

11/7/11

**Одобрено кафедрой
«Энергоснабжение электрических
железных дорог»**

**Тяговые и трансформаторные
ПОДСТАНЦИИ**

**Руководство по выполнению лабораторных работ № 3 и 4
для студентов V курса**

специальности

190401 ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ (ЭНС)



Москва – 2007

**ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ НА ТЕМУ
«ИССЛЕДОВАНИЕ ТОКОВ КОРОТКОГО
ЗАМЫКАНИЯ В СИСТЕМАХ ТЯГОВОГО
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОСТОЯННОГО
И ПЕРЕМЕННОГО ТОКА»**

Составитель — д-р. техн. наук, проф. Л.А. Герман

**1. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ
К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

По рассматриваемой тематике предлагаются две лабораторные работы, которые могут выполняться в любой последовательности.

Лабораторная работа 3: «Исследование токов короткого замыкания в системе тягового электроснабжения переменного тока».

Лабораторная работа 4: «Исследование токов короткого замыкания в системе тягового электроснабжения постоянного тока».

Отчёт по выполненным работам каждый студент предоставляет индивидуально. Исходные данные по выполнению работ предоставляются каждому студенту индивидуально по его шифру (исходные данные даны в Приложении 1). Отчёт должен быть оформлен в соответствии с Международной системой единиц СИ и ЕСКД. Перед выполнением лабораторной работы студент должен ознакомиться с соответствующей литературой [1 — 10] и ответить на контрольные вопросы.

Лабораторную работу выполняют на ПЭВМ. Студент предоставляет распечатку отчета по лабораторной работе, который должен содержать:

1. Наименование работы. Указать фамилию и шифр студента.
2. Цель работы.
3. Порядок выполнения работы.
4. Схему рассматриваемой тяговой подстанции, схему замещения, исходные данные.
5. Расчётные формулы. Результаты расчетов свести в таблицы.
6. Графики по результатам выполненной работы.
7. Выводы, полученные на основании расчетов и графиков.

**ТЯГОВЫЕ И ТРАНСФОРМАТОРНЫЕ
ПОДСТАНЦИИ**

Руководство по выполнению
лабораторных работ №3 и 4

Редактор *Д.Н. Тихонычев*
Корректор *В.В. Игнатова*
Компьютерная верстка *Л.В. Орлова*

Тип. зак.	Изд. зак.34	Тираж 200 экз.
Подписано в печать 01.12.07	Гарнитура NewtonC	Офсет
Усл. печ. л. 1,75		Формат 60×90 ¹ / ₁₆

Издательский центр РГОТУПС,
125993, Москва, Часовая ул., 22/2

Участок оперативной печати РГОТУПС,
125993, Москва, Часовая ул., 22/2

© Российский государственный открытый технический университет путей сообщения, 2007

Лабораторные работы выполняются на ЭВМ в программном обеспечении системы Mathcad (рекомендуется применить современные версии Mathcad 2001... Mathcad-13) [9,10], которая является многофункциональной интерактивной вычислительной системой математики, позволяющей решать задачи математики как численно так и аналитически. Особенно важно, что все это можно делать, не прибегая к программированию (хотя элементы программирования эта система имеет).

В систему встроена двух- и трехмерная графика, есть возможность подключения к популярным офисным и конструкторским программам, возможен выход из программы напрямую в Интернет.

Для установки Mathcad-13 требуется IBM-совместимый ПК со следующими основными характеристиками:

- процессор Pentium/Celeron 233 MHz / 300 MHz или выше;
- устройство для чтения компакт-дисков;
- операционная система Windows 98/2000/XP или Windows NT 4.0 и выше;
- не менее 48 Мбайт памяти;
- не менее 150 Мбайт свободного пространства на жёстком диске;
- графическая видеосистема Super VGA с числом цветов не менее 256;
- стандартная мышь.

2. ОБЩИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ ПО КОРОТКИМ ЗАМЫКАНИЯМ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Короткое замыкание (КЗ) — всякое случайное или преднамеренное, не предусмотренное нормальным режимом работы, электрическое соединение различных точек электроустановок между собой или с землёй.

Методы расчета токов КЗ зависят от вида КЗ (однофазное, двухфазное, трехфазное), от состояния нейтрали в рассматриваемой сети (заземленная, изолированная, компенсирован-

ная), от уровня номинальных напряжений сетей и т.д. Объем изучения рассматриваемой тематики весьма обширен [1 — 8]. В лабораторных работах ограничимся исследованиями тока КЗ на тяговых подстанциях переменного и постоянного тока электрических железных дорог.

В зависимости от причин возникновения КЗ в системе тягового электроснабжения могут быть разделены на две группы.

- ◆ К первой группе относятся причины случайного характера:
 - перекрытия изоляторов контактной сети вследствие перенапряжений;
 - перекрытия изоляторов воздушных промежутков, роговых разрядников и т.п. птицами;
 - касание проводов заземленных частей при неблагоприятных атмосферных явлениях, и т.д.
- ◆ Ко второй группе относятся причины возникновения КЗ эксплуатационного характера из-за неправильной эксплуатации контактной сети и электроподвижного состава (ЭПС):
 - неправильное взаимодействие контактной сети и токоприемника ЭПС;
 - загрязнение, механические повреждения и старение изоляторов;
 - ошибочные действия обслуживающего персонала;
 - повреждения на ЭПС и т.д.

Во время КЗ токи в фазах сети резко увеличиваются до значений, во много раз превышающих максимальный ток рабочего режима. Наступает аварийный режим КЗ, при котором токовые части и аппараты подвергаются значительным электродинамическим и термическим воздействиям. Для их правильной оценки необходимо уметь определять максимальное значение тока КЗ в заданной точке сети в любой момент времени после начала КЗ. Вследствие КЗ снижается напряжение в линии, что недопустимо для ряда технологических процессов.

К мерам, предупреждающим или уменьшающим опасность развития аварий, относятся: выбор рациональной схемы сети, правильный выбор аппаратов по условиям КЗ, применение токоограничивающих устройств и т.д. [1]. Экономически выгод-

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3

«Исследование токов короткого замыкания (КЗ) в системе тягового электроснабжения переменного тока»

Цель работы — исследование переходных процессов до установившегося значения тока КЗ на тяговых подстанциях переменного тока электрических железных дорог.

При этом необходимо рассчитать параметры цепи КЗ и оценить их влияние на протекание переходного режима.

1. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРОЦЕССАХ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В СИСТЕМЕ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА И ОСНОВНЫЕ РАСЧЁТНЫЕ ВЫРАЖЕНИЯ

1.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПО РАСЧЕТУ ТОКА КЗ

Переходный режим в общем случае характеризуется появлением наряду с периодической (вынужденной) составляющей аperiodической (свободной) составляющей тока КЗ [1,6]. Правильно оценить электродинамическое и термическое действие КЗ невозможно, не учитывая переходной режим КЗ. Это объясняется повышенным значением амплитудного и действующего значения тока КЗ в переходном режиме.

На тяговых подстанциях переменного тока системы 25кВ аварийная ситуация возникает при КЗ в трехфазных сетях, питающихся от районной обмотки трансформатора, при КЗ в тяговой сети и в линии ДПР-27,5кВ, при повреждениях электрооборудования подстанции и т.д. Специфический режим однофазного КЗ может быть на старых промежуточных тяговых подстанциях, где были установлены короткозамкатель в ОРУ-110(220)кВ в случае повреждения трансформатора и последующего включения короткозамкателя [1]. Таким образом, даже для одной тяговой подстанции видно большое разнообразие видов КЗ.

но применять меры по ограничению токов КЗ, если дополнительные затраты на это окупаются благодаря применению более лёгкой аппаратуры и токоведущих частей и повышается надёжность электроснабжения потребителей.

В настоящее время для ограничения токов КЗ в энергосистемах наиболее часто используются: стационарное и автоматическое деление сети, токоограничивающие реакторы и аппараты, трансформаторы с расщеплённой обмоткой низшего напряжения, а также разземление нейтралей некоторых силовых трансформаторов, их заземление через реакторы и резисторы [1,6,8].

В системе тягового электроснабжения электрических железных дорог уменьшение отрицательного воздействия токов КЗ выполняется в основном за счёт снижения времени действия токов КЗ путём увеличения быстродействия работы защит, уменьшения собственного времени и времени гашения дуги выключателей и применение различных устройств ограничения токов КЗ [3]. Соответственно, исследование и расчеты токов КЗ необходимы по следующим причинам:

- для сопоставления, оценки и выбора главных схем электрических станций, сетей и подстанций;
- выбора и проверки электрических аппаратов и проводников;
- проектирования и настройки устройств релейной защиты и автоматики;
- оценки уровня электробезопасности, и в частности, оценки напряжения прикосновения при КЗ, наведенного напряжения и т.д.
- определения влияния токов нулевой последовательности линий электропередачи на линии связи;
- оценки допустимости и разработки методики проведения различных испытаний в электрических системах и, в частности, на тяговых подстанциях, и т.д.

Предварительно сделаем некоторые замечания по расчетам токов КЗ.

Во-первых, по терминологии принятой в энергосистемах токи КЗ в системе тягового электроснабжения считаются удаленными от ядра энергосистемы, так как ограничены сопротивлением системы внешнего электроснабжения (СВЭ) и трансформаторов тяговых подстанций. Поэтому периодическая составляющая в токе КЗ в переходном процессе принимается неизменной.

Во-вторых, при КЗ не учитывается начальная нагрузка (т.е., нагрузка до момента КЗ). Это относится как к общесетевой нагрузке [1, с. 29], так и к тяговой нагрузке, когда при резком понижении напряжения в тяговой сети выпрямительная установка в ЭПС «запирает» его силовую цепь. [3, с. 342].

1.2. ФОРМИРОВАНИЕ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ И ОСНОВНОЙ РАСЧЕТНОЙ ФОРМУЛЫ

Для исследования предлагается вариант тяговой подстанции переменного тока системы 25кВ (рис. 1). На подстанции, подключенной к системе внешнего электроснабжения (СВЭ), установлен силовой трехобмоточный трансформатор со схемой соединения тяговой обмотки «треугольник», а на районной обмотке — «звезда». На тяговой подстанции возможно включение установки продольной емкостной компенсации (УПК) в отсос (на рис. 1 УПК показана пунктиром). Из возможных вариантов КЗ (К1, К2, К3, К4) ограничимся исследованиями КЗ на шинах 27,5кВ (К1) и на шинах районной обмотки (К4). Исходные данные по параметрам элементов схемы даны в прил. 1.

Схема замещения в трехфазном исполнении изображена на рис. 2, а, где указаны сопротивления СВЭ (X_c, R_c) и трансформатора тяговой подстанции (X_r, R_r). Отметим, что изображенная схема замещения трансформатора не зависит от схемы соединения трансформатора (напомним, что в лабораторной работе принято: схема соединения тяговой обмотки — «треугольник», а районной — «звезда»).

После суммирования сопротивлений СВЭ и трансформатора получаем эквивалентную схему замещения (рис 2, б).

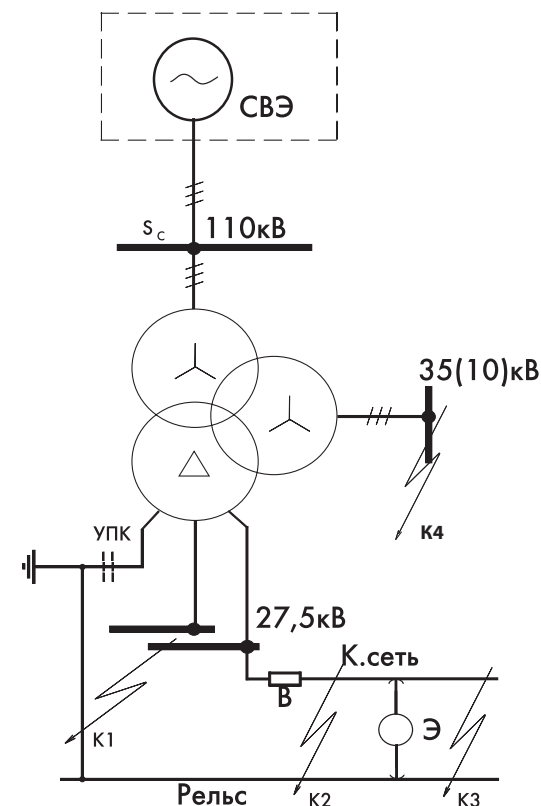


Рис.1. Схема подключения тяговой подстанции системы 25 кВ

При трехфазном КЗ, например, на шинах районной обмотки 35 (10)кВ, (рис 2, в) достаточно определить ток в одной фазе, который определяется фазным напряжением и сопротивлением фазы. При двухфазном КЗ ток определяется линейным напряжением и сопротивлением «петли» (по рис. 2, г это удвоенное сопротивление фазы). Такая схема замещения, в частности, получается при КЗ на шинах 27,5кВ (К1).

При подключении электрической сети с КЗ к достаточно мощному источнику с синусоидальным напряжением $u(t) = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi)$ ток в ней изменяется по закону [1]

$$i_k(t) = \sqrt{2} \cdot I_k \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi - \varphi_k) - \sqrt{2} \cdot I_k \cdot \exp(-\frac{t}{T}) \cdot \sin(\psi - \varphi_k), (1)$$

$$\varphi_k = \arctg(\frac{X_{\pi}}{R_{\pi}}), T = \frac{X_{\pi}}{(\omega \cdot R_{\pi})}, (2)$$

$$X_{\pi} = X_c + X_T, R_{\pi} = R_c + R_T, (3)$$

где $U_M = \sqrt{2} \cdot U_H$, U_H — номинальное напряжение, I_k — действующее значение установившегося тока КЗ, φ_k — угол сдвига тока I_k относительно напряжения, ψ — начальная фаза напряжения, X_c, R_c индуктивное и активное сопротивление энергосистемы; X_T, R_T — то же трансформатора тяговой подстанции.

Пояснения к указанным формулам и анализ построенных волновых диаграмм подробно представлены в учебнике [1, с. 28].

В указанных формулах для трехфазного КЗ $i_k(t) = i_k^{(3)}(t)$ и вместо U_M подставить $U_M / \sqrt{3}$, а для двухфазного КЗ (в частности, это вариант КЗ в тяговой сети) $i_k(t) = i_k^{(2)}(t)$, и вместо X_{π} и R_{π} в указанных формулах подставляется $2X_{\pi}$ и $2R_{\pi}$ (см. рис. 2, з).

Если при КЗ возникает дуга, то её сопротивление (обычно активное) добавляется к R_{π} (3).

1.3. Ударный ток КЗ [1]

Первое слагаемое в выражении (1) называется *периодической* или *вынужденной* составляющей, второе *апериодической* или *свободной составляющей*. При удалённых КЗ апериодическая составляющая затухает через 15—30 мс. При близких к тяговой подстанции КЗ постоянная времени T возрастает (из-за малости R_c и R_T по сравнению с X_{π}) и время затухания апериодической составляющей увеличивается до нескольких периодов.

При изменении начальной фазы в момент КЗ изменяется амплитудное значение свободной составляющей. Варьируя начальной фазой ψ , можно найти такое её значение ψ_m , при котором амплитуда суммарного тока будет самой большой из всех возможных (1).

Очевидно

$$\psi_m = \varphi_k \pm 90.$$

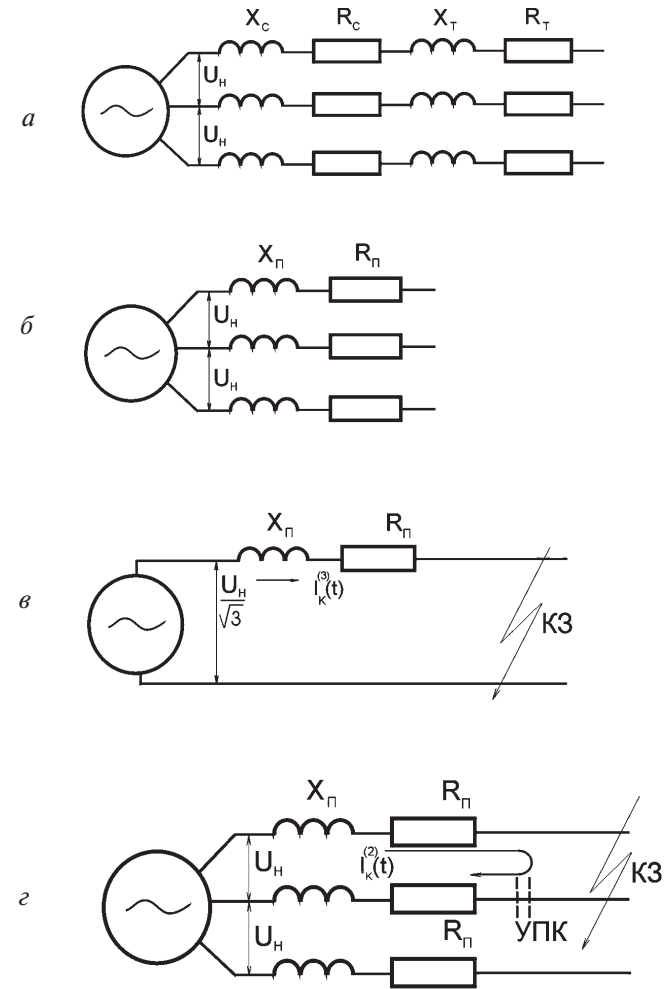


Рис.2. Схемы замещения

Наибольшая из всех возможных амплитуд наблюдается примерно спустя $T / 2 = 0,01$ от начала КЗ. Её принято обозначать i_y и называть ударным током КЗ.

1.4. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ

Приведём формулы, необходимые для расчёта параметров схемы замещения цепи КЗ (рис. 1).

Сопротивление системы внешнего электроснабжения.

Индуктивное:

$$X_c = \frac{U_n^2}{S_c}, \quad (4)$$

где U_n — номинальное напряжение;

S_c — мощность короткого замыкания системы СВЭ.

Для сопротивления X -индуктивность высчитывается по формуле:

$$L = \frac{X}{2 \cdot \pi \cdot f}, \quad (5)$$

где f — промышленная частота, $f = 50$ Гц.

В лабораторной работе для упрощения расчётов принимаем, что активное сопротивление системы в три раза меньше индуктивного, т. е.

$$R_c = \frac{X_c}{3}. \quad (6)$$

Индуктивное сопротивление трансформатора:

$$X_t = \frac{u_k \cdot U_n^2}{100 \cdot S_t}, \quad (7)$$

где u_k — напряжение короткого замыкания трансформатора, %;

S_t — номинальная мощность трансформатора, МВ·А;

U_n — номинальное напряжение трансформатора, кВ;

Активное сопротивление трансформатора:

$$R_t = \frac{\Delta P \cdot U_n^2}{S_t^2}, \quad (8)$$

где ΔP — потери короткого замыкания, кВт.

1.5. РАСЧЕТ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДУГИ

Активное сопротивление дуги:

$$R_d = 1050 \cdot \frac{L_y \cdot n_{из} \cdot b}{I_k}, \quad (9)$$

где L_y — длина пути утечки по поверхности одного изолятора, м;

$n_{из}$ — число изоляторов в гирлянде;

b — коэффициент, учитывающий возможность развития дуги по наикратчайшему пути в воздухе;

I_k — действующее значение тока КЗ, протекающего в дуге, А.

Для тарельчатых изоляторов $L_y = 0,26 — 0,37$ м. Коэффициент b для быстродействующих защит принимают равным $0,8 — 0,9$.

Большие сопротивления дуги осложняют работу защиты, особенно тех её ступеней, которые реагируют на фазовый угол тока КЗ. При замыкании через дугу с сопротивлением $2 — 2,5$ Ом фазовый угол сдвига удалённого тока КЗ уменьшается с $60 — 80$ до $52 — 55$ эл. град. Фазовый угол сдвига тока КЗ при близких к подстанции повреждениях, сопровождающихся электрической дугой, снижается ещё больше.

Поскольку сопротивление дуги в месте КЗ полагают чисто активным, то индуктивное сопротивление дуги принимается равным нулю.

1.6. РАСЧЕТ КЗ ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ УСТАНОВКИ ПРОДОЛЬНОЙ ЕМКОСТНОЙ КОМПЕНСАЦИИ (УПК) ТЯГОВОЙ ПОДСТАНЦИИ НА ШИНЫ 27,5кВ

УПК с емкостным сопротивлением $X_{упк}$ обычно включают в отсос тяговой подстанции [4] для стабилизации и симметрирования напряжения шин 27,5кВ (рис. 1).

В этом случае в схеме замещения (см. рис. 2, з) УПК включают в одну фазу и её сопротивление $X_{упк}$ вычитается из суммарного X_n .

По рекомендации [4] в лабораторной работе следует принять

$$X_{упк} = X_n. \quad (10)$$

В результате вместо сопротивления $2X_n$ в расчете КЗ участвует уменьшенное сопротивление — X_n . Совершенно ясно, что при включении УПК ток КЗ увеличивается.

1.7. ПРИМЕНЕНИЕ УСИЛЕННЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ДЛЯ ОГРАНИЧЕНИЯ ТОКОВ КЗ

Для ограничения токов КЗ в системе 25 кВ разработаны силовые трансформаторы с повышенной динамической стойкос-

тью (например, ТДТНЖУ–40000 / 110 [2]). В этих трансформаторах увеличено сопротивление трансформатора по цепи 110(220) / 27,5кВ за счет увеличения напряжения короткого замыкания до 17,5 %.

В лабораторной работе предлагается выполнить сравнительный расчет токов КЗ с усиленным трансформатором.

2. ЗАДАЧИ И ПЛАН ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

1. Рассчитать активные и индуктивные сопротивления цепи короткого замыкания: сопротивление системы, сопротивление подстанции, сопротивление дуги в месте короткого замыкания.

2. Рассчитать на компьютере функцию $i_k(t)$ и $u(t)$ в вариантах:

2.1 При трехфазном КЗ на шинах районной обмотки трансформатора (см. рис. 2, в). Начальную фазу напряжения принять: 0, 30, 60, 90 эл. град.

2.2. При КЗ на шинах 27,5кВ (замыкание вывода трансформатора на рельс, УПК отсутствует, см. рис. 2, г). Начальную фазу принять для получения максимальной амплитуды переходного процесса (см. подраздел 1.3);

- повторить расчет при включении УПК в отсос подстанции (см. рис. 2, г);

- повторить расчет при включении усиленного трансформатора, УПК отсутствует.

2.3. Построить графики зависимости функции тока короткого замыкания $i_k(t)$ и напряжения $u(t)$ по результатам расчета (на каждом графике должно быть две кривые: напряжение и ток КЗ).

3. По результатам расчета и построенных графиков определить:

- действующее значение установившегося тока короткого замыкания;

- максимальную амплитуду тока короткого замыкания;

- фазу тока короткого замыкания установившегося режима.

4. Сделать соответствующие выводы.

5. Исходные данные для выполнения лабораторной работы принять из табл. П1.1 прил. 1.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение термину «Короткое замыкание (КЗ)» в электрических сетях.

2. Назовите причины возникновения КЗ.

3. Зачем нужно рассчитывать ток КЗ?

4. Какие виды КЗ Вы знаете? Как влияет режим нейтрали электрических сетей на токи КЗ?

5. Какие элементы входят в схему замещения при расчете КЗ на тяговой подстанции?

6. Напишите формулу, по которой Вы будете рассчитывать переходный режим тока КЗ на тяговой подстанции

7. Напишите выражение для расчета периодической составляющей тока КЗ. То же для апериодической составляющей тока КЗ.

8. Как рассчитать ударный ток КЗ?

9. Дайте формулы расчета активного и реактивного сопротивления силового трансформатора и ВЛ-110(220).

10. По какой формуле рассчитывают напряжение в дуге при КЗ?

11. Почему при включении усиленных трансформаторов уменьшается ток КЗ?

12. Покажите схему замещения при расчете КЗ при УПК в отсосе тяговой подстанции

13. Когда амплитудное значение тока КЗ в переходном процессе будет больше: при 0 или 90 эл. град. начальной фазы напряжения в момент включения?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4 «ИССЛЕДОВАНИЕ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ (КЗ) В СИСТЕМЕ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА»

Цель работы — изучить переходные процессы при коротких замыканиях (КЗ) в тяговой сети и влияющие факторы на их протекание.

При этом необходимо рассмотреть:

- метод расчета параметров контура КЗ,
- оценить влияние изменения активного и индуктивного сопротивления этого контура на характер изменения тока КЗ в переходном процессе.

1. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРОЦЕССАХ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Короткое замыкание (КЗ) в тяговой сети постоянного тока сопровождается переходным процессом при его возникновении, а затем и при отключении КЗ быстродействующими выключателями, собственное время которых 0,003 — 0,005 с. При изучении переходных процессов определяются значения как установившихся токов КЗ, так и процесс изменения тока КЗ во времени. При этом установившееся значение тока КЗ зависит от активного сопротивления контура КЗ, а характер изменения тока КЗ в начальный период зависит также и от индуктивности контура КЗ [1, 3, 7].

Переходные процессы являются быстропротекающими, длительность их составляет доли секунд. Полное время отключения КЗ включая и время гашения дуги на контактах быстродействующего выключателя, составляет 0,044 — 0,08 с. Тем не менее, изучение переходных процессов в тяговой сети важно, так как оно даёт возможность установить, как изменяются по форме и амплитуде исследуемые величины, а также определить продолжительность переходного процесса при различных режимах работы тяговой сети. Анализ переходных процессов

позволяет находить пути повышения эффективности работы коммутационной аппаратуры и релейной защиты.

Токи КЗ в системе электроснабжения тяговой сети постоянного тока зависят от сопротивления цепи короткого замыкания (КЗ). Вблизи тяговой подстанции токи КЗ могут достигать несколько десятков килоампер, и по мере удаления точки КЗ от подстанции токи снижаются. Такие токи представляют большую опасность для сетей и оборудования термическими и динамическими воздействиями. В общем случае токи КЗ в тяговой сети постоянного тока больше, чем на участках переменного тока, поэтому вероятность пережога контактных проводов возрастает.

В отличие от цепей переменного тока, где мгновенные значения тока периодически снижаются до нуля и дуга в отключающем аппарате в этот момент гаснет, в цепях постоянного тока происходит его нарастание до установившегося значения за сотые доли секунды. Отключение такого тока связано с большими трудностями. Для этого необходимы быстродействующие выключатели с максимальным током отключения 15—30 кА. Надежность отключения таких токов КЗ определяется тем, что современные быстродействующие выключатели осуществляют отключение значительно раньше момента достижения током КЗ своего максимального значения и снабжены дугогасительными камерами, эффективно удлиняющими дугу для её разрыва, и рассеивающую её энергию [1, 2, 5, 7].

2. ФОРМИРОВАНИЕ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ТОКОВ КЗ

Для исследования предлагается вариант схемы тяговой подстанции постоянного тока (рис. 1), подключенной к СВЭ. На подстанции установлены два понизительных трансформатора ($T1$ и $T2$) и преобразовательный трансформатор T_n , выпрямительная установка (ВУ) собрана по трехфазной мостовой схеме. К шинам 3,3кВ подключено сглаживающее устройство (СУ) с реактором (индуктивность L_{cy} , активное сопротивление R_{cy}) и фильтрами (Ф). Возможны схемы однозвенного и двухзвенного СУ [1].

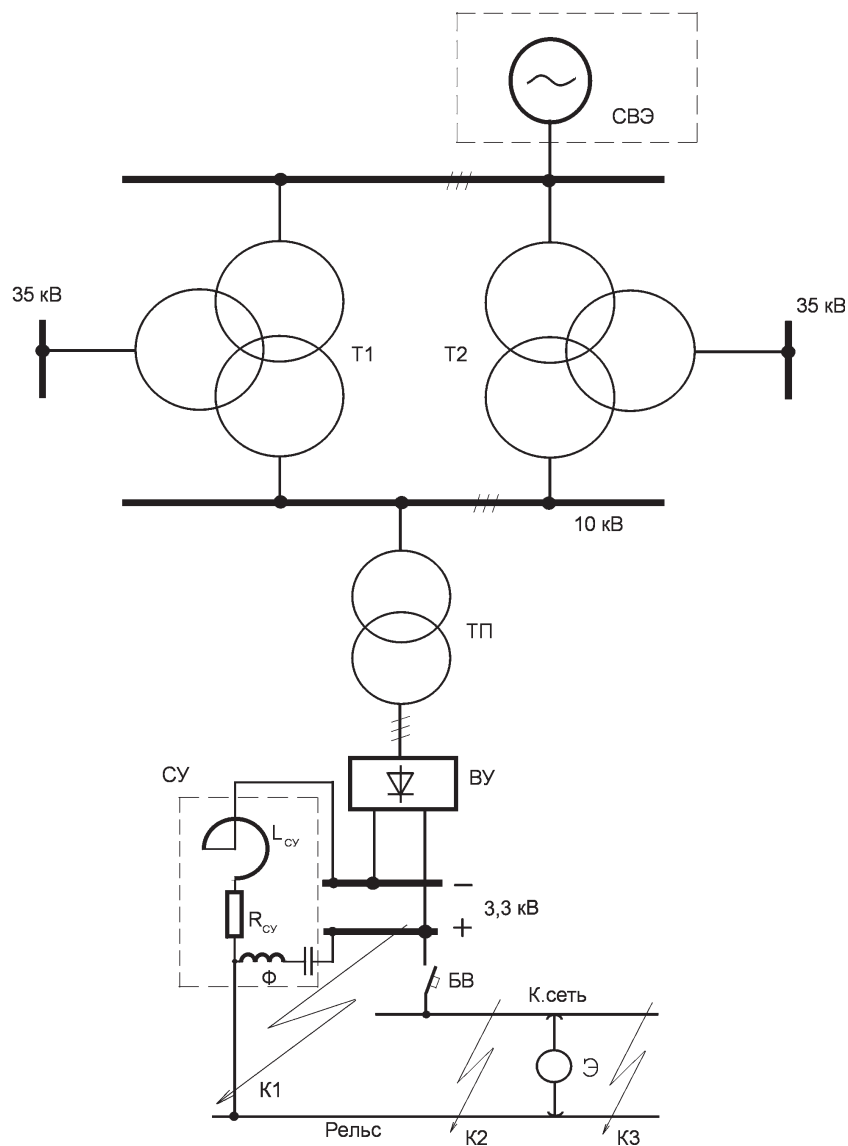


Рис.1. Схема тяговой подстанции постоянного тока

В исследованиях ограничимся вариантом КЗ на шинах 3,3кВ (К1).

В схеме замещения (рис 2, а) отмечается внутреннее сопротивление подстанции и индуктивность L_p , зависящие от сопротивления СВЭ и трансформаторов подстанции (расчет внутреннего сопротивления ρ и индуктивности L_p дан ниже), и сопротивление R_{cy} и индуктивность L_{cy} реактора СУ. При КЗ в тяговой сети следует учитывать сопротивления питающих и отсасывающих проводов тяговой подстанции и сопротивления тяговой сети. При суммировании внутреннего сопротивления подстанции и сопротивления реактора СУ получаем эквивалентную схему замещения для расчета тока КЗ на шинах 3,3кВ тяговой подстанции.

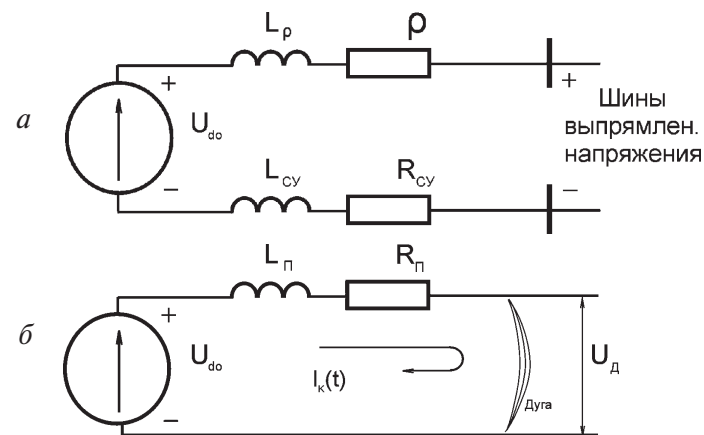


Рис.2. Схемы замещения для расчета токов КЗ тяговой подстанции постоянного тока

3. РАСЧЕТ СОПРОТИВЛЕНИЙ КОНТУРА КЗ

3.1. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ТЯГОВОЙ ПОДСТАНЦИИ

Приведём основные расчётные выражения, необходимые для определения параметров схемы замещения цепи короткого замыкания (рис. 2,б).

Сопротивление тяговой подстанции вычисляют по формуле, Ом

$$R_{\text{п}} = \rho + R_{\text{сy}}, \quad (1)$$

где ρ — внутреннее сопротивление подстанции, Ом;

$R_{\text{сy}}$ — сопротивление реактора сглаживающего устройства, Ом.

Внутреннее сопротивление подстанции определяется [3]

$$\rho = \frac{A \cdot X^* \cdot U_{\text{н}}}{(1 - A \cdot X^*) N_{\text{т}} \cdot T_{\text{н}}}, \quad (2)$$

где A — коэффициент относительного наклона внешней характеристики преобразовательного агрегата;

$U_{\text{н}}$ — номинальное напряжение на шинах выпрямленного тока, В;

$I_{\text{н}}$ — номинальный ток одного выпрямительного агрегата, А;

$N_{\text{т}}$ — число включенных в работу выпрямительных агрегатов;

X^* — суммарное индуктивное сопротивление, включенное в каждый из линейных проводов вторичных обмоток преобразовательного агрегата, выраженное в относительных единицах.

Коэффициент A принимают равным для шестипульсовых выпрямителей 0,5 и для двенадцатипульсовых выпрямителей 0,26 [3].

Номинальное напряжение $U_{\text{н}}$ принимают равным 3300 В.

Значение X^* вычисляют по формуле [3, 7]

$$X^* = \frac{S_{\text{т}} \cdot N_{\text{т}}}{S_{\text{с}}} + \frac{u_{\text{кп}} \cdot S_{\text{т}} \cdot N_{\text{т}}}{100 \cdot S_{\text{п}} \cdot N_{\text{п}}} + \frac{u_{\text{кт}}}{100}, \quad (3)$$

где $S_{\text{т}}, S_{\text{п}}$ — номинальные мощности первичных обмоток соответственно тягового (преобразовательного) и понизительного трансформаторов, МВА;

$u_{\text{кт}}, u_{\text{кп}}$ — напряжения короткого замыкания соответственно тягового и понизительного трансформаторов, %;

$S_{\text{с}}$ — мощность короткого замыкания на вводах в тяговую подстанцию, МВ·А;

$N_{\text{п}}$ — число включенных в работу понизительных трансформаторов.

Параметры трансформаторов, номинальные токи преобразовательных агрегатов и мощности короткого замыкания, заимствованные из [2, 3], приведены в прилагаемых таблицах (прил. 1) и принимаются в лабораторной работе в зависимости от шифра студента.

3.2. Установившееся значение тока КЗ

Установившееся значение тока короткого замыкания на шинах выпрямленного напряжения равно A ,

$$I_{\text{кз}} = U_{\text{д0}} / R_{\text{п}}. \quad (4)$$

В лабораторной работе для упрощения расчетов принимаем

$$U_{\text{д0}} = 3600 \text{ В},$$

Падение напряжения на дуге определяется [3], В,

$$U_{\text{д}} = 1350 \cdot L_{\text{y}} \cdot n_{\text{из}} \cdot b, \quad (5)$$

где L_{y} — длина пути утечки по поверхности одного изолятора, м;

$n_{\text{из}}$ — число изоляторов в гирлянде;

b — коэффициент, учитывающий возможность развития дуги по наикратчайшему пути.

Рекомендуется в лабораторной работе принять

$$L_{\text{y}} = 0,3; n = 2; b = 0,9.$$

Указанные расчеты действительны и при КЗ в тяговой сети. В этом случае следует лишь добавить в выражении (1) сопротивление тяговой сети (включая отсасывающий и питающий провода). В рассматриваемой лабораторной работе ограничимся исследованиями при КЗ на шинах выпрямленного напряжения. Расчет токов при КЗ в тяговой сети дается в курсе «Релейная защита» [3].

3.3. ФОРМИРОВАНИЕ УРАВНЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ФУНКЦИИ ТОКА КЗ ОТ ВРЕМЕНИ

Обходя по контуру цепь КЗ (рис 2,б), напишем дифференциальное уравнение баланса напряжений в этом контуре

$$U_{\text{расч}} = i_{\text{к}}(t) \cdot R_{\text{п}} + L_{\text{п}} \cdot i_{\text{к}}'(t) + U_{\text{д}}$$

или

$$i_{\text{к}}'(t) L_{\text{п}} + i_{\text{к}}(t) R_{\text{п}} = U_{\text{расч}} - U_{\text{д}}, \quad (6)$$

где $L_{\text{п}}$ — суммарная индуктивность цепи КЗ, Гн;

$R_{\text{п}}$ — суммарное активное сопротивление цепи КЗ, Ом.

Решение (6) следующее

$$i_{\text{к}}(t) = I_{\text{кз}} (1 - e^{-t/T}), \quad (7)$$

где T — постоянная времени цепи КЗ, $T = L_{\text{п}} / R_{\text{п}}$;

Тем не менее, предлагается для общности рассуждений решить дифференциальное уравнение (6), используя пакет компьютерной математики Mathcad — 13 [10]. В прил. 2 приведена процедура решения дифференциального уравнения в Mathcad-13.

При КЗ на шинах выпрямленного напряжения $R_{\text{п}}$ определяется по формуле (1), а $L_{\text{п}}$ вычисляются

$$L_{\text{п}} = L_{\text{р}} + L_{\text{св}}$$

$$L_{\text{р}} = (X^* \cdot U_{\text{т}} / S_{\text{т}}) / 2\pi f,$$

где X^* — относительное значение суммарного индуктивного сопротивления СВЭ и трансформаторов подстанции, определяемое по выражению (3).

$U_{\text{т}}$ — напряжение вентильной обмотки тягового трансформатора;

Значение $2\pi f = 2 \times 3,14 \times 50$.

Напряжение $U_{\text{т}}$ для преобразователя «звезда — две обратные звезды с уравнительным реактором» равно 3020 В (трансформаторы УТМРУ, ТМП, ТМПУ), для мостовой схемы преобразователя — 1520 В (трансформаторы ТДП и ТДПУ) и для двенадцатипульсовой схемы — 2610 В (трансформаторы ТРДП) [2].

При исследовании токов КЗ следует принять индуктивность реактора в двух вариантах СУ [1]:

однозвенное СУ — $L_{\text{св}1} = 5$ мГн;

двухзвенное СУ — $L_{\text{св}2} = 10$ мГн.

4. ЗАДАЧИ И ПЛАН ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

4.1. Рассчитать активные и индуктивные сопротивления цепи короткого замыкания: сопротивление системы внешнего энергоснабжения, сопротивление подстанции и величину падения напряжения в дуге.

4.2. Рассчитать установившийся ток КЗ на шинах выпрямленного напряжения в вариантах:

4.2.1. На подстанции включен один понизительный трансформатор, а затем подключается второй (при этом принять однозвенное сглаживающее устройство),

4.2.2. Включено однозвенное СУ, а затем заменить на двухзвенное СУ (при этом принять один включенный понизительный трансформатор)

В п. п. 4.2.1 и 4.2.2 принять работающими один преобразовательный трансформатор ($T_{\text{п}}$) и одно выпрямительное устройство (ВУ).

4.3. Рассчитать на компьютере функцию $i_{\text{к}}(t)$ в вариантах по п. п. 4.2.1. и 4.2.2.

4.4. Построить графики функции тока короткого замыкания $i_{\text{к}}(t)$ в указанных вариантах (в одних осях показать три графика).

4.5. Сделать соответствующие выводы о зависимости тока короткого замыкания от параметров схемы замещения цепи КЗ.

При этом обратить внимание:

- от какого параметра изменяется установившееся значение тока КЗ;
- от какого параметра изменяется начальная скорость нарастания тока КЗ.

Исходные данные для выполнения лабораторной работы взять из табл. П 1.2 прил. 1.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Почему в общем случае в тяговой сети постоянного тока уровень токов КЗ выше, чем в тяговой сети переменного тока?
2. Составьте схему замещения для расчета тока КЗ на тяговой подстанции постоянного тока
3. Напишите формулу для расчета внутреннего сопротивления подстанции.
4. Как определить постоянную времени короткозамкнутой цепи в расчетах токов КЗ на подстанции постоянного тока?
5. Дайте формулу расчета установившегося значения тока КЗ?
6. От какого сопротивления зависит установившееся значение тока КЗ? От какого сопротивления зависит начальная скорость нарастания тока КЗ?
7. Почему в тяговых сетях постоянного тока при отключении КЗ не достигается установившееся значение тока КЗ?
8. Какое собственное значение времени отключения быстродействующего автомата и за какое полное время отключается ток КЗ?
9. Если увеличить мощность трансформаторов на тяговой подстанции, то установившееся значение тока КЗ увеличится или уменьшится?
10. Если увеличить индуктивность реактора сглаживающего устройства, то что изменится в переходном процессе тока КЗ?
11. Как рассчитать напряжение в дуге при КЗ?
12. Расскажите, как отключается ток КЗ в быстродействующем автомате, акцентируя внимание на учет собственного времени автомата, времени расхождения контактов и времени горения дуги.

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Бей Ю. М., Мамошин Р. Р., Пупынин В. Н., Шалимов М. Г. Тяговые подстанции. — М.: Транспорт, 1986. — 319 с.
2. Силовое оборудование тяговых подстанций железных дорог (сборник справочных материалов), ОАО «РЖД». — М.: Трансиздат, 2004. — 384 с.
3. Фигурнов Е. П. Релейная защита. — М.: Желдориздат, 2002. — 720 с.
4. Бородулин Б. М., Герман Л. А., Николаев Г. А. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог. — М.: Транспорт, 1983. — 183 с.

Дополнительная

5. Почаевец В. С. Электрические подстанции: Учеб. для техникумов и колледжей ж.-д. тр-та. — М.: Желдориздат, 2001. — 512 с.
6. Расчёт коротких замыканий и выбор электрооборудования/И.П. Крючков, Б.Н. Неклепаев, В.А. Старшинов и др.; Под ред. Крюčkова И.П. и Старшинова В.А. — М.: «Академия», 2005. — 416 с.
7. Кузнецов С. М. Защита тяговой сети от токов короткого замыкания: уч. пос. — Новосибирск: НГТУ, 2005. — 352 с.
8. Электрооборудование электрических станций и подстанций /Л. Д. Рожкова, Л. К. Карнеева, Т. В. Чиркова. — М.: «Академия», 2004. — 448 с.
9. Серебряков А. С., Шумейко В. В. Mathcad и решение задач электротехники. — М.: Маршрут, 2005.— 240с.
10. Васильев А. Н. Mathcad-13 на примерах. — СПб.: БХВ-Петербург, 2006. — 528с.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Таблица П1.1

Исходные данные для выполнения лабораторной работы 1
«Исследование токов КЗ в системе тягового электроснабжения переменного тока»

Исходные данные	Предпоследняя цифра учебного шифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Мощность КЗ энергосистемы, МВ · А, S_c	500	1000	1500	500	1000	1500	500	1000	1500	500
Тип, мощность и напряжение понижающих трансформаторов	ТДТНЭ 40000/110 115/27.5/11	ТДТНЭ 25000/110 115/38.5/27.5	ТДТНЭ 25000/110 115/27.5/П	ТДТНЭ 25000/110 115/38.5/27.5	ТДТНЭ 25000/110 115/38.5/27.5	ТДТНЭ 25000/110 115/38.5/27.5	ТДТНЭ 25000/110 115/38.5/27.5	ТДТНЭ 40000/110 115/38.5/27.5	ТДТНЭ 40000/110 115/38.5/27.5	ТДТНЭ 25000/110 115/27.5/11

Таблица П1.2

Исходные данные для лабораторной работы 2
«Исследование токов КЗ в системе тягового электроснабжения постоянного тока»

Исходные данные	Последняя цифра учебного шифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Мощность КЗ энергосистемы, МВ · А, S_c	500	1000	1500	500	1000	1500	500	1000	1500	500
Тип, мощность и напряжение понижающих трансформаторов	ТДТН 40000/110 115/38.5/11	ТДТН 25000/110 115/38.5/11	ТДТН 16000/110 115/38.5/11	ТДТН 25000/110 115/38.5/11	ТДТН 16000/110 115/38.5/11	ТДТН 16000/110 115/38.5/11	ТДТН 25000/110 115/38.5/11	ТДТН 25000/110 115/38.5/11	ТДТНЭ 40000/110 115/38.5/11	ТДТН 16000/110 115/38.5/11
Тип преобразовательных трансформаторов	ТРДП 16000/10 ЖУ1	ТРДП 16000/10 ЖУ1	ТРДП 12500/10 ЖУ1	ТРДП 16000/10 ЖУ1	ТРДП 12500/10 ЖУ1	ТРДП 16000/10 ЖУ1	ТРДП 16000/10 ЖУ1	ТРДП 16000/10 ЖУ1	ТРДП 16000/10 ЖУ1	ТРДП 12500/10 ЖУ1

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПАКЕТА МАТНСАД-13 ДЛЯ РЕШЕНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ

- Для решения дифференциального уравнения целесообразно применить достаточно универсальную процедуру (функцию) `Odesolve(t, tn)`, где t и t_n — соответственно переменная интегрирования и конец отрезка интегрирования. Эта функция решает дифференциальное уравнение методом Рунге-Кутты с фиксированным шагом. Для перехода на автоматический (адаптивный) шаг нужно щелкнуть в рабочем документе по имени функции правой кнопкой мыши и выбрать в появившемся меню пункт `Adaptive`.
- Общий принцип работы с указанной процедурой состоит в следующем. Прежде всего перед функцией `Odesolve` необходимо поместить ключевое слово `Given`. Затем вводится дифференциальное уравнение и начальные условия (в записи производных удобно использовать «штрих» — знак производной, как обычно)

Окончательно обращение к функции имеет следующий вид

$$y:=\text{Odesolve}(t,t_n),$$

где y — имя искомой функции $y(t)$ (в рассматриваемых лабораторных работах — это функция тока КЗ $i_k(t)$).