
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.316.925:621.332.3

EDN ABDYPP

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ДИСТАНЦИОННЫХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТ ПОВРЕЖДЕНИЙ КОНТАКТНОЙ СЕТИ. ЧАСТЬ 2

А.Л. КуликовORCID: 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

Невозможностью обеспечения резервирования линий электропередач контактной сети обусловлена большая длительность задержек движения электроподвижного состава в случае возникновения устойчивых коротких замыканий (КЗ). Одним из основных факторов, препятствующих уменьшению временных затрат на устранение неисправности и восстановление нормальной работы системы тягового электроснабжения, является невозможность быстрого и точного определения места повреждения (ОМП) с использованием существующих методов. Несмотря на то, что к настоящему времени разработано значительное количество дистанционных методов определения места короткого замыкания (ОМКЗ) контактной сети, накоплен большой опыт эксплуатации устройств, реализующих функцию ОМКЗ и выполнено большое количество исследований на тему повышения точности средств дистанционного ОМП, ни один из известных способов не обладает достаточной эффективностью с точки зрения уменьшения ущерба при устойчивых КЗ, что обуславливает актуальность разработки более точных методов ОМП контактной сети.

Во второй части статьи дана характеристика методам ОМП по параметрам аварийного режима (ПАР), рассмотрены известные способы ОМП контактной сети

по ПАР, отмечены наиболее существенные особенности их информационного и математического обеспечения и используемых моделей тяговой сети, проанализированы преимущества и недостатки этих методов. По результатам произведенного обзора сделан вывод о сохраняющейся актуальности задачи дальнейшего развития средств дистанционного ОМП контактной сети и выделены наиболее перспективные направления повышения их эффективности.

Ключевые слова: определение мест повреждений, определение места короткого замыкания, контактная сеть, система тягового электроснабжения, электрифицированный железнодорожный транспорт.

Для цитирования: Куликов А.Л., Осокин В.Л., Леваков Д.А. Сравнительный анализ и перспективы развития дистанционных методов определения мест повреждений контактной сети. Часть 2 // Интеллектуальная Электротехника. 2025. № 2. С. 4-33. EDN ABDYPP

COMPARATIVE ANALYSIS AND PROSPECTS FOR DEVELOPMENT OF DISTANCE METHODS FOR OVERHEAD CATENARY NETWORK FAULT LOCATION. PART 2

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 impossibility of reservation of the overhead catenary network lines is due to the long delays in the movement of electric rolling stock during persistent short circuits. One of the main factors preventing the reduction of time spent on troubleshooting and restoring of a traction power supply system normal functioning is the impossibility of quick and accurate fault location (FL) using existing methods. Despite the fact that a significant number of the distance methods for a short circuit location (SCL) in a overhead catenary network have been developed, a great deal of experience has been accumulated in the operation of devices implementing the SCL function, and a large number of studies

have been carried out on the topic of increasing the accuracy of a distance FL tools, none of the known methods is sufficiently effective in terms of damage reducing during persistent short circuits, which determines the relevance of developing more accurate methods for the overhead catenary network FL.

The second part of the article examines known distance FL tools based on emergency mode parameters, notes the most significant features of their informational and mathematical support and the traction network models used, and analyzes the advantages and disadvantages of these methods. Based on the results of the review, a conclusion was made about the continuing relevance of task of the further development of the overhead catenary network distance FL tools development and the most promising areas for increasing their effectiveness were identified.

Keywords: fault locating, short circuit location, overhead catenary network, traction electric power supply system, electrified railway transport.

For citation: 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. EDN ABDYPP

I. Характеристика методов определения мест повреждения контактной сети по параметрам аварийного режима

По результатам анализа преимуществ и недостатков различных подходов к определению места повреждения (ОМП) в первой части статьи [1] был сделан вывод о предпочтительности использования средств ОМП, принцип действия которых основан на анализе параметров, характеризующих режим короткого замыкания (КЗ) в тяговой сети, поскольку эти методы в наибольшей степени удовлетворяют требованию быстрой и точной локализации места КЗ на линиях электропередач (ЛЭП) контактной сети. Как правило, анализируемыми параметрами аварийного режима (ПАР), по значениям которых возможно отличить аварийный режим от нормального и которые несут информацию о местоположении КЗ, являются действующие значения и фазовые углы напряжений на шинах тяговых подстанций (ТП) и постах секционирования (ПС), а также токов питающих фидеров и плеч питания ТП, на основании которых вычисляются производные параметры: модуль, активная и реактивная составляющие сопротивления петли КЗ и реактивная мощность [2, 3]. Оценка ПАР осуществляется после затухания апериодической составляющей тока КЗ и до расхождения главных контактов выключателя фидера, питающего поврежденный участок тяговой сети, что существенно отличает ОМП по ПАР от рассмотренных выше петлевых методов. Последовательность операций при ОМП по ПАР показана на рис. 1 [2, 4]. К группе ОМП по ПАР относится большое число методов, различающихся по большому числу критериев, в качестве наиболее важных из которых можно выделить следующие:

- использование одностороннего или двухстороннего замера ПАР;
- объем (количество) анализируемых ПАР;
- применяемое математическое обеспечение ОМП;
- возможность использования для определения места короткого замыкания (ОМКЗ) на одно-, двух- и многопутных участках;
- возможность использования для ОМКЗ на участках с теми или иными системами тяги и схемами питания контактной сети;
- применяемую математическую модель тяговой сети.

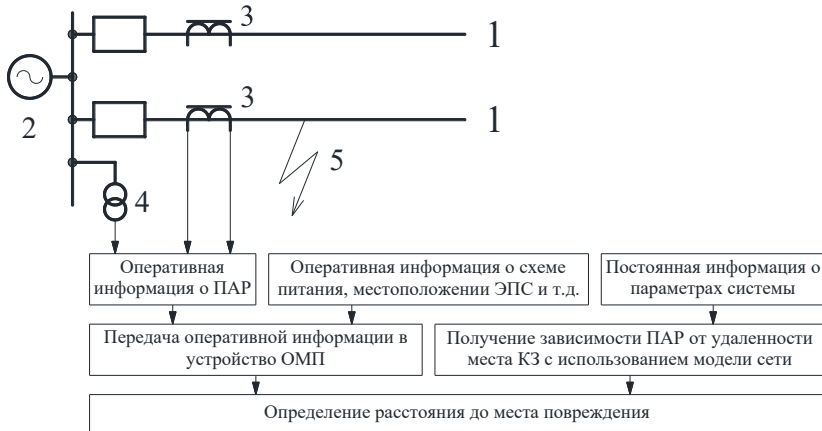


Рис. 1. Простейшая структурная схема системы ОМП контактной сети:
 1 – контактная сеть; 2 – ТП или ПС; 3, 4 – трансформатор тока (ТТ) и трансформатор напряжения (ТН) соответственно; 5 – место КЗ

Fig. 1. The simplest structural diagram of the FL system of an overhead catenary network:

1 – overhead catenary network; 2 – traction substation (TS) or sectioning point (SP);
 4 – current transformer (CT) and voltage transformer (VT);
 5 – short circuit (SC) location

Поскольку ОМП по ПАР представляет собой задачу, для решения которой необходимо использование математической модели, воспроизводящей существенные с точки зрения поставленной задачи свойства тяговой сети (параметры системы и их связь с параметрами режима), важным условием ее правильного решения и минимизации ошибки ОМП является выбор модели. Модель должна в полной мере отвечающей требованию ее адекватности, т.е. отображения свойств системы с требуемой точностью [5]. Теоретические исследования [6-10] и опыт длительной эксплуатации различных

устройств, реализующих функцию дистанционного ОМП по ПАР, свидетельствуют о значительном влиянии адекватности используемой модели сети и достоверности данных о ее параметрах на точность определения удаленности места КЗ [2, 11]. В связи с этим, одним из важнейших направлений развития средств ОМП контактной сети является совершенствование математических моделей систем тягового электроснабжения (СТЭ) [8-10, 12-17].

Другой важной задачей является выбор состава получаемой и анализируемой информации о значениях ПАР, а также совокупности методов, алгоритмов и программ, используемых для вычисления расстояния до места КЗ, т.е. информационного и математического обеспечения ОМП соответственно [4]. Выбор используемого информационного и математического обеспечения существенно влияет на точность и достоверность результатов ОМП.

II. Методы ОМП, основанные на использовании однородных моделей тяговой сети

Первый отечественный и зарубежный опыт применения методов ОМП воздушных линий по параметрам режима КЗ относится к середине 1930-х гг. [4, 11]. Однако промышленный выпуск и внедрение простейших аналоговых устройств для реализации этих методов были начаты в 1950-х гг. Задача ОМП контактной сети долгое время оставалась нерешенной из-за невозможности использования стандартных средств ОМП электрических сетей в контактной сети железных дорог, в частности, в виду применения значений токов и напряжений нулевой последовательности, которые отсутствуют в однофазной тяговой сети.

Первые специализированные устройства для ОМП контактной сети были разработаны в 1960-х гг. и описаны в [18-21]. В основу принципа действия этих устройств положен «метод Z», сущность которого заключается в следующем (рис. 2): в момент КЗ в контролируемой фидерной зоне производится одностороннее измерение и фиксация модулей напряжения $U_{\text{ш}}$ на шинах ТП и тока $I_{\text{ф}}$ фидера, питающего поврежденную контактную сеть. В последующем осуществляется деление значения $U_{\text{ш}}$ на значение $I_{\text{ф}}$ с учетом известного значения полного удельного сопротивления $z_{\text{ТС}}$ тяговой сети на данном участке [18, 22]:

$$L_{\text{КЗ}} = \frac{U_{\text{ш}}}{I_{\text{ф}} \cdot z_{\text{ТС}}} = \frac{Z_{\text{ПКЗ}}}{z_{\text{ТС}}}, \quad (1)$$

где $L_{\text{КЗ}}$ – расстояние до места КЗ, км; $Z_{\text{ПКЗ}}$ – полное сопротивление петли КЗ, Ом.

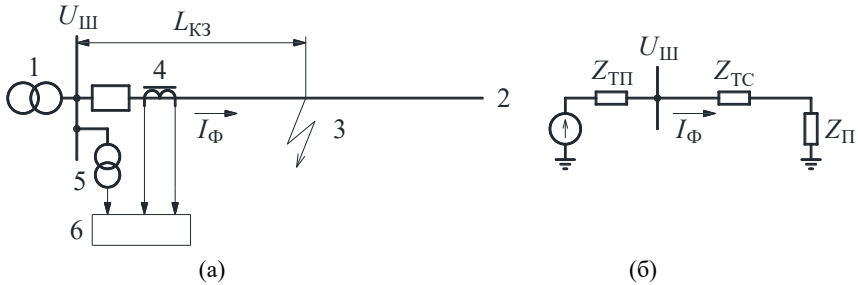


Рис. 2 – Схема ОМП «методом Z» (а) и схема замещения тяговой сети (б), используемая для его реализации:

1 – ТП; 2 – контактная сеть; 3 – место КЗ; 4, 5 – ТТ и ТН; 6 – устройство ОМП;
 $Z_{ТП}$ – сопротивление ТП; $Z_{ТС}$ – сопротивление тяговой сети;
 $Z_{П}$ – переходное сопротивление

Fig. 2. The diagram of the FL using «method Z» (a) and the equivalent circuit of the traction network (b) used for its implementation:

1 – TS; 2 – overhead catenary network; 3 – SC location; 4, 5 – CT and VT;
 6 – device for FL; $Z_{ТП}$ – impedance of TS; $Z_{ТС}$ – traction network impedance;
 $Z_{П}$ – transition impedance

Таким образом, «метод Z» основан на вычислении расстояния до места КЗ, как отношения сопротивления петли КЗ к удельному значению сопротивления эквивалентированной тяговой сети. На основе этого метода были разработаны устройства типов УКЗН, ОМП-68, ОМП-71 и «Лисна». Опыт эксплуатации устройств показывает, что их точность является недостаточной: при наиболее благоприятных условиях (в случае металлического КЗ) погрешность «метода Z» может составлять около 500 м, а при больших значениях переходного сопротивления или при КЗ на конце троса группового заземления (ТГЗ) величина ошибки может превышать 5...6 км [2, 22, 23].

Низкая точность «метода Z» обусловлена следующими факторами. Как следует из (1), ОМП основано на предположениях об однородности тяговой сети, независимости значения ее удельного сопротивления от параметров режима и расстояния от ТП до места КЗ, а также не учитывает переходное сопротивление в месте повреждения. В случае КЗ через переходное сопротивление в неоднородной сети напряжение на шинах ТП и входное сопротивление цепи КЗ могут быть определены по (2) и (3) соответственно:

$$U_{III} = I_{\Phi} \cdot \left(\sum_{i=1}^n (z_{ТС,i} \cdot l_i) + Z_{П} \right), \quad (2)$$

$$Z_{\text{ПКЗ}} = \frac{U_{\text{III}}}{I_{\Phi}} = \frac{I_{\Phi} \cdot \left(\sum_{i=1}^n (z_{\text{ТС},i} \cdot l_i) + Z_{\text{П}} \right)}{I_{\Phi}} = \sum_{i=1}^n (z_{\text{ТС},i} \cdot l_i) + Z_{\text{П}}, \quad (3)$$

где $Z_{\text{П}}$ – переходное сопротивление в месте КЗ, Ом; $z_{\text{ТС},i}$ – удельное сопротивление тяговой сети на i -м однородном участке, Ом/км; l_i – длина i -го однородного участка, км; n – количество однородных участков на интервале между ТП и местом КЗ.

Поскольку предположение об однородности тяговой сети не позволяет учесть влияние расстояния от ТП до места КЗ на значение удельного сопротивления, а переходное сопротивление $Z_{\text{П}}$ во всех случаях является неизвестной величиной, случайным образом изменяющейся в широких пределах, указанные факторы вносят погрешность в результат ОМП. При этом величина погрешности значительно увеличивается при двухстороннем питании в силу того, что в этом случае падение напряжения на переходном сопротивлении, в соответствии с первым законом Кирхгофа, определяется суммой токов со стороны смежных подстанций [2]. Кроме того, известно [2, 6, 22], что погрешность «метода Z » зависит от большого количества других факторов, наиболее важными из которых являются:

- шунтирующее влияние земли на сопротивление рельсовой цепи;
- различие схем питания контактной сети и схем соединения рельсов;
- наличие остаточной нагрузки электроподвижного состава (ЭПС);
- различие напряжений холостого хода смежных ТП и изменение их параметров при регулировании напряжения;
- погрешности ТТ и ТН, а также измерительных приборов.

В [2] отмечено, что для устранения недостатка «метода Z », связанного с использованием усредненного значения сопротивления тяговой сети, настройку устройств ОМП целесообразно выполнять с использованием универсальных или индивидуальных нелинейных графиков зависимости сопротивления тяговой сети от удаленности места КЗ, учитывающих различный характер этой зависимости при разном количестве параллельных путей и при разных схемах питания контактной сети.

Известен модифицированный вариант [24] этого способа, адаптированный для применения в тяговой сети 2×25 кВ. Как известно [2, 25], на участках, электрифицированных по системе 2×25 кВ с автотрансформаторами, зависимости тока КЗ и сопротивления петли КЗ носят волновой характер, как показано на рис. 3.б. Этот фактор не позволяет однозначно определить расстояние до места КЗ с использованием рассмотренного выше способа, поскольку одному значению сопротивления петли КЗ соответствуют несколько возможных мест повреждения.

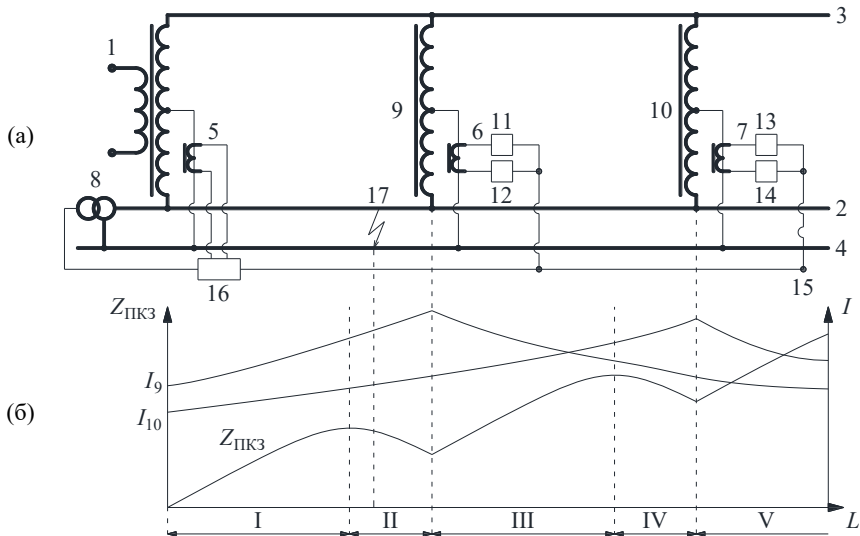


Рис. 3. Принципиальная схема ОМП методом [24] (а) и зависимости сопротивления петли КЗ и токов на выводах средних точек автотрансформаторов (б):

1 – ТП; 2 – контактный провод; 3 – питающий провод; 4 – рельсы; 5–7 – ТТ; 8 – ТН; 9, 10 – автотрансформаторы; 11–14 – токовые реле; 15 – линия связи; 16 – устройство ОМП; 17 – место КЗ

Fig. 3. Schematic diagram of the FL using the method [24] (a) and the dependence of the SC loop impedance and currents at the terminals of the autotransformers (AT) midpoints (b):

1 – TS; 2 – catenary wire; 3 – feeding wire; 4 – rails; 5–7 – CT; 8 – VT; 9, 10 – AT; 11–14 – current relays; 15 – communication lines; 16 – FL device; 17 – SC location

Этот способ предполагает установку максимальных токовых реле на выводах средних точек автотрансформаторов. Уставки срабатывания реле выбираются таким образом, чтобы по комбинации их состояний можно было судить о нахождении места КЗ в одной из зон I-V (рис. 3), в пределах которых зависимость $Z_{ПКЗ}(L_{КЗ})$ является однозначной [2, 24]. После определения зоны повреждения удаленность места КЗ уточняется с использованием «метода Z».

Другой вариант [26] «метода Z», также предназначенный для ОМП тяговой сети 2×25 кВ, основан на одновременном двухстороннем измерении ПАР, значения которых используются для вычисления входных сопротивлений петли КЗ со стороны каждой из смежных ТП. Определение расстояния до места КЗ производится по зависимостям отношений каждого из

этих сопротивлений к их сумме от удаленности места аварии, которые полагаются близкими к линейным. В [2] отмечено, что наибольшая точность ОМП обеспечивается при измерении токов и напряжений контактных сетей всех путей участка и питающего провода на каждой из смежных ТП. Их значения используются для реализации модифицированного вычислительного алгоритма, приведенного в [2].

Способы обладают большей точностью по сравнению с базовым вариантом «метода Z », однако при близких повреждениях, КЗ через переходное сопротивление и наличии ЭПС в межподстанционной зоне их погрешность может достигать 8 км.

Дальнейшим развитием подхода, положенного в основу принципа действия рассмотренных устройств, является способ, основанный на оценке реактивной составляющей сопротивления петли КЗ. Метод, названный «методом X », предполагает измерение в момент КЗ (рис. 4), помимо модулей тока I_Φ и напряжения U_Φ , дополнительно фазового угла φ между их векторами и вычисление расстояния до места КЗ по формуле [22]:

$$L_{\text{КЗ}} = \frac{U_{\text{ш}} \cdot \sin \varphi}{I_\Phi \cdot x_{\text{ТС}}} = \frac{X_{\text{ПКЗ}}}{x_{\text{ТС}}}, \quad (4)$$

где $X_{\text{ПКЗ}}$ – индуктивное сопротивление петли КЗ, Ом; $x_{\text{ТС}}$ – удельное реактивное сопротивление тяговой сети, Ом/км.

Использование реактивного сопротивления петли КЗ обуславливает преимущество «метода X » перед «методом Z », состоящее в исключении влияния переходного сопротивления на результат ОМП, что объясняется преимущественно резистивным характером сопротивления дуги [2, 22, 23]. На «методе X » основан принцип действия ряда отечественных и зарубежных устройств [27-39] ОМП контактной сети, включенных в систему телемеханики. Модификация «метода X », отличием которой является возможность учитывать взаимное влияние со стороны контактной сети параллельного пути, также положена в основу функции ОМП, реализуемой микропроцессорным устройством релейной защиты (МУРЗ) контактной сети БМРЗ-ФКС [30].

Известен вариант [31] «метода X », предназначенный для ОМП тяговой сети железнодорожных станций. Как известно [25], в пределах станций контактная сеть смежных путей соединяется параллельно, при этом количество электрифицированных путей может быть значительным, что препятствует однозначному определению места аварии по значению сопротивления петли КЗ, рассчитанному по (4), поскольку каждому значению этого сопротивления соответствует несколько точек, расположенных на разных путях. Согласно описанию к патенту [31], эта проблема может быть решена

путем обеспечения единственного пути протекания тока КЗ, для чего внутри секции исключается параллельное соединение контактной сети.

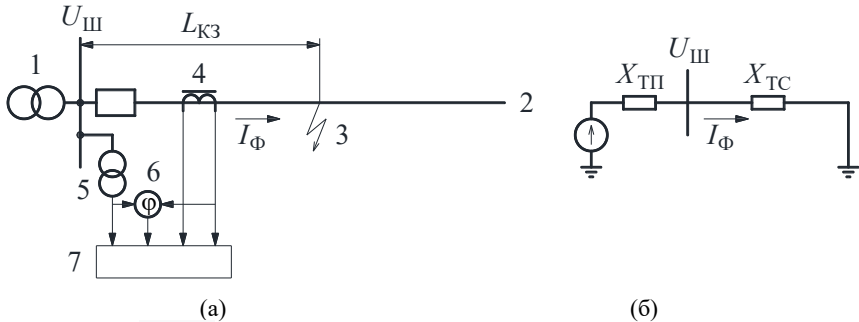


Рис. 4. Принципиальная схема ОМП «методом X» (а) и схема замещения тяговой сети (б), используемая для его реализации:
 1 – ТП; 2 – контактная сеть; 3 – место КЗ; 4, 5 – ТТ и ТН; 6 – фазометр;
 7 – устройство ОМП; $X_{ТП}$ – сопротивление ТП; $X_{ТС}$ – сопротивление тяговой сети

Fig. 4. Schematic diagram of the FL using «method X» (a) and the equivalent circuit of the traction network (b) used for its implementation:
 1 – TS; 2 – overhead catenary network; 3 – SC location; 4, 5 – CT and VT;
 6 – phase meter; 7 – device for FL; $X_{ТП}$ – TS impedance;
 $X_{ТС}$ – traction network impedance

Опыт эксплуатации устройств ОМП, включенных в систему телемеханики тяговой сети, «метод X» обеспечивает большую точность при ОМП тяговой сети однопутного участка с односторонним питанием контактной сети, чем «метод Z». Вместе с тем, использование (4) не позволяет учесть искажение расчетного значения $X_{ПКЗ}$ при КЗ через ТГЗ, при двухстороннем питании контактной сети и при узловом или параллельном соединении контактных сетей смежных путей. Кроме того, остальные недостатки «метода Z» также присущи «методу X», в связи с чем его погрешность может превышать 2,5 км [2].

III. Адаптивные методы ОМП,

основанные на использовании индуктивно развязанных моделей

Как было отмечено выше, применение средств дистанционного ОМП контактной сети, основанных на использовании упрощенных схем замещения тяговой сети и реализации простейших вычислительных алгоритмов, в большинстве случаев не позволяет точно определить место повреждения, что подтверждается как опытом их практического применения, так и данными теоретических исследований [2, 6, 7]. Вместе с тем, разработка более эффективных способов ОМП долгое время сдерживалась недостаточными

возможностями существующей аналоговой техники и отсутствием адекватных моделей СТЭ, позволяющих при расчетах принимать во внимание большее число факторов, оказывающих влияние на значения ПАР [22].

Развитие микропроцессорной вычислительной техники и появление МУРЗ тяговой сети сделали возможной реализацию более сложных методов ОМП [22]. Эти методы обеспечивают расчет расстояния до места КЗ со значительно меньшей погрешностью по сравнению с рассмотренными выше методами, что достигается за счет применения усовершенствованного информационного и математического обеспечения, а также использования индуктивно развязанных схем замещения, отличающихся лучшим уровнем детализации и достаточно простым способом учета взаимных индуктивных связей между всеми проводниками тяговой сети.

Способы построения индуктивно развязанных схем тяговой сети переменного тока основаны на теоретических положениях, приведенных в [25, 32, 33]. Решение этой задачи основывается на широком применении эквивалентирования параллельно соединенных проводников и принятии ряда допущений, значительно упрощающих расчет сопротивлений тяговой сети. Эти допущения, а также расчетные формулы и их подробные обоснования приведены в [12, 13, 34, 35]. Для наиболее распространенного случая – двухпутного участка с двухсторонним питанием тяговой сети – пример индуктивно развязанной схемы замещения, составленной с использованием этих решений, представлен на рис. 5 б.

К наиболее простым способам ОМП, при разработке которых была предпринята попытка учесть специфику устройства тяговой сети и, в частности, влияние проводимости рельсы-земля, относятся усовершенствованные варианты «метода X»: «метод X1» и «метод X2» [7, 22, 23]. «Метод X1» основан на одностороннем измерении токов поврежденного присоединения I'_1 и плеча ТП L_A , а также напряжения $\underline{U}_A$ на шинах ТП и вычислении расстояния L_{K3} по выражению:

$$L_{K3} = \frac{U_A \cdot \sin(\varphi_1 - \delta_1)}{I'_1 \cdot x_{-1,n} + I_A \cdot x'_{p,mv}}, \quad (5)$$

где φ_1 – угол между векторами $\underline{U}_A$ и I'_1 , град.; $x_{-1,n}$ – удельное индуктивное сопротивление контактной сети контактной сети одного пути при n путях, включенных в работу, и равенстве тока контактной сети этого пути току остальных путей, Ом/км; $x'_{p,mv}$ – удельное индуктивное сопротивление эквивалентированной рельсовой цепи с учетом взаимного индуктивного влияния контактных сетей всех путей и шунтирующего влияния земли, Ом/км; δ_1 – дополнительный угол, компенсирующий погрешность при близких КЗ и больших значениях $R_{п}$, град.

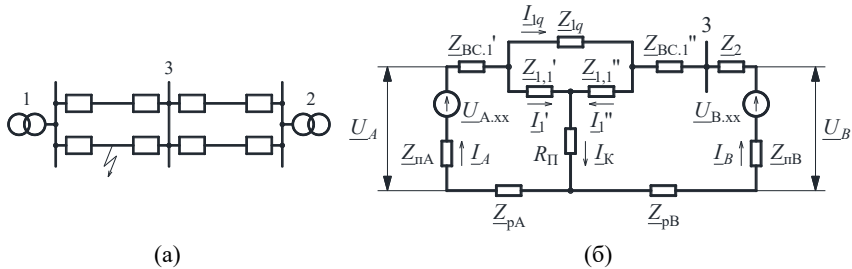


Рис. 5. Принципиальная схема питания контактной сети двухпутного участка (а) и индуктивно развязанная схема замещения (б):

1, 2 – ТП; 3 – ПС; $U_{A.xx}$, $U_{B.xx}$ – напряжения холостого хода ТП; U_A , U_B – напряжения на шинах ТП; I_A , I_B – токи ТП; I_K – ток КЗ; $I_{\text{лq}}$ – ток в неповрежденной контактной сети; I'_1 , I''_1 – токи в контактной сети поврежденного пути; $Z_{\text{пА}}$, $Z_{\text{пВ}}$ – сопротивления ТП; Z_2 – сопротивление контактной сети двух путей; $Z_{\text{рА}}$, $Z_{\text{рВ}}$ – сопротивления рельсовой цепи на участках от места КЗ до ТП А и ТП В; $Z_{\text{лq}}$ – сопротивление неповрежденной контактной сети; Z'_1 , Z''_1 – сопротивления поврежденной контактной сети; $Z_{\text{вс.1}}$, $Z''_{\text{вс.1}}$ – взаимные сопротивления контактных сетей; $R_{\text{п}}$ – переходное сопротивление

Fig. 5. Schematic diagram of the electric power supply of the overhead catenary network of a double-track section (a) and inductively isolated equivalent circuit (b):

1, 2 – TS; 3 – SP; $U_{A.xx}$, $U_{B.xx}$ – TS open circuit voltages; U_A , U_B – bus voltages of TS; I_A , I_B – TS currents; I_K – SC current; $I_{\text{лq}}$ – undamaged overhead catenary network current; I'_1 , I''_1 – undamaged track currents; $Z_{\text{пА}}$, $Z_{\text{пВ}}$ – TS impedances; Z_2 – two tracks overhead catenary network impedance; $Z_{\text{рА}}$, $Z_{\text{рВ}}$ – impedances of the rail circuit in the sections from the SC location to TS A and TS B; $Z_{\text{лq}}$ – undamaged overhead catenary network impedance; Z'_1 , Z''_1 – damaged overhead catenary network impedance; $Z_{\text{вс.1}}$, $Z''_{\text{вс.1}}$ – mutual impedances; $R_{\text{п}}$ – transition impedance

Наиболее существенным отличием «метода X2», также основанного на одностороннем измерении ПАР, является вычисление параметров дуги, т.е. ее сопротивления и тока КЗ. При этом в силу того, что значения $R_{\text{д}}$ и I_K изначально неизвестны, а информация о значениях ПАР со стороны смежной ТП не используется, для расчета расстояния до места КЗ необходима реализация сложного вычислительного алгоритма, основанного на использовании метода последовательных приближений [7, 23].

Известно [2, 22], что большая точность ОМП обеспечивается при использовании методов, учитывающих влияние таких факторов, как наличие переходного сопротивления в месте КЗ и изменение сопротивления рельсовой цепи в зависимости от длины межподстанционной зоны и удаленности места КЗ. Этим требованиям отвечают адаптивные указатели мест повреждений [36-46]. В основу указанных методов ОМП положены применение индуктивно развязанных моделей тяговой сети и реализация сложных алгоритмов, приведенных в работах [2, 22, 23] и описаниях к патентам [36-46].

Их совокупность можно разделить на группы односторонних [36, 40, 41, 46] и двухсторонних [36-39, 42-45] методов. Использование значений ПАР, измеренных на двух смежных ТП, позволяет исключить обратные связи между функциональными блоками устройства ОМП и производить вычисления без использования метода последовательных приближений [37, 42-45], или существенно упростить расчетные выражения [38, 42, 43] за счет построения вычислительного алгоритма только на анализе значений токов [23]. Вместе с тем, существенным недостатком двухсторонних методов является необходимость оборудования канала связи для обмена информацией о ПАР между смежными ТП, что предусматривается не всеми существующими системами телемеханики [2, 23]. Кроме того, введение в устройство канала связи между смежными ТП вносит в результат ОМП дополнительную погрешность, обусловленную влиянием помех [41].

Общими недостатками, характерными для большинства как односторонних, так и двухсторонних способов, являются следующие [4]:

- значительная сложность вычислений;
- введение операций по определению значений промежуточных параметров, погрешность при расчете которых приводит к значительной ошибке ОМП;
- неопределенность подбора поправочных коэффициентов для конкретных условий функционирования тяговой сети;
- использование рассчитываемых и измеряемых величин в знаменателях расчетных формул, приводящее к увеличению погрешности;
- использование большого числа допущений (о равенстве аргументов напряжений холостого хода смежных ТП, замена части комплексных значений ПАР абсолютными и т.д.);
- использование значений тока ТП, во многих случаях определяемого не только суммой токов в контактной сети, но также нагрузкой потребителей собственных нужд ТП и потребителей, питаемых от ЛЭП системы «два проводника-рельсы».

По указанным причинам погрешность рассмотренных методов ОМП составляет не менее 200 м и в ряде случаев может превышать 1 км [36, 38, 39]. К факторам, существенно ограничивающим эффективность этих способов, также относится невозможность применения методов [37-42], предполагающих использование значений токов фидеров контактной сети, для вычисления расстояния до места КЗ, расположенного за ближайшей узловой точкой (ПС или пункт параллельного соединения), в которой контактные сети смежных путей соединяются параллельно [45].

Простым способом повышения точности одностороннего ОМП контактной сети является перенос места измерения ПАР с шин ТП на ПС [47]. Преимущества данного решения объясняются уменьшением влияния изменения сопротивления рельсовой цепи вблизи ТП, влияния остаточного тока

ЭПС, остающегося в работе ввиду малого снижения напряжения на шинах ТП, а также уменьшением полной погрешности ТТ за счет уменьшения величины измеряемых токов КЗ [47, 48]. В связи с этим, из числа односторонних методов ОМП, основанных на традиционных принципах измерения тока и напряжения, следует выделить метод [46], основанный на измерении значений ПАР на ПС и их последующем анализе. Другим преимуществом указанного способа является существенное упрощение используемого алгоритма определения расстояния до места КЗ по сравнению с методами [36–45]. Упрощение алгоритма заключается в значительном уменьшении числа вычислительных операций и обеспечивается за счет использования способа объективной оценки переходного сопротивления в месте КЗ, описанного в [49]. Вместе с тем, метод [46] не предназначен для ОМП неоднородной тяговой сети и предполагает использование формул, содержащих в знаменателе измеренные и рассчитанные величины, что приводит к снижению точности.

IV. Современные методы ОМП контактной сети

К числу основных факторов, обуславливающих погрешности рассмотренных методов ОМП по ПАР, относится использование упрощенных расчетных моделей СТЭ, при составлении которых тяговая сеть полагается однородной на всем протяжении межподстанционной зоны, ее элементы (контактная сеть и рельсовая цепь) эквивалентизируются, и не учитывается влияние ЭПС. Кроме того, модели не учитывают наличие электрической связи между смежными ТП посредством ЛЭП 110 (220) кВ системы внешнего электроснабжения (СВЭ). Согласно [12], погрешность вычисления параметров системы, обусловленная представлением структуры тяговой сети, в действительности представляющей собой сложную многопроводную систему, в упрощенном виде составляет 1-2 %, а общая погрешность вычислений по упрощенным методикам при этом может достигать 10 %, что является приемлемым только для повседневной инженерной и проектной практики. Также в [15, 50, 51] отмечено, что неучет конфигурации СВЭ и использование приближенных значений ее параметров также вносят значительную методическую погрешность в задачи расчета или анализа ПАР в тяговой сети. Эти обстоятельства в совокупности с развитием эффективных средств компьютерного моделирования электрических систем и широким распространением МУРЗ тяговой сети обусловили актуальность задач совершенствования подходов к моделированию тяговой сети и разработки методов ОМП, основанных на использовании более детализированных и адекватных моделей СТЭ [10, 52, 53].

Первым известным способом дистанционного ОМП, основанным на использовании детализированной модели, учитывающий неоднородность тяговой сети и случайный характер изменения ряда параметров системы, и

на применении современных технических средств как на этапе моделирования СТЭ, является «метод С», описанный в [54]. Важнейшей особенностью математического обеспечения метода является применение положений теории распознавания образов для установления места КЗ [52, 53, 55]. Сущность «метода С» заключается в следующем. На предварительном этапе (до возникновения КЗ) составляется схема замещения СТЭ, учитывающая неоднородность структуры тяговой сети, шунтирующее влияние земли, зависимость ряда параметров тяговой сети от параметров режима, взаимное влияние между ее проводниками, особенности схемы питания и другие факторы [8-10]. Пример такой схемы показан на рис. 6.

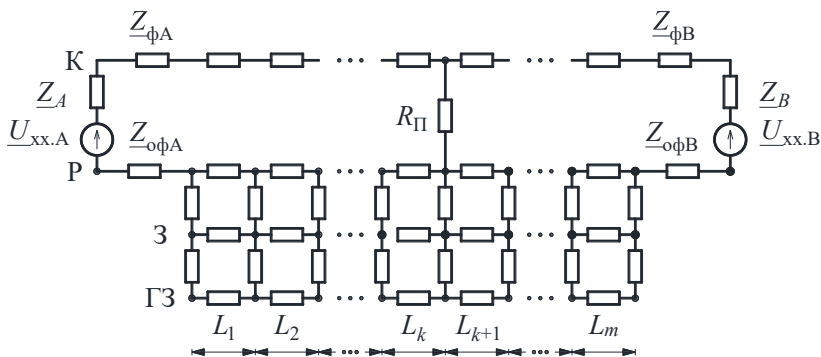


Рис. 6. Детализированная схема замещения однопутного участка тяговой сети:

K – контактная сеть; P – эквивалентированная рельсовая цепь;
 $3, ГЗ$ – верхний и нижний слои земли; $U_{хх.А}, U_{хх.В}$ – напряжения холостого хода ТП;
 Z_A, Z_B – сопротивления ТП; $Z_{фА}, Z_{фВ}, Z_{офА}, Z_{офВ}$ – сопротивления питающих и отсасывающих фидеров ТП, $R_{П}$ – переходное сопротивление

Fig. 6. Detailed equivalent circuit diagram of traction network single-track section:

K – overhead catenary network; P – equivalent rail circuit; $3, ГЗ$ – upper and lower ground layers; $U_{хх.А}, U_{хх.В}$ – TS open circuit voltages; Z_A, Z_B – TS impedances; $Z_{фА}, Z_{фВ}, Z_{офА}, Z_{офВ}$ – supply and return feeders impedances, $R_{П}$ – transition resistance

Эта схема условно разделяется на ряд сегментов $[L_1; L_m]$ длиной ΔL , в пределах которых тяговая сеть полагается однородной (табл. 1). Путем расчета ПАР при КЗ на границах выделенных участков схемы формируется база данных, состоящая из векторов $[M_j]$, которые в свою очередь включают наборы $\{x_{i,j}\}$ значений параметров режима и петли КЗ. Каждый вектор $[M_j]$ соответствует конкретному месту повреждения, значению переходного сопротивления $R_{П}$, сезону и другим условиям. Данные о ПАР, полученные по результатам расчетов или имитационных экспериментов, сохраняются в долговременной памяти и используются на этапе анализа измеренных значений ПАР.

Таблица 1.
Структура базы данных расчетных значений ПАР

Table 1.
Structure of calculated values of fault mode parameters database

$R_{П}, \text{ Ом}$	M_j			
	$L_{КЗ}, \text{ км}$			
	ΔL_1	$\Delta L_1 + \Delta L_2$	...	$\sum_{i=1}^m \Delta L_i$
$R_{П1}$	$\{x_{1,1}\}$	$\{x_{1,2}\}$	...	$\{x_{1,m}\}$
$R_{П2}$	$\{x_{2,1}\}$	$\{x_{2,2}\}$	...	$\{x_{2,m}\}$
...	...	...	...	...
$R_{Пn}$	$\{x_{n,1}\}$	$\{x_{n,2}\}$	...	$\{x_{n,m}\}$

При реальном КЗ определяется множество значений $\{X\}$ ПАР, по своему составу аналогичное векторам $\{x_{i,j}\}$ расчетных значений, далее методом сравнения эталонов производится идентификация множеств $\{X\}$ и $\{x_{i,j}\}$ и определяется степень соответствия измеренных и рассчитанных значений ПАР. В качестве места КЗ принимается интервал, характеризующийся наибольшим числом совпадений между элементами векторов $\{X\}$ и $\{x_{i,j}\}$ [52-54].

Согласно результатам экспериментальной проверки, погрешность «метода С» составляет 200-400 м и зависит прежде всего от длины шага разбиения тяговой сети и дискретности значений переходного сопротивления, используемых для формирования базы данных $[M_j]$ [53]. Это обстоятельство, в совокупности с необходимостью применения численных методов для решения системы уравнений состояния нелинейной электрической системы, какой является тяговая сеть переменного тока [17], обуславливает главный недостаток рассмотренного способа, заключающийся в сложности и громоздкости расчетов при формировании матриц $[M_j]$, совокупность которых составляет базу расчетных данных о ПАР.

К числу дистанционных методов ОМП по ПАР, основанных на использовании сегментированных неоднородных моделей тяговой сети, также относятся двухсторонние способы ОМП в системах 25 кВ и 2×25 кВ, описанные в [56-58]. Для их реализации в момент КЗ на смежных ТП производится измерение комплексных значений токов в проводах тяговой сети и напряжений на шинах ТП. Далее с применением метода интегрирования телеграфных уравнений [57, 58] или посредством реализации вычислительного алгоритма, приведенного в [56], составляются графики зависимости

модулей и углов напряжений на границах выделенных участков относительно обоих концов линии от расстояния до одной из ТП. Пример такого графика показан на рис. 7.

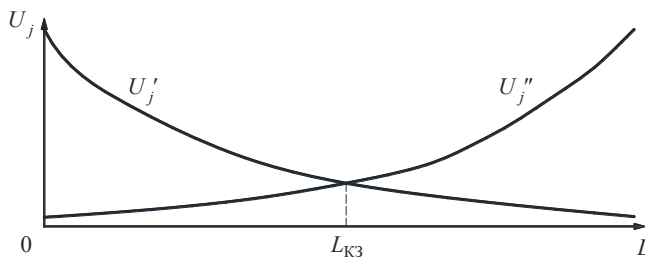


Рис. 7. ОМП с использованием графиков зависимости модулей напряжения от удаленности места КЗ

Fig. 7. FL using graphs of the dependence of voltage modules on the distance to the SC location

Место КЗ определяется как абсцисса точки пересечения кривых $U_j'(L)$ и $U_j''(L)$, построенных в одних осях [57]. Использование указанного критерия обеспечивает возможность однозначного ОМП в системах 25 кВ, однако он является недостаточным в случае системы 2×25 кВ ввиду многократного пересечения графиков $U_j'(L)$ и $U_j''(L)$. Для решения этой проблемы предусматривается введение дополнительного критерия по аргументу комплексного значения напряжения, и в этом случае место КЗ устанавливается как абсцисса точек пересечения графиков модулей и углов напряжений относительно шин смежных ТП [58]. Согласно результатам имитационных экспериментов, погрешность этих методов составляет около 3,3 % межподстанционной зоны [57].

Из [3, 47] известно, что при чисто активном характере переходного сопротивления в качестве критерия, указывающего на место КЗ на ЛЭП, может использоваться факт выполнения равенства:

$$Q_K = \text{Im}[\underline{U}_K, \bar{I}_K] = 0, \quad (6)$$

где Q_K , $\underline{U}_K$, $\bar{I}_K$ – реактивная мощность, напряжение и сопряженный комплекс тока в месте КЗ.

Поскольку величина потерь реактивной мощности на активном переходном сопротивлении равна нулю, на основе уравнения баланса реактивной мощности, составленного для простейшей схемы тяговой сети (рис. 8), можно записать выражение:

$$Q_K = \sum Q_{TP} - \sum \Delta Q_{TC} = 0, \quad (7)$$

где $\sum Q_{TP}$ – сумма реактивной мощности ТП; $\sum \Delta Q_{TC}$ – сумма потерь реактивной мощности на участках тяговой сети.

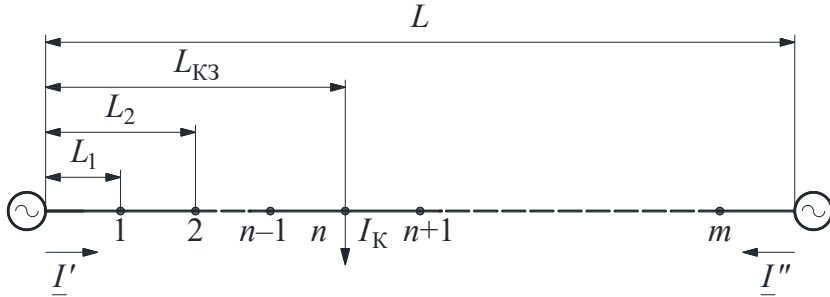


Рис. 8. Схема для ОМП методом контроля реактивной мощности:
 $\underline{I}$, $\underline{I''}$ – токи со стороны смежных ТП

Fig. 8. Scheme for FL using reactive power control method:
 $\underline{I}$, $\underline{I''}$ – currents from adjacent TS

Таким образом, контроль реактивной мощности и использование критерия (6) позволяют в полной мере решить проблему исключения влияния активного переходного сопротивления в месте КЗ на точность ОМП при существенном упрощении алгоритмов для вычисления расстояния до КЗ [47]. Контроль реактивной мощности и использование критерия (7) положены в основу ряда дистанционных способов [59-61], подробно описанных и обоснованных в [47].

Метод [60] предполагает измерение комплексных значений токов поврежденной линии на обоих ее концах, а также напряжений на шинах смежных ТП. Алгоритм определения места КЗ на основании этих значений включает два этапа [47]:

- 1) расчет расстояния до места КЗ, исходя из вычисленного значения $\sum Q_{TP}$ и удельного сопротивления условно однородной тяговой сети;
- 2) определение реального значения удельного сопротивления тяговой сети с использованием неоднородной модели и уточнение расстояния до места КЗ методом последовательных приближений.

Способ [61], также изложенный в [60] и основанный на одностороннем измерении токов в фидерах поврежденной и исправной контактной сети и напряжения на шинах ПС двух- или многопутного участка, отличается от

предыдущего следующими особенностями в части математического обеспечения ОМП [47]:

- измеренное значение реактивной мощности КЗ на ТП в методе [61] заменяется рассчитанным при заданном расстоянии до места КЗ;
- вычисление расстояния до места КЗ по аналитическим выражениям в методе [61] заменяется систематической проверкой выполнения условия (7) при изменяющемся заданном значении удаленности места КЗ от шин ПС.

Таким образом, последовательность операций при ОМП рассматриваемым методом описывается следующим алгоритмом [47, 61, 62]:

- 1) систематическая проверка выполнения условия (7) для однородной сети при изменяющемся заданном расстоянии до места КЗ с шагом 1 км;
- 2) исследование зоны, в которой изменяется знак разности (7), с шагом 0,2 км;
- 3) систематическая проверка выполнения условия (7) для неоднородной сети при изменяющемся заданном расстоянии до места КЗ с шагом 0,1 км, начиная с точки, найденной по п. 2.

К числу специализированных методов ОМП тяговой сети системы 2×25 кВ относится способ [59], сущность которого заключается в выделении поврежденной зоны по измеренным минимальным напряжениям на шинах ТП и АТП и последующем вычислении расстояния до места КЗ с использованием критерия (7), который применительно к случаю КЗ на контактной сети может быть записан в виде [47]:

$$Q_K = \sum Q_{TP} - \sum \Delta Q_{TC} = (Q_{ATK.i} + Q_{ATK.j} + Q_{ATP.i}) - (\Delta Q_K + \Delta Q_P + \Delta Q_R) = 0, \quad (8)$$

где $Q_{ATK.i}$, $Q_{ATK.j}$ – реактивная мощность контактной сети на обоих концах выделенного участка; $Q_{ATP.i}$ – реактивная мощность питающего провода; ΔQ_K , ΔQ_P , ΔQ_R – потери реактивной мощности в контактной сети, питающем проводе и рельсах.

При КЗ на участке между ТП и ближайшим к ней АТП расстояние до места КЗ определяется с использованием неоднородной модели тяговой сети методом последовательных приближений в результате систематического вычисления коэффициента, учитывающего стекание тока в землю, и реактивной мощности в предполагаемой точке КЗ по (8). В случае КЗ в зоне, ограниченной двумя АТП, т.е. на расстоянии 8-15 км от ближайшей ТП, и при его отсутствии на указанном участке станций, используется однородная модель, а расстояние до места КЗ вычисляется по аналитическим выражениям, приведенным в [47] и описании к патенту [57].

Как отмечено в [47], преимущества рассмотренных выше методов ОМП, основанных на контроле реактивной мощности, состоят в повышении точности за счет исключения влияния активного переходного сопротивления в месте КЗ на результат ОМП, простоте применяемых алгоритмов расчета расстояния до места КЗ, минимизации количества вычислений с использованием детализированной модели за счет ввода этапа предварительной оценки удаленности места КЗ, и возможности отказа от жесткого требования синхронного измерения ПАР.

В. Выводы

В статье определено место средств дистанционного ОМП в структуре автоматизированной системы управления электроснабжением железных дорог и системы ОМКЗ тяговой сети. Установлено, что за период с начала 1960-х гг. было разработано большое количество дистанционных методов ОМП контактной сети, наиболее многочисленной группой среди которых являются методы, основанные на измерении и анализе ПАР.

Несмотря на многочисленные исследования на тему ОМП контактной сети, в существующих нормативных документах отсутствуют рекомендации по выбору методов и устройств ОМП. В настоящее время наиболее приемлемым вариантом с точки зрения точности и скорости выявления места КЗ является ОМП по ПАР, что обусловлено невозможностью применения импульсных методов в тяговой сети и нецелесообразностью внедрения технологии распределенного акустического зондирования только для решения задачи ОМП.

Известно большое количество методов ОМП контактной сети по ПАР, различающихся по составу набора контролируемых параметров, используемым алгоритмам для анализа ПАР и вычисления места КЗ, а также по используемым моделям тяговой сети. Согласно выводам теоретических исследований и опыту применения средств ОМП контактной сети, наибольшей эффективностью обладают методы, в основу которых положены детализированные модели СТЭ, применение которых существенно упрощается благодаря возможностям современных средств компьютерного моделирования. В части информационного обеспечения ОМП установлено, что определение расстояния до места КЗ с наибольшей точностью обеспечивается при измерении ПАР на ПС.

Главными современными тенденциями развития средств ОМП контактной сети являются внедрение расчетных моделей, приближенных к реальным условиям, выбор информационного обеспечения, позволяющего отказаться от сложных аналитических алгоритмов и исключающего влияние дестабилизирующих факторов на точность ОМП, и активное использование возможностей современной вычислительной техники на всех этапах решения задачи ОМП.

В настоящее время сохраняется высокая актуальность задачи совершенствования средств дистанционного ОМП контактной сети, что связано с отсутствием известных дистанционных методов ОМП, точность которых не зависит от конфигурации СТЭ и влияния случайных факторов. В связи с этим, целесообразно продолжать работы по дальнейшему повышению точности ОМП контактной сети с использованием накопленного опыта разработки и эксплуатации известных средств ОМП.

© Куликов А.Л., 2025

© Осокин В.Л., 2025

© Леваков Д.А., 2025

Поступила в редакцию 21.02.2025

Принята к публикации 02.05.2025

Received 21.02.2025

Accepted 02.05.2025

Библиографический список

- [1] 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.
- [2] Фигурнов Е.П. Релейная защита. М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2009. – 604 с.
- [3] Аржаников Е.А., Лукоянов В.Ю., Мисриханов М.Ш. Определение места короткого замыкания на высоковольтных линиях электропередачи. М.: Энергоатомиздат, 2003. – 272 с.
- [4] Шалыт Г.М. Определение мест повреждения в электрических сетях. М.: Энергоиздат, 1982. – 312 с.
- [5] Голубева Н.В. Математическое моделирование систем и процессов. С-Пб.-М.-Краснодар: Лань, 2016. – 192 с.
- [6] 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.
- [7] Попова Н.А. Повышение точности определения расстояния до короткого замыкания в тяговой сети переменного тока // Автоматизированные системы электроснабжения железных дорог, Жарков Ю.И. Ростов-на-Дону: РГУПС, 1995. – С. 123-128.
- [8] 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.
- [9] Быкадоров А.Л., Заруцкая Т.А., Муратова-Милехина А.С. Определение параметров петли и места короткого замыкания в тяговой сети с экранирующим и

- усиливающим проводами // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. 2015. № 2. С. 10-13.
- [10] 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.
- [11] Шалыт Г.М., Айзенфельд А.И., Малый А.С. Определение мест повреждений линий электропередачи по параметрам аварийного режима. М.: Энергоатомиздат, 1983. – 208 с.
- [12] 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
- [13] Крюков А.В., Закарюкин В.П., Черепанов А.В., Крюков А.Е., Середкин Д.А., Фесак И.А. Моделирование трехфазных систем тягового электроснабжения железных дорог переменного тока. Екатеринбург: УрГУПС, 2023. – 171 с.
- [14] Закарюкин В.П., Крюков А.В. Методы совместного моделирования систем тягового и внешнего электроснабжения железных дорог переменного тока. Иркутск: ИрГУПС, 2010. – 160 с.
- [15] Фигурнов Е.П., Жарков Ю.И., Попова Н.А. Схемы замещения системы внешнего электроснабжения электрифицированного транспорта напряжением 27,5 кВ // Электричество. 2020. № 8. С. 29-36. DOI: 10.24160/0013-5380-2020-8-29-36
- [16] Корниенко В.В., Петров И.П., Петрова Т.Е. Вычисление параметров тяговой сети с ЭУП // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2001. № 2. С. 79-82.
- [17] 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
- [18] Самсонов Ю.Я., Фигурнов Е.П. Устройство для определения места короткого замыкания в контактной сети железных дорог переменного тока, Пат. 161410 SU, заявл. 16.07.62; опубл. 19.03.64. – Бюл. № 7.
- [19] Зимаков В.А., Корсаков Г.М. Устройство для определения места короткого замыкания в контактной сети железных дорог, Пат. 266055 SU, заявл. 07.05.66; опубл. 17.03.70. – Бюл. № 11.
- [20] Аксельрод Б.А., Корсаков Г.М., Овласюк В.Я., Сухопрудский Н.Д. Устройство для определения места короткого замыкания в контактной сети железных дорог, Пат. 377706 SU, заявл. 13.05.71; опубл. 17.04.73. – Бюл. № 18.
- [21] Курганов В.В., Фигурнов Е.П. Устройство для определения места короткого замыкания и телеизмерения уровней напряжения на фидерах контактной сети переменного тока, Пат. 369519 SU, заявл. 15.06.70; опубл. 08.02.73. – Бюл. № 18.
- [22] Фигурнов Е.П., Стороженко Д.Е. Современные методы определения удаленности повреждения контактной сети // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2003. № 1. С. 48-53.

- [23] 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.
- [24] Бочев А.С., Тупченко М.Ю., Фигурнов Е.П. Устройство для определения места повреждения тяговой сети с автотрансформаторами электрифицированной железной дороги, Пат. 1395532 SU, заявл. 10.06.86; опубл. 15.05.88. – Бюл. № 18.
- [25] Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
- [26] Бочев А.С., Кузнецов В.В., Тупченко М.Ю., Фигурнов Е.П. Устройство для определения места повреждения тяговой сети электрифицированной железной дороги, Пат. 740555 SU, заявл. 13.09.78; опубл. 15.06.80. – Бюл. № 22.
- [27] Фигурнов Е.П. Устройство для определения места короткого замыкания в контактной сети, Пат. 158328 SU, заявл. 08.10.62; опубл. 19.10.63. – Бюл. № 21.
- [28] Зимаков В.А., Корсаков Г.М. Устройство для определения расстояния до места повреждения на контактной сети железных дорог переменного тока, Пат. 265277 SU, заявл. 12.05.66; опубл. 09.03.70. – Бюл. № 10.
- [29] Maenicke E. Circuit arrangement for determining the distance of fault locations in line short-circuits, Pat. 3735204 US, filed. 25.06.71; publ. 22.05.73.
- [30] ДИВГ.648228.082-14.01 РЭ1-ЛУ. Блок микропроцессорный релейной защиты БМРЗ-ФКС-01. Руководство по эксплуатации. Ч. 2. С.-Пб.: ООО «НТЦ «Мехатроника». – 82 с.
- [31] Триллер А.А., Быкадоров А.Л., Заруцкая Т.А. Способ определения места короткого замыкания на электрифицированной железнодорожной станции, Пат. 2636154 RU, заявл. 25.03.16; опубл. 21.11.17. – Бюл. № 33.
- [32] Тер-Оганов Э.В., Пышкин А.А. Электроснабжение железных дорог. Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2014. – 432 с.
- [33] Carson J.R. Wave propagation in overhead wires with ground return // The Bell System Technical Journal. 1926. № 5 (4). P. 539-554. DOI: 10.1002/j.1538-7305.1926.tb00122.x
- [34] Фигурнов Е.П. Сопротивления электротяговой сети однофазного переменного тока // Электричество. 1997. № 5. С. 23-29.
- [35] Карякин Р.Н. Тяговые сети переменного тока. М.: Транспорт, 1987. – 279 с.
- [36] Быкадоров А.Л., Жарков Ю.И., Петров И.П., Фигурнов Е.П. Указатель удаленности короткого замыкания в тяговой сети переменного тока, Пат. 2160193 RU, заявл. 01.06.98; опубл. 10.12.00.
- [37] Фигурнов Е.П., Петров И.П., Жарков Ю.И., Быкадоров А.Л. Определитель места повреждения контактной сети, Пат. 2160673 RU, заявл. 01.06.98; опубл. 20.12.00.
- [38] Фигурнов Е.П., Петров И.П., Жарков Ю.И., Быкадоров А.Л. Определитель места повреждения тяговой сети, Пат. 2177417 RU, заявл. 01.06.98; опубл. 27.12.01.
- [39] Быкадоров А.Л., Жарков Ю.И., Петров И.П., Фигурнов Е.П. Устройство для определения удаленности места короткого замыкания в тяговой сети электрифицированного транспорта (варианты), Пат. 2181672 RU, заявл. 01.06.98; опубл. 27.04.02.

- [40] Фигурнов Е.П., Жарков Ю.И., Стороженко Д.Е. Способ определения удаленности короткого замыкания контактной сети переменного тока и устройство для его выполнения, Пат. 2189606 RU, заявл. 16.04.01; опублик. 20.09.02.
- [41] Фигурнов Е.П., Жарков Ю.И., Стороженко Д.Е. Определитель удаленности повреждения контактной сети (варианты), Пат. 2189607 RU, заявл. 16.04.01; опублик. 20.09.02.
- [42] Фигурнов Е.П., Жарков Ю.И., Харчевников В.И. Способ определения удаленности места повреждения контактной сети (варианты), Пат. 2609727 RU, заявл. 24.09.15; опублик. 02.02.17. – Бюл. № 4.
- [43] Фигурнов Е.П., Жарков Ю.И., Харчевников В.И. Способ определения удаленности короткого замыкания контактной сети (варианты), Пат. 2610826 RU, заявл. 22.09.15; опублик. 15.02.17. – Бюл. № 5.
- [44] Фигурнов Е.П., Жарков Ю.И., Харчевников В.И. Способ определения удаленности короткого замыкания контактной сети электрического транспорта (варианты), Пат. 2619625 RU, заявл. 22.09.15; опублик. 17.05.17. – Бюл. № 14.
- [45] Фигурнов Е.П., Жарков Ю.И., Харчевников В.И. Способ определения расстояния до места короткого замыкания контактной сети переменного тока (варианты), Пат. 2629734 RU, заявл. 22.09.15; опублик. 31.08.17. – Бюл. № 25.
- [46] Герман Л.А., Субханвердиев К.С., Фигурнов Е.П., Петров И.П., Попов А.Ю., Вязов Е.В. Способ определения удаленности короткого замыкания в контактной сети переменного тока многопутного участка (варианты), Пат. 2747112 RU, заявл. 23.10.20; опублик. 27.04.21. – Бюл. № 12.
- [47] Герман Л.А. Совершенствование тягового электроснабжения переменного тока для повышения пропускной способности железных дорог. Н. Новгород: СамГУПС, 2024. – 186 с.
- [48] Шабад М.А. Трансформаторы тока в схемах релейной защиты. М.: НТФ «Энергопрогресс», 1998. – 64 с.
- [49] Субханвердиев К.С., Герман Л.А., Заруцкая Т.А. Учет переходного сопротивления в месте повреждения контактной сети по параметрам аварийного режима // Электричество. 2024. № 11. С. 51-57. DOI: 10.24160/0013-5380-2024-11-51-57
- [50] 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.
- [51] Закарюкин В.П., Крюков А.В., Алексеенко Е.А. Анализ применимости упрощенных моделей внешней сети для определения токов короткого замыкания в системах тягового электроснабжения железных дорог // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. № 19 (11-12). С. 12-20.
- [52] 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
- [53] 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.

- [54] 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.
- [55] Тропченко А.А., Тропченко А.Ю. Методы вторичной обработки и распознавания изображений. СПб.: Университет ИТМО, 2015. – 215 с.
- [56] 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.
- [57] Есаулов А.В., Тигунцев С.Г. Определение места повреждения в тяговой сети системы 25 кВ // Известия Транссиба. 2023. № 2 (54). С. 120-127.
- [58] 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.
- [59] Герман Л.А., Субханвердиев К.С. Способ определения мест повреждения (ОМП) межподстанционной зоны тягового электроснабжения 2х25 кВ, Пат. 2788303 RU, заявл. 11.05.22; опубл. 17.01.23. – Бюл. № 2.
- [60] Герман Л.А., Субханвердиев К.С., Куликов А.Л., Карпов И.П., Обалин М.Д. Способ определения места 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.
- [61] Герман Л.А., Субханвердиев К.С., Куликов А.Л., Карпов И.П., Обалин М.Д. Способ определения места короткого замыкания контактной сети переменного тока 25 кВ, Пат. 2790576 RU, заявл. 10.06.22; опубл. 27.02.23. – Бюл. № 6.
- [62] Куликов А.Л., Герман Л.А., Субханвердиев К.С., Карпов И.П. Определение места короткого замыкания в контактной сети переменного тока по измерению реактивной мощности // Наука и образование транспорту. 2021. № 2. С. 31-34.

References

- [1] 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.
- [2] E.P. Figurnov, *Releynaya zashchita [Relay protection]*. Moscow: State Educational Institution “Educational and Methodological Center for Education in Railway Transport”, 2009 (in Russian).
- [3] E.A. Arzhannikov, V.Yu. Lukoyanov and M.Sh. Misrikhanov, *Opredelenie mesta korotkogo zamykaniya na vysokovoltnykh liniyah elektroperedachi [Determining the location of a short circuit on high-voltage power lines]*. Moscow: Energoatomizdat, 2003 (in Russian).
- [4] G.M. Shalyt, *Opredelenie mest povrezhdeniya v elektricheskikh setyah [Determining fault locations in electrical networks]*. Moscow: Energoizdat, 1982 (in Russian).
- [5] N.V. Golubeva, *Matematicheskoe modelirovanie sistem i protsessov [Mathematical modeling of systems and processes]*. St. Petersburg-Moscow-Krasnodar: Lan’, 2016 (in Russian).
- [6] 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. Zharkov, Rostov-on-Don: RGUPS, 1995, pp. 118-123 (in Russian).
- [7] N.A. Popova, “Povyshenie tochnosti opredeleniya rassoyaniya do korotkogo замыкания в тяговой сети переменного тока [Improving the accuracy of determining the distance to a short circuit in an AC traction network]”, in *Avtomatizirovannye sistemy elektrosnabzheniya zheleznih dorog [Automated power supply systems for railways]*, Yu.I. Zharkov, Rostov-on-Don: RGUPS, 1995, pp. 123-128, (in Russian).
- [8] 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 Povolzhya*, vol. 5, no. 41, pp. 5-11, 2013.
- [9] A.L. Bykadorov, T.A. Zarutskaya and A.S. Muratova-Milekhina, “Determination loop parameters and fault location in traction network with the screening and enhances wires”, *Trudy Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya Scientific Journal*, no. 2, pp.10-13, 2015.
- [10] 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.
- [11] G.M. Shalyt, A.I. Aisenfel’d and A.S. Malyi, *Opredelenie mest povrezhdenii linii elektropredachi po parametram avariinogo rezhima [Determination of locations of power transmission line damages based on emergency mode parameters]*. Moscow: Energoatomizdat, 1983 (in Russian).
- [12] 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
- [13] A.V. Kryukov, V.P. Zakaryukin, A.V. Cherepanov, A.E. Kryukov, D.A. Seredkin and I.A. Fesak, *Modeling of three-phase traction power supply systems of AC railways*. Ekaterinburg: UrGUPS, 2023.
- [14] V.P. Zakaryukin and V.P. Kryukov, *Metody sovmestnogo modelirovaniya sistem tyagovogo i vneshnego elektrosnabzheniya zheleznih dorog peremennogo toka [Methods of joint modeling of traction and external power supply systems of AC railways]*. Irkutsk: IrGUPS, 2010 (in Russian).
- [15] E.P. Figurnov, Yu.I. Zharkov and N.A. Popova, “Equivalent circuits of the 27.5 kV electric railway external power supply system”, *Elektrichestvo*, no. 8, pp. 29-36, 2020. DOI: 10.24160/0013-5380-2020-8-29-36
- [16] V.V. Kornienko, I.P. Petrov and T.E. Petrova, “Vychislenie parametrov tyagovoi seti s EUP [Calculation of traction network parameters with SFW]”, *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya*, no. 2, pp. 79-82, 2001 (in Russian).
- [17] 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
- [18] E.P. Figurnov and Yu.Ya. Samsonov, “Ustroistvo dlya opredeleniya mesta korotkogo замыкания в контактной сети железных дорог переменного тока [Device for determining the location of a short circuit in the contact network of alternating current railways]”, Patent SU 161410, Mar. 19, 1964 (in Russian).

- [19] V.A. Zimakov and G.M. Korsakov, “*Ustroistvo dlya opredeleniya mesta korotkogo zamykania v kontaktnoi seti zheleznih dorog* [Device for determining the location of a short circuit in the contact network of railways]”, Patent SU 266055, Mar. 17, 1970 (in Russian).
- [20] B.A. Aksel’rod, G.M. Korsakov, V.Ya. Ovlayuk and N.D. Sukhoprudskiy, “*Ustroistvo dlya opredeleniya mesta korotkogo zamykania v kontaktnoi seti zheleznih dorog* [Device for determining the location of a short circuit in the contact network of railways]”, Patent SU 377706, Apr. 17, 1973 (in Russian).
- [21] V.V. Kurganov and E.P. Figurnov, “*Ustroistvo dlya opredeleniya mesta korotkogo zamykania i telemekhanicheskoy upravleniya napryazheniya na fiderah kontaktnoi seti peremennogo toka* [Device for determining the location of a short circuit and telemetry of voltage levels on feeders of an AC contact network]”, Patent SU 369519, Feb. 8, 1973 (in Russian).
- [22] E.P. Figurnov and D.E. Storozhenko, “*Sovremennye metody opredeleniya udalennosti 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).
- [23] 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’nye voprosy tekhnicheskikh nauk* [Current issues in technical sciences], July 20-23, 2011, Perm, Russia, pp. 53-56 (in Russian).
- [24] A.S. Bochev, M.Yu. Tupchenko and E.P. Figurnov, “*Ustroistvo dlya opredeleniya mesta povrezhdeniya tyagovoi seti s avtotransformatorami elektrifitsirovannoi zheleznoi dorogi* [Device for determining the location of damage to the traction network with autotransformers of an electrified railway]”, Patent SU 1395532, May 15, 1988 (in Russian).
- [25] K.G. Markvardt, *Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznih dorog* [Power supply for electrified railways]. Moscow: Transport, 1982 (in Russian).
- [26] A.S. Bochev, V.V. Kuznetsov, M.Yu. Tupchenko and E.P. Figurnov, “*Ustroistvo dlya opredeleniya mesta povrezhdeniya tyagovoi seti elektrifitsirovannoi zheleznoi dorogi* [Device for determining the location of damage to the traction network of an electrified railway]”, Patent SU 740555, Jun. 15, 1980 (in Russian).
- [27] E.P. Figurnov, “*Ustroistvo dlya opredeleniya mesta korotkogo zamykaniya v kontaktnoi seti* [Device for determining the location of a short circuit in a contact network]”, Patent SU 158328, Oct. 19, 1963 (in Russian).
- [28] V.A. Zimakov and G.M. Korsakov, “*Ustroistvo dlya opredeleniya rasstoyaniya do mesta povrezhdeniya na kontaktnoi seti zheleznih dorog peremennogo toka* [Device for determining the distance to the fault location on the contact network of AC railways]”, Patent SU 265277, Mar. 09, 1970 (in Russian).
- [29] E. Maenick, “*Circuit arrangement for determining the distance of fault locations in line short-circuits*”, Patent US 3735204, May 22, 1973.
- [30] Microprocessor relay protection unit BMRZ-FKS-01. User manual. Pt. 2, ДИВГ.648228.082-14.01 РЭ1-ЛУ.
- [31] A.A. Triller, A.L. Bykadorov and T.A. Zarutskaya, “*Method of determination of short circuit place at electrified railway station*”, Patent RU 2636154, Nov. 21, 2017.

- [32] E.V. Ter-Oganov and A.A. Pyshkin, *Elektrosnabzhenie zheleznyh dorog [Power supply for railways]*. Ekaterinburg: Publishing house UrGUPS, 2014 (in Russian).
- [33] J.R. Carson, "Wave propagation in overhead wires with ground return", *The Bell System Technical Journal*, vol. 5, no. 4, pp. 539-554, Oct. 1926. DOI: 10.1002/j.1538-7305.1926.tb00122.x
- [34] E.P. Figurnov, "Soprotivleniya elektroyagovoi seti odnofaznogo peremennogo toka [Resistances of single-phase alternating current electric traction network]", *Elektrichestvo*, no. 5, pp. 23-29, 1997 (in Russian).
- [35] R.N. Karyakin, *Tyagovie seti peremennogo toka [AC current traction networks]*. Moscow: Transport, 1987 (in Russian).
- [36] A.L. Bykadorov, Yu.I. Zharkov, I.P. Petrov and E.P. Figurnov, "AC traction power system short-circuit fault distance indicator", Patent RU 2160193, Dec. 10, 2000.
- [37] E.P. Figurnov, I.P. Petrov, Yu.I. Zharkov and A.L. Bykadorov, "Contact system fault detector", Patent RU 2160673, Dec. 20, 2000.
- [38] E.P. Figurnov, I.P. Petrov, Yu.I. Zharkov and A.L. Bykadorov, "Traction system fault detector", Patent RU 2177417, Dec. 27, 2001.
- [39] A.L. Bykadorov, Yu.I. Zharkov, I.P. Petrov and E.P. Figurnov, "Ustroistvo dlya opredeleniya udalonnosti mesta korotkogo zamykaniya v tyagovoi seti elektrifitsirovannogo transporta (varianty) [Ground fault detector in traction network of electrified transport (alternatives)]", Patent RU 2181672, Apr. 27, 2002 (in Russian).
- [40] E.P. Figurnov, Yu.I. Zharkov and D.E. Storozhenko, "Procedure determining distance to short-circuit point in AC contact network and device for its realization", Patent RU 2189606, Sep. 20, 2002.
- [41] E.P. Figurnov, Yu.I. Zharkov and D.E. Storozhenko, "Device determining distance to faulty point in traction network (versions)", Patent RU 2189607, Sep. 20, 2002.
- [42] E.P. Figurnov, Yu.I. Zharkov and V.I. Kharchevnikov, "Sposob opredeleniya udalonnosti mesta povrezhdeniya kontaktnoi seti (varianty) [Method of determining distance to catenary system failure point (versions)]", Patent RU 2609727, Feb. 2, 2017 (in Russian).
- [43] E.P. Figurnov, Yu.I. Zharkov and V.I. Kharchevnikov, "Sposob opredeleniya udalonnosti korotkogo zamykaniya kontaktnoi seti (varianty) [Method of determining remote of short electrical circuit (versions)]", Patent RU 2610826, Feb. 15, 2017 (in Russian).
- [44] E.P. Figurnov, Yu.I. Zharkov and V.I. Kharchevnikov, "Sposob opredeleniya udalonnosti korotkogo zamykaniya kontaktnoi seti elektricheskogo transporta (varianty) [Method of determining remoteness of short circuit in contact network of electric transport (versions)]", Patent RU 2619625, May 17, 2017 (in Russian).
- [45] E.P. Figurnov, Yu.I. Zharkov and V.I. Kharchevnikov, "Method for determining distance to short circuit point of AC contact network (versions)", Patent RU 2629734, Aug. 31, 2017.
- [46] L.A. German, K.S. Subkhanverdiev, E.P. Figurnov, I.P. Petrov, A.Yu. Popov and E.V. Vyazov, "Method for determining the distance of a short circuit in the AC contact network of a multipath section (options)", Patent RU 2747112, Apr. 27, 2021.
- [47] 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).
- [48] M.A. Shabad, *Transformatory toka v shemah releinoi zashchity [Current transformers in relay protection schemes]*. Moscow: Energoproggress, 1998 (in Russian).
- [49] K.S. Subkhanverdiev, L.A. German and T.A. Zarutskaya, "Uchyot perehnodnogo soprotivleniya v meste povrezhdeniya kontaktnoi seti po parametram avariynogo rezhyma [Consideration of the transient resistance at the contact system fault location based of the emergency mode parameters]", *Elektrichestvo*, no. 11, pp. 51-57, 2024 (in Russian).
- [50] 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).
- [51] V.P. Zakaryukin, A.V. Kryukov and E.A. Alekseenko, "Analysis of applicability of external network simplified models for definition of short circuit currents in systems of railroad traction power supply", *Izvestiya vyshih uchebnykh zavedenii [News of higher educational institutions]*, vol. 19, no. 11-12, pp. 12-20, 2017 (in Russian).
- [52] 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 putei soobshcheniya*, vol 2, no. 82, pp. 119-128, 2021. DOI: 10.46973/0201-727X_2021_2_119
- [53] A.L. Bykadorov, T.A. Zarutskaya and A.S. Muratova-Milekhina, "Povyshenie effektivnosti opredeleniya mesta korotkogo замыкания v tyagovykh setyakh peremennogo toka na osnove informatsionnykh tekhnologii [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).
- [54] 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.
- [55] A.A. Tropchenko, and A.Yu. Tropchenko, *Metody vtorichnoi obrabotki i raspoznaniya izobrazhenii [Methods of secondary image processing and recognition]*. St. Petersburg: Universitet ITMO, 2015 (in Russian).
- [56] 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.
- [57] 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.
- [58] 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.
- [59] L.A. German and K.S. Subkhanverdiev, "Method for fault location (FL) of the inter-substation zone of traction power supply 2*25 kV", Patent RU 2788303, Jan. 17, 2023.
- [60] 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.

- [61] 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 in the AC contact network of a 25 kV system", Patent RU 2790576, Feb. 27, 2023.
- [62] A.L. Kulikov, L.A. German, K.S. Subkhanverdiev and I.P. Karpov, "Определение места короткого замыкания в контактной сети по измерению реактивной мощности [Determining the location of a short circuit in an AC contact network by measuring reactive power]", *Nauka i obrazovanie transportu [Science and education for transport]*, no. 2, pp. 31-34, 2021 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Куликов Александр Леонидович, доктор технических наук, профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

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

Осокин Владимир Леонидович, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного инженерно-экономического университета, г. Княгинино, Нижегородская обл., Российская Федерация.

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

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

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