

ОПАСНОЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ОБРАТНОЙ ТЯГОВОЙ СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НАПРЯЖЕНИЕМ 25 кВ НА УСТРОЙСТВА ЖАТ

МАНАКОВ Александр Демьянович, д-р техн. наук, старший научный сотрудник Центра компьютерных железнодорожных технологий; e-mail: manakoff_2@mail.ru

РАХМОНБЕРДИЕВ Абдулазиз Абдимажитович, аспирант кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»; e-mail: raa19860102@gmail.com

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург

При электрической тяге поездов на устройства железнодорожной автоматики и телемеханики, подключенные к рельсам или расположенные в непосредственной близости с обратной тяговой рельсовой сетью, воздействуют перенапряжения и сверхтоки при аварийных процессах в тяговой сети. Для разработки на математических моделях средств и систем защиты от перенапряжений и сверхтоков требуется разработка модели источника опасных электромагнитных воздействий на разном удалении места короткого замыкания от тяговой подстанции и при различных эксплуатационных условиях. В статье на основе метода переменных состояния разработана распределенная математическая модель тяговой сети переменного тока напряжением 25 кВ. Предлагается после проведения компьютерных экспериментов сложную схему замещения тяговой сети заменить эквивалентными параметрами для каждой полуволны тока короткого замыкания. Проведена верификация предлагаемой модели тяговой сети.

Ключевые слова: тяговая сеть переменного тока; короткое замыкание; аварийные процессы; переходной процесс; опасное электромагнитное воздействие; рельсовая цепь; математическая модель; метод переменных состояния.

DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-03-233-251

▼ Введение

Устройства железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) служат для регулирования движения поездов и обеспечивают безопасность их движения. Рельсовые цепи (РЦ) являются основными устройствами, контролирующими целостность рельсовой линии, определяющими местоположение поездов на железнодорожной линии и тем самым обеспечивающими безопасность движения поездов. Оборудование устройств РЦ, счетчики осей, путевые устройства системы автоматического управления торможением поезда (САУТ) находятся в непосредственной близости с рельсовой линией или гальванически связаны с ней. Рельсовая линия (обратная тяговая рельсовая сеть) используется в качестве направляющей системы, в которой проходят: обратный тяговый ток на тяговую подстанцию; сигналы рельсовых цепей; информационные сигналы от постовых и напольных устройств

на подвижной состав, например, в системах автоматической локомотивной сигнализации непрерывного действия (АЛСН), автоматического регулирования скорости (АРС) и др.

Работа РЦ и тяговой сети взаимно связаны. Тяговая сеть (ТС) в этой связи является определяющей. При разработке устройств РЦ должны учитываться все процессы в ТС в нормальном и аварийном режимах.

На электрифицированных участках по системе электроснабжения тяги переменного тока напряжением 25 кВ применяются системы «провод — рельс» (ПР) и «два провода — рельс» (ДПР) в качестве резервного источника питания устройств ЖАТ. Обрыв контактного провода, перекрытие изоляции контактной подвески, короткие замыкания (КЗ) на электровозе приводят к возникновению перенапряжений и сверхтоков в цепях ЖАТ электрически или магнитно связанных с ТС [1–8]. Перенапряжения и (или) сверхтоки,

в результате действия которых происходит повреждение и (или) разрушение ТС, будем называть опасными электромагнитными воздействиями (ОЭМВ). При ОЭМВ пробивается изоляция обмоток трансформаторов и реле, воздушных и кабельных линий. Происходят: соотнесение проводов и (или) соединение этих проводов с корпусом ТС, испарение рабочей поверхности полупроводника (разрыв цепи), плавление кристалла полупроводникового элемента (КЗ цепи).

В настоящее время продолжается техническое перевооружение релейно-контактных систем ЖАТ на микроэлектронную элементную базу. В результате этого снижаются уровни рабочих сигналов и электрическая прочность оборудования, а также — токонесущая способность элементов систем ЖАТ. В связи с этими факторами требуется снижать критические уровни допустимых энергий ОЭМВ на устройства ЖАТ на базе микроэлектронных элементов. Для этого требуется определить характеристики ОЭМВ (перенапряжений и сверхтоков), действующие на устройства ЖАТ, и разработать новые методы и средства защиты от ОЭМВ.

При исследовании на математических моделях средств защиты устройств ЖАТ от ОЭМВ требуется разработка математических моделей источника ОЭМВ. Известно, что действительный ток КЗ в тяговой сети состоит из суммы принужденного и свободного тока. В зависимости от фазы напряжения питания тяговой сети, при котором происходит аварийный процесс, ток КЗ будет иметь для каждой полуволны различные амплитуды и длительности, до установившегося процесса. Различные полуволны тока КЗ будут оказывать разное воздействие на устройства защиты от перенапряжений и сверхтоков устройств ЖАТ.

Целью статьи является разработка модели тягой сети для каждой полуволны тока короткого замыкания, позволяющей на математических моделях оценивать эффективность средств защиты устройств ЖАТ от коммутационных перенапряжений и сверхтоков в обратной тяговой рельсовой сети и создавать высоконадежные системы защиты.

1. ОЭМВ тока короткого замыкания на устройства РЦ

На рис. 1 приведена схема участка железной дороги, оснащенного устройствами ЖАТ при электрической тяге переменного тока напряжением 25 кВ, где: ТП — тяговая подстанция; БВ ТП — быстродействующий автоматический выключатель на тяговой подстанции; ТТ — тяговый трансформатор; ИО — изоляция опоры; РР — роговой разрядник; КП — контактный провод; ДПР — провода резервного источника питания устройств ЖАТ по системе «два провода — рельс»; КЗ — короткое замыкание контактного провода на рельс; РНД-35/1000 — разъединитель высоковольтный наружной установки двухколонковый; КТПО — комплектная трансформаторная подстанция; РТФ-35/1-5 — разрядник трубчатый фибробакелитовый; ПКТ-35/1000 — предохранитель высоковольтный с кварцевым наполнителем в патроне для защиты силовых трансформаторов; ЗНОМ-35/65У1 — заземляемый трансформатор напряжения питания устройств ЖАТ; НВШ — низковольтный шкаф; ИПМ-62 — искровой промежуток многократного действия; ВК — выравнивающий контур; РШ — релейный шкаф; ВОЦН-220 — выравниватель оксидно-цинковый с ножевыми выводами; РКВН-250 — разрядник керамический вентильный с ножевыми выводами; ДТ1-150 — дроссель-трансформатор (ДТ); Св.3(5) — (проходные) светофоры системы автоблокировки; ПЯ — путевой ящик; АВМ-2 — автоматический выключатель многократного действия; ПРТ-А — путевой релейный трансформатор общепромышленного исполнения (изолирующий трансформатор); ВОЦН-380 — выравниватель оксидно-цинковый с ножевыми выводами; РЦ 7ПР — аппаратура приемного конца для РЦ седьмого блок участка; РЦ 5ПТ — аппаратура питающего конца для РЦ пятого блок участка.

Причины повреждения контактной сети показаны на рис. 2 [9]. В случае КЗ контактного провода (КП) на рельсовую линию в тяговой сети развивается переходной процесс со значительными перенапряжениями и токами в контактном проводе и линии ДПР. Эти перенапряжения влияют на разрядники, установленные в

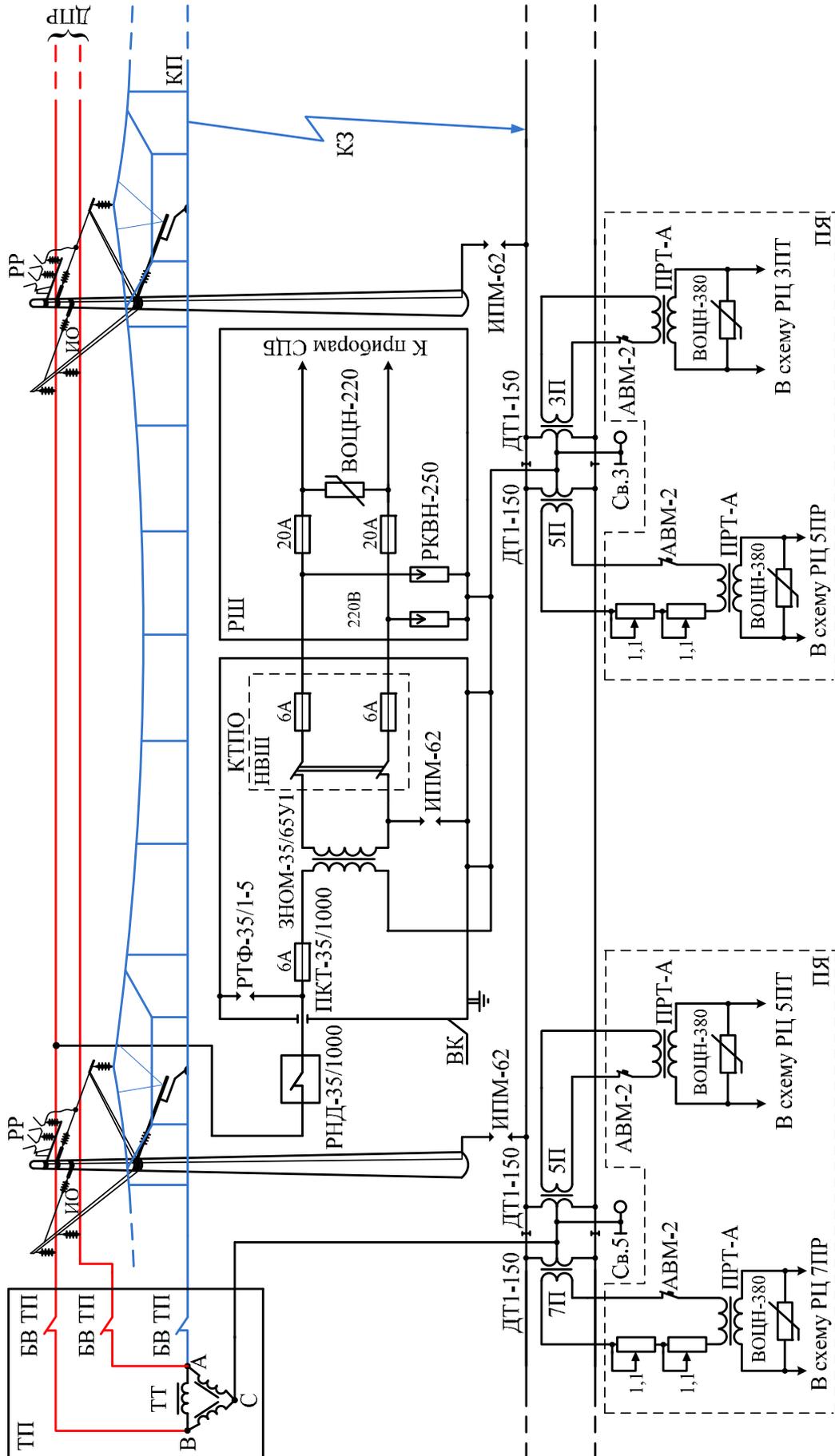


Рис. 1. Схема участка железной дороги тяговой сети переменного тока напряжением 25 кВ



Рис. 2. Повреждения контактной сети по причине их возникновения

РШ устройств ЖАТ. Для защиты вводов питания устройств ЖАТ от продольных перенапряжений («провод — земля») применяются разрядники типа РКВН-250¹, а для защиты от поперечных перенапряжений («провод — провод») — выравниватели типа ВОЦН-220 и ВОЦН-380¹ [10, 11].

При коммутационных перенапряжениях в результате срабатывания средств защиты в РШ пробиваются искровые промежутки и вентиляционные диски разрядников РКВН-250, диски оксидноцинковых варисторов ВОЦН-220 и ВОЦН-380, имеющих нелинейные свойства. При этом происходит КЗ трансформаторов питания устройств ЖАТ, плавление изоляции и возгорание вводного кабеля в РШ, что приводит к задержкам в движении поездов.

В месте КЗ контактного провода на рельс возникают большие величины токов КЗ.

¹Руководящие указания по защите от перенапряжений устройств СЦБ (РУ-90). — М.: Транспорт, 1990. — 60 с.

Следовательно, из-за этих токов создаются значительные потенциалы на рельсах [12].

Известно, что контактная сеть — это защитный экран для рельсовых линий от прямых попаданий молнии. Поэтому атмосферные перенапряжения рассматриваются как одна из причин перекрытия изоляции и искровых промежутков в контактной сети. После перекрытия изоляции в тяговой сети развивается ток КЗ, который действует до срабатывания на тяговой подстанции БВ ТП [1]. При селективной защите с выдержкой времени и срабатывании первой ступени защиты время воздействия тока КЗ на устройства рельсовых цепей (t_3) равно 0,14 с. При селективной защите с выдержкой времени и условиями срабатывания второй ступени защиты $t_3 = 0,64$ с. При неселективной защите межподстанционной зоны $t_3 = 0,37$ с [13].

В случае КЗ по полуобмотке ДТ течет ток КЗ. В результате создается ОЭМВ на устройстве РЦ. Расстояние от места КЗ до ТП, тип

контактной подвески, фаза напряжения питания тяговой сети при которой происходит КЗ, тип рельса, значение сопротивления «рельс — земля» (R_{p-3}), величина сопротивления земли (R_3) являются важными факторами, влияющими на значение тока КЗ в рельсах.

Электромагнитные процессы в тяговой сети переменного тока напряжением 25 кВ являются сложными, а выражения для описания этих сложных процессов при исследовании средств защиты устройств РЦ от коммутационных перенапряжений в тяговой сети — громоздкими. Поэтому разработка упрощенной схемы источника ОЭМВ, эквивалентной исходной схеме источника, является актуальной задачей.

В данной работе предлагается исследовать аварийные процессы в тяговой сети, в зависимости от места КЗ и параметров тяговой сети, для создания модели источника ОЭМВ на устройства РЦ. Далее, для исследования средств защиты РЦ от коммутационных перенапряжений и сверхтоков рекомендуется заменить тяговую сеть со сложными электромагнитными связями на эквивалентные параметры для каждой полуволны тока КЗ.

2. Аналитический обзор исследований переходных процессов в тяговой сети при коротком замыкании контактного провода на рельс

Исследованием аварийных процессов в тяговой сети переменного тока при КЗ контактного провода на рельс занимались известные ученые, такие как К. А. Любимов, И. Г. Евсеев, Е. П. Фигурнов, К. Г. Кучма, И. А. Цецура, Г. Г. Марквардт, В. С. Ляличев, И. И. Рыков [2, 3, 13–21]. Задачей исследования этих работ является определение тока КЗ в контактном проводе как функции параметров тяговой сети, с целью совершенствования схем защиты контактной сети и оборудования ТП от воздействия аварийного тока. Проведенные исследования осуществлялись с помощью натуральных экспериментов, физического моделирования и на математических моделях.

Экспериментальным определениям токов в КП посвящены работы [2, 3, 15]. Натурные эксперименты дают возможность получить

точные результаты исследований при создании КЗ в тяговой сети переменного тока. Проведение натуральных экспериментов связано с задержками движения поездов и нарушением в работе устройств ЖАТ. Поэтому этот метод считается малоэффективным.

Физические модели тяговой сети переменного тока, с помощью которых возможно исследовать токи КЗ, рассмотрены в работах [16, 17]. Исследование на физической модели дает возможность сэкономить большие ресурсы, но происходящий процесс в физической модели не соответствует процессу в реальном (физическом) объекте, так как для перехода от процессов на физической модели к реальным процессам требуется подбор масштабных коэффициентов, что приводит к возникновению больших ошибок.

В работах [13, 14, 18–21] проведены исследования токов КЗ в тяговой сети переменного тока путем математического моделирования. Отличие этого метода от экспериментального исследования в том, что при таких исследованиях не прерывается питание тяговой сети. Сопротивление заземлителя на ТП и сопротивление между рельсами и землей R_{p-3} , воздействующие на ток КЗ в рельсах, не учтены в математических моделях, изложенных в работах [13, 14, 19].

Наиболее универсальная математическая модель приведена в работе [18]. В этой модели учтены сопротивления заземлителя ТП и сопротивления R_{p-3} , оказывающие влияние на характеристики аварийного процесса. Модель позволяет исследовать характеристики токов КЗ тяговой сети переменного тока и постоянного тока. В работах [20, 21] тяговая сеть рассматривается как линия с сосредоточенными параметрами. Схемы замещения не учитывают растекание тока КЗ в земле.

В работе [22] осуществлен анализ установившихся режимов электроэнергетической сети методом переменных состояния. Отмечаются широкие возможности метода для анализа электрических сетей.

В статье разрабатывается математическая модель тяговой сети переменного тока напряжением 25 кВ с распределенными параметрами на основе метода переменных состояния.

3. Математическая модель тяговой сети переменного тока напряжением 25 кВ

Схема замещения тяговой сети приведена на рис. 3, где: $U_{ТП}$ — напряжение на тяговом трансформаторе; R_E — сопротивление фазовой обмотки тягового трансформатора; L_E — индуктивность фазовой обмотки тягового трансформатора; $R_{(P-3)1}, \dots, R_{(P-3)N}$ — сопротивление 1 км участка рельсовой линии между рельсами и землей (сопротивления «рельс — земля»), где N — количество участков протяженностью в 1 км; R_0 — сопротивление между землей и рельсами у места присоединения отсасывающего фидера тяговой подстанции; R_{K1}, \dots, R_{KN} — сопротивление 1 км контактной подвески; L_{K1}, \dots, L_{KN} — индуктивность 1 км контактной подвески; R_{P1}, \dots, R_{PN} — сопротивление 1 км рельсов; L_{P1}, \dots, L_{PN} — индуктивность 1 км рельсов; C — емкость конденсаторов установки поперечной компенсации; L — индуктивность реактора установки поперечной компенсации; $R_{ИР1}, \dots, R_{ИРН}$ — сопротивление 1 км изоляции между контактной подвеской и рельсами; R_L — сопротивление, устанавливаемое по условиям метода переменных состояния.

Известно, что методы узловых потенциалов, контурных токов и переменных состояния являются основными методами для анализа электрических цепей. Состав физических величин, выбираемых в качестве переменных, играет определяющую роль при различии этих методов [23].

В методах контурных токов и узловых потенциалов используются токи и напряжения — однотипные переменные, и уравнения составляются в однородном координатном базисе. В таких методах необходимо обращать параметрические матрицы при решении систем дифференциальных уравнений. Из всех операций над матрицами обращение матриц является наиболее трудоемкой, требующей больших затрат времени. В методе переменных состояния обращение параметрических матриц не требуется [23].

В электрической цепи процессы перехода из одного режима в другой, проходящие во времени, связаны с изменением ее энергетического состояния. Поэтому выбор искомым переменных величин, характеризующих

электрическое состояние электрической цепи, позволяет минимизировать число переменных в системе дифференциальных уравнений. Переменными, характеризующими запас энергии в цепи, могут быть токи в индуктивных элементах и напряжения на емкостных элементах. Такие переменные называются переменными состояния [23].

В методе переменных состояния возможно получить системы дифференциальных уравнений в нормальной форме Коши, разрешимой относительно производных. Возможность построить универсальные алгоритмы анализа, не накладывающие ограничений на структуру анализируемых схем и характер входящих в них компонентов, являются основными преимуществами метода переменных состояния. Кроме того, метод переменных состояния совмещается со многими численными методами анализа, реализованными в наиболее общеупотребительных стандартных программах решения дифференциальных уравнений, требующих записи уравнений в нормальной форме.

С помощью переменных состояния проводились исследования опасных электромагнитных воздействий тяговой сети переменного тока напряжением 25 кВ на устройства РЦ. При использовании этого метода напряжения на индуктивностях и токи через емкости, а также напряжения и токи неактивных элементов схемы $y(t)$ выражаются через переменные состояния $x(t)$ и независимые источники тока и напряжения $u(t)$.

Нахождение векторов токов и напряжений неактивных элементов — $y(t)$ и напряжений на индуктивностях и токов через емкости для начального момента времени осуществляются по выражениям (1) и (2). Но при этом есть условия: независимые источники тока и напряжения $u(t)$, а также начальные значения переменных состояния $x(t)$ должны быть известны.

$$\dot{x}(t) = f_1[x(t), u(t)], \quad (1)$$

$$y(t) = f_2[x(t), u(t)], \quad (2)$$

Решается дифференциальное уравнение (1) для определения значения вектора $x(t)$ (переменных состояния) для конца определенного

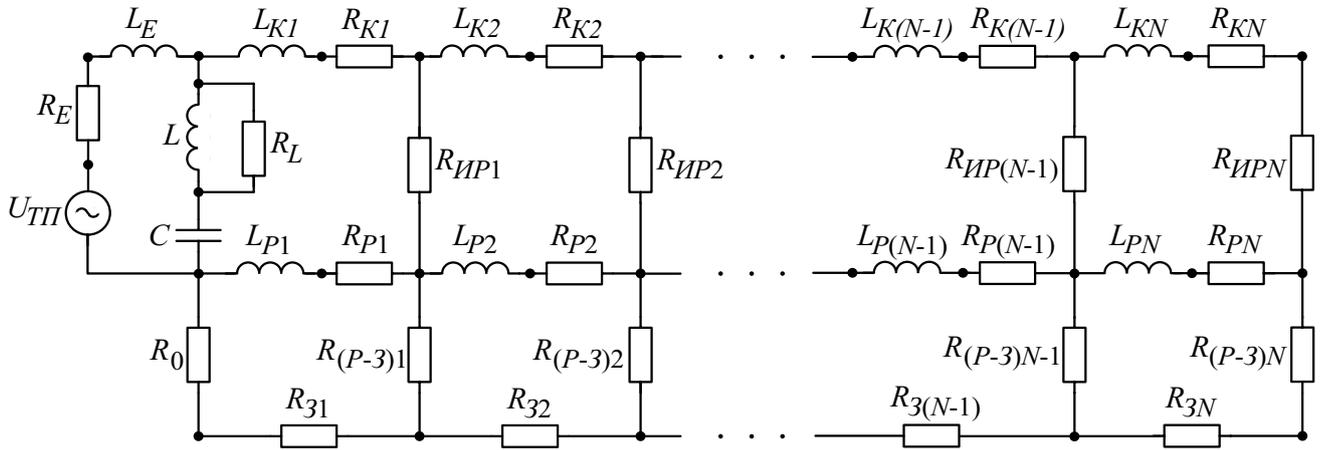


Рис. 3. Схема замещения тяговой сети переменного тока напряжением 25 кВ

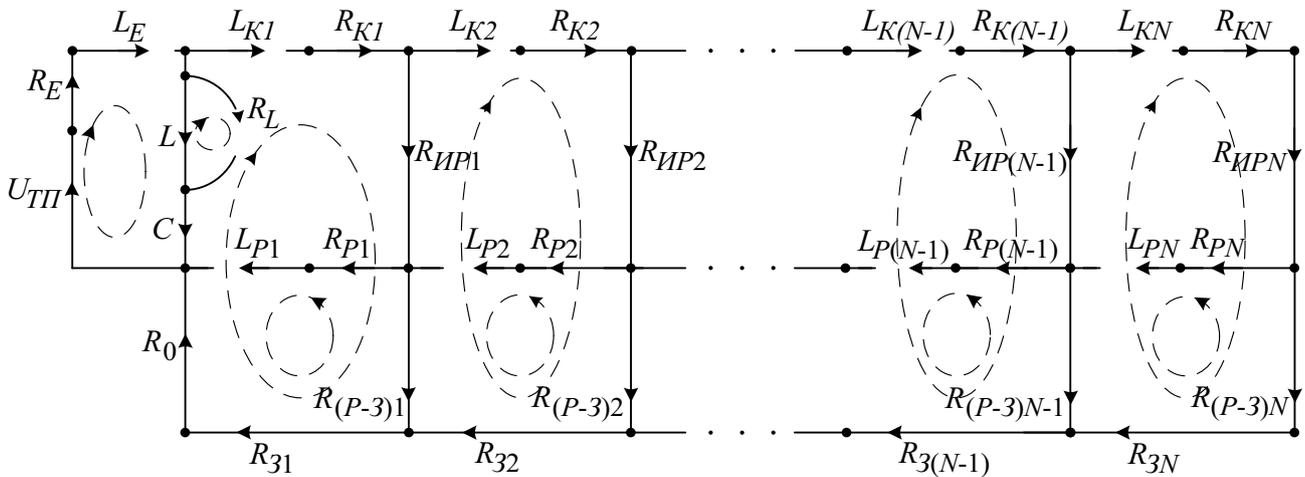


Рис. 4. Дерево линейно направленного графа схемы замещения тяговой сети переменного тока напряжением 25 кВ, показанной на рис. 3

шага интегрирования. Далее, определенное значение вектора $x(t)$ используется как начальное значение для следующего шага интегрирования. Эти операции повторяются заданное число раз [23].

При методе переменных состояния используется топологическая матрица контур-ветвь (F -матрицы). При этом уравнения токов и напряжений Кирхгофа выражаются через F -матрицу.

$$U^C(t) = -F \cdot U^B(t), \quad (3)$$

$$I^B(t) = F^T \cdot I^C(t), \quad (4)$$

где F^T — транспонированная F -матрица; $U^B(t)$, $I^B(t)$ — векторы напряжений и токов ветвей линейного направленного графа схемы; $U^C(t)$, $I^C(t)$ — векторы напряжений и токов связей линейного направленного графа схемы.

В методе переменных состояния применяются дифференциальные уравнения первого порядка. Количество дифференциальных уравнений равно количеству реактивных составляющих схемы. По условиям метода переменных состояния составлен линейный направленный граф для схемы замещения тяговой сети переменного тока напряжением 25 кВ. Далее, на основе линейно направленного графа составлено дерево направленного графа схемы (рис. 4).

На рис. 4 стрелками отмечены направления токов во всех компонентах схемы, сплошными линиями представляются ветви дерева линейно направленного графа, а пунктирными линиями — связи дерева линейно направленного графа. Контурные с положительным обходом тока в замкнутых контурах обозначены штриховыми окружностями.

С помощью дерева линейно направленного графа составлена топологическая F -матрица (рис. 5). Принцип составления F -матрицы показан в работе [23].

Используя F -матрицу были составлены системы алгебраических и дифференциальных уравнений в форме Коши.

Напряжения на сопротивлениях ветвей U_R^B :

$$\begin{cases} U_{RE} = R_E \cdot I_{LE}; \\ U_{RL} = R_L \cdot (I_{LE} - I_L - I_{LK1}); \\ U_{RK1} = R_{K1} \cdot I_{LK1}; \\ \dots \\ U_{RKN} = R_{KN} \cdot I_{LKN}; \\ U_{RP1} = R_{P1} \cdot I_{LP1}; \\ \dots \\ U_{RPN} = R_{PN} \cdot I_{LPN}; \\ U_{R31} = R_{31} \cdot (I_{LK1} - I_{LP1}); \\ \dots \\ U_{R3N} = R_{3N} \cdot (I_{LKN} - I_{LPN}); \\ U_{R0} = R_0 \cdot (I_{LK1} - I_{LP1}); \\ U_{R(P-3)1} = R_{(P-3)1} \cdot (I_{LK1} - I_{LK2} - I_{LP1} + I_{LP2}); \\ \dots \\ U_{R(P-3)N} = R_{(P-3)N} \cdot (I_{LKN} - I_{LPN}); \\ U_{RIP1} = R_{IP1} \cdot (I_{LK1} - I_{LK2}); \\ \dots \\ U_{RIPN} = R_{IPN} \cdot I_{LKN}; \end{cases} \quad (5)$$

токи через сопротивления ветвей I_R^B :

$$\begin{cases} I_{RE} = I_{LE}; \\ I_{RL} = I_{LE} - I_L - I_{LK1}; \\ I_{RK1} = I_{LK1}; \\ \dots \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} I_{RKN} = I_{LKN}; \\ I_{RP1} = I_{LP1}; \\ \dots \\ I_{RPN} = I_{LPN}; \\ I_{R31} = I_{LK1} - I_{LP1}; \\ \dots \\ I_{R3N} = I_{LKN} - I_{LPN}; \\ I_{R0} = I_{LK1} - I_{LP1}; \\ I_{R(P-3)1} = I_{LK1} - I_{LK2} - I_{LP1} + I_{LP2}; \\ \dots \\ I_{R(P-3)N} = I_{LKN} - I_{LPN}; \\ I_{RIP1} = I_{LK1} - I_{LK2}; \\ \dots \\ I_{RIPN} = I_{LKN}; \end{cases} \quad \text{окончание (6)}$$

ток через емкость ветви I_C^B :

$$I_C = I_{LE} - I_{LK1}; \quad (7)$$

напряжения на индуктивностях связей U_L^C :

$$\begin{cases} U_{LE} = -U_{TP} - U_C - U_{RE} + U_{RL}; \\ U_L = U_{RL}; \\ U_{LK1} = U_C + U_{RL} - U_{RK1} - U_{R0} - U_{R31} - U_{RIP1}; \\ U_{LK2} = -U_{RK2} + U_{R(P-3)1} - U_{R(P-3)2} - U_{R32} + \\ + U_{RIP1} - U_{RIP2}; \\ \dots \\ U_{LKN} = -U_{RKN} + U_{R(P-3)N-1} - U_{R(P-3)N} - U_{R3N} + \\ + U_{RIP(N-1)} - U_{RIPN}; \\ U_{LP1} = -U_{RP1} + U_{R0} + U_{R(P-3)1} + U_{R31}; \\ \dots \\ U_{LPN} = -U_{RPN} - U_{R(P-3)N-1} + U_{R(P-3)N} + U_{R3N}. \end{cases} \quad (8)$$

производная напряжения на емкости ветви dU_C^B / dt :

$$\dot{U}_C = I_C / C; \quad (9)$$

производные токов через индуктивности связей dI_L^C / dt :

ВЕТВИ

	$U_{ТП}$	C	R_E	R_L	R_{K1}	R_{K2}	\dots	$R_{K(N-1)}$	R_{KN}	R_{P1}	R_{P2}	\dots	$R_{P(N-1)}$	R_{PN}	R_{31}	R_{32}	\dots	$R_{3(N-1)}$	R_{3N}	R_0	$R_{(P-3)1}$	$R_{(P-3)2}$	\dots	$R_{(P-3)N}$	R_{IP1}	R_{IP2}	\dots	$R_{IP(N-1)}$	R_{IIPN}			
L_E	1	1	1																													
L				-1																												
L_{K1}		-1	-1	1											1					1					1							
L_{K2}					1											1					-1											
\dots						1											1															
$L_{K(N-1)}$								1										1														
L_{KN}									1										1													
L_{P1}										1										-1												
L_{P2}											1										-1											
\dots												1																				
$L_{P(N-1)}$													1																			
L_{PN}														1																		

СВЯЗИ

Рис. 5. Топологическая Г-матрица дерева линейно направленного графа, показанного на рис. 4

Таблица 1

Первичные параметры схемы замещения тяговой сети переменного тока напряжением 25 кВ

Время моделирования, мкс	80 000	L_E , мГн	7,514	C , мкФ	13,5
Интервал дискретизации, нс	2	R_E , Ом	0,113	L , мГн	89,17
Длина линии, км	20	R_{P1}, \dots, R_{P20} , Ом/км	0,11	R_0 , Ом	0,2
Фаза напряжения короткого замыкания, рад	0 (1,57)	L_{P1}, \dots, L_{P20} , мГн/км	0,803	$R_{(P-3)1}, \dots, R_{(P-3)20}$, Ом·км (рельс — земля)	0,25 — лето 25 — зима
$U_{ТП}$, кВ	38,89	R_{K1}, \dots, R_{K20} , Ом/км	0,085	R_{31}, \dots, R_{320} , Ом·км	0,3
R_L , Ом	5000	L_{K1}, \dots, L_{K20} , мГн/км	0,904	R_{IP1}, \dots, R_{IP20} , Ом/км	40 000

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{I}_{LE} = U_{LE} / L_E; \\ \dot{I}_L = U_L / L; \\ \dot{I}_{LK1} = U_{LK1} / L_{K1}; \\ \dots \\ \dot{I}_{LKN} = U_{LKN} / L_{KN}; \\ \dot{I}_{LP1} = U_{LP1} / L_{P1}; \\ \dots \\ \dot{I}_{LPN} = U_{LPN} / L_{PN}; \end{array} \right. \quad (10)$$

напряжения на емкости ветви в конце шага интегрирования U_C^B :

$$U_C = U_C + \dot{U}_C \cdot dt; \quad (11)$$

токи через индуктивности связей в конце шага интегрирования I_L^C :

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{LE} = I_{LE} + \dot{I}_{LE} \cdot dt; \\ I_L = I_L + \dot{I}_L \cdot dt; \\ I_{LK1} = I_{LK1} + \dot{I}_{LK1} \cdot dt; \\ \dots \\ I_{LKN} = I_{LKN} + \dot{I}_{LKN} \cdot dt; \\ I_{LP1} = I_{LP1} + \dot{I}_{LP1} \cdot dt; \\ \dots \\ I_{LPN} = I_{LPN} + \dot{I}_{LPN} \cdot dt; \end{array} \right. \quad (12)$$

Метод переменных состояния позволяет определять токи в каждом элементе схемы замещения и напряжения на всех элементах схемы при исследовании переходных процессов при наличии в схеме замещения элементов с нелинейными вольтамперными характеристиками.

4. Компьютерные эксперименты переходных процессов в тяговой сети переменного тока напряжением 25 кВ

Для решения систем уравнений (5) — (12) были определены первичные параметры тяговой сети переменного тока напряжением 25 кВ, включающей в себя следующее силовое оборудование и устройства: тяговый трансформатор типа ТДТНЖ-40000/110/27,5/10; установка поперечной компенсации с конденсаторами типа КС1-1,05-30 (13,5 мкФ) и индуктивностью L (89,17 мГн); контактная подвеска типа М-120+МФ-100; рельсы типа Р-65. Определения первичных параметров осуществлены по выражениям, приведенным в справочниках² и работах [24–27]. В табл. 1 приведены первичные параметры схемы замещения тяговой сети переменного тока напряжением 25 кВ, которые применялись при компьютерных экспериментах для исследования характеристик тока КЗ.

По уравнениям (5) — (12) и первичным параметрам схемы замещения тяговой сети переменного тока напряжением 25 кВ была разработана программа в среде Delphi 7 для исследования аварийных процессов в тяговой сети.

Среднее расстояние между ТП составляет 40 км [28]. Питание тяговой сети в большинстве случаев двухстороннее, поэтому достаточно выполнить расчеты до середины межподстанционной зоны, так как влияние на вторую половину

²Справочник по электроснабжению железных дорог. Т. 1 / Под ред. К. Г. Марквардта. — М.: Транспорт, 1980. — 256 с.

Справочник по электроснабжению железных дорог. Т. 2. / Под ред. К. Г. Марквардта. — М.: Транспорт, 1981. — 392 с.

Карякин Р. Н. Справочник по молниезащите / Р. Н. Карякин. — М.: Энергосервис, 2005. — 879 с.

межподстанционной зоны будет аналогично рассмотренному участку.

Расчеты компьютерных экспериментов выполнялись до 20-го км, т. е. до середины межподстанционной зоны. Исследования производились при КЗ на 1-м, 2-м, 3-м, 4-м, 5-м, 8-м, 12-м, 16-м и 20-м километрах тяговой сети переменного тока напряжением 25 кВ для летних и зимних условий. В расчетах принимались значения сопротивления «рельс — земля», равные $R_{P-3} = 0,25 \text{ Ом} \cdot \text{км}$ и $R_{P-3} = 25 \text{ Ом} \cdot \text{км}$, соответственно, для летних и зимних условий [27]. Результаты компьютерных экспериментов показаны на рис. 6–12.

На рис. 6 представлены осциллограммы напряжения на ТП ($U_{ТП}$) и токов в КП ($I_{КП}$), в рельсах (I_P), а также в земле (I_3) при фазе напряжения КЗ $\psi = 0^\circ$ и расстоянии места КЗ от ТП, равном 5 км по летним условиям ($R_{P-3} = 0,25 \text{ Ом} \cdot \text{км}$). Ток $I_{КП}$ отстает от напряжения $U_{ТП}$ на угол $\varphi = 56^\circ$.

Осциллограммы, показанные на рис. 7, соответствуют напряжению на ТП ($U_{ТП}$), токам в КП ($I_{КП}$), в рельсах (I_P) и земле (I_3) при зимних условиях переходного сопротивления $R_{P-3} = 25 \text{ Ом} \cdot \text{км}$ при $\psi = 0^\circ$. Ток $I_{КП}$ отстает от напряжения $U_{ТП}$ на угол $\varphi = 60^\circ$.

Были проведены компьютерные эксперименты по определению амплитудных значений токов в КП ($I_{КП}$), в рельсах (I_P) и земле (I_3) при КЗ контактного провода на рельс на 1-м, 2-м, 3-м, 4-м, 5-м, 8-м, 12-м, 16-м и 20-м от ТП при летних условиях ($R_{P-3} = 0,25 \text{ Ом} \cdot \text{км}$, рис. 8) и зимних условиях ($R_{P-3} = 25 \text{ Ом} \cdot \text{км}$, рис. 9).

Из рис. 8 следует, что при летних условиях максимальный ток КЗ идет в земле на участке от ТП до 10-го км. При зимних условиях максимальный ток КЗ идет в земле на участке от 4-го до 8-го км. Максимальный ток КЗ в земле летом в 2,7 раза больше, чем зимой.

На рис. 10 показаны углы отставания фазы тока КЗ в КП (φ) от напряжения питания тяговой сети ($U_{ТП}$). Увеличение угла φ при зимних условиях можно объяснить ростом влияния индуктивности рельсов при увеличении тока КЗ в рельсах при зимних условиях.

На рис. 11 представлены графики напряжений между рельсом и землей (U_{P-3}) при КЗ на 5-м км от ТП при летних и зимних условиях.

Напряжение U_{P-3} при зимних условиях в 8 раз больше, чем при летних условиях. Напряжение $U_{P-3} = 4839 \text{ В}$ превышает допустимое напряжение ($U_{ДОП} = 2,5 \text{ кВ}$), действующее на изоляцию релейных устройств ЖАТ, в 2 раза.

Были определены амплитудные значения напряжения между рельсом и землей при КЗ на различных удалениях от ТП при летних и зимних условиях и удельном сопротивлении земли ($R_3 = 0,3 \text{ Ом} \cdot \text{км}$, рис. 12). Из графиков следует, что при летних условиях ($R_{P-3} = 0,25 \text{ Ом} \cdot \text{км}$) напряжение U_{P-3} не превышает допустимое напряжение для изоляции аппаратуры РЦ, равное 2,5 кВ.

Тогда как при зимних условиях напряжение U_{P-3} при КЗ превышает допустимое для изоляции аппаратуры РЦ напряжение на всем исследуемом участке. При этом в зимних условиях требуется применение средств защиты аппаратуры РЦ от продольных перенапряжений (провод — земля). Это перенапряжение также создает опасность для обслуживающего персонала.

Используя рассчитанные фазовые соотношения между током КЗ в КП ($I_{КП}$) и напряжением питания тяговой сети ($U_{ТП}$) (рис. 10), амплитуды токов КЗ (рис. 9), напряжение на фазе ТП (U_M), длительность полуволны тягового тока, предлагается тяговую сеть в режиме КЗ для полуволны тягового тока заменить эквивалентными параметрами, которые рассчитываются по следующим формулам:

$$R_{ЭКП} = (\cos \varphi \cdot U_M) / I_{КП}; \quad (13)$$

$$L_{ЭКП} = (\sin \varphi \cdot U_M \cdot \theta) / (I_{КП} \cdot \pi), \quad (14)$$

где $R_{ЭКП}$ — эквивалентное активное сопротивление тяговой сети для тока КЗ в КП; $L_{ЭКП}$ — эквивалентная индуктивность тяговой сети для тока КЗ в КП; φ — разность фаз между напряжением и током в КП; U_M — амплитудное значение напряжения на трансформаторе тяговой подстанции, В; $I_{КП}$ — амплитудное значение тока в месте КЗ, А; θ — длительность полуволны тока КЗ, сек.

Выражения (13) и (14) позволяют сложную схему тяговой сети переменного тока привести к эквивалентным параметрам, которые упрощают процессы анализа

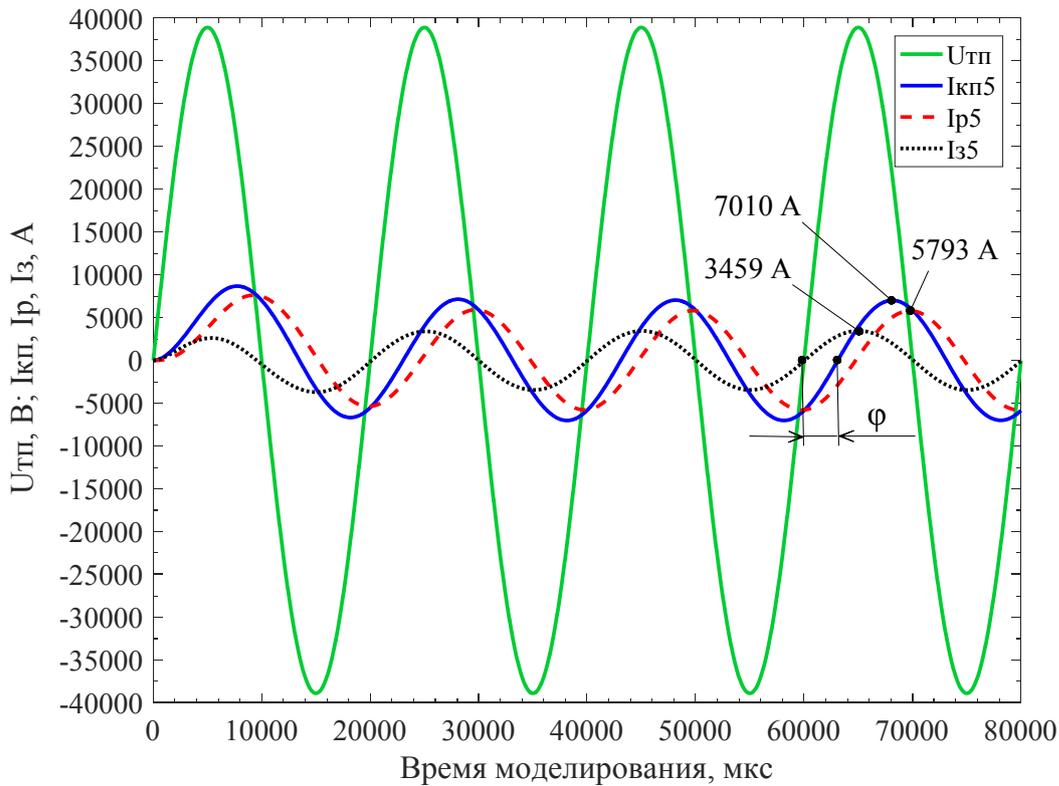


Рис. 6. Напряжение на ТП и токи в тяговой сети переменного тока при КЗ контактного провода на рельс на расстоянии 5 км от ТП ($R_{p-3} = 0,25 \text{ Ом} \cdot \text{км}$ (лето) и $\psi = 0^\circ$)

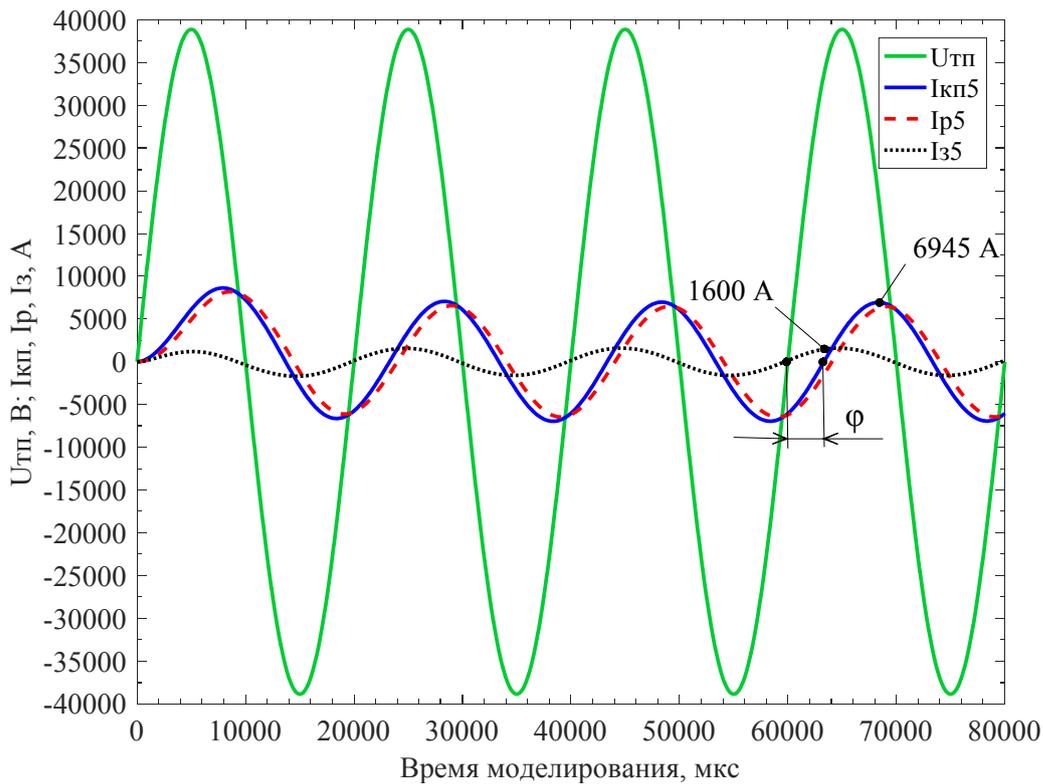


Рис. 7. Напряжение на ТП и токи в тяговой сети переменного тока при КЗ контактного провода на рельс на расстоянии 5 км от ТП ($R_{p-3} = 25 \text{ Ом} \cdot \text{км}$ (зима) и $\psi = 0^\circ$)

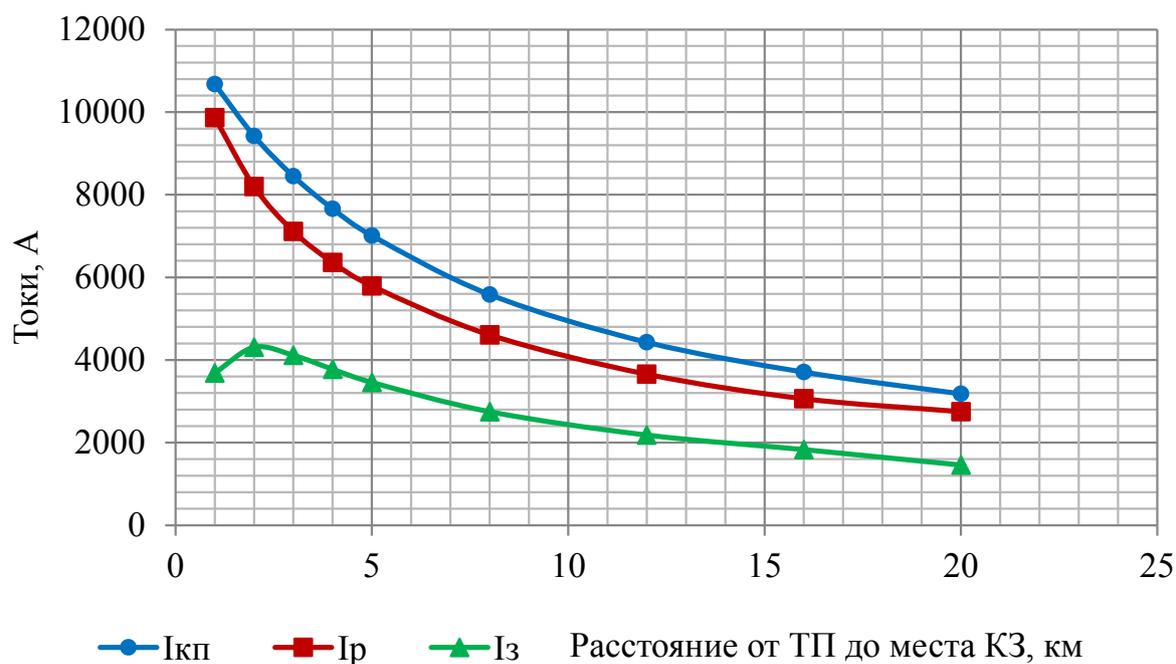


Рис. 8. Амплитудные значения токов в контактном проводе ($I_{кп}$), в рельсах (I_p) и земле ($I_з$) в месте КЗ контактного провода на рельс при летних условиях ($R_{p-з} = 0,25 \text{ Ом} \cdot \text{км}$, $\psi = 0^\circ$)

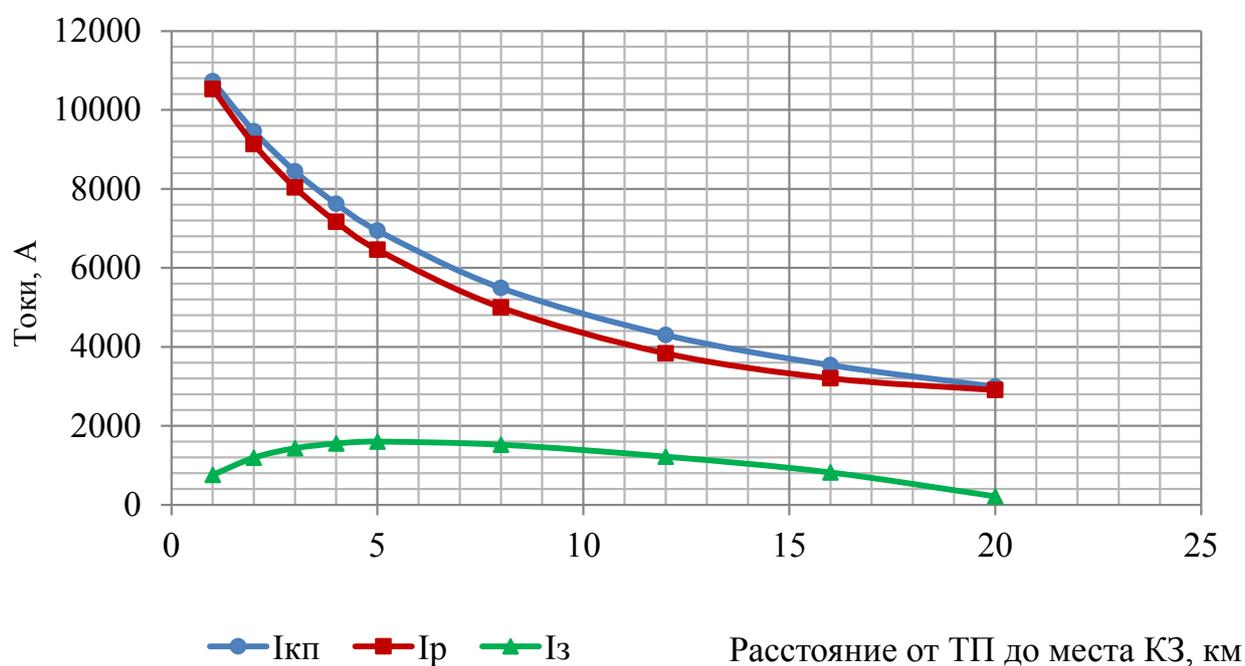


Рис. 9. Амплитудные значения токов в контактном проводе ($I_{кп}$), в рельсах (I_p) и земле ($I_з$) в месте КЗ контактного провода на рельс при зимних условиях ($R_{p-з} = 25 \text{ Ом} \cdot \text{км}$ и $\psi = 0^\circ$)

средств защиты устройств ЖАТ от коммутационных перенапряжений и сверхтоков при КЗ в тяговой сети. На рис. 13 показаны

результаты расчетов эквивалентных параметров тяговой сети переменного тока напряжением 25 кВ.

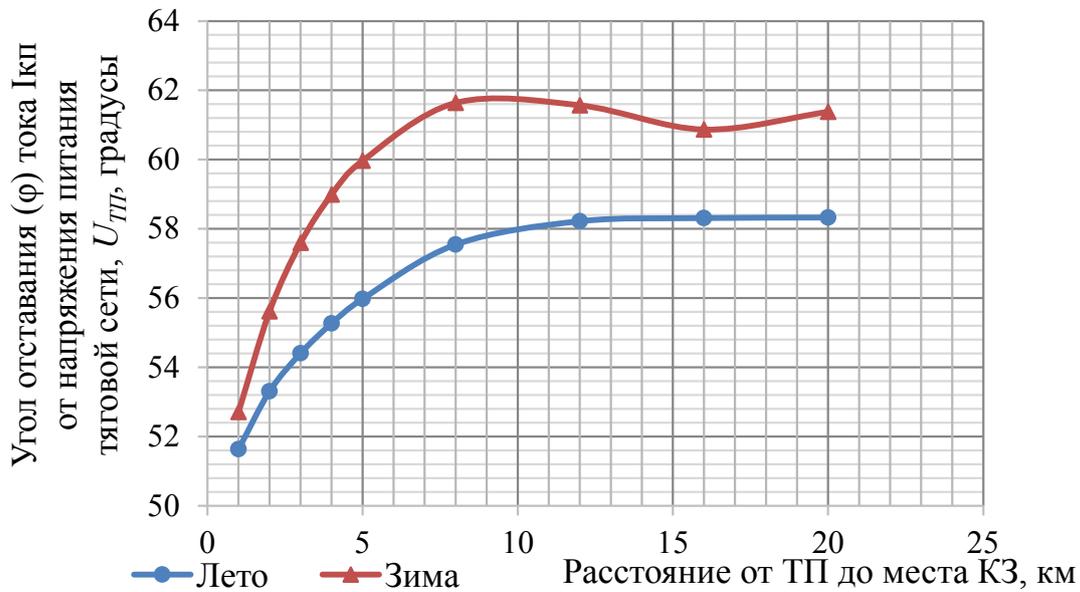


Рис. 10. Фазовое соотношение (φ) между напряжением на ТП и током в контактном проводе при летних ($R_{p-3} = 0,25 \text{ Ом} \cdot \text{км}$) и зимних ($R_{p-3} = 25 \text{ Ом} \cdot \text{км}$) условиях

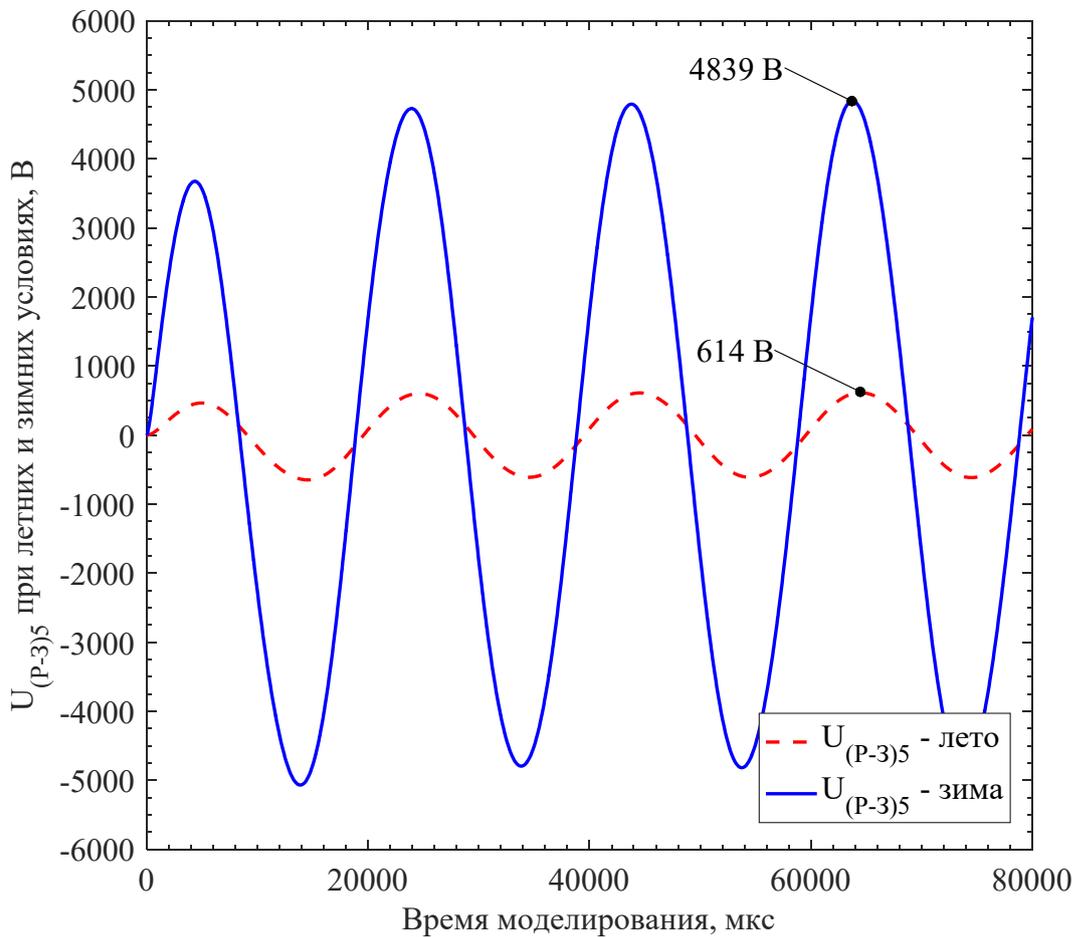


Рис. 11. Напряжение между рельсом и землей $U_{(p-3)5}$ в месте КЗ контактного провода на рельс на расстоянии 5 км от ТП при летних и зимних условиях

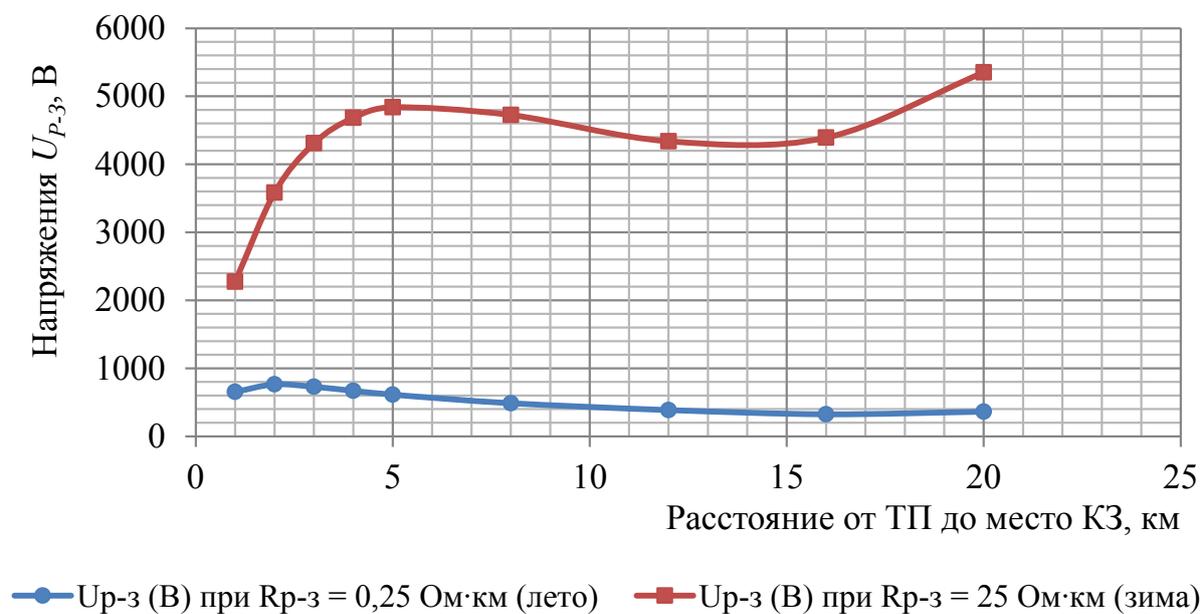


Рис. 12. Амплитудные значения напряжения между рельсом и землей $U_{(p-3)}$ в месте КЗ контактного провода на рельс при летних и зимних условиях ($R_3 = 0,3 \text{ Ом}\cdot\text{км}$ и $\psi = 0^\circ$)

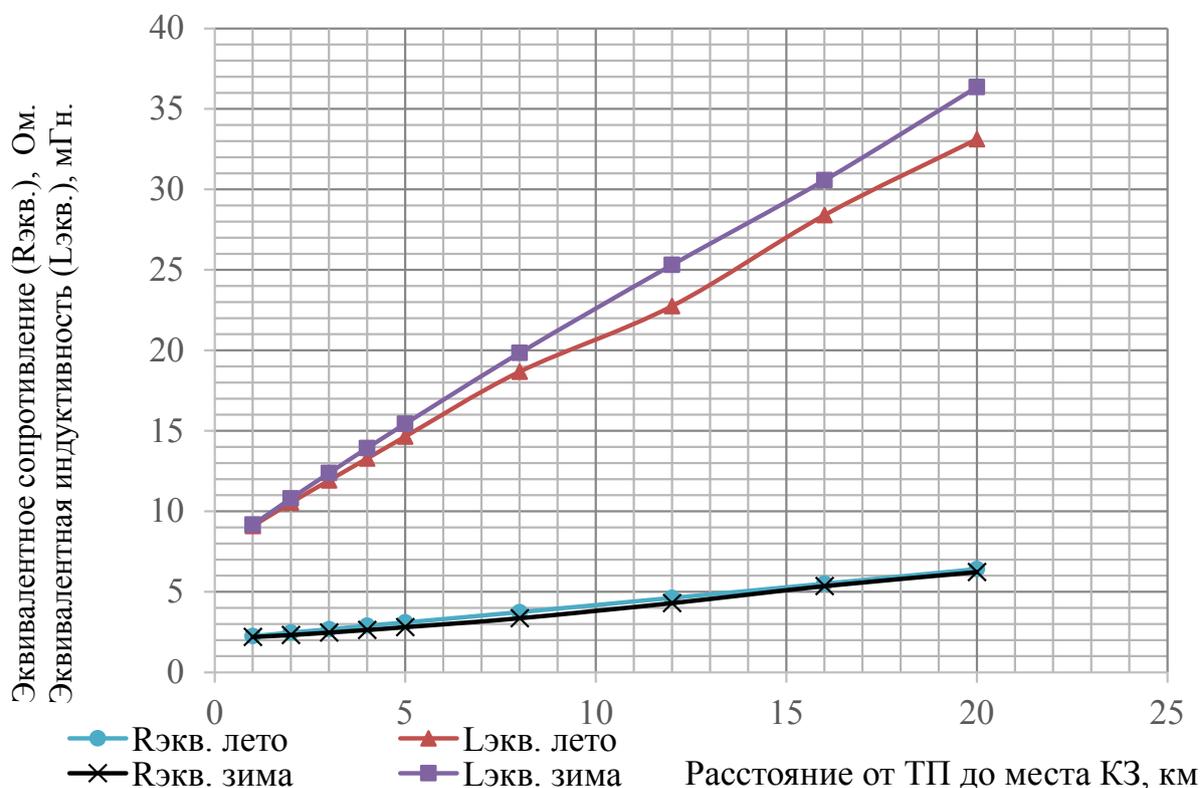


Рис. 13. Эквивалентные параметры тяговой сети

5. Верификация математической модели тяговой сети переменного тока напряжением 25 кВ

В статье проведена верификация³ разработанной математической модели применительно к реальному участку тяговой сети переменного тока напряжением 25 кВ.

В работе [27] приведены результаты натуральных экспериментов электромагнитных процессов в тяговой сети переменного тока напряжением 25 кВ при КЗ. Испытания проводились на Восточно-Сибирской железной дороге в марте — апреле 1963 г. Опыты КЗ выполнялись на магистральном двухпутном участке. Измерялись токи в отключенных и заземленных проводах и рельсах при КЗ в тяговой сети. КЗ проводилось по команде руководителя испытаний включением фидерного выключателя, замыкающего контактную сеть через заземляющие ножи шинного разъединителя на контурный заземлитель ТП. Одновременно с включением выключателя включались осциллографы, которые осциллографировали токи фидеров и напряжения на шинах ТП при КЗ.

Основные характеристики участка испытаний следующие. На ТП установлено по два трехфазных трансформатора мощностью 31,5 МВ·А и 40,5 МВ·А ($u_K = 10,8\%$). Эквивалентное сопротивление контурного заземлителя ТП не превышает 0,1 Ом. Тип контактной подвески ПБСМ1-95+МФ-100. На главных путях уложены рельсы типа Р-65. Испытания

³ Верификация [лат. *verus* истинный + *facere* делать] — проверка истинности теоретических положений, установление достоверности опытным путем.

проводились при температуре воздуха (–20–25 °С). Переходное сопротивление рельс — земля в период испытаний изменялось в пределах 2,5–20 Ом·км.

Параметры схемы замещения тяговой сети, показанные в табл. 2, использовались при компьютерном эксперименте на разработанной математической модели тяговой сети.

Вычислительный эксперимент на математической модели показал результат тока КЗ на расстоянии 20 км от ТП, равный $1966 e^{-j56}$. Натурный эксперимент КЗ на расстоянии 21,6 км от ТП показал ток КЗ, равный $1820 e^{-j61}$ [27, табл. 2.7]. Значение амплитуды и фазы тока КЗ на модели превышает значение амплитуды и фазы тока при натурном эксперименте на 8 %.

Разработанная математическая модель тяговой сети удовлетворительно согласуется с реальной тяговой сетью и может быть рекомендована для исследования токов КЗ в тяговой сети на различных удалениях от ТП и при различных эксплуатационных условиях: сопротивление земли, сопротивление рельс — земля, тип контактной подвески, тип тяговых трансформаторов.

Заключение

В работе предлагается распределенная математическая модель тяговой сети переменного тока напряжением 25 кВ как источника ОЭМВ на устройства ЖАТ. Сделан аналитический обзор исследований переходных процессов в тяговой сети переменного тока напряжением 25 кВ при КЗ контактного провода на рельс. Проведены исследования аварийных процессов в тяговой сети переменного тока

Таблица 2

Параметры схемы замещения тяговой сети переменного тока напряжением 25 кВ Восточно-Сибирской железной дороги

Время моделирования, мкс	80 000	L_E , мГн	7,514	C , мкФ	13,5
Интервал дискретизации, нс	2	R_E , Ом	0,113	L , мГн	89,17
Длина линии, км	21,6	R_{P1}, \dots, R_{P20} , Ом/км	0,11	R_0 , Ом	0,1
Фаза напряжения КЗ, рад	0 (1,57)	L_{P1}, \dots, L_{P20} , мГн/км	0,803	$R_{(P-3)1}, \dots, R_{(P-3)20}$, Ом·км (рельс — земля)	20 — зима
$U_{ТП}$, кВ	38,89	R_{K1}, \dots, R_{K20} , Ом/км	0,39	R_{31}, \dots, R_{320} , Ом·км	0,3
R_L , Ом	5000	L_{K1}, \dots, L_{K20} , мГн/км	1,73	R_{IP1}, \dots, R_{IP20} , Ом/км	40000

напряжением 25 кВ в зависимости от расстояния места КЗ до ТП, параметров тяговой сети и сопротивления изоляции «рельс — земля» при летних и зимних климатических условиях. Предложено тяговую сеть со сложными электромагнитными связями заменить обобщенными эквивалентными параметрами (эквивалентная индуктивность, эквивалентное активное сопротивление) для каждой полуволны тока КЗ, которые упрощают процессы анализа средств защиты устройств ЖАТ от коммутационных перенапряжений и сверхтоков в обратной тяговой рельсовой сети при КЗ.

Исследование ОЭМВ тяговой сети на устройства ЖАТ по предложенной математической модели для каждой полуволны тока КЗ позволяет: определить ограничивающие свойства дроссель-трансформаторов и трансформаторов ЖАТ по передаче энергии ОЭМВ через магнитную связь за счет эффекта насыщения магнитопровода; обосновать выбор средств защиты аппаратуры ЖАТ от энергии, действующей на средства защиты до момента насыщения магнитопровода трансформатора. Такие исследования на математических моделях позволяют создавать системы защиты аппаратуры ЖАТ, состоящей из согласованных каскадов функциональной и дополнительной защиты от ОЭМВ. Функциональной защитой являются трансформаторы и дроссель-трансформаторы ЖАТ. Дополнительной защитой являются устройства защиты от импульсных перенапряжений и сверхтоков. ▲

Библиографический список

1. Евсеев И. Г. Защита устройств СЦБ от опасных напряжений и токов / И. Г. Евсеев. — М.: Транспорт, 1971. — 143 с.
2. Любимов К. А. Влияние коротких замыканий в контактных сетях на устройства СЦБ и связи / К. А. Любимов, В. С. Ляличев, В. Ф. Шепко // Автоматика, телемеханика и связь — 1975. — Вып. 11. — С. 16–21.
3. Евсеев И. Г. Исследования опасных напряжений и токов в рельсовых цепях при коротком замыкании контактной сети / И. Г. Евсеев, В. С. Ляличев // Автоматика, телемеханика и связь. — 1965. — Вып. 6. — С. 16–20.
4. Правила защиты устройств проводной связи, железнодорожной сигнализации и телемеханики от опасного и мешающего влияния линий электропередачи. Ч. 1. Общие положения. Опасные влияния. — М.: Энергия, 1966. — 40 с.
5. Правила защиты устройств проводной связи, железнодорожной сигнализации и телемеханики от опасного и мешающего влияния линий электропередачи. Ч. 2. Мешающие влияния. — М.: Связь, 1972. — 56 с.
6. Манаков А. Д. Методика исследования опасных электромагнитных влияний тяговой сети на устройства рельсовых цепей / А. Д. Манаков // Элементы и системы автоматического управления на железнодорожном транспорте: межвуз. сб. науч. тр. — Хабаровск: ХабИИЖТ, 1993. — С. 30–34.
7. Михайлов М. И. Защита сооружений связи от опасных и мешающих влияний / М. И. Михайлов, Л. Д. Разумов, С. А. Соколов. — М.: Связь, 1978. — 288 с.
8. Расчет влияния тяговой сети электрифицированных железных дорог переменного тока на линии СЦБ. Вспомогательные материалы. 650219. — СПб.: ГТСС, 2003. — 86 с.
9. Сердинов С. М. Повышение надежности устройств электроснабжения электрифицированных железных дорог. 2-е изд., перераб. и доп. / С. М. Сердинов. — М.: Транспорт, 1985. — 301 с.
10. Митрохин В. Е. Критерий выбора устройства защиты от перенапряжений / В. Е. Митрохин, А. Е. Гаранин, К. А. Бондаренко // Автоматика, связь, информатика. — 2011. — Вып. 4. — С. 14–17.
11. Ведерников Б. М. Перспективные схемы защиты устройств железнодорожной автоматики от грозовых и коммуникационных перенапряжений / Б. М. Ведерников // Материалы XLII Международной научно-практической конференции КазАТК им. М. Тынышпаева на тему «Инновационные технологии на транспорте: образование, наука, практика». — 18. 04. 2018. — Т. 3. — С. 12–16.
12. Косарев Б. И. Электробезопасность в системе электроснабжения железнодорожного транспорта / Б. И. Косарев, Я. А. Зельвянский, Ю. Г. Сибаров. — М.: Транспорт, 1983. — 200 с.
13. Фигурнов Е. П. Релейная защита устройств электроснабжения железных дорог / Е. П. Фигурнов. — М.: Транспорт, 1981. — 215 с.
14. Кучма К. Г. Защита от токов короткого замыкания в контактной сети / К. Г. Кучма, Г. Г. Марквардт, В. Н. Пушкин. — М.: Трансжелдориздат, 1960. — 259 с.
15. Цецура И. А. Влияние коротких замыканий в контактной сети на рельсовые цепи и кабели СЦБ // Автоматика, телемеханика и связь — 1964. — Вып. 4. — С. 22–25.
16. Марквардт Г. Г. Модель электрической железной дороги переменного тока / Г. Г. Марквардт, Е. Ф. Белов // Тр. ВЗИИТа. — 1969. — Вып. 41. — С. 18–39.
17. Ляличев В. С. Защищенность от перенапряжений в рельсовых цепях переменного тока 25 Гц // Автоматика, телемеханика и связь — 1973. — Вып. 9. — С. 3–6.
18. Рыков И. И. О повышении эффективности работы искровых промежуток / И. И. Рыков, А. В. Фарафонов // Тр. ЦНИИ МПС. 1978. — Вып. 595. — С. 38–69.
19. Фигурнов Е. П. Расчет токов короткого замыкания в электротяговых сетях / Е. П. Фигурнов, А. С. Бочев // Вестник ВНИИЖТа. — М., 1976. — Вып. 6. — С. 8–12.
20. Жарков Ю. И. Учет схем питания тяговых подстанций при расчетах коротких замыканий в тяговой сети перемен-

- ного тока / Ю. И. Жарков, Н. А. Попова, Е. П. Фигурнов // Вестник ВНИИЖТ. — 2019. — Т. 78. — № 3. — С. 10–18.
21. Герман Л. А. Расчет токов короткого замыкания в тяговой сети с двухсторонним питанием / Л. А. Герман, А. С. Серебряков, А. Б. Лоскутов и др. // Электричество. — 2019. — № 5. — С. 19–23.
 22. Ягуп В. Г. Анализ режима электроэнергетической сети методом переменных состояния / В. Г. Ягуп, Е. В. Ягуп. — Восточно-Европейский журнал передовых технологий. Украинская государственная академия железнодорожного транспорта. — 2010. — № 1/6(43). — С. 43–46.
 23. Чахмахсазян Е. А. Машинный анализ интегральных схем. Вопросы теории и программирования / Е. А. Чахмахсазян, Ю. Н. Бармаков, А. Э. Гольденберг. — М.: Советское радио, 1974. — 272 с.
 24. Бей Ю. М. Тяговые подстанции / Ю. М. Бей, Р. Р. Мамошин, В. Н. Пупынин, М. Г. Шалимов. — М.: Транспорт, 1986. — 318 с.
 25. Котельников А. В. Рельсовые цепи в условиях влияния заземляющих устройств / А. В. Котельников, А. В. Наумов, Л. П. Слободянюк. — М.: Транспорт, 1990. — 215 с.
 26. Бородулин Б. М. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог / Б. М. Бородулин. — М.: Транспорт, 1983. — 183 с.
 27. Карякин Р. Н. Тяговые сети переменного тока: 2-е изд., перераб. и доп. / Р. Н. Карякин — М.: Транспорт, 1987. — 279 с.
 28. Мирошниченко Р. И. Режимы работы электрифицированных участков / Р. И. Мирошниченко. — М.: Транспорт, 1982. — 207 с.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2022, Vol. 8, No. 3, pp. 233–251

DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-03-233-251

Hazardous Electromagnetic Impact of AC 25 kV Reverse Traction Network on Railway Automation and Remote control Devices

Information about authors

Manakov A. D., Doctor in Engineering, Senior Researcher, Center for Computer Railway Technologies. E-mail: manakoff_2@mail.ru

Rahmonberdiyev A. A., Postgraduate Student, Automation and Remote Control on Railways Department. E-mail: raa19860102@gmail.com

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
Saint Petersburg

Abstract: During electric traction of trains, railway automation and Remote control devices, connected to rails or located in close proximity to reverse traction rail network, are affected by overvoltages and overcurrents during emergency processes in a traction network. To develop, basing on mathematical models, of means and systems for protection against overvoltages and overcurrents it is required to work out a model of hazardous electromagnetic impact source at different distances from short circuit spot to traction substation and under various operating conditions. In the article, it has been developed based on state variables method a distributed mathematical model of AC traction network with 25 kV voltage. After computer experiments, it is proposed the replacement of substitution complex scheme for a traction network with equivalent parameters for each half-wave of short-circuit current. Verification has been pursued for the proposed traction network model.

Keywords: AC traction network; short circuit; emergency processes; transition process; hazardous electromagnetic impact; track chain; mathematical model; state variables method.

References

1. Evseev I. G. *Zashchita ustroystv STsB ot opasnykh napryazheniy i tokov* [Protection of signaling devices from hazardous voltages and currents]. Moscow: Transport Publ., 1971. 143 p. (In Russian)
2. Lyubimov K. A. *Vliyaniye korotkikh замыканий v kontaknykh setyakh na ustroystva STsB i svyazi* [Influence of short circuits in contact networks on signaling and communication devices]. *Avtomatika, telemekhanika i svyaz'* [Automation, remote control and communication]. 1975, I. 11, pp. 16–21. (In Russian)
3. Evseev I. G. *Issledovaniya opasnykh napryazheniy i tokov v rel'sovykh tsepyakh pri korotkom замыкании kontaktnoy seti* [Research of hazardous voltages and currents in rail circuits in the event of a short circuit in the contact network]. *Avtomatika, telemekhanika i svyaz'* [Automation, remote control and communication]. 1965, I. 6, pp. 16–20. (In Russian)
4. *Pravila zashchity ustroystv provodnoy svyazi, zheleznodorozhnoy signalizatsii i telemekhaniki ot opasnogo i meshayushchego vliyaniya liniy elektroperedachi. Obshchie polozheniya. Opasnye vliyaniya* [Rules for the protection of wired communication devices, railway signaling and telemechanics from dangerous and interfering influence of power lines. General provisions. dangerous influences]. Moscow: Energiya Publ., 1966. 40 p. (In Russian)
5. *Pravila zashchity ustroystv provodnoy svyazi, zheleznodorozhnoy signalizatsii i telemekhaniki ot opasnogo i meshayushchego vliyaniya liniy elektroperedachi* [Rules for the protection of wired communication devices, railway signaling and Remote control from dangerous and interfering influence of power lines]. *Meshayushchie vliyaniya* [Interfering influences]. Moscow: Svyaz' Publ., 1972. 56 p. (In Russian)
6. Manakov A. D. *Metodika issledovaniya opasnykh elektromagnitnykh vliyaniy tyagovoy seti na ustroystva rel'sovykh tsepey* [Methodology for the study of dangerous electromagnetic influences of the traction network on the devices of rail circuits]. *Elementy i sistemy avtomaticheskogo upravleniya na zheleznodorozhnom transporte* [Elements and systems of automatic control in railway transport: interuniversity]. Khabarovsk: KhablIzHT Publ., 1993, pp. 30–34. (In Russian)
7. Mikhaylov M. I., Razumov L. D., Sokolov S. A. *Zashchita sooruzheniy svyazi ot opasnykh i meshayushchikh vliyaniy* [Protection of communication facilities from dangerous and interfering influences]. Moscow: Svyaz' Publ., 1978. 288 p. (In Russian)
8. *Raschet vliyaniya tyagovoy seti elektrifitsirovannykh zheleznnykh dorog peremennogo toka na linii STsB. Vspomogatel'nye materialy. 650219* [Calculation of the influence of the traction network of electrified AC railways on the signaling lines. Auxiliary materials. 650219]. St. Petersburg, GTSS Publ., 2003. 86 p. (In Russian)
9. Serdinov S. M. *Povysheniye nadezhnosti ustroystv elektrosnabzheniya elektrifitsirovannykh zheleznnykh dorog* [Improving the reliability of power supply devices for electrified railways]. Moscow: Transport Publ., 1985. 301 p. (In Russian)
10. Mitrokhin V. E. *Kriteriyi vybora ustroystva zashchity ot perenapryazheniy* [Criteria for choosing a surge protection device]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communications, informatics]. 2011, I. 4, pp. 14–17. (In Russian)

11. Vedernikov B. M. Perspektivnye skhemy zashchity ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki ot grozovykh i kommunikatsionnykh perenapryazheniy [Perspective schemes for protection of railway automation devices from lightning and communication surges]. *Materialy XLII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii KazATK im. M. Tynyshpaeva na temu "Innovatsionnye tekhnologii na transporte: obrazovanie, nauka, praktika"* [Materials of the XLII International scientific-practical conference KazATC named after. M. Tynyshpaeva on the topic "Innovative technologies in transport: education, science, practice"]. 2018, vol. 3, pp. 12–16. (In Russian)
12. Kosarev B. I. *Elektrobezopasnost' v sisteme elektrosnabzheniya zheleznodorozhnoy transporta* [Electrical safety in the power supply system of railway transport]. Moscow: Transport Publ., 1983. 200 p. (In Russian)
13. Figurnov E. P. *Releynaya zashchita ustroystv elektrosnabzheniya zheleznikh dorog* [Relay protection of railway power supply devices]. Moscow: Transport Publ., 1981. 215 p. (In Russian)
14. Kuchma K. G., Markvardt G. G., Belov E. F. *Zashchita ot tokov korotkogo zamykaniya v kontaktnoy seti* [Protection against short circuit currents in the contact network]. Moscow: Transzheldorizdat Publ., 1960. 259 p. (In Russian)
15. Tsetsura I. A. Vliyaniye korotkikh zamykaniy v kontaktnoy seti na rel'sovye tsepi i kabeli STsB [Influence of short circuits in the contact network on rail circuits and cables of the signaling system]. *Avtomatika, telemekhanika i svyaz'* [Automation, telemechanics and communication]. 1964, I. 4, pp. 22–25. (In Russian)
16. Markvardt G. G., Belov E. F. Model' elektricheskoy zheleznoy dorogi peremennogo toka [Model of an electric railway of alternating current]. *Tr. VZIIA [Tr. VZIIIT]*. 1969, I. 41, pp. 18–39. (In Russian)
17. Lyalichev V. S. Zashchishchennost' ot perenapryazheniy v rel'sovykh tsepekh peremennogo toka 25 Gts [Overvoltage protection in rail circuits of alternating current 25 Hz]. *Avtomatika, telemekhanika i svyaz'* [Automation, telemechanics and communication]. 1973, I. 9, pp. 3–6. (In Russian)
18. Rykov I. I., Bochev A. S. O povyshenii effektivnosti raboty iskrovykh promezhutkov [On improving the efficiency of spark gaps]. *Tr. TsNII MPS* [Tr. Central Research Institute of MPS]. 1978, I. 595, pp. 38–69. (In Russian)
19. Figurnov E. P., Bochev A. S. Raschet tokov korotkogo zamykaniya v elektroyagovykh setyakh [Calculation of short circuit currents in electric traction networks]. *Vestnik VNIIZhT* [Bulletin of VNIIZhT.]. Moscow, 1976, I. 6, pp. 8–12. (In Russian)
20. Zharkov Yu. I. Uchet skhem pitaniya tyagovykh podstantsiy pri raschetakh korotkikh zamykaniy v tyagovoy seti peremennogo toka [Accounting for power supply circuits of traction substations when calculating short circuits in an alternating current traction network]. *Vestnik VNIIZhT* [Bulletin of VNIIZhT.]. 2019, vol. 78, I. 3, pp. 10–18. (In Russian)
21. German L. A. Raschet tokov korotkogo zamykaniya v tyagovoy seti s dvukhstoronnim pitaniem [Calculation of short-circuit currents in a traction network with two-sided power supply]. *Elektrichestvo* [Electricity]. 2019, I. 5, pp. 19–23. (In Russian)
22. Yagub V. G. Analiz rezhima elektro-energeticheskoy seti metodom peremennykh sostoyaniya [Analysis of the mode of the electric power network by the method of state variables]. *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy. Ukrainskaya gosudarstvennaya akademiya zheleznodorozhnogo transporta* [Eastern European Journal of Advanced Technologies. Ukrainian State Academy of Railway Transport]. UKRAINA. Khar'kov. 2010, I. 1/6 (43), pp. 43–46. (In Russian)
23. Chakhmaksazyan E. A. *Mashinnyy analiz integral'nykh skhem. Voprosy teorii i programirovaniya* [Machine analysis of integrated circuits. Questions of theory and programming]. Moscow: Sovetskoe radio Publ., 1974. 272 p. (In Russian)
24. Bey Yu. M. *Tyagovye podstantsii* [Traction substations]. Moscow: Transport Publ., 1986. 318 p. (In Russian)
25. Kotel'nikov A. V. *Rel'sovye tsepi v usloviyakh vliyaniya zazemlyayushchikh ustroystv* [Rail circuits under the influence of grounding devices]. Moscow: Transport Publ., 1990. 215 p. (In Russian)
26. Borodulin B. M. *Kondensatornye ustanovki elektrifitsirovannykh zheleznikh dorog* [Capacitor units of electrified railways]. Moscow: Transport Publ., 1983. 183 p. (In Russian)
27. Karyakin R. N. *Tyagovye seti peremennogo toka* [AC traction networks]. Moscow: Transport Publ., 1987. 279 p. (In Russian)
28. Miroshnichenko R. I. *Rezhimy raboty elektrifitsirovannykh uchastkov* [Modes of operation of electrified sections]. Moscow: Transport Publ., 1982. 207 p. (In Russian)