схемы замещения для воздушных и кабельных линий.

Для воздушной линии ВЛ АС-3 x 10/1,8;  $I_{доп} = 84$  А;

$$x_{овл} = 0,4 \text{ Ом/км};$$

$$X_{ВН} = x_0 L_c = 0,4 \cdot 3 = 1,2 \text{ Ом};$$

$$r_0 = \frac{10^3}{\gamma S} = \frac{10^3}{30 \cdot 10} = 3,33 \text{ Ом/км};$$

$$R_{ВН} = r_0 L_c = 3,33 \cdot 3 = 10 \text{ Ом};$$

Сопротивления приводятся к низкому напряжению (НН):

$$R_C = R_{BH} \left( \frac{V_{HH}}{V_{BH}} \right)^2 = 10 \left( \frac{0,4}{10} \right)^2 10^3 = 16 \text{ мОм},$$

$$X_C = X_{BH} \left( \frac{V_{HH}}{V_{BH}} \right)^2 = 1,2 \left( \frac{0,4}{10} \right)^2 10^3 = 1,9 \text{ мОм}.$$

Для трансформатора сопротивления определяем по таблице Б.1:

$$R_T = 5,5 \text{ мОм}, X_T = 17,1 \text{ мОм}; Z_T^{(l)} = 195 \text{ мОм}.$$

Для автоматов по таблице Б.3:

$$ISF R_{ISF} = 0,11 \text{ мОм}; x_{ISF} = 0,12 \text{ мОм}; R_{IIISF} = 0,2 \text{ мОм};$$

$$SF1 R_{SF1} = 0,15 \text{ мОм}; x_{SF1} = 0,17 \text{ мОм}; R_{IISF1} = 0,4 \text{ мОм};$$

$$SF R_{SF} = 2 \text{ мОм}; X_{SF} = 1,8 \text{ мОм}; R_{IISF} = 0,9 \text{ мОм}.$$

Для кабельных линий (КЛ) сопротивления схемы замещения определяем по таблице Б.5. Для кабельной линии 1 (КЛ1):

$$r_0' = 0,33 \text{ мОм/м}; x_0 = 0,08 \text{ мОм/м}.$$

Так как в схеме 3 параллельных кабеля, то

$$r_0 = r_0' \cdot 0,33 = 0,33 \cdot 0,33 = 0,11 \text{ мОм/м};$$

$$R_{кл1} = r_0 L_{КЛ1} = 0,11 \cdot 5 = 0,55 \text{ мОм};$$

$$X_{кл1} = x_0 L_{КЛ1} = 0,08 \cdot 5 = 0,4 \text{ мОм}.$$

Для КЛ2:

$$r_0 = 0,63 \text{ мОм/м}; x_0 = 0,09 \text{ мОм/м}.$$

$$R_{КЛ2} = 0,63 \cdot 20 = 12,6 \text{ мОм};$$

$$X_{КЛ2} = 0,09 \cdot 20 = 1,8 \text{ мОм}.$$

Для шинпровода ШРА 630 сопротивления схемы замещения определяем по таблице Б.7:

$$r_o = 0,1 \text{ мОм/м}; x_o = 0,13 \text{ мОм/м};$$

$$r_{oII} = 0,2 \text{ мОм/м}; x_{oII} = 0,26 \text{ мОм/м}.$$

$$R_{uu} = r_o L_{uu} = 0,1 \cdot 2 = 0,2 \text{ мОм};$$

$$X_{uu} = x_o L_{uu} = 0,13 \cdot 2 = 0,26 \text{ мОм}.$$

Для ступеней распределения сопротивления схемы замещения определяем по таблице Б.4:

$$R_{c1} = 15 \text{ мОм}; R_{c2} = 20 \text{ мОм}.$$

Упрощаем схему замещения, вычислив эквивалентные сопротивления на участках между точками КЗ, и наносим их на схему (рис.2):

$$R_{\partial 1} = R_{BL} + R_T + R_{ISF} + R_{IIISF} + R_{c1} = 16 + 5,5 + 0,11 + 0,2 + 15 = 36,8 \text{ мОм};$$

$$X_{\partial 1} = X_C + X_T + X_{ISF} = 1,9 + 17,1 + 0,12 = 19,12 \text{ мОм};$$

$$R_{\partial 2} = R_{SF1} + R_{IIISF1} + R_{KLI} + R_{III} + R_{c2} = 1,15 + 0,4 + 0,55 + 0,2 + 20 = 21,3 \text{ мОм};$$

$$X_{\partial 2} = X_{SF1} + X_{KLI} + X_{III} = 0,17 + 0,4 + 0,26 = 0,83 \text{ мОм};$$

$$R_{\partial 3} = R_{SF} + R_{IIISF} + R_{KLI2} = 2 + 0,9 + 12,6 = 15,5 \text{ мОм};$$

$$X_{\partial 3} = X_{SF} + X_{KLI2} = 1,8 + 1,8 = 3,6 \text{ мОм}.$$

Вычисляем сопротивления до каждой точки КЗ и заносим их в «Сводную ведомость (таблица 1):

$$R_{K1} = R_{\partial 1} = 36,8 \text{ мОм};$$

$$X_{K1} = X_{\partial 1} = 19,12 \text{ мОм};$$

$$Z_{K1} = \sqrt{R_{K1}^2 + X_{K1}^2} = \sqrt{36,8^2 + 19,12^2} = 41,5 \text{ мОм};$$

$$R_{K2} = R_{\partial 1} + R_{\partial 2} = 36,8 + 21,3 = 58,1 \text{ мОм};$$

$$X_{K2} = X_{\text{Э1}} + X_{\text{Э2}} = 19,12 + 0,83 = 19,95 \text{ мОм};$$

$$Z_{K2} = \sqrt{R_{K2}^2 + X_{K2}^2} = \sqrt{58,1^2 + 19,95^2} = 61,4 \text{ мОм};$$

$$R_{K3} = R_{K2} + R_{\text{Э3}} = 58,1 + 15,5 = 73,6 \text{ мОм};$$

$$X_{K3} = X_{K2} + X_{\text{Э3}} = 19,95 + 3,6 = 23,55 \text{ мОм};$$

$$Z_{K3} = \sqrt{R_{K3}^2 + X_{K3}^2} = \sqrt{73,6^2 + 23,55^2} = 77,3 \text{ мОм}.$$

$$\frac{R_{K1}}{X_{K1}} = \frac{36,8}{19,12} = 1,9;$$

$$\frac{R_{K2}}{X_{K2}} = \frac{58,1}{19,95} = 2,9;$$

$$\frac{R_{K3}}{X_{K3}} = \frac{73,6}{23,55} = 3,1.$$

Определяются коэффициенты  $K_y$  по графику на рисунке 1 и  $q$ :

$$K_{y1} = F\left(\frac{R_{K1}}{X_{K1}}\right) = F(1,9) = 1,0;$$

$$K_{y2} = F\left(\frac{R_{K2}}{X_{K2}}\right) = F(2,9) = 1,0;$$

$$K_{y3} = F\left(\frac{R_{K3}}{X_{K3}}\right) = F(3,1) = 1,0;$$

$$q_1 = q_2 = q_3 = \sqrt{1 + 2(1,0 - 1)^2} = 1.$$

Определяем 3-фазные и 2-фазные токи КЗ и заносим в «Ведомость токов КЗ» (таблица 1):

$$I_{k1}^{(3)} = \frac{V_{k1}}{\sqrt{3}Z_{k1}} = \frac{0,4 \cdot 10^3}{1,73 \cdot 41,5} = 5,6 \text{ кА};$$

$$I_{k2}^{(3)} = \frac{V_{k2}}{\sqrt{3}Z_{k2}} = \frac{0,38 \cdot 10^3}{1,73 \cdot 61,4} = 3,6 \text{ кА};$$

$$I_{k3}^{(3)} = \frac{V_{k3}}{\sqrt{3}Z_{k3}} = \frac{0.38 \cdot 10^3}{1.73 \cdot 77.3} = 2.8 \text{ кА};$$

$$I_{y1} = q_1 I_{k1}^{(3)} = 5.6 \text{ кА};$$

$$I_{y2} = q_2 I_{k2}^{(3)} = 3.6 \text{ кА};$$

$$I_{y3} = q_3 I_{k3}^{(3)} = 2.8 \text{ кА};$$

$$i_{y1} = \sqrt{2} K_{y1} I_{k1}^{(3)} = 1.14 \cdot 1.0 \cdot 5.6 = 7.9 \text{ кА};$$

$$i_{y2} = \sqrt{2} K_{y2} I_{k2}^{(3)} = 1.14 \cdot 1.0 \cdot 3.6 = 5.1 \text{ кА};$$

$$i_{y3} = \sqrt{2} K_{y3} I_{k3}^{(3)} = 1.14 \cdot 1.0 \cdot 2.8 = 4.0 \text{ кА};$$

$$I_{k1}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{k1}^{(3)} = 0.87 \cdot 5.6 = 4.9 \text{ кА};$$

$$I_{k2}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{k2}^{(3)} = 0.87 \cdot 3.6 = 3.1 \text{ кА};$$

$$I_{k3}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{k3}^{(3)} = 0.87 \cdot 2.8 = 2.4 \text{ кА}.$$

Составим схему замещения для расчета 1-фазных токов КЗ и определим ее сопротивления

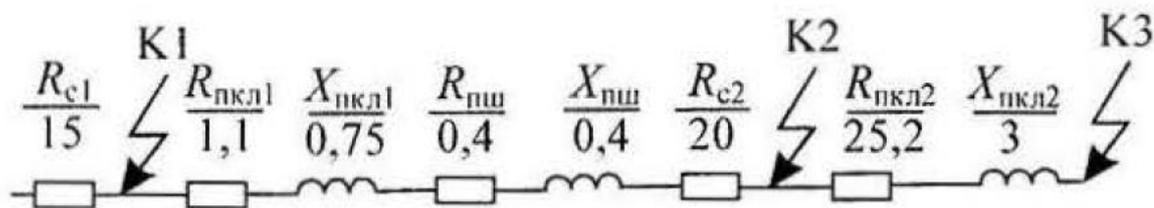


Рисунок 5 – Схема замещения для расчета 1-фазных токов КЗ

$$X_{ПКЛ1} = x_{оп} L_{КЛ1} = 0,15 \cdot 5 = 0,75 \text{ Ом};$$

$$R_{ПКЛ1} = 2r_{оп} L_{КЛ1} = 2 \cdot 0,11 \cdot 5 = 1,1 \text{ Ом};$$

$$X_{ПКЛ2} = x_{0П} L_{КЛ2} = 0,15 \cdot 20 = 3 \text{ Ом};$$

$$R_{ПКЛ2} = 2r_{0П} L_{КЛ2} = 2 \cdot 0,63 \cdot 20 = 25,2 \text{ Ом};$$

$$R_{Пш} = r_{0П} L_{ш} = 0,2 \cdot 2 = 0,52 \text{ мОм};$$

$$X_{Пш} = x_{0П} L_{ш} = 0,26 \cdot 2 = 0,52 \text{ мОм}.$$

Полное сопротивление до точки К1:

$$Z_{П1} = R_{c1} = 15 \text{ мОм}.$$

Полное сопротивление до точки К2:

$$R_{П2} = R_{c1} + R_{ПКЛ1} + R_{Пш} + R_{c2} = 15 + 1,1 + 0,4 + 20 = 36,5 \text{ мОм}.$$

$$X_{П2} = X_{ПКЛ1} + X_{Пш} = 0,75 + 0,52 = 1,3 \text{ мОм}.$$

$$Z_{П2} = \sqrt{R_{П2}^2 + X_{П2}^2} = \sqrt{36,5^2 + 1,3^2} = 36,9 \text{ мОм}.$$

$$R_{П3} = R_{П2} + R_{ПКЛ2} = 36,5 + 20,5 = 61,7 \text{ мОм}.$$

$$X_{П3} = X_{ПКЛ2} + X_{П2} = 3 + 1,3 = 4,3 \text{ мОм}.$$

$$Z_{П3} = \sqrt{R_{П3}^2 + X_{П3}^2} = \sqrt{61,7^2 + 4,3^2} = 62,3 \text{ мОм}.$$

$$I_{k1}^{(1)} = \frac{V_{кф}}{Z_{П1} + \frac{Z_T^1}{3}} = \frac{230}{15 + \frac{190}{3}} = 2,9 \text{ кА};$$

$$I_{k2}^{(1)} = \frac{V_{\text{кф}}}{Z_{\Pi 2} + \frac{Z_T^1}{3}} = \frac{220}{36,9 + 190/3} = 2,2 \text{ кА};$$

$$I_{k3}^{(1)} = \frac{V_{\text{кф}}}{Z_{\Pi 3} + \frac{Z_T^1}{3}} = \frac{230}{62,3 + 190/3} = 1,7 \text{ кА}.$$

Результаты расчета токов КЗ представлены в «Сводной ведомости токов КЗ» (таблица 1).

Таблица 1 – Сводная ведомость токов КЗ

Точки КЗ	$R_K$ , мОм	$X_K$ , мОм	$Z_K$ , мОм	$R_K/X_K$	$K_y$	$q$	$I_k^{(3)}$ , кА	$I_k^{(2)}$ , кА	$i_{\phi 2}$ , кА	$I_y^{(3)}$ , кА	$Z_{\Pi}$ , мОм	$I_k^{(1)}$ , кА
К1	36,8	19,2	41,5	1,9	1,0	1	5,6	4,9	7,9	5,6	15	2,9
К2	58,1	19,95	61,4	2,9	1,0	1	3,6	3,1	5,1	3,6	36,9	2,2
К3	73,6	23,55	77,3	3,1	1,0	1	2,8	2,4	4,0	2,8	62,3	1,7

## Список литературы

1. Неклепаев Б. Н., Крючков Н. П. Электрическая часть станций и подстанций. Справочные материалы к курсовому и дипломному проектированию. - М: Энергоатомиздат, 1989.
2. Методические указания к самостоятельному изучению курса «Электрические станции и подстанции систем электроснабжения» /Перепеченый А. Т. Горяжа В. Н., Трофимов Г. С. - Харьков, ХИИГХ, 1991.
3. Блок М. Н. Пособие для курсового и дипломного проектирования электрических станций и подстанций.
4. Рожкова Л. Д., Козулин В. С. Электрооборудование станций и подстанций: учебник для техникумов - 3-е издание. - М: Энергоатомиздат, 1987

**Приложение А. Оформление курсовой работы**

ФЕДЕРАЛЬНОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
"БРЯНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ"

*Факультет энергетики и природопользования*

*Кафедра электроэнергетики и автоматики*

**КУРСОВАЯ РАБОТА**

*по дисциплине*

***Электромагнитные переходные процессы***

*на тему:*

*«Расчет токов короткого замыкания сети электроснабжения сельских потребителей»*

Студент группы ЗЕ- \_\_\_\_\_ зач. кн. № \_\_\_\_\_  
Ф.И.О.

Дата выдачи задания \_\_\_\_\_

Принял преподаватель: \_\_\_\_\_  
Ф.И.О.

Дата \_\_\_\_\_ 2019 г.

*Брянск-2019*

Рисунок А. 1 – Титульный лист

## Содержание

Введение .....	
1 Основные теоретические положения .....	
1.1 Расчет токов короткого замыкания .....	
2. Расчет токов короткого замыкания сети электроснабжения сельских потребителей .....	
2.1 Исходные данные для расчета токов КЗ .....	
Список литературы .....	
Приложения .....	

					<i>Введение</i>	<i>Лист</i>
<i>из</i>	<i>лист</i>	<i>№</i>	<i>Подпис.</i>	<i>Дата</i>		<i>2</i>

Рисунок А.2 – Содержание курсовой работы

### Список литературы

1. Неклепаев Б. Н., Крючков Н. П. Электрическая часть станций и подстанций. Справочные материалы к курсовому и дипломному проектированию. - М: Энергоатомиздат, 1989.
2. Методические указания к самостоятельному изучению курса «Электрические станции и подстанции систем электроснабжения» /Перепеченый А. Т. , Гаряжа В. Н., Трофимов Г. С. - Харьков, ХИИГХ, 1991./
3. Блок М. Н. Пособие для курсового и дипломного проектирования электрических станций и подстанций.
4. Рожкова Л. Д., Козулин В. С. Электрооборудование станций и подстанций: учебник для техникумов - 3-е издание. - М: Энергоатомиздат, 1987

					<i>Введение</i>	<i>Лист</i>
<i>из</i>	<i>лист</i>	<i>№</i>	<i>Подпис.</i>	<i>Дата</i>		<i>22</i>

Рисунок А.3 – Список литературы

Приложение Б Справочные данные для определения  
сопротивлений схемы замещения

Таблица Б.1 - Сопротивление трансформаторов 10/0,4 кВ

Мощность, кВА	$R_T$ , мОм	$X_T$ , мОм	$Z_T$ , мОм	$Z_T^{(l)}$ , мОм
25	153,9	243,6	287	3110
40	88	157	180	1949
63	52	102	114	1237
100	31,5	64,7	72	779
160	16,6	41,7	45	487
250	9,4	27,2	28,7	312
400	5,5	17,1	18	195
630	3,1	13,6	14	129
1000	2	8,5	8,8	81
1600	1	5,4	5,4	54

Таблица Б.2 - Значение сопротивлений первичных обмоток катушечных трансформаторов тока ниже 1 кВ

$K_{TT}$ трансформатора тока	Сопротивление, мОм класса точности			
	1		2	
	$X_T$	$r_T$	$X_T$	$r_T$
1	2	3	4	5
20/5	67	42	17	19
30/5	30	20	8	8,2
40/5	17	11	4,2	4,8
50/5	11	7	2,8	3
75/5	4,8	3	1,2	1,3
100/5	1,7	2,7	0,7	0,75
150/5	1,2	0,75	0,3	0,33
200/5	0,67	0,42	0,17	0,19
300/5	0,3	0,2	0,08	0,09
400/5	0,17	0,11	0,04	0,05
500/5	0,07	0,05	0,02	0,02

Таблица Б.3 - Значение сопротивлений автоматических выключателей, рубильников, разъединителей до 1 кВ

$I_{н.а}$ А	Автомат			Рубиль- ник	Разъединитель
	$R_а$ , мОм	$X_а$ , мОм	$R_n$ , мОм	$R$ , мОм	$R$ , мОм
50	5,5	4,5	1,3	—	—
70	2,4	2	1	—	—
100	1,3	1,2	0,75	0,5	—
150	0,7	0,7	0,7	0,45	—
200	0,4	0,5	0,6	0,4	—
400	0,15	0,17	0,4	0,2	0,2
600	0,12	0,13	0,25	0,15	0,15
1000	0,1	0,1	0,15	0,08	0,08
1600	0,08	0,08	0,1	—	0,06
2000	11,07	0,08	0,08	—	0,03
2500	0,06	0,07	0,07	—	0,03
3000	0,05	0,07	0,06	—	0,02
4000	0,04	0,05	0,05	—	—

Таблица Б.4 - Значение переходных сопротивлений на ступенях распределения

Ступень	Место	$R_{ст}$ , мОм	Дополнительные сведения
1	2	3	4
1	Распределительные устройства под- станции	15	Используются при от- сутствии достоверных данных о контактах и их переходных сопро- тивлениях в сетях, пи- тающихся от цеховых трансформаторов мощ- ностью до 2500 кВ-А включительно
2	Первичные распределительные цеховые пункты	20	
3	Вторичные распределительные цеховые пункты	25	
4	Аппаратура управления электроприем- ников, получающих питание от вторич- ных РП	30	

Таблица Б.5 - Значения удельных сопротивлений кабелей, проводов

S, мм <sup>2</sup> жилы	r <sub>o</sub> , мОм/м при 20 °С жилы		x <sub>o</sub> , мОм/м	
	А1	Си	кабель с бумаж- ной поясной изоляцияй	три провода в трубе или кабель с любой изоляцияй (кроме бумажной)
1	2	3	4	5
1	—	18,5	—	0,133
1,5	—	12,3	—	0,126
2,5	12,5	7,4	0,104	0,116
4	7,81	4,63	0,095	0,107
6	5,21	3,09	0,09	0,1
10	3,12	1,84	0,073	0,099
16	1,95	1,16	0,0675	0,095
25	1,25	0,74	0,0662	0,091
35	0,894	0,53	0,0637	0,088
50	0,625	0,37	0,0625	0,085
70	0,447	0,265	0,0612	0,082
95	0,329	0,195	0,0602	0,081
120	0,261	0,154	0,0602	0,08
150	0,208	0,124	0,0596	0,079
185	0,169	од	0,0596	0,78
240	0,13	0,077	0,0587	0,077

Таблица Б.6 - Значения удельных сопротивлений троллейных шинопроводов до 1 кВ

Тип	$I_H, A$	Сопротивление, мОм/м		
		$r_o$	$x_o$	$z_o$
1	2	3	4	5
ШТМ	250	0,315	0,18	0,36
	400	0,197	0,12	0,23
ШТА	250	0,474	0,15	0,496
	400	0,217	0,13	0,254

Таблица Б.7 - Значение удельных сопротивлений комплектных шинопроводов

Параметры	Тип комплектного шинопровода						
	ШМА				ШРА		
1	2	3	4	5	6	7	8
$I_H, A$	1250	1600	2500	3200	250	400	630
$r_o, мОм/м$	0,034	0,03	0,017	0,015	0,21	0,15	0,1
$x_o, мОм/м$	0,016	0,014	0,008	0,007	0,21	0,17	0,13
$r_{on}, мОм/м$	0,068	0,06	0,034	0,03	0,42	0,3	0,2
$x_{on}, мОм/м$	0,053	0,06	0,075	0,044	0,42	0,24	0,26
$z_{on}, мОм/м$	0,086	0,087	0,082	0,053	0,59	0,38	0,33

Таблица Б.8 - Значение активных переходных сопротивлений неподвижных контактных соединений

$S$ , мм <sup>2</sup> кабеля	$R_{п}$ , мОм
16	0,85
25	0,064
35	0,056
50	0,043
70	0,029
95	0,027
120	0,024
185	0,021
240	0,012

$I_H$ , А	$R_{п}$ , мОм
ШРА	
250	0,009
400	0,006
630	0,0037
ШМА	
1600	0,0034
2500	0,0024
3200	0,0012
4000	0,0011

Учебное издание

Кисель Юрий Евгеньевич

## **ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ**

Методические указания к выполнению курсовой работы  
студентов направлению  
13.03.02 Электрификация и автоматизация сельского хозяйства

Редактор Павлютина И.П.

---

Подписано к печати 20.06.2019 г. Формат 60x84. 1/16.

Бумага печатная. Усл. п. л. 1,86. Тираж 100 экз. Изд. №6406.

---

Издательство Брянского государственного аграрного университета  
243365 Брянская обл., Выгоничский район, с. Кокино, Брянский ГАУ