
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.31:621.33

EDN VWKJYQ

**АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ
И ПРЕДЛАГАЕМЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ
ТЯГОВОЙ СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА. ЧАСТЬ 1****А.Л. Куликов**ORCID: 0000-0003-1092-7136 e-mail: inventor61@mail.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***В.Л. Осокин**ORCID: 0000-0001-8772-4252 e-mail: osokinvl@mail.ruНижегородский государственный инженерно-экономический университет
*Княгинино, Нижегородская область, Россия***Д.А. Леваков**ORCID: 0009-0006-5706-7515 e-mail: dmitriy.levakov@mail.ruНижегородский государственный инженерно-экономический университет
Княгинино, Нижегородская область, Россия

Для решения задач, связанных с анализом режимов работы систем тягового электроснабжения (СТЭ), требуется использование математических моделей исследуемой системы. Специфика устройства СТЭ обуславливает невозможность использования при их моделировании ряда подходов, применяемых при составлении моделей трехфазных систем электроснабжения стационарных потребителей электроэнергии. В первой части статьи проанализированы современные требования к математическим моделям тяговой сети, используемым при решении задачи дистанционного определения места повреждения (ОМП). Установлено, что основным требованием, от выполнения которого зависит точность ОМП, является адекватность модели, используемой для анализа измеренных параметров аварийного режима. По результатам рассмотрения известных подходов к моделированию СТЭ сделан вывод о недостаточной степени соответствия существующих моделей требованию адекватности.

Ключевые слова: адекватность модели; имитационное моделирование; математическая модель тяговой сети; определение мест повреждений; расчет установившегося режима; система тягового электроснабжения.

Для цитирования: Куликов А.Л., Осокин В.Л., Леваков Д.А. Анализ существующих подходов и предлагаемый подход к моделированию тяговой сети переменного тока. Часть 1 // Интеллектуальная Электротехника. 2026. № 1. С. 78-102. EDN VWKJYQ

ANALYSIS OF EXISTING AND PROPOSED APPROACHES TO AC TRACTION NETWORK MODELING. PART 1

A.L. Kulikov

ORCID: **0000-0003-1092-7136** e-mail: **inventor61@mail.ru**
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

V.L. Osokin

ORCID: **0000-0001-8772-4252** e-mail: **osokinvl@mail.ru**
Nizhny Novgorod State Engineering and Economical University
Knyaginino, Nizhny Novgorod region, Russia

D.A. Levakov

ORCID: **0009-0006-5706-7515** e-mail: **dmitriy.levakov@mail.ru**
Nizhny Novgorod State Engineering and Economical University
Knyaginino, Nizhny Novgorod region, Russia

Abstract. The solution to the problems related to the analysis of operating modes in traction power supply systems (TPSS) requires the use of mathematical models of the system under study. The specific construction of the TPSS makes it impossible to use a number of approaches used in the development of models of three-phase power supply systems for stationary consumers of electricity in their modeling. The 1st part of the article analyzes modern requirements for mathematical model of traction networks used in solving the problem of remote fault locating (FL), as a result of which it was found out that the main requirement on which the FL accuracy depends is the goodness fit of the model used to analyze the measured emergency mode parameters. Based on the results of the examination of known approaches to modeling TPSS, a conclusion was made that compliance degree of existing models with the goodness fit requirement is insufficient.

Keywords: model adequacy; simulation; mathematical model of traction network; fault locating; steady state calculation; traction power supply system.

For citation: A.L. Kulikov, V.L. Osokin, D.A. Levakov, "Analysis of existing and proposed approaches to AC traction network modeling. Part 1", *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 78-102, 2026. EDN VWKJYQ

I. Введение

Для решения широкого спектра теоретических и практических задач тягового электроснабжения, связанных с исследованием, проектированием, оптимизацией режимов работы, защитой и автоматизацией систем тягового электроснабжения (СТЭ), требуется использование математической модели рассматриваемой системы. В связи с этим, выбор подходящей модели СТЭ представляет собой важную задачу, от правильности решения которой зависят как возможность решения основной задачи с удовлетворительной степенью точности, так и простота ее решения.

Проблема моделирования СТЭ характеризуется сложностью и невозможностью применения ряда подходов, положенных в основу способов моделирования электроэнергетических систем общего назначения и систем электроснабжения стационарных потребителей электроэнергии. Специфика этой проблемы является следствием существенных отличий СТЭ от трехфазных электрических сетей общего назначения в части своего устройства, а также особенностей процесса передачи электрической энергии электроподвижному составу (ЭПС) по линиям электропередачи (ЛЭП) контактной сети и рельсовым цепям. Присутствие в составе тяговой сети большого числа разнородных проводников, несимметричность их расположения, наличие электрической связи с землей, многообразие вариантов топологии тяговой сети и непостоянство количества, мощности и мест подключения нагрузки значительно осложняют задачу моделирования СТЭ. В связи с этими факторами и большой трудоемкостью анализа сложных моделей без использования современной вычислительной техники, в основу большинства известных в настоящее время моделей тяговой сети положено применение упрощенного подхода, связанного с принятием многочисленных допущений. Такой подход к составлению математических моделей не позволяет принять во внимание указанные выше особенности СТЭ, в результате чего существующие модели неполно отражают наиболее существенные свойства моделируемых систем. Использование упрощенных моделей тяговой сети приводит к возникновению значительных погрешностей при расчетах, что приемлемо только при решении некоторых инженерных задач. Вместе с тем, ряд теоретических и практических задач требует решения с максимальной точностью, при этом использование упрощенных моделей является нецелесообразным из-за внесения недопустимых погрешностей в их решение. К числу таких задач относится дистанционное определение места повреждения (ОМП) контактной сети, высокие требования к точности которого обусловлены необходимостью уменьшения временных затрат на устранение причины устойчивого короткого замыкания (КЗ) и сокращения длительности вынужденных задержек движения поездов при авариях в тяговой сети.

Одной из основных причин неудовлетворительной точности существующих способов дистанционного ОМП по ПАР является использование упрощенных математических моделей тяговой сети для анализа измеренных значений параметров режима КЗ. Эти погрешности ограничивают точность средств ОМП и препятствуют правильному определению удаленности места КЗ с применением как ранних, так и современных алгоритмов ОМП. Указанными причинами обусловлена значительная актуальность проблемы совершенствования подходов к моделированию СТЭ и разработке моделей тяговой сети, удовлетворяющих современным требованиям в отношении соответствия моделируемой системе. В настоящее время известны исследования, направленные на решение проблемы совершенствования моделей тяговой сети, по результатам которых были предложены модели, отличающиеся повышенной степенью соответствия оригиналу. Вместе с тем, по причине наличия у этих моделей ряда существенных недостатков, которые будут рассмотрены ниже, указанная проблема остается актуальной.

II. Требования к моделям СТЭ, применяемым при дистанционном ОМП контактной сети

В настоящее время наиболее целесообразным, с точки зрения точного определения расстояния до места КЗ, является применение дистанционных методов ОМП, основанных на анализе параметров, характеризующих аварийный режим в тяговой сети [1-3]. Эти методы, вне зависимости от состава набора контролируемых ПАР, способов их измерения (одностороннего или двухстороннего) и последующего анализа, предполагают использование модели СТЭ, параметры которой позволяют установить зависимости между контролируемыми параметрами режима КЗ и искомым расстоянием до места повреждения. Таким образом, задача ОМП по ПАР (рис. 1) включает в себя сопоставление измеренных значений параметров режима или других величин, определяемых с использованием результатов измерений, с расчетными значениями тех же параметров, полученными с использованием модели сети [3, 4].

Различия между измеренными и расчетными данными, как и неравенство результатов измерений реальным значениям параметров режима КЗ, препятствуют правильному решению задачи ОМП и обуславливают несоответствие определяемого значения расстояния до места повреждения истинному месту КЗ. Факторы, влияющие на погрешность при ОМП, могут быть разделены на следующие группы [5]:

– погрешность измерений, обусловленная несовершенством используемых трансформаторов тока и напряжения и другого измерительного оборудования;

– начальная погрешность, возникающая в результате использования приближенных значений физических констант и значений параметров элементов системы, в том числе, вследствие использования упрощенных методик для их определения;

– погрешность задачи, обусловленная использованием упрощенной модели рассматриваемой системы (применение упрощенных подходов к моделированию различных частей СТЭ не позволяет точно воспроизвести свойства исследуемой системы и принять во внимание при решении задачи ОМП влияние ряда факторов, оказывающих влияние на режим в системе);

– погрешность метода, применяемого для решения системы уравнений состояния СТЭ (наличие погрешности реализации обусловлено необходимостью использования численных методов решения, обусловленной невозможностью применения прямых методов ввиду нелинейности решаемых уравнений).

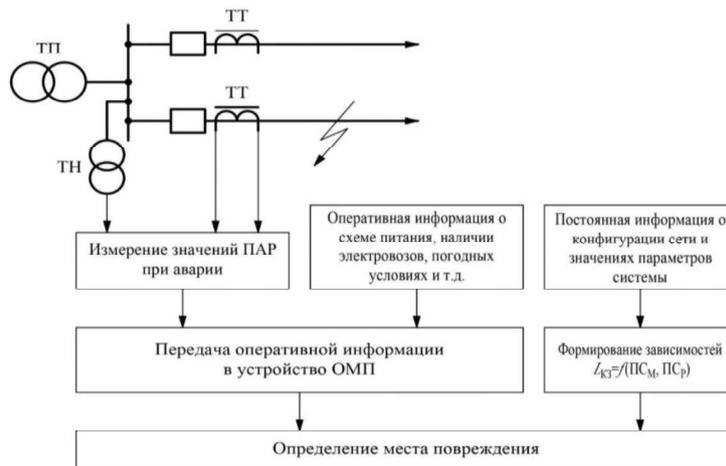


Рис. 1. Структурная схема дистанционного ОМП контактной сети по ПАР:

ТТ, ТН – трансформаторы тока и напряжения; ПС_М – значения параметров системы, принятые при моделировании; ПР_Р – расчетные значения параметров режима КЗ; L_{КЗ} – расстояние до места повреждения

Fig. 1. Structural diagram of the remote FL of the catenary network by emergency mode parameters (EMP):

ТТ, ТН – current and voltage transformers; ПС_М – system parameters values adopted during modeling; ПР_Р – calculated values of EMP; L_{КЗ} – distance to fault location

Поскольку одной из составляющих погрешности решения является погрешность задачи, связанная с недостаточной полнотой соответствия модели реальному объекту, особую важность, с точки зрения точного решения задачи ОМП по ПАР, имеет требование адекватности и точности используемой модели СТЭ. Минимизация погрешности задачи требует использования модели объекта, характеризующейся высокой степенью соответствия моделируемому объекту в части совпадения их выходных параметров, и достаточно полно отражающей те свойства моделируемой сети, которые оказывают существенное влияние на характер зависимостей анализируемых параметров режима КЗ от удаленности места повреждения. Таким образом, адекватность модели оригиналу, в данном случае представленному СТЭ, относится к числу основных факторов, влияющих на точность дистанционного ОМП [5-7].

Вместе с тем, требование адекватности используемой модели находится в противоречии с требованиями простоты и экономичности, в соответствии которыми количество учитываемых факторов, а также затраты вычислительных ресурсов, машинного времени и памяти, требуемые для реализации модели, должны быть минимальными [7]. Применительно к задаче дистанционного ОМП по ПАР и моделям, используемым для ее решения, эти требования обусловлены, главным образом, ограниченными возможностями ранних устройств РЗА, реализованных на основе электромеханической и электронной элементной базы, а также необходимостью обеспечения простоты их конструкции. Следствием этого были многочисленные упрощающие допущения, принятые при разработке расчетных моделей, положенных в основу наиболее простых методов ОМП ЛЭП [1, 8, 9]. Введение этих допущений, применение упрощенных подходов к моделированию различных элементов СТЭ и отказ от учета влияния различных факторов на режим в моделируемой сети приводят к ухудшению адекватности модели и, соответственно, увеличивают погрешность ОМП, на что указывают многочисленные исследования на тему оценки и повышения эффективности дистанционного ОМП тяговой сети, такие как [2, 3, 9, 10].

В настоящее время к наиболее существенным тенденциям развития комплекса средств РЗ и ПА относится применение интеллектуальных электронных устройств (ИЭУ) на микропроцессорной элементной базе, а также современных средств имитационного моделирования электроэнергетических систем [11, 12]. Использование цифровых вычислительных устройств в совокупности с современными программными комплексами позволяет существенно упростить разработку адекватных моделей СТЭ и их использование в ходе имитационных экспериментов, а преимущества микропроцессорных устройств РЗА перед электромеханическими и полупроводнико-

выми устройствами обуславливают снижение требований к простоте и экономичности реализуемых алгоритмов. В связи с этим, использование ряда упрощений при разработке моделей тяговой сети, предназначенных для использования при решении задачи ОМП по ПАР, является нецелесообразным, и перспективы дальнейшего совершенствования средств дистанционного ОМП связаны, в том числе, с применением детализированных моделей, приближенных к реальным условиям [9].

II. Анализ существующих подходов к моделированию тяговой сети

Упрощенные модели тяговой сети

Ранние методы ОМП, такие как «Z», «X» и их модификации, предполагающие вычисление расстояния до места КЗ по простым аналитическим выражениям, требуют представления тяговой сети в эквивалентированном виде, т.е. представления всей совокупности проводников, образующих тяговую сеть, в виде пассивного двухполосника [1-3, 9]. Поскольку тяговая сеть обладает сложной топологией, включает в себя большое количество несимметрично расположенных разнородных проводников, образующих взаимосвязанные контуры, характеризуется неоднородностью и наличием гальванической связи с землей на всем протяжении трассы, задача ее эквивалентирования без использования современных средств компьютерного моделирования является достаточно сложной, что обусловило необходимость принятия ряда упрощающих допущений [1, 9, 13]:

- тяговая сеть в пределах рассматриваемого участка считается однородной, а неодинаковые в различных точках трассы параметры, такие как удельные сопротивления проводников и расстояния между ними, усредняются и полагаются равными;
- различие схем питания тяговой сети, схем соединения контактных и рельсовых сетей смежных путей, а также различие параметров смежных подстанций игнорируются или учитываются упрощенно;
- упрощенно учитываются шунтирующее влияние земли и утечка тока из рельсовой сети;
- упрощенно учитываются параметры системы внешнего электроснабжения (СВЭ) подстанций;
- не учитываются схема группового заземления опор контактной сети и прерывистый характер включения тросов группового заземления (ТГЗ);
- принимается допущение о металлическом КЗ, т.е. не учитывается наличие переходного сопротивления между контактной сетью и землей в месте повреждения;
- принимается допущение о линейности тяговой сети, параметры всех ее элементов считаются не зависящими от параметров режима;
- не учитывается наличие нагрузки подстанций (ПС).

Методы расчета сопротивления тяговой сети, позволяющие перейти от параметров отдельных элементов тяговой сети к параметрам эквивалентного двухполюсника, изложены в работах [14, 15]. Как правило, рассматривается контур «контактный провод – рельс», применительно к которому в соответствии со вторым законом Кирхгофа записывается выражение для определения падения напряжения на единицу длины с учетом взаимного электромагнитного влияния проводников. В результате выражения токов в различных элементах контактной сети через ток питающего присоединения и введения коэффициента v , связывающего ток в контактной сети с током в рельсах, становится возможным определение отношения падения напряжения в рассматриваемом контуре к току присоединения. Таким образом, итоговое выражение для определения эквивалентного сопротивления тяговой сети принимает вид:

$$\underline{z}_{TC} = \underline{z}_{KC} + v \cdot \underline{z}_P, \quad (1)$$

где \underline{z}_{KC} , \underline{z}_P – погонные сопротивления контактной сети и рельсов соответственно, Ом/км; $v = I_P / I_{KC}$ – коэффициент, учитывающий шунтирующее влияние земли, о.е.

Результатом выполнения указанных операций является упрощенная схема замещения тяговой сети, представленная на рис. 2 [1, 9].

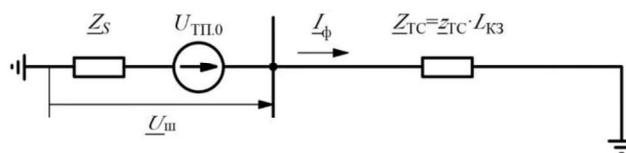


Рис. 2. Упрощенная схема замещения тяговой сети при металлическом КЗ

Fig. 2. Simplified equivalent circuit diagram of the traction network with a metallic short circuit

При использовании эквивалентированных моделей тяговой сети расстояние до места металлического КЗ может быть вычислено как отношение входного сопротивления петли КЗ к значению погонного сопротивления тяговой сети, рассчитанному по (1) [1].

Важнейшим преимуществом рассмотренного подхода к построению математических моделей тяговой сети является значительное упрощение вида уравнений состояния системы, что позволяет выполнять ОМП по ПАР с использованием простейших алгоритмов.

Вместе с тем, согласно выводам [1-3, 13], принятие вышеперечисленных допущений не позволяет с достаточной точностью отразить специфику устройства тяговой сети, в действительности представляющей собой сложную систему, электрический режим в которой определяется действием множества факторов.

Невозможность их учета обуславливает низкую адекватность упрощенных моделей, в связи с чем их использование в целях дистанционного ОМП приводит к значительным погрешностям методов «Z» и «X».

Так, исследование влияния допущения об однородности тяговой сети на точность ОМП в неоднородной тяговой сети, результаты которого приведены в [3], показало, что погрешность, обусловленная этим фактором, может составлять 1,4-1,8 км. Кроме того, нелинейность параметров рельсов и неравномерный характер утечки тока из рельсовой сети обуславливают зависимость удельного сопротивления тяговой сети от удаленности места КЗ, что также вносит в результат ОМП погрешность, величина которой может достигать 0,5 км [1].

К числу других существенных недостатков рассматриваемых моделей относятся невозможность точного учета схемы заземления опор, схемы питания контактной сети, различия параметров подстанций и схем их внешнего электропитания. В совокупности с дестабилизирующим влиянием переходного сопротивления, эти факторы могут приводить к отклонению результата ОМП по методам «Z» и «X» от реального значения удаленности места повреждения до 11 км [1]. Принимая во внимание современные требования к точности дистанционного ОМП контактной сети, согласно которым максимальная приемлемая величина погрешности определения удаленности места КЗ составляет 250 м. [16], точность простейших аналитических методов ОМП является неудовлетворительной. Поскольку к числу основных причин низкой точности этих методов относится недостаточная степень адекватности используемых моделей СТЭ, использование рассмотренного выше подхода к моделированию тяговой сети является нецелесообразным, с точки зрения удовлетворения требования к точности ОМП.

Индуктивно развязанные схемы замещения тяговой сети

В связи со снижением требований к простоте и экономичности используемых моделей СТЭ, вызванным совершенствованием системы РЗ и ПА тяговой сети и ее переводом на микропроцессорную элементную базу, наиболее широкое применение при решении задачи ОМП получили индуктивно развязанные модели тяговой сети [1]. Методика составления таких моделей подробно описана в [1, 17, 18].

Так, сущность методики расчета, изложенной в [17, 18], заключается в замене совокупности контуров «проводник – земля» совокупностью результирующих контуров, образованных «пучками» параллельно соединенных проводов контактной сети или рельсов. При этом в целях упрощения процесса расчета взаимные сопротивления всех пар проводников одной многопроводной сети и взаимные сопротивления проводников различных многопроводных сетей принимаются равными средним значениям соответствующих величин. Целесообразность применения упрощенной методики при составлении схемы замещения тяговой сети в целях инженерной и проектной практики обусловлена наличием большого количеством разнородных и несимметрично расположенных проводников (8 на

двухпутном участке, электрифицированном по схеме 25 кВ, и 12 на двухпутном участке, электрифицированном по схеме 25 кВ с экранируемыми и усиленными проводами (ЭУП).

В соответствии с рассматриваемым подходом, схема цепи, состоящая из q параллельно соединенных ветвей с взаимной индуктивной связью в явном виде (рис. 3а), заменяется эквивалентной схемой, в которой усредненное значение взаимного сопротивления q ветвей вынесено в отдельную ветвь, включенную последовательно с преобразуемой частью цепи между точками a и b (рис. 3б). Сопротивление этой ветви $Z_{m,q}$ рассчитывается по (2) и зависит от среднего геометрического расстояния D_q между всеми проводниками цепи, определяемому по (3).

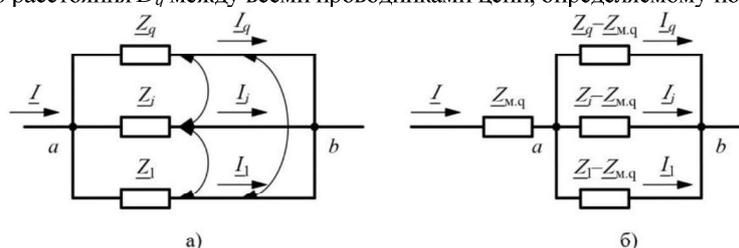


Рис. 3. Схема замещения q параллельно соединенных проводников с взаимной индуктивной связью (а) и индуктивно развязанная схема замещения той же цепи (б)

Fig. 3. Equivalent circuit diagram of q parallel-connected conductors with mutual inductive coupling (a) and inductively uncoupled equivalent circuit diagram of the same circuit (b)

$$\underline{Z}_{m,q} = \frac{2}{q \cdot (q-1)} \cdot \sum_{i=1}^{q-1} \sum_{j=i+1}^q \underline{Z}_{m,ij}; \quad (2)$$

$$D_q = \left(\prod_{i=1}^{q-1} \prod_{j=i+1}^q D_{ij} \right)^{\frac{2}{q \cdot (q-1)}}, \quad (3)$$

где \underline{Z}_{ij} – взаимное сопротивление между проводниками i и j ; D_{ij} – расстояние между осями проводников i и j .

Записав и преобразовав уравнение по второму закону Кирхгофа для контура « i -й проводник – земля» (рис. 3а) с учетом ранее принятого допущения о равенстве взаимных сопротивлений между всеми проводниками, можно получить выражение (4), которому соответствует схема, показанная на рис. 3б:

$$\underline{U}_{ab} = (\underline{Z}_i - \underline{Z}_{m,q}) \cdot \underline{I}_i + \underline{Z}_{m,q} \cdot \underline{I}; \quad (4)$$

где \underline{U}_{ab} – напряжение между точками a и b (рис. 3), равное падению напряжения в любой из ветвей цепи.

С использованием описанной методики вычисляются эквивалентные сопротивления многопроводных контуров «контактная сеть – земля» и «рельсы – земля», что позволяет выполнить дальнейшее преобразование схемы, показанной на рис. 3б, и привести ее к виду пассивного двухполосника.

На втором этапе преобразования схемы замещения рассматривается тяговая сеть в целом, отдельные части которой преобразованы описанным выше способом и представлены в виде индуктивно связанных двухполосников. При этом, в соответствии с принятыми допущениями, взаимные сопротивления между проводниками разных «пучков» принимаются равными среднему значению для всех пар проводников, вычисляемому по формулам, аналогичным (2) и (3).

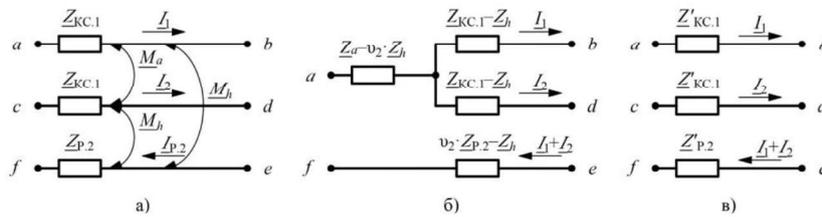


Рис. 4. Схема замещения двухпутного участка тяговой сети с взаимной индуктивной связью в явном виде (а), преобразованная схема с индуктивно развязанными контактными сетями и с учетом влияния земли (б), индуктивно развязанная схема замещения сети (в)

Fig. 4. Equivalent circuit diagram of a double-track section of a traction network with mutual inductive coupling in explicit form (a), transformed circuit with inductively uncoupled catenary networks and taking into account the influence of the ground (b), inductively uncoupled equivalent circuit of network (в)

На рис. 4 представлены следующие обозначения: M_a , M_h – коэффициенты взаимной индукции между контактными сетями и между контактной сетью и рельсами соответственно; Z_a , Z_h – взаимные индуктивные сопротивления, соответствующие коэффициентам M_a и M_h ; $Z_{\text{к.с.1}}$, $Z_{\text{р.2}}$ – расчетные сопротивления контактной сети одного пути и рельсовой сети двух путей; v_2 – коэффициент, характеризующий утечку тока из рельсовой сети.

Для схемы замещения тяговой сети двухпутного участка с одинаковыми контактными подвесками на обоих путях, представленной на рис. 4а, можно записать выражения для определения падений напряжения в каждой ветви с учетом выбранных направлений токов и влияния земли на ток в рельсовой сети:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{ab} &= \underline{Z}_{\text{к.с.1}} I_1 + \underline{Z}_a I_2 - \underline{Z}_h v_2 (I_1 + I_2) = \\ &= (\underline{Z}_{\text{к.с.1}} - \underline{Z}_h) I_1 + (\underline{Z}_a - v_2 \underline{Z}_h) (I_1 + I_2); \\ \underline{U}_{cd} &= \underline{Z}_a I_1 + \underline{Z}_{\text{к.с.1}} I_2 - \underline{Z}_h v_2 (I_1 + I_2) = \end{aligned} \quad (5)$$

$$= (\underline{Z}_{\text{KC.1}} - \underline{Z}_h) \underline{I}_2 + (\underline{Z}_a - \nu_2 \underline{Z}_h) (\underline{I}_1 + \underline{I}_2);$$

$$\underline{U}_{ef} = -\underline{Z}_h \underline{I}_1 - \underline{Z}_h \underline{I}_2 + \underline{Z}_{\text{P.2}} \nu_2 (\underline{I}_1 + \underline{I}_2) = (\nu_2 \underline{Z}_{\text{P.2}} - \underline{Z}_h) (\underline{I}_1 + \underline{I}_2).$$

Из (5) определяются параметры эквивалентной схемы замещения, показанной на рис. 4б, взаимные индуктивные связи между ветвями которой в явном виде отсутствуют. Для устранения фиктивной ветви с сопротивлением $\underline{Z}_a - \nu_2 \underline{Z}_h$ и перехода к полностью развязанной схеме замещения складываются множители при сумме токов $(\underline{I}_1 + \underline{I}_2)$ в (5). Конечным результатом преобразований является схема, представленная на рис. 4в. Значения расчетных сопротивлений контактной сети одного пути $\underline{Z}'_{\text{KC.1}}$ и рельсовой сети двух путей $\underline{Z}'_{\text{P.2}}$ определяются по (6):

$$\begin{aligned} \underline{Z}'_{\text{KC.1}} &= \underline{Z}_{\text{K.1}} - \underline{Z}_{\text{BC}}; \\ \underline{Z}'_{\text{P.2}} &= \nu_2 \cdot \underline{Z}_{\text{P.1}} + \underline{Z}_{\text{BC}}; \\ \underline{Z}_{\text{K.1}} &= \underline{Z}_{\text{KC.1}} - \underline{Z}_h; \\ \underline{Z}_{\text{BC}} &= \underline{Z}_a - \underline{Z}_h, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\underline{Z}_{\text{K.1}}$ – индуктивно развязанное сопротивление контактной сети одного пути; $\underline{Z}_{\text{BC}}$ – индуктивное сопротивление взаимосвязи.

Способ определения поправочного коэффициента ν , входящего в формулы для расчета параметров элементов индуктивно развязанной схемы замещения, согласно [18], основывается на анализе схемы замещения рельсовой сети, электрически соединенной с землей через переходное сопротивление балласта и шпал. Эта система рассматривается как электрическая цепь с равномерно распределенными параметрами и представляется в виде пассивных П-образных четырехполюсников, параметры которых зависят от погонных значений переходного сопротивления балласта и собственного сопротивления рельсов, а также удельного сопротивления земли.

Таким образом, описанная методика позволяет перейти от исходной схемы замещения тяговой сети, в которой все ее проводники представлены соответствующими ветвями с взаимной индуктивной связью в явном виде, к упрощенной и индуктивно развязанной схеме замещения, в которой многопроводные части тяговой сети (контактная и рельсовая сети) эквивалентированы и представлены в виде двухполюсников, взаимные сопротивления между которыми характеризуют средние значения взаимных сопротивлений между всеми парами проводников двух многопроводных элементов и выносятся в ветвь, соответствующую рельсовой сети. Эти решения позволяют сформировать простую схему замещения тяговой сети, топологически схожую с принципиальной схемой питания участка тяговой сети. В качестве примера рассмотрим участок с n электри-

фицированными путями и наиболее распространенным вариантом питания контактной сети от двух смежных подстанций при узловой схеме соединения контактных подвесок на посту секционирования ПС. Принципиальная схема питания этого участка показана на рис. 5.

В результате преобразований, выполненных в соответствии с приведенной методикой, формируется индуктивно развязанная схема замещения тяговой сети в пределах рассматриваемой межподстанционной зоны (рис. 6). Специфика формирования индуктивно развязанных схем замещения, предназначенных для использования в целях решения задачи ОМП, заключается в добавлении дополнительной ветви с переходным сопротивлением Z_{Π} (или узла, общего для аварийной контактной сети и рельсов, при допущении о металлическом КЗ) и разделении соответствующих ветвей на два сегмента [1, 18]. При этом контактная сеть n путей на участке между ПС и смежной подстанцией, как правило, эквивалентруется ввиду независимости токораспределения между этими ветвями от конфигурации сети за точкой их параллельного соединения. Дальнейшее упрощение схемы достигается путем эквивалентирования исправных линий на участке, содержащем КЗ, и заменой треугольника, образованного эквивалентированной исправной контактной сетью и двумя ветвями поврежденной линии, на трехлучевую звезду [1]. Таким образом, индуктивно развязанная схема замещения может быть приведена к наиболее простому виду (рис. 7).

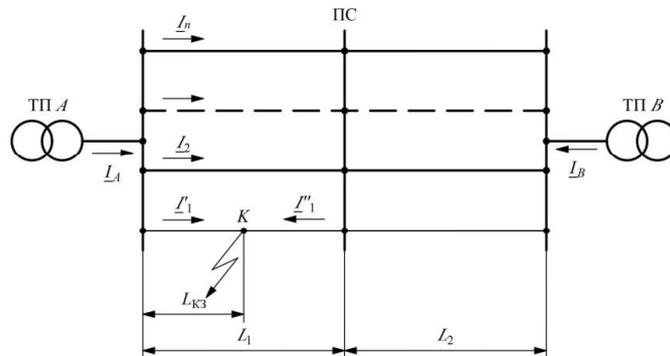


Рис. 5. Принципиальная схема питания n -путного участка тяговой сети с двухсторонним питанием и узловой схемой соединения контактных сетей параллельных путей при КЗ на участке 1-го пути, между ТП А и ПС

Fig. 5. Schematic diagram of the power supply of an n -track section of a traction network with two-way power supply and a nodal connection of the catenary networks of parallel tracks during a SC on the section of the 1st track, between substation A and sectioning station

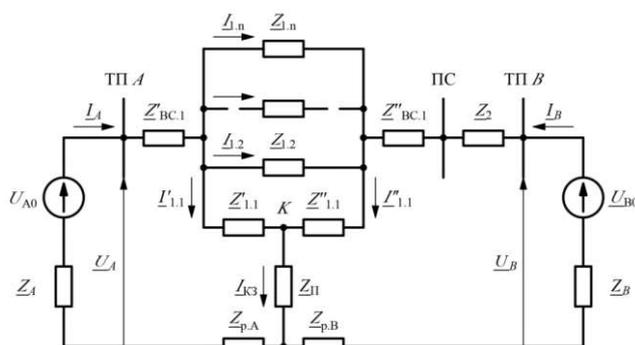


Рис. 6. Индуктивно развязанная схема замещения n -путного участка тяговой сети при КЗ через переходное сопротивление в контактной сети 1-го пути

Fig. 6. Inductively uncoupled equivalent circuit of an n -track section of a traction network during a SC through contact resistance in the 1st track catenary network

На рис. 6 представлены следующие обозначения: $Z'_{1,1}$, $Z''_{1,1}$ – сопротивления сегментов контактной сети 1-го пути от ТП А до места КЗ и от места КЗ до ПС соответственно; $Z_{1,2} \dots Z_{1,n}$ – сопротивления контактных сетей неповрежденных путей между ТП А и ПС; Z_2 – эквивалентное сопротивление параллельно соединенных контактных сетей n путей на участке от ПС до ТП В; $Z_{р,А}$, $Z_{р,В}$ – сопротивления рельсовой сети всех путей между точкой КЗ и соответственно ТП А и ТП В; $Z'_{вс,1}$, $Z''_{вс,2}$ – индуктивно развязанные сопротивления взаимосвязи между контактными сетями n путей от ТП А до места КЗ и от места КЗ до ПС соответственно.

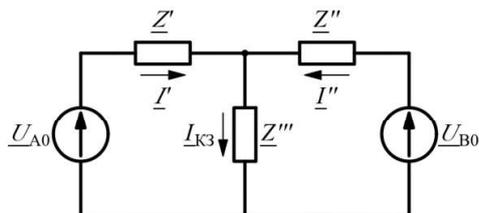


Рис. 7. Упрощенный вариант индуктивно развязанной схемы замещения тяговой сети: Z' , Z'' , Z''' – эквивалентные сопротивления

Fig. 7. Simplified version of the inductively uncoupled equivalent circuit of the traction network: Z' , Z'' , Z''' – equivalent impedances

Обладая повышенной степенью детализации и позволяя проводить анализ режима КЗ с учетом таких факторов, как различие схем питания тяговой сети, взаимное индуктивное влияние между контактными сетями параллельных путей и зависимость удельного сопротивления тяговой сети от

места КЗ, а также позволяя ввести в расчетные выражения большее число контролируемых ПАР, рассмотренные индуктивно развязанные схемы также являются достаточно простыми и позволяют производить расчеты с использованием аналитических выражений, что обусловило их широкое применение при решении задачи ОМП контактной сети. На использовании индуктивно развязанных схем замещения, аналогичных показанным на рис. 6 и 7, основан принцип действия большого количества методов ОМП и указателей удаленности места КЗ, подробная характеристика которых приведена в работах [1, 9, 19, 20].

Недостатки индуктивно развязанных схем замещения, составленных в соответствии с описанной методикой, обусловлены внесением в расчеты дополнительной погрешности, обусловленной следующими факторами [9, 18]:

- заменой реальных значений коэффициентов взаимной индукции между проводниками средними значениями коэффициентов для различных групп проводников;
- определением параметров тяговой сети при усредненных габаритах на прямых участках пути;
- неопределенностью значений ряда параметров при вычислении среднего значения тока в рельсовой сети с учетом влияния утечки через балласт.

Дополнительная погрешность, обусловленная принятыми допущениями, составляет 1-2 %, что приемлемо при проведении инженерных расчетов в связи с незначительностью этой погрешности по сравнению с погрешностями, возникающими в результате применения упрощенных способов расчета собственных сопротивлений проводников, а также коэффициентов само- и взаимной индукции контуров [18]. Однако жесткие требования к точности ОМП обуславливают нецелесообразность использования при составлении схем замещения СТЭ подходов, ограничивающих адекватность получаемых моделей. Вместе с тем, для современных алгоритмов ОМП характерна значительная сложность вне зависимости от вида используемой модели сети, а их реализация требует применения микропроцессорных устройств РЗА, в связи с чем требование простоты модели в настоящее время не являются существенным.

Современные детализированные модели тяговой сети

Как было отмечено выше, основным фактором, обуславливающим погрешности при дистанционном ОМП по ПАР, является использование расчетных моделей СТЭ, методика составления которых предполагает введение большого числа допущений в целях упрощения процесса расчета или упрощения топологии схемы замещения сети [2, 9, 13]. Помимо эквивалентирования и линеаризации различных элементов тяговой сети и усреднения

значений ее геометрических и электрических параметров на всем протяжении моделируемой зоны, в число аспектов задачи моделирования, при рассмотрении которых часто применяется упрощенный подход, относится моделирование СВЭ: при этом не учитываются особенности конфигурации внешней части системы, параметры ее элементов определяются приближенно, а наличие связей (обычно представленных ЛЭП 110 (220) кВ) между смежными ТП игнорируется. Многочисленные исследования [2, 3, 9, 10, 16, 21-23] показывают, что совокупность этих факторов представляет собой важнейший источник погрешности задачи, существенно ограничивающей точность алгоритмов ОМП контактной сети, в связи с чем наиболее целесообразным, с точки зрения повышения степени адекватности расчетной модели тяговой сети и минимизации ошибки при ОМП, является представление исследуемой системы в наиболее детализированном виде.

Такой подход к моделированию СТЭ позволяет наиболее точно учесть особенности устройства тяговой сети и принять во внимание неоднородность ее параметров, разнородность и несимметричность расположения образующих ее проводников (проводов, тросов и рельсов), нелинейность параметров рельсовой сети и влияние на них проводимостей балластного слоя и грунта, наличие большого количества соединений между рельсами, контактными подвесками смежных путей и т.п., прерывистый характер расположения ТГЗ при групповом заземлении опор и другие факторы, которые не могут быть адекватно отражены при использовании подходов, рассмотренных выше [1]. Неактуальность использования эквивалентированных моделей обусловлена также значительно возросшими возможностями вычислительной техники, упрощающей как проведение вычислительных экспериментов, так и процесс разработки моделей, а также широким применением интеллектуальных электронных устройств (ИЭУ) в современных автоматизированных системах управления электроснабжением железных дорог [24].

Современные детализированные модели тяговой сети, в наибольшей степени отвечающие требованию адекватности, представляют собой сегментированные схемы замещения. Такой подход к моделированию тяговой сети позволяет исключить необходимость принятия допущения о ее однородности, не выполняемого в действительности и приводящего к значительному искажению параметров модели по сравнению с моделируемой системой и, следовательно, к погрешностям при ОМП. Его суть состоит в условном разделении тяговой сети (рис. 8) на ряд участков $[L_1; L_m]$ длиной ΔL_i каждый, в пределах которых удельные значения собственных и взаимных сопротивлений проводников сети полагаются неизменными и в общем случае отличными от аналогичных значений величин, характеризующих тяговую сеть в пределах других сегментов [25, 26].

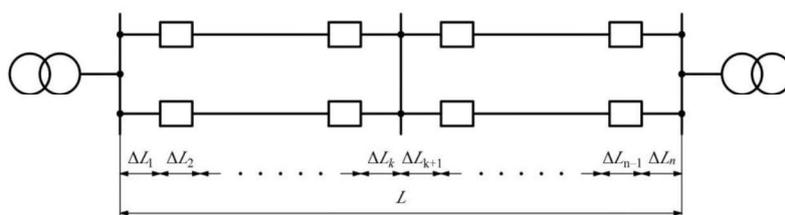


Рис. 8. Пример принципиальной схемы питания участка тяговой сети, условно разделенного на n сегментов длиной ΔL_i

Fig. 8. Example of a schematic diagram of a traction network section power supply conditionally divided into n segments of length ΔL_i

Таким образом, условное сегментирование тяговой сети позволяет достаточно точно учесть разнотипность проводов и тросов вдоль трассы тяговой сети, различие количества параллельных путей и расстояний между ними, сближения с другими ЛЭП, наличие железнодорожных станций с разветвленной тяговой сетью и другие факторы, обуславливающие неоднородность тяговой сети и затрудняющие составление адекватных моделей с использованием рассмотренных ранее подходов.

Другим важным преимуществом рассматриваемого подхода является простота учета поперечных соединений между проводниками, в результате чего существенно упрощается учет междурельсовых и междупутных перемычек, дроссель-трансформаторов, постов секционирования и пунктов параллельного соединения контактной сети. При использовании подходов к моделированию тяговой сети, базирующихся на эквивалентировании ее элементов и использовании средних значений параметров, составление схемы замещения с учетом указанных элементов существенно затруднено и требует введения дополнительных допущений, снижающих адекватность модели. Точный учет топологии контактной и рельсовой сетей, необходимый с точки зрения правильной оценки токораспределения в тяговой сети, возможен только при делении ее схемы замещения на условно однородные сегменты, не содержащие ответвлений, и включения дополнительных ветвей между соответствующими узлами.

К числу важнейших особенностей современных моделей тяговой сети относится минимальная степень эквивалентирования ее многопроводных элементов, таких как контактная сеть и рельсы. В отличие от ранее рассмотренного подхода, основанного на более жестких требованиях к простоте полученной модели, современные методы моделирования тяговой сети предполагают ее детализированное представление в виде совокупности разнородных проводов, тросов и рельсов, в общем случае несимметрично расположенных в поперечном сечении пролета. Таким образом, при всех расчетах с использованием современных детализированных моделей

непосредственно используются значения собственных и взаимных параметров контуров «проводник – земля», определенные для каждого из n условно выделенных сегментов. Из работ [2, 3, 9, 16, 22, 26] известно, что такой подход наиболее полно отвечает требованию точного учета структуры моделируемой сети и позволяет получить модель, наиболее адекватную оригиналу.

Детализация структуры тяговой сети также обуславливает значительное упрощение моделирования рельсовой сети и учет ее электрической связи с балластным слоем и землей, что достигается путем непосредственного учета проводимостей соответственно балласта и различных слоев грунта при составлении схемы замещения. При этом не требуется определение поправочного коэффициента ν , вычисление которого по методикам [14, 18, 27] сопряжено с необходимостью принятия ряда упрощающих допущений. Проблеме влияния степени детализации цепи, состоящей из рельсов, балласта и многослойного грунта на адекватность модели посвящены работы [2, 13, 21]. Приведенные в них результаты имитационных экспериментов с использованием вариантов модели, отличающихся в части детализации структуры «рельсы – земля», свидетельствуют о значительном влиянии этого фактора на токораспределение в рельсах и земле, а также на расчетные значения параметров режима и петли КЗ.

Таким образом, результатом применения описанного подхода, основанного на принципах условного сегментирования сети и минимизации степени эквивалентирования ее частей, является детализированная схема замещения (рис. 9).

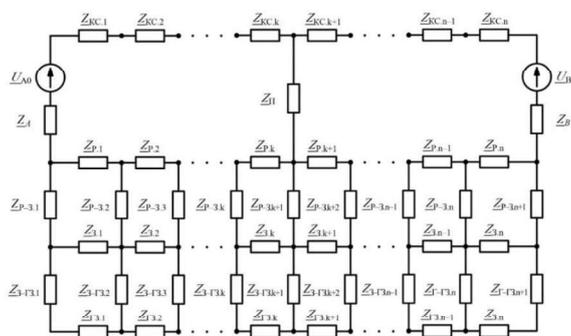


Рис. 9. Пример детализированной и условно сегментированной схемы замещения тяговой сети однопутного участка с двухсторонним питанием
Fig. 9. Example of a detailed and segmented circuit diagram of a single-track traction network with double-way power supply

На рис. 9 представлены следующие обозначения: U_{A0}, U_{B0}, Z_A, Z_B – напряжения холостого хода и сопротивления подстанций A и B ; $Z_{KC,i}, Z_{P,i}, Z_{3,i}, Z_{Г3,i}$ – сопротивления контактной и рельсовой сетей, поверхностного и глубокого слоев земли; $Z_{P-3,i}, Z_{Г-Г3,i}$ – переходные сопротивления между рельсами и землей и между слоями земли; $Z_{П}$ – переходное сопротивление в месте КЗ.

Детализированные схемы замещения тяговой сети характеризуются значительной сложностью топологии, наличием большого количества узлов и индуктивно связанных ветвей, часть которых обладает нелинейными параметрами, что делает невозможным использование простейших аналитических выражений при их анализе и требует применения более сложного математического аппарата [2, 13]. Особенно актуальной эта проблема является при необходимости формирования баз данных значений ПАР, полученных по результатам вычислительных экспериментов, в ходе которых моделируется режим КЗ при различных комбинациях ряда факторов (величина переходного сопротивления, схема питания контактной сети и др.) На анализе таких массивов (табл. 1) основан принцип действия дистанционного метода «С» [25].

Таблица 1.
Общий вид структуры базы данных расчетных значений ПАР

Table 1.
General view of the calculated EMP database structure

$R_{П}, \text{ Ом}$	M_j				
	$L_{КЗ}, \text{ км}$				
	ΔL_1	$\Delta L_1 + \Delta L_2$	...	$\sum_i^{n-1} \Delta L_i$	$\sum_i^{n-1} \Delta L_i$
$R_{П.1}$	$\begin{Bmatrix} R_{ПКЗ.1,1} \\ X_{ПКЗ.1,1} \\ Z_{ПКЗ.1,1} \\ \Phi_{ПКЗ.1,1} \end{Bmatrix}$	$\{x_{1,2}\}$	....	$\{x_{1,n-1}\}$	$\{x_{1,n}\}$
$R_{П.2}$	$\{x_{2,1}\}$	$\{x_{2,2}\}$	...	$\{x_{2,n-1}\}$	$\{x_{2,n}\}$
...
$R_{П.m-1}$	$\{x_{m-1,1}\}$	$\{x_{m-1,2}\}$	...	$\{x_{m-1,n-1}\}$	$\{x_{m-1,n}\}$
$R_{П.m}$	$\{x_{m,1}\}$	$\{x_{m,2}\}$	...	$\{x_{m,n-1}\}$	$\{x_{m,n}\}$

Для совершенствования подходов к моделированию СТЭ и применения детализированных моделей в исследовательских и практических целях целесообразно использование таких моделей в совокупности с применением компьютерного моделирования [2, 22, 26]. Отметим, что это не является специфической особенностью метода «С», а характерно для большинства современных методов

ОМП, реализация которых основывается на анализе неоднородных моделей тяговой сети. Так, выполнения большого количества вычислений требуют также способ [28-30], основанный на численном интегрировании телеграфных уравнений тяговой сети, и способ [31], предполагающий итерационное вычисление расстояния до места повреждения по условию баланса реактивной мощности.

III. Заключение

Рассмотрены известные подходы к составлению схем замещения тяговой сети переменного тока и проанализирована целесообразность их использования в целях изучения влияния различных факторов на зависимости значений ПАР от удаленности места КЗ, оценки эффективности известных методов ОМП по ПАР и построения расчетных моделей перспективных методов. Основываясь на требованиях, предъявляемых к точности современных способов дистанционного ОМП и их расчетным моделям, опыте применения существующих средств ОМП контактной сети и результатах исследований [2, 3, 8-10, 16, 19, 23], можно сделать следующие выводы относительно перспектив применения рассмотренных подходов к моделированию СТЭ.

За период времени с начала исследований по теме ОМП контактной сети и разработки простейших указателей удаленности места КЗ был осуществлен перевод АСУЭ железных дорог с электромеханической и полупроводниковой элементной базы на микропроцессорную, и в связи с этим изменилась приоритетность требований, предъявляемых к расчетным моделям, используемым для оценки расстояния до места повреждения. Возможности современных микропроцессорных устройств РЗ и ПА тяговой сети, а также средств имитационного моделирования электрических сетей позволяют пренебречь требованием к простоте моделей, вследствие чего основным является их адекватность моделируемой сети.

Упрощенные модели, составленные с широким применением эквивалентирования различных частей тяговой сети и с учетом допущения о ее однородности по всей длине участка, не обладают достаточной адекватностью. Существенные недостатки этих моделей, связанные с невозможностью точного отражения параметров моделируемой системы, представляют собой один из важнейших факторов, обуславливающих неудовлетворительную точность большинства известных методов ОМП по ПАР. Наиболее адекватными являются детализированные модели, при составлении которых учитывается неоднородность тяговой сети, точно воспроизводится ее топология, и в минимальной степени эквивалентуются ее составные части.

Существующие модели не в полной мере удовлетворяют указанным требованиям, что снижает их адекватность и, как следствие, не позволяет точно исследовать влияние различных факторов на параметры режима КЗ, а также ограничивает точность методов ОМП, основанных на использовании этих моделей.

В связи с этим, целесообразно их дальнейшее совершенствование в части повышения степени детализации.

© Куликов А.Л., 2026

© Осокин В.Л., 2026

© Леваков Д.А., 2026

Поступила в редакцию 05.11.2025

Принята к публикации 05.11.2025

Received 20.01.2026

Accepted 20.01.2026

Библиографический список

- [1] Фигурнов Е.П. Релейная защита. М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2009. – 604 с.
- [2] Куликов А.Л., Осокин В.Л., Леваков Д.А. Исследование влияния детализации модели тяговой сети и метода расчета параметров режима на точность расчетных данных // XLVI Межд. науч.-тех. конф. «Кибернетика энергетических систем», Октябрь 19-21, 2024, Новочеркасск, Россия: Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова, 2024. С. 150-163.
- [3] Леваков Д.А., Куликов А.Л., Осокин В.Л. Оценка погрешностей простейших методов определения мест повреждений контактной сети с использованием неоднородной модели тяговой сети переменного тока // XXIX Нижегородская сессия молодых ученых (гуманитарные, технические, естественные науки), Ноябрь 12-15, 2024, Нижний Новгород, Россия: ООО «Издательство «Перо», 2024. С. 384-388.
- [4] Аржанников Е.А., Лукоянов В.Ю., Мисриханов М.Ш. Определение места короткого замыкания на высоковольтных линиях электропередачи. М.: Энергоатомиздат, 2003. – 272 с.
- [5] Демидович Б.П., Марон И.А. Основы вычислительной математики. С.-Пб.: Лань, 2011. – 672 с.
- [6] Муратаев И.А., Муратаева Г.А., Ярославский Д.А., Хузяшев Р.Г., Горячев М.П. Моделирование режимов работы электроэнергетических систем. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2019. – 94 с.
- [7] Звонарев С.В. Основы математического моделирования. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. – 112 с.
- [8] Куликов А.Л., Осокин В.Л., Леваков Д.А. Сравнительный анализ и перспективы развития дистанционных методов определения мест повреждений контактной сети. Часть 1 // Интеллектуальная Электротехника. 2025. № 1. С. 16-35.
- [9] Куликов А.Л., Осокин В.Л., Леваков Д.А. Сравнительный анализ и перспективы развития дистанционных методов определения мест повреждения контактной сети. Часть 2 // Интеллектуальная электротехника. 2025. № 2. С. 4-33.
- [10] Попова Н.А. О достоверности определения расстояния до короткого замыкания в тяговой сети переменного тока // Автоматизированные системы электроснабжения железных дорог, Жарков Ю.И. Ростов-на-Дону: РГУПС, 1995. – С. 118-123.
- [11] Шнеерсон Э.М. Цифровая релейная защита. М.: Энергоатомиздат, 2007. – 549 с.

- [12] Федосеев А.М., Федосеев М.А. Релейная защита электроэнергетических систем. М.: Энергоатомиздат, 1992. – 528 с.
- [13] Куликов А.Л., Леваков Д.А. Моделирование контактной сети железнодорожного транспорта для определения мест повреждений // *Электричество*. 2024. № 3. С. 45-58. DOI: 10.24160/0013-5380-2024-3-45-58
- [14] Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
- [15] Тер-Оганов Э.В., Пышкин А.А. Электроснабжение железных дорог. Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2014. – 432 с.
- [16] Быкадоров А.Л., Заруцкая Т.А., Гаврилов И.В., Муратова-Милехина А.С. Детализация структуры тяговых сетей переменного тока в задачах моделирования и расчета параметров петли короткого замыкания // *Электроснабжение и электрооборудование транспорта*. 2015. № 4. С. 4-12.
- [17] Фигурнов Е.П. Сопротивления электротяговой сети однофазного переменного тока // *Электричество*. 1997. № 5. С. 23-29.
- [18] Фигурнов Е.П., Быкадоров А.Л., Жарков Ю.И., Герман Л.А., Субханвердиев К.С. Сопротивления электротяговой сети однофазного переменного тока железных дорог // *Электричество*. 2021. № 11. С. 35-44. DOI: 10.24160/0013-5380-2021-11-35-44
- [19] Фигурнов Е.П., Стороженко Д.Е. Современные методы определения удаленности повреждения контактной сети // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. 2003. № 1. С. 48-53.
- [20] Дынькин Б.Е., Завражин В.В. Сравнительный анализ существующих методов определения повреждения тяговой сети // *Межд. науч. конф. «Актуальные вопросы технических наук»*, Июль 20-23, 2011, Пермь, Россия: Меркурий, 2011. С. 53-56.
- [21] Быкадоров А.Л., Заруцкая Т.А., Муратова-Милехина А.С. Анализ взаимного влияния параметров тяговой сети переменного тока на полное сопротивление контура короткого замыкания // *Вестник транспорта Поволжья*. 2013. № 5 (41). С. 5-11.
- [22] Быкадоров А.Л., Заруцкая Т.А., Муратова-Милехина А.С. Повышение эффективности определения места короткого замыкания в тяговых сетях переменного тока на основе информационных технологий // *Вестник транспорта Поволжья*. 2015. № 6 (54). С. 15-19.
- [23] Герман Л.А., Кишкурно К.В., Субханвердиев К.С. Оценка погрешности расчета токов короткого замыкания в тяговой сети переменного тока // *Электроника и электрооборудование транспорта*. 2017. № 1. С. 5-10.
- [24] Герман Л.А. Совершенствование тягового электроснабжения переменного тока для повышения пропускной способности железных дорог. Н. Новгород: СамГУПС, 2024. – 186 с.
- [25] Муратова-Милехина А.С., Быкадоров А.Л., Заруцкая Т.А. Способ определения места короткого замыкания контактной сети электрифицированного транспорта. Пат. 2566458 RU, заявл. 20.02.14; опубл. 27.10.2015. – Бюл. № 30.
- [26] Быкадоров А.Л., Заруцкая Т.А., Муратова-Милехина А.С. Применение теории распознавания образов при определении места короткого замыкания в тяговых сетях переменного тока // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. 2021. № 2 (82). С. 119-128. DOI: 10.46973/0201-727X_2021_2_119
- [27] Карякин Р.Н. Тяговые сети переменного тока. М.: Транспорт, 1987. – 279 с.

- [28] Тигунцев С.Г., Есаулов А.В. Способ определения места короткого замыкания в тяговой сети системы 2*25 кВ железной дороги, Пат. 2821157 RU, заявл. 21.03.24; опубл. 17.06.24. – Бюл. № 17.
- [29] Есаулов А.В., Тигунцев С.Г. Определение места повреждения в тяговой сети системы 25 кВ // Известия Транссиба. 2023. № 2 (54). С. 120-127.
- [30] Есаулов А.В., Тигунцев С.Г., Анненков Е.О. Определение места повреждения в тяговой сети системы 2×25 кВ // Известия Транссиба. 2023. № 4 (56). С. 101-112.
- [31] Герман Л.А., Субханвердиев К.С., Куликов А.Л., Карпов И.П., Обалин М.Д. Способ определения мест короткого замыкания неоднородной контактной сети однопутного участка электрифицированного транспорта с двухсторонним питанием, Пат. 2789434 RU, заявл. 10.06.22; опубл. 02.02.23. – Бюл. № 4.

References

- [1] Е.Р. Figurnov, *Releynaya zashchita [Relay protection]*. Moscow: State Educational Institution “Educational and Methodological Center for Education in Railway Transport”, 2009 (in Russian).
- [2] A.L. Kulikov, V.L. Osokin and D.A. Levakov, “Research on the influence of the traction network model detailing and the mode parameters calculating method on the accuracy of the calculated data”, in proc. *XLVI Int. sci.-tech. conf. Kibernetika energeticheskikh sistem [Cybernetics of power systems]*, Oct. 19-21, 2024, Novocherkassk, Russia, pp. 155-163 (in Russian).
- [3] D.A. Levakov, A.L. Kulikov and V.L. Osokin, “Error estimation of the simplest methods for fault locating of a catenary network using heterogeneous model of an alternating current traction network”, in proc. *XXIX Nizhegorodskaya sessiya molodykh uchennykh (gumanitarnie, tekhnicheskie, estestvennye nauki) [XXIX Nizhny Novgorod session of young scientists (humanities, technical, natural sciences)]*, Nov. 12-15, 2024, Nizhny Novgorod, Russia, pp. 384-388 (in Russian).
- [4] E.A. Arzhannikov, V.Yu. Lukoyanov and M.Sh. Misrikhanov, *Opredelenie mesta korotkogo замыкaniya na vysokovolnykh liniyah elektroperedachi [Determining the location of a short circuit on high-voltage power lines]*. Moscow: Energoatomizdat, 2003 (in Russian).
- [5] B.P. Demidovich and I.A. Maron, *Osnovy vychislitel'noi matematiki [Fundamentals of Computational Mathematics]*. St. Petersburg: Lan', 2011 (in Russian).
- [6] I.A. Murataev, G.A. Murataeva, D.A. Yaroslavsky, R.G. Khuzyashev and M.P. Goryachev, *Modelirovaniye rezhimov raboty elektroenergeticheskikh sistem [Modeling of operating modes of electric power systems]*. Kazan: Kazan State Energetic University, 2019 (in Russian).
- [7] S.V. Zvonarev, *Osnovy matematicheskogo modelirovaniya [Fundamentals of mathematical modeling]*. Yekaterinburg: Ural University, 2019 (in Russian).
- [8] A.L. Kulikov, V.L. Osokin and D.A. Levakov, “Comparative analysis and prospects for development of distance methods for overhead catenary network fault location. Part 1”, *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 16-35, 2025.
- [9] A.L. Kulikov, V.L. Osokin and D.A. Levakov, “Comparative analysis and prospects for development of distance methods for overhead catenary network fault location. Part 2”, *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 4-33, 2025.

- [10] N.A. Popova, "O dostovernosti opredeleniya rasstoyaniya do korotkogo zamykaniya v tyagovoi seti peremennogo toka [On the reliability of determining the distance to a short circuit in an alternating current traction network]", in *Avtomatizirovannye sistemy elektrosnabzheniya zheleznih dorog [Automated power supply systems for railways]*, Yu.I. Zharkova, Rostov-on-Don: RGUPS, 1995, pp. 118-123 (in Russian).
- [11] E.M. Shneerson, *Tsifrovaya releinaya zashchita [Digital relay protection]*. Moscow: Energoatomizdat, 2007 (in Russian).
- [12] A.M. Fedoseev and M.A. Fedoseev, *Releinaya zashchita elektroenergeticheskikh sistem [Relay protection of electric power systems]*. Moscow: Energoatomizdat, 1992 (in Russian).
- [13] A.L. Kulikov and D.A. Levakov, "Modeling the railway contact line system for fault location purposes", *Elektrichestvo*, no. 3, pp. 45-58, 2024. DOI: 10.24160/0013-5380-2024-3-45-58
- [14] K.G. Markvardt, *Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznih dorog [Power supply for electrified railways]*. Moscow: Transport, 1982 (in Russian).
- [15] E.V. Ter-Oganov and A.A. Pyshkin, *Elektrosnabzhenie zheleznih dorog [Power supply for railways]*. Ekaterinburg: Publishing house UrGUPS, 2014 (in Russian).
- [16] A.L. Bykadorov, T.A. Zarutskaya, I.V. Gavrilov and A.S. Muratova-Milekhina, "Detail structures traction ac networks for modeling and dimensioning of short-circuit loop", *Electronics and electrical equipment of transport*, no. 4, pp. 4-12, 2015.
- [17] E.P. Figurnov, "Soprotivleniya elektrodyagovoi seti odnofaznogo peremennogo toka [Resistances of single-phase alternating current electric traction network]", *Elektrichestvo*, no. 5, pp. 23-29, 1997 (in Russian).
- [18] E.P. Figurnov, A.L. Bykadorov, Yu.I. Zharkov, L.A. German and K.S. Subkhanverdiev, "Impedances of a single-phase ac railroad electric traction network", *Elektrichestvo*, no. 11, pp. 35-44, 2021. DOI: 10.24160/0013-5380-2021-11-35-44
- [19] E.P. Figurnov and D.E. Storozhenko, "Sovremennye metody opredeleniya udalonnosti povrezhdeniya kontaktnoi seti [Modern methods for determining the distance of damage to the contact network]", *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya*, no. 1, pp. 48-53, 2003 (in Russian).
- [20] B.E. Dyn'kin and V.V. Zavrazhin, "Sravnitel'nyi analiz sushchestvuyushchih metodov opredeleniya povrezhdeniya tyagovoi seti [Comparative analysis of existing methods for determining fault to the traction network]", in proc. *Int. scientific conf. Aktual'nie voprosy tehnikeskikh nauk [Current issues in technical sciences]*, July 20-23, 2011, Perm, Russia, pp. 53-56 (in Russian).
- [21] A.L. Bykadorov, T.A. Zarutskaya and A.S. Muratova-Milekhina, "Interaction between a.c. traction network parameters and short circuit loop impedance", *Vestnik transporta Povolzh'ya*, vol. 5, no. 41, pp. 5-11, 2013.
- [22] A.L. Bykadorov, T.A. Zarutskaya and A.S. Muratova-Milekhina, "Povyshenie effektivnosti opredeleniya mesta korotkogo zamykaniya v tyagovykh setyakh peremennogo toka na osnove informatsionnykh tehnologii [Improving the efficiency of short circuit location in AC traction networks based of information technologies]", *Vestnik transporta Povolzh'ya [Bulletin of Volga Region transport]*, vol. 6, no. 54, pp. 15-19, 2015 (in Russian).
- [23] L.A. German, K.V. Kishkurno and K.S. Subkhanverdiev, "Estimation of an error of calculation of short-circuit currents in ac tractive circuit", *Elektronika i elektrooborudovanie*

- transporta [Electronics and electrical equipment of transport]*, no. 1, pp. 5-10, 2017 (in Russian).
- [24] L.A. German, *Sovershenstvovanie tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka dlya povyshcheniya propusknoi sposobnosti zheleznyh dorog [Improving AC traction power supply to increase railway capacity]*. N. Novgorod: SamGUPS, 2024 (in Russian).
- [25] A.S. Muratova-Milekhina, A.L. Bykadorov, T.A. Zarutskaya, "Method of determination of short circuit place in catenary system of electrified transport", Patent RU 2566458, Oct. 27, 2015.
- [26] A.L. Bykadorov, T.A. Zarutskaya and A.S. Muratova-Milekhina, "Application of pattern recognition theory in determining the location of a short circuits in AC traction networks", *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya*, vol 2, no. 82, pp. 119-128, 2021. DOI: 10.46973/0201-727X_2021_2_119
- [27] R.N. Karyakin, *Tyagovie seti peremennogo toka [AC current traction networks]*. Moscow: Transport, 1987 (in Russian).
- [28] S.G. Tiguntsev and A.V. Esaulov, "Method of determining short circuit point in traction network of system 2*25 kV of railway", Patent RU 2821157, Jun. 17, 2024.
- [29] A.V. Esaulov and S.G. Tiguntsev, "Determination of the fault location in 25 kV railway power supply system", *Journal of Transsib Railway Studies*, vol. 2, no. 54, pp. 120-127, 2023.
- [30] A.V. Esaulov, S.G. Tiguntsev and E.O. Annenkov, "Determination of the fault location in 2*25 kV railway power supply system", *Journal of Transsib Railway Studies*, vol. 4, no. 56, pp. 101-112, 2023.
- [31] L.A. German, K.S. Subkhanverdiev, A.L. Kulikov, I.P. Karpov and M.D. Obalin, "Method for determining the location of a short circuit of an inhomogeneous contact network of a single-track section of electrified transport with two-way power supply", Patent RU 2789434, Feb. 02, 2023.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Куликов Александр Леонидович, доктор технических наук, профессор Нижегородского государственного технического университета им. П.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия.

Alexander L. Kulikov, D. Sci. (Eng.), professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. P.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.

Осокин Владимир Леонидович, доктор технических наук, доцент Нижегородского государственного инженерно-экономического университета, г. Княгинино, Нижегородская обл., Россия.

Vladimir L. Osokin, D. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Engineering and Economical University, Knyaginino, Nizhny Novgorod region, Russia.

Леваков Дмитрий Андреевич, аспирант Нижегородского государственного инженерно-экономического университета, г. Княгинино, Нижегородская обл., Россия.

Dmitriy A. Levakov, postgraduate student of the Nizhny Novgorod State Engineering and Economical University, Knyaginino, Nizhny Novgorod region, Russia.