

УДК 621.316.925:621.332.3

EDN SWCJXI

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ДИСТАНЦИОННЫХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТ ПОВРЕЖДЕНИЙ КОНТАКТНОЙ СЕТИ. ЧАСТЬ 1

А.Л. Куликов

ORCID: 0000-0003-1092-7136 e-mail: inventor61@mail.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижегород, Россия

В.Л. Осокин

ORCID: 0000-0001-8772-4252 e-mail: osokinvl@mail.ru

Нижегородский государственный инженерно-экономический университет
Княгинино, Нижегородская область, Россия

Д.А. Леваков

ORCID: 0009-0006-5706-7515 e-mail: dmitriy.levakov@mail.ru

Нижегородский 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.

В первой части статьи определено назначение средств дистанционного ОМП в контексте системы ОМП контактной сети и автоматизированной системы управления электроснабжения железных дорог в целом. Дана общая характеристика дистанционным методам ОМП, приведена их классификация и рассмотрены импульсные и петлевые методы, а также ОМП с использованием технологии распределенного акустического зондирования.

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 1 // Интеллектуальная Электротехника. 2025. № 1. С. 16-35. EDN SWCJXI

COMPARATIVE ANALYSIS AND PROSPECTS FOR DEVELOPMENT OF DISTANCE METHODS FOR OVERHEAD CATENARY NETWORK FAULT LOCATION. 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 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 first part of the article defines the purpose of distance FL tools in the context of the FL system of the overhead catenary network and the automated power supply control

system of railways in general. A general description of remote FL methods is given, their classification is presented, and pulse and loop methods are considered, as well as FL using distributed acoustic sensing technology.

Keywords: fault location, 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 1", *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 16-35, 2025. EDN SWCJXI

I. Введение

Эксплуатационная протяженность электрифицированных железнодорожных путей общего пользования Российской Федерации составила около половины общей эксплуатационной длины Российских железных дорог или более 43,5 тыс. км [1]. Известно, что удельный вес электрического транспорта в общем объеме железнодорожных перевозок в настоящее время составляет около 80 %, а средняя грузонапряженность электрифицированных линий более чем в 4 раза превышает значение аналогичного показателя, характеризующего не электрифицированные железные дороги. Ввиду значительности доли грузовых и пассажирских перевозок, осуществляемых посредством железнодорожного транспорта, и его ведущей роли в обеспечении грузевого грузооборота (87 % без учета трубопроводного транспорта), электрифицированные железные дороги являются важной частью транспортного комплекса России и обладают высокой значимостью, с точки зрения удовлетворения ожиданий его основных пользователей и потребителей, а также представляет собой важную часть производственной и социальной инфраструктуры [1, 2].

Преимущества электрической тяги перед тепловозной заключаются в лучших технико-экономических показателях электрифицированных линий, таких как возможность реализации больших грузонапряженности и участковой скорости движения, обеспечения большей пропускной и провозной способности железных дорог при меньшей себестоимости перевозок. Большой экономической и энергетической эффективностью электрической тяги обусловлена общемировая тенденция развития железнодорожного транспорта в сторону увеличения роли этого вида тяги и возложения на электрифицированные железные дороги до 90% объема перевозок [2]. Вышеперечисленные преимущества, связанные с использованием электрической тяги, учтены в действующей Транспортной стратегии России [1], согласно которой в настоящее время является целесообразной реализация таких мероприятий, как дальнейшее расширение полигона электрифицированных железных дорог, усиление мощности энергетического хозяйства

уже электрифицированных линий и постепенный отказ от закупки дизельных локомотивов в пользу увеличения парка электроподвижного состава (ЭПС).

Современные тенденции развития железнодорожного транспорта и необходимость минимизации избыточных совокупных издержек на перевозку обуславливают особую актуальность проблемы внедрения новых технологий и технических решений в части управления системами электропитания железных дорог (СЭЖД) в различных режимах работы. Решение указанной проблемы требует дальнейшего совершенствования автоматизированных систем управления электроснабжением (АСУЭ) железных дорог с целью повышения надежности электроснабжения тяговых потребителей, обеспечения оптимальных условий передачи и распределения электроэнергии и обеспечения высоких значений технико-экономических показателей работы электрифицированных линий [1, 3, 4]. АСУЭ представляет собой комплекс устройств телемеханики, технологической и системной автоматики различного назначения, структура которого продемонстрирована на рис. 1 [3, 5].



Рис. 1. Структурная схема АСУЭ железных дорог

Fig. 1. Structural diagram of automated power supply control system of a railways

Важной составляющей комплекса устройств сетевой автоматики, предназначенных для выявления, предотвращения развития и ликвидации аварийных режимов в СЭЖД, являются средства дистанционного определения места повреждения (ОМП) линий электропередач (ЛЭП) контактной сети. Необходимость оснащения железнодорожной тяговой сети устройствами, реализующими функцию ОМП, является следствием особенностей устройства и условий работы системы тягового электроснабжения (СТЭ).

Воздействие неблагоприятных факторов и подверженность проводов и конструкций контактной сети посторонним и атмосферно-климатическим воздействиям, а также ошибочным действиям обслуживающего персонала обуславливают повышенную повреждаемость контактной сети: среднее число отключений выключателей питающих фидеров по причине короткого замыкания (КЗ) составляет около 10 случаев в год [2-4, 6, 7]. Важной особенностью тяговой сети, с точки зрения обеспечения надежного электроснабжения тяговых потребителей, является отсутствие резервирования ЛЭП контактной сети, вследствие чего повреждения их элементов часто приводят к длительному прекращению тягового электроснабжения на значительном протяжении. На высокую степень повреждаемости контактной сети и надежность функционирования СТЭ также указывают статистические данные, приведенные в исследовании [8], согласно которым на контактную сеть приходится свыше 90 % случаев нарушения нормальной работы электрифицированного железнодорожного транспорта, доля которых в общем времени задержек движения поездов составляет 75 %.

К числу наиболее тяжелых аварийных ситуаций, которыми сопровождается эксплуатация тяговой сети, относятся КЗ, возникающие в результате соединения проводов и тросов контактной сети с землей, ходовыми рельсами или заземленными элементами опор. Опыт эксплуатации СТЭ и статистические данные показывают, что 80-90 % КЗ на линиях контактной сети являются неустойчивыми или преходящими [9]. Такие КЗ самоликвидируются после снятия напряжения с поврежденного участка сети, в этом случае действие автоматики повторного включения (АПВ) контактной сети оказывается успешным, и электроснабжение возобновляется после непродолжительной бестоковой паузы. При устойчивых КЗ, причина которых не самоустраняется после отключения поврежденной линии, для восстановления тягового электроснабжения на поврежденном участке контактной сети требуется проведение ремонтно-восстановительных работ [3, 6, 10, 11]. Ввиду большой протяженности ЛЭП контактной сети, одной из наиболее трудоемких и длительных операций при ликвидации аварии является определение места короткого замыкания (ОМКЗ), быстрота осуществления которого в значительной мере определяет совокупное время отключенного состояния линии. Этими обстоятельствами, а также необходимостью минимизации ущерба, связанного с нарушениями перевозочного процесса и задержками в движении поездов при устойчивом КЗ, обусловлена необходимость применения на тяговых подстанциях (ТП) и постах секционирования (ПС) устройств сетевой автоматики контактной сети, реализующих функцию дистанционного ОМП линии.

Хотя создание первых таких устройств относится к периоду становления АСУЭ железных дорог в начале 1960-х гг., однако и в настоящее

время по-прежнему отсутствуют достаточно эффективные средства ОМП контактной сети, позволяющие оперативно выявлять место устойчивого КЗ [3, 9]. Основным фактором, ограничивающим эффективность применения устройств для определения расстояния до места КЗ и препятствующим их внедрению, является невозможность обеспечения высокой точности определения расстояния до места КЗ при использовании известных методов дистанционного ОМП контактной сети. Этим обстоятельством в совокупности с целями и задачами развития российского транспортного комплекса, приведенными в [1], обусловлена сохраняющаяся актуальность проблемы разработки новых способов ОМП контактной сети, позволяющих точно и быстро выявить место устойчивого КЗ.

Несмотря на отсутствие решений, в полной мере удовлетворяющих указанным требованиям, за прошедший период времени накоплен значительный опыт разработки дистанционных методов ОМКЗ и эксплуатации устройств защиты и автоматики контактной сети, реализующих методы ОМП, а также выполнено большое количество теоретических исследований, направленных на разработку более эффективных способов решения задачи ОМП ЛЭП тяговой сети. Значительный вклад в развитие теории ОМП контактной сети и реализацию новых технических решений, направленных на повышение эффективности ОМП, выполнен отечественными авторами: Е.П. Фигурновым, Ю.Я. Самсоновым, Ю.И. Жарковым, А.С. Бочевым, В.Я. Овласюком, Г.М. Корсаковым, В.А. Зимаковым, И.П. Петровым, Н.А. Поповой, В.Н. Пупыниным, А.Л. Быкадоровым, Т.А. Заруцкой, Л.А. Германом, К.С. Субханвердиевым. Ими и другими авторами опубликовано большое количество научных работ по теме ОМП контактной сети и разработано множество методов определения расстояния до места КЗ, в связи с чем особую актуальность приобретает задача обобщения и систематизации разработок.

В статье анализируются существующие способы ОМП, отмечены их наиболее существенные преимущества и недостатки, а также выявлены основные тенденции развития подходов к организации ОМП ЛЭП контактной сети. Кроме того, развитие информационных технологий и цифровой вычислительной техники обуславливают необходимость повторного рассмотрения известных методов ОМП с учетом расширения возможностей устройств защиты и автоматики тяговой сети и АСУЭ железных дорог в целом.

II. Специфика задачи ОМКЗ в контактной сети

В общем случае комплекс мероприятий, направленных на поиск места устойчивого КЗ на ЛЭП и выявление ее поврежденного элемента (например, перекрытого или пробитого изолятора), представляет собой совокупность последовательно совершаемых операций [6]:

- 1) определение поврежденной части сети;
- 2) автоматическое повторное включение;
- 3) применение дистанционных методов ОМП;
- 4) применение топографических методов ОМП.

Как правило, определение поврежденной части сети осуществляется автоматически при срабатывании селективной релейной защиты от КЗ. Этот случай, применительно к контактной сети двухпутного участка с ПС, проиллюстрирован на рис. 2а. К особенностям СТЭ, оказывающим значительное влияние на процедуру определения поврежденного участка контактной сети, относится широкое использование неселективного способа организации схемы защиты от КЗ [4, 12]. Его сущность заключается в отключении без выдержки времени выключателей всех питающих фидеров смежных ТП при аварии в любой точке межподстанционной зоны, как показано на рис. 2б. В этом случае выделение аварийного участка контактной сети в зависимости от состава защит и установленного оборудования может осуществляться путем сравнения модулей токов смежных присоединений в момент КЗ [4, 13], или может быть выполнено на этапе повторного включения.

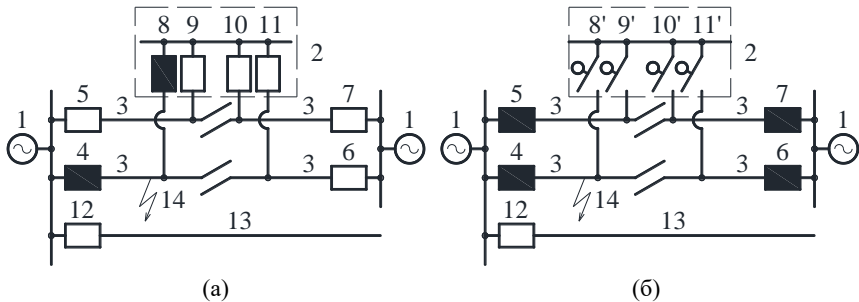


Рис. 2. Примеры селективного (а) и неселективного (б) способов организации защиты тяговой сети от КЗ:

1 – ТП; 2 – ПС; 3 – контактная сеть; 4–12 – выключатели (черным цветом выделены выключатели, отключаемые при КЗ в точке 14); 8'–11' – разъединители; 13 – линия «два провода-рельсы»; 14 – место КЗ

Fig. 2. Examples of selective (a) and non-selective (b) methods of short circuits protection for traction network:

1 – traction substations; 2 – sectioning point; 3 – overhead catenary network; 4–12 – breakers (switched off in the event of a short circuit at the point 14 are highlighted in black); 8'–11' – disconnectors; 13 – transmission line; 14 – short circuit location

Второй этап представляет собой повторную подачу рабочего напряжения на ранее отключенную часть сети [6]. Вместе с тем, АПВ линии, содержащей устойчивое КЗ, является крайне нежелательным ввиду повышенного износа силового оборудования, опасности перегрева проводов, тросов и струн контактной сети и, следовательно, увеличения объема ущерба при аварии [4, 5, 12]. С целью предотвращения подачи рабочего напряжения на неустранившееся КЗ, а также для выделения фидерной зоны с поврежденной контактной сетью ТП или ПС оборудуются устройствами контроля и поиска КЗ (УККЗ и УПКЗ), позволяющими быстро производить диагностирование сети на предмет устойчивого повреждения. В настоящее время известно большое количество таких устройств [13-19], работа которых основана на анализе характеристик остаточного напряжения, генерируемого фазорасщепителями ЭПС, или наводимого со стороны ЛЭП системы «два провода-рельс» (ДПР-27,5 кВ) и оставшихся в работе линий контактной сети параллельных путей [4, 12, 20, 21]. Таким образом, при использовании указанных решений в части автоматизации СТЭ осуществляются определение поврежденной части тяговой сети и повторная подача рабочего напряжения в случае самоустраняющегося КЗ.

Принцип контроля наведенного напряжения также положен в основу действия ряда УПКЗ [22–24], предназначенных для определения аварийного участка контактной сети при наличии устойчивого КЗ, информация о котором необходима для вывода поврежденного оборудования в ремонт. Способ отыскания зоны КЗ, реализуемый этими устройствами, представляет собой развитие наиболее простого и широко применяемого метода поиска поврежденного участка, заключающегося поочередном отключении продольных разъединителей и опробовании контактной сети подачей рабочего напряжения. При этом происходит включение на устойчивое КЗ, о негативных последствиях которого сказано выше.

Эффективным способом решения этой задачи, лишенным недостатков, связанных с подачей рабочего напряжения на неустранившееся КЗ и необходимостью многократных включений и отключений выключателя поврежденной контактной сети, является метод определения зоны КЗ, основанный на использовании УПКЗ [3-5, 9, 25-27]. Процесс определения поврежденной зоны происходит путем последовательного отключения разъединителей и фиксации равенства нулю измеряемого напряжения при наличии КЗ. При этом, в отличие от метода поиска места КЗ опробованием контактной сети, выключатель остается отключенным на всем протяжении описанной процедуры, и повторное включение осуществляется только после отделения поврежденной зоны от смежных ТП. Структурные схемы поиска места КЗ опробованием контактной сети и использованием одного из вариантов УПКЗ приведены на рис. 3а и б соответственно.

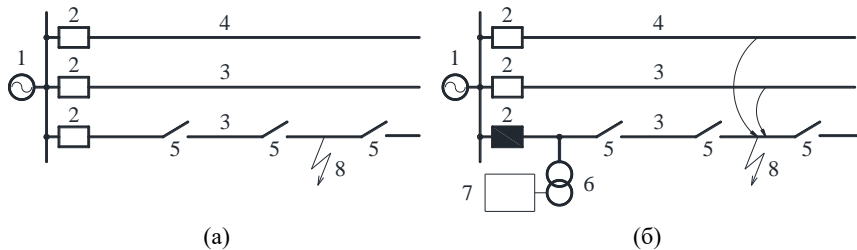


Рис. 3. Структурная схема поиска зоны КЗ
путем опробования контактной сети (а); с использованием УПКЗ (б):
 1 – ТП; 2 – выключатели; 3 – контактная сеть; 4 – линия «два провода-рельс»;
 5 – продольные разъединители; 6 – трансформатор напряжения; 7 – УПКЗ;
 8 – место устойчивого КЗ

Fig. 3. Structural diagram of searching a short circuit zone by testing the overhead catenary network (a) and using the special device (b):

1 – traction substation; 2 – breakers; 3 – overhead catenary network;
 4 – transmission line; 5 – longitudinal disconnectors; 6 – voltage transformer;
 7 – device for a short circuit searching; 8 – short circuit location

Эти способы непосредственно относятся к теме статьи, поскольку их применение позволяет быстро локализовать место устойчивого КЗ в пределах определенной секции и, тем самым, уменьшить длину зоны поиска поврежденного элемента сети и ускорить восстановление ее нормального функционирования. Вместе с тем, несмотря на преимущества схем автоматизации тяговой сети с использованием УПКЗ, точное определение расстояние до места устойчивого КЗ по-прежнему является невозможным, т.к. при использовании метода, проиллюстрированного на рис. 3, определяется только зона между соответствующими разъединителями [25], что диктует необходимость применения средств дистанционного и топографического ОМП. Последние предназначены для точного определения местоположения точки КЗ, а преимущества и недостатки обеих групп способов ОМКЗ обуславливают целесообразность их комплексного применения [6].

Реализация дистанционных способов ОМП тяговой сети (рис. 4) основана на использовании различных приборов и устройств, устанавливаемых на тяговых подстанциях, постах секционирования контактной сети и автотрансформаторных пунктах (АТП). Назначением этих методов является быстрая локализация места КЗ, в том числе неустойчивого, информация о местоположении которого представляет значительную ценность, с точки зрения обеспечения надежности СТЭ. Вместе с тем, известные способы дистанционного ОМКЗ имеют большие погрешности, составляющие от нескольких сотен метров до нескольких километров, в связи с чем для

уточнения места КЗ требуется применение топографических (трассовых) способов ОМП [3, 6, 28].

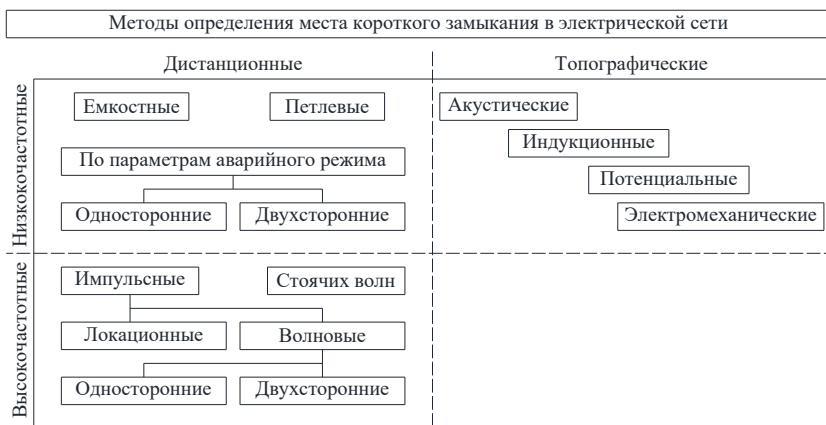


Рис. 4. Схема классификации методов ОМП

Fig. 4. Classification of the fault locating methods

Применение топографических методов (рис. 4) подразумевает поиск точного места повреждения при движении поисковой бригады или транспортного средства, оснащенного средствами топографического ОМП, вдоль трассы обследуемой линии [6, 28]. Примерами таких способов являются отечественные акустический [29] и индукционный [30] методы, а также немецкий метод [31], основанный на контроле сигналов от передатчиков, устанавливаемых на проводниках или конструкциях контактной сети, при помощи размещаемого на транспортном средстве устройства. Поскольку средства топографического ОМП находятся в распоряжении ремонтных служб и линейного персонала и не являются составной частью АСУЭ железных дорог, ниже будут рассмотрены только дистанционные методы ОМП контактной сети.

III. Классификация и характеристика дистанционных методов ОМП

С учетом различий в теоретических основах дистанционных методов ОМП ЛЭП, их совокупность принято разделять на группы низко- и высокочастотных методов в зависимости от характера электрических процессов, анализ которых производится для определения удаленности места КЗ [6, 28]. При этом к низкочастотному диапазону применительно к ВЛ относятся частоты до 1 кГц, а к высокочастотному – от 30 до 1000 кГц.

В практике ОМП ЛЭП общего назначения широкое распространение получило применение импульсных методов, в основу принципа действия

которых положено измерение интервалов времени распространения электромагнитных волн или импульсов на участках между местом повреждения и одним или двумя концами линии [3, 6, 28]. Имеются различия между волновыми и локационными методами, составляющими группу импульсных способов. Локационные методы основаны на вычислении расстояния до места повреждения на основании измеряемого времени распространения зондирующего импульса от одного из концов ЛЭП, на котором устанавливается локационный искатель, до места КЗ и в противоположном направлении. Сущность волновых методов заключается в анализе волновых процессов при КЗ, при этом производится измерение времени пробега не специально генерируемого импульса, а электромагнитных волн, возникающих в месте повреждения [6, 28, 32]. Несмотря на высокую эффективность импульсных методов при ОМП в трехфазных сетях общего назначения, применение этих способов для ОМКЗ контактной сети существенно затрудняется ввиду влияния факторов, связанных с особенностями устройства СТЭ. Отечественный опыт разработки локационных методов ОМП контактной сети, попытки создания которых были предприняты Г.М. Корсаковым и В.А. Зимаковым в 1960-х гг., свидетельствует об их высокой чувствительности к различным неоднородностям и ответвлениям линии: многократное отражение импульсов от токоприемников, ПС, пунктов параллельного соединения (ППС) контактных подвесок, АТП, нейтральных вставок и большого числа других элементов тяговой сети, нарушающих ее однородность, затрудняет отбор необходимых отраженных импульсов, препятствует автоматизации процедуры ОМП и вносит большие погрешности в результаты расчета расстояния до места повреждения [33, 34].

Петлевые методы, применяемые в сетях общего назначения для ОМП кабельных линий и основанные на измерении токов в поврежденном и исправном проводниках, соединяемых по концам линии и подключаемых к источнику питания [6, 28], имеют варианты, адаптированные для использования в тяговой сети. К числу таких методов относятся российский [35] и японский [36] способы ОМП, при реализации которых в качестве второго проводника используется контактная сеть параллельного пути, как показано на рис. 5.

Расстояние x до места КЗ в однородной контактной сети при равных удельных сопротивлениях контактных подвесок параллельных путей, согласно [35], рассчитывается на основании токораспределения в параллельных линиях:

$$x = 2 \cdot L \cdot \frac{I_1/I_2}{(I_1/I_2)+1}, \quad (1)$$

где L – длина измерительной схемы, км.

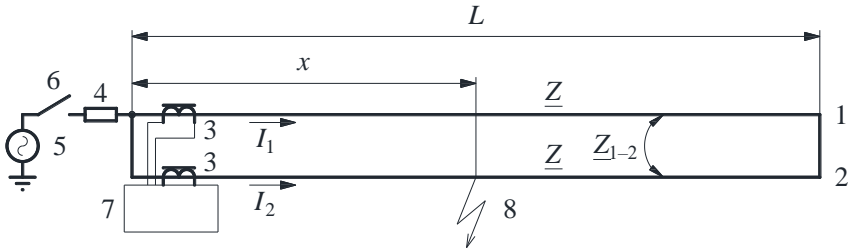


Рис. 5. Принципиальная схема ОМП контактной сети с использованием искусственно создаваемой цепи:

1, 2 – контактная сеть; 3 – трансформаторы тока; 4 – токоограничивающий резистор; 5 – ТП; 6 – ключ; 7 – устройство ОМП; 8 – место повреждения; I_1, I_2 – токи в контактной сети; z – удельное сопротивление контактной сети; z_{1-2} – удельное взаимное сопротивление

Fig. 5. Schematic diagram of the overhead catenary network FL using an artificially created circuit:

1, 2 – overhead catenary network; 3 – current transformers; 4 – current limiting resistor; 5 – traction substation; 6 – breaker; 7 – fault locating (FL) device; 8 – fault location; I_1, I_2 – overhead catenary network currents; z – overhead catenary network impedance; z_{1-2} – mutual impedance

В случае неоднородных или неодинаковых контактных подвесок параллельных путей вместо расчета по (1) в [35] с целью уменьшения погрешности метода предложено определять расстояние x до места повреждения по реальной зависимости $x = f(I_1/I_2)$, составляемой с использованием результатов серии экспериментов.

Предложенный в [35] способ имеет важное преимущество перед методами ОМП по параметрам реального КЗ, которые будут рассмотрены ниже, состоящее в отсутствии влияния переходного сопротивления (электрической дуги, опоры, или троса группового заземления (ТГЗ)) на расчетное значение удаленности места КЗ. Вместе с тем, этот метод не получил широкого распространения ввиду значительного числа коммутаций, требуемых для сборки и разборки измерительной схемы, необходимости отключения контактной сети параллельного пути, невозможности применения этого метода на однопутных участках и невозможности его использования при преходящих КЗ.

Альтернативный способ ОМП контактной сети, имеющий принципиальные отличия от всех указанных групп методов, представляет собой часть системы управления движением поездов, контроля состояния железнодорожной инфраструктуры и подвижного состава, основанной на применении технологии распределенного акустического зондирования (*Distributed*

Acoustic Sensor (DAS), Fiber Optic Sensing (FOS) или Fiber Optic Acoustic Detection (FOAD)). Сущность этой технологии, нашедшей ограниченное применение на железных дорогах Австрии, Германии, США и Японии, заключается в регистрации изменений параметров оптической среды, обусловленных внешними возмущающими воздействиями [37, 38]. В качестве контролируемой оптической среды используются прокладываемые вдоль трассы железной дороги волоконно-оптические кабели (ВОК), по которым передаются лазерные импульсы.

Деформации ВОК, вызванные прохождением поездов, возникновением оползней, действиями посторонних лиц или КЗ в тяговой сети, приводят к рассеянию передаваемых импульсов. При этом сигнал рассеяния фиксируется измерительной аппаратурой, и по времени его распространения по ВОК судят об удаленности места повреждения. Заявленная точность метода ОМП, основанного на использовании технологии распределенного акустического зондирования, составляет 10 м, однако на его погрешность оказывает влияние большой ряд факторов, к числу которых относятся энергоемкость КЗ, длина и время горения дуги, расстояние от места КЗ до ВОК, влияние окружающего шума и другие [39]. Существенным препятствием для широкого внедрения анализируемого способа ОМП является также нецелесообразность прокладки ВОК и оснащения железных дорог соответствующим измерительным оборудованием с целью решения только задачи ОМКЗ ввиду сложности системы и необходимости значительных капитальных вложений для ее обустройства.

IV. Выводы

В данной части статьи была рассмотрена система ОМП контактной сети в контексте ее места в АСУЭ, охарактеризованы топографические и дистанционные способы ОМП, проанализированы дистанционные методы определения места КЗ или поврежденной секции, не относящиеся к группе методов ОМП по параметрам аварийного режима (ПАР). В результате проведенного анализа могут быть сделаны следующие выводы.

Применение метода опробования контактной сети нецелесообразно ввиду повышенного износа оборудования тяговой сети и невозможности точного определения удаленности места КЗ. Более перспективный метод поиска поврежденной зоны с использованием УПКЗ также не может использоваться вместо дистанционного ОМП. Импульсные методы характеризуются неудовлетворительной точностью ввиду непригодности для применения в неоднородных и разветвленных тяговых сетях. Петлевой метод требует составления измерительной цепи и временного вывода из работы контактной сети параллельного пути, а область его применения ограничена участками с двумя и более электрифицированными путями. Внедре-

ние технологии распределенного акустического зондирования требует значительных капитальных затрат и является целесообразным только при ее использовании для решения большого перечня задач.

В связи с указанными обстоятельствами, в настоящее время наиболее оптимальным подходом к решению задачи ОМП контактной сети является анализ измеренных значений ПАР. Известные методы ОМП контактной сети по ПАР будут рассмотрены во второй части статьи.

© Куликов А.Л., 2025

© Осокин В.Л., 2025

© Леваков Д.А., 2025

Поступила в редакцию 19.02.2025

Принята к публикации 05.03.2025

Received 19.02.2025

Accepted 05. 03.2025

Библиографический список

- [1] Распоряжение Правительства Российской Федерации от 27.11.2021 г. № 3363-р «Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года» // Правительство России. [Электронный ресурс]. URL: <http://static.government.ru/media/files/7enYF2uL5kFZIOOpQhLlOnUT91RjCbeR.pdf> (дата обращения 01.02.2025).
- [2] Котельников А.В. Электрификация железных дорог. Мировые тенденции и перспективы. М.: Интекст, 2002. – 104 с.
- [3] Фигурнов Е.П. Релейная защита. В 2-х ч. 3-е изд. М.: УМЦ ЖДТ, 2009.
- [4] Герман Л.А. Совершенствование тягового электроснабжения переменного тока для повышения пропускной способности железных дорог. Н. Новгород: СамГУПС, 2024. – 186 с.
- [5] Герман Л.А., Селянин В.С. Автоматизация электроснабжения тяговой сети переменного тока // Железнодорожный Транспорт. 2010. № 7. С. 34-40.
- [6] Шалыт Г.М. Определение мест повреждения в электрических сетях. М.: Энергоиздат, 1982. – 312 с.
- [7] Пупынин В.Н., Герман Л.А. Диагностика контактной сети переменного тока и современный алгоритм управления выключателями фидеров 27,5 кВ // Наука и Техника Транспорта. 2006. № 2. С. 40-55.
- [8] Галкин А.Г., Митрофанов С.А. Статистический анализ адекватности оценки состояния контактной сети в филиалах ОАО «РЖД» // Инновационный Транспорт. 2011. № 1 (1). С. 48-54.
- [9] Герман Л.А. Автоматизация электроснабжения в аварийных ситуациях тяговой сети железных дорог // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2010. № 3 (82). С. 196-203.
- [10] Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
- [11] Тер-Оганов Э.В., Пышкин А.А. Электроснабжение железных дорог. Екатеринбург: УрГУПС, 2014. – 432 с.

- [12] Герман Л.А., Субханвердиев К.С., Вязов Е.В. Автоматизирован пост секционирования на разъединителях с вакуумным выключателем // Локомотив. 2020. № 4 (760). С. 40-42.
- [13] Герман Л.А., Герман И.В., Карпов И.П. Способ автоматизации повторного включения (АПВ) выключателей двухпутного участка переменного тока тягового электроснабжения с постом секционирования на разъединителях, Пат. 2793578 RU, заявл. 23.07.22; опубл. 04.04.23. – Бюл. № 10.
- [14] Герман Л.А., Субханвердиев К.С., Якунин Д.В., Ишкин Д.В., Карпов И.П. Устройство запрета автоматического повторного включения выключателя контактной сети переменного тока двухпутного участка, Пат. 2724143 RU, заявл. 04.10.19; опубл. 22.06.20. – Бюл. № 18.
- [15] Герман Л.А., Субханвердиев К.С., Вязов Е.В., Жевлаков Д.А. Устройство автоматизации поста секционирования контактной сети переменного тока на разъединителях, Пат. 2725823 RU, заявл. 08.07.19; опубл. 06.07.20. – Бюл. № 19.
- [16] Герман Л.А., Субханвердиев К.С., Карпов И.П., Жевлаков Д.А. Устройство контроля короткого замыкания в контактной сети переменного тока двухпутного участка с быстродействующим автоматическим повторным включением (БАПВ) выключателя питающей линии, Пат. 2740160 RU, заявл. 28.07.20; опубл. 12.01.21. – Бюл. № 2.
- [17] Герман Л.А., Герман В.Л. Способ управления автоматическим повторным включением питающей линии контактной сети двухпутного участка, Пат. 2775931 RU, заявл. 05.07.21; опубл. 12.07.22. – Бюл. № 20.
- [18] Герман Л.А., Субханвердиев К.С., Куликов А.Л. Способ автоматического повторного включения (АПВ) питающих линий контактной сети двухпутного участка системы 25 кВ с постом секционирования на разъединителях, Пат. 2795540 RU, заявл. 10.06.22; опубл. 04.05.23. – Бюл. № 13.
- [19] Герман Л.А., Жевлаков Д.А., Герман И.В., Саликов И.А., Котельников А.С., Блохинцев В.А., Галин А.Д., Яшков Е.А. Способ управления автоматическим повторным включением выключателя, Пат. 2803041 RU, заявл. 11.05.23; опубл. 05.09.23. – Бюл. № 25.
- [20] Герман Л.А., Попов А.Ю., Саморуков А.В., Ишкин Д.В., Якунин Д.В., Субханвердиев К.С. Новый алгоритм автоматизации электроснабжения тяговой сети переменного тока с постом секционирования на выключателях // Вестник Научно-исследовательского Института Железнодорожного Транспорта. 2017. № 76 (5). С. 266-272. DOI: 10.21780/2223-9731-2017-76-5-266-272
- [21] Герман Л.А., Новиков Е.В. Совершенствование работы интеллектуальных терминалов для автоматизации электроснабжения тяговой сети переменного тока // Наука и Техника Транспорта. 2015. № 4. С. 16-21.
- [22] Герман Л.А., Муреев П.А. Устройство контроля короткого замыкания контактной сети переменного тока, Пат. 85672 RU, заявл. 13.04.09; опубл. 10.08.09. – Бюл. № 25.
- [23] Герман Л.А., Лучкевич О.Р. Устройство определения зоны повреждения контактной сети переменного тока, Пат. 104323 RU, заявл. 03.12.10; опубл. 10.05.11. – Бюл. № 13.

- [24] Герман Л.А., Корнеев В.А., Попов Д.С., Якунин Д.В. Пост секционирования контактной сети переменного тока, Пат. 160050 RU, заявл. 28.10.15; опубл. 27.02.16. – Бюл. № 6.
- [25] Герман Л.А., Попов А.Ю. Оперативно определять зону повреждения в отключенной контактной сети // Локомотив. 2012. № 1 (661). С. 36-38.
- [26] Герман Л.А., Герман В.Л., Саморуков А.В., Попов А.Ю., Попов Д.С. Современные устройства автоматизации электроснабжения тяговой сети переменного тока // Электроника и Электрооборудование Транспорта. 2013. № 1. С. 6-12.
- [27] Герман Л.А., Корнеев В.А., Максимов А.В., Муреев П.А., Куров Д.А., Парфенов М.С. Тяговая сеть автоматизирована // Локомотив. 2015. № 6 (702). С. 41-43.
- [28] Аржанников Е.А., Лукоянов В.Ю., Мисриханов М.Ш. Определение места короткого замыкания на высоковольтных линиях электропередачи. М.: Энергоатомиздат, 2003. – 272 с.
- [29] Мрыхин С.Д., Мрыхин Д.С., Перетокин Б.П., Фигурнов Е.П. Способ и устройство для обнаружения мест повреждения изоляции на контактной сети, Пат. 2187438 RU, заявл. 18.04.00; опубл. 20.08.2002.
- [30] Жарков Ю.И., Семенов Ю.Г., Микаэльян М.В. Топографический способ определения места короткого замыкания в тяговой сети переменного тока, Пат. 2668663 RU, заявл. 27.06.17; опубл. 02.10.18. – Бюл. № 28.
- [31] Baldauf W., Landwehr B., Sarnes B., Tiffe G. Ortung und lokalisierung von kurzschlussstellen in oberleitungsanlagen, Пат. 102006018471 DE, заявл. 19.04.06; опубл. 25.10.07.
- [32] Куликов А.Л., Лоскутов А.А., П.С. Пелевин. Принципы реализации релейной защиты, основанной на распознавании волновых портретов // V Межд. молодежный форум «Интеллектуальные энергосистемы», Октябрь 09-13, 2017, Томск, Россия: ТПУ, 2017. С. 59-63.
- [33] Лёвин Г.М. Устройство для определения расстояния до места повреждения контактной сети, АС 207964 SU, заявл. 26.02.65; опубл. 29.12.67. – Бюл. № 3.
- [34] Лёвин Г.М. Погрешность волнового метода при определении расстояния до места повреждения контактной сети постоянного тока // Труды ВНИИЖТ. 1966. Вып. 315. С. 67-75.
- [35] Пупынин В.Н., Шевлюгин М.В. Способ определения расстояния до места короткого замыкания в многопутных тяговых сетях переменного и постоянного тока и устройство для его осуществления (варианты), Пат. 2237905 RU, заявл. 03.04.01; опубл. 10.10.04.
- [36] Koji A., Tetsuo U. Failure location method, device, program, and computer-readable recording medium, Пат. 2005315842 JP, заявл. 07.01.05; опубл. 10.11.05.
- [37] Попов А.Н., Галинуров Р.З. Волоконно-оптические технологии в системах управления движением поездов и контроля состояния объектов инфраструктуры // Транспорт Урала. 2018. № 3 (58). С. 48-54. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-3-48-54
- [38] Ефремов А.Ю. Конференция WDF 2017: развитие технологии DAS для железных дорог // Железные Дороги Мира. 2017. № 11. С. 67-74.
- [39] Определение мест коротких замыканий в тяговых сетях при помощи технологии DAS // Железные дороги мира. 2017. № 12. С. 58-63.

References

- [1] Order of the Government of the Russian Federation dated Nov. 27, 2021 no. 3363-r “Transportnaya strategiya Rossijskoj Federacii do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda [Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with a Forecast for the Period until 2035]”, *The Russian Government*. [Online]. Available at: <http://static.government.ru/media/files/7enYF2uL5kFZIOOpQhLl0nUT91RjCbeR.pdf> [Accessed: Feb. 1, 2025] (in Russian).
- [2] A.V. Kotel'nikov, *Elektrifikatsiya zheleznyh dorog. Mirovye tendencii i perspektivy [Railway electrification. World Trends and Prospects]*. Moscow: Intext, 2002 (in Russian).
- [3] E.P. Figurnov, *Releynaya zashchita [Relay protection]*, 3rd ed. Moscow: UMC ZDT, 2009 (in Russian).
- [4] L.A. German, *Sovershenstvovanie tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka dlya povyshcheniya propusknoi sposobnosti zheleznyh dorog [Improving AC traction power supply to increase railway capacity]*. Nizhny Novgorod: SamGUPS, 2024 (in Russian).
- [5] L.A. German and V.S. Selyakin, “Avtomatizatsiya elektrosnabzheniya tyagovoi seti peremennogo toka [Automation of power supply of AC traction network]”, *Zheleznodorozhnyi Transport [Railway Transport]*, no. 7, pp. 34-40, 2010 (in Russian).
- [6] G.M. Shalyt, *Opreделение мест povrezhdeniya v elektricheskikh setyah [Determining fault locations in electrical networks]*. Moscow: Energoizdat, 1982 (in Russian).
- [7] V.N. Pupyin and L.A. German, “On the diagnostics of the alternating current contact system and the algorithm of 27.5 kW feeder switch control”, *Nauka i Tehnika Transporta*, no. 2, pp. 40-55, 2006.
- [8] G.G. Galkin and S.A. Mitrofanov, “Statistical analysis of adequacy of overhead contact system state assessment at “Russian railways” OJSC branches”, *Innotrans*, vol. 1, no. 1, pp. 48-54, 2011.
- [9] L.A. German, “Automation of electric supply in emergency of railways contact networks”, *Transactions of NNSTU n. a. R.E.Alekseev*, vol. 3, no. 82, pp. 196-203, 2010.
- [10] K.G. Markvardt, *Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannyh zheleznyh dorog [Power supply for electrified railways]*. Moscow: Transport, 1982 (in Russian).
- [11] E.V. Ter-Oganov and A.A. Pyshkin, *Elektrosnabzhenie zheleznyh dorog [Power supply for railways]*. Ekaterinburg: USURT, 2014 (in Russian).
- [12] L.A. German, K.S. Subkhanverdiev and E.V. Vyazov, “Avtomatizirovan post sektionirovaniya na raz'edinitelyah s vakuumnym vyklyuchatelem [The sectioning post on disconnectors with a vacuum circuit breaker has been automated]”, *Lokomotiv [Locomotive]*, vol. 4, no. 760, pp. 40-42, 2020 (in Russian).
- [13] L.A. German, I.V. German and I.P. Karpov, “Method for automatic reclosing (AR) of switches of a double-track section of alternating current of traction power supply with a sectioning point on disconnectors”, Patent RU 2793578, Apr. 4, 2023.
- [14] L.A. German, K.S. Subkhanverdiev, D.V. Yakunin, D.V. Ishkin and I.P. Karpov, “Device for prohibition of automatic repeated switching-on of double-track road AC catenary system circuit breaker”, Patent RU 2724143, Jun. 22, 2020.

- [15] L.A. German, K.S. Subkhanverdiev, E.V. Vyazov and D.A. Zhevnikov, “Automation device for post of sectioning contact AC network on disconnectors”, Patent RU 2725823, Jul. 6, 2020.
- [16] L.A. German, K.S. Subkhanverdiev, I.P. Karpov and D.A. Zhevnikov, “Short-circuit monitoring device in alternating current contact network of double-track section with fast-acting automatic repeated switching (FARS) of supply line switch”, Patent RU 2740160, Jan. 12, 2021.
- [17] L.A. German and V.L. German, “Method for controlling the automatic circuit reclosure of the feed line of the contact system of a double-track section”, Patent RU 2775931, Jul. 12, 2022.
- [18] L.A. German, K.S. Subkhanverdiev and A.L. Kulikov, “Method of automatic reclosing (AR) of the supply lines of contact network of double-track section of 25 kV system with sectioning point at disconnectors”, Patent RU 2795540, May 4, 2023.
- [19] L.A. German, D.A. Zhevnikov, I.V. German, I.A. Salikov, A.S. Kotelnikov, V.A. Blokhintsev, A.D. Galin and E.A. Yashkov, “Circuit breaker auto-reclosing control method”, Patent RU 2803041, Sep. 5, 2023.
- [20] L.A. German, A.Yu. Popov, A.V. Samorukov, D.V. Ishkin, D.V. Yakunin and K.S. Subkhanverdiev, “A new algorithm for automating power supply of an AC traction network with a sectioning points on switches”, *Russian Railway Science Journal*, vol. 76, no. 5, pp. 266-272, 2017. DOI: 10.21780/2223-9731-2017-76-5-266-272
- [21] L.A. German and E.V. Novikov, “Improvement of operation of smart terminals for power supply automation of the alternating current traction network”, *Nauka i Tehnika Transporta*, no. 4, pp. 16-21, 2015.
- [22] L.A. German and P.A. Mureev, “Ustroistvo kontrolya korotkogo zamykaniya kontaktnoi seti peremennogo toka [Short circuit monitoring device for AC contact network]”, Patent RU 85672, Aug. 10, 2009 (in Russian).
- [23] L.A. German and O.R. Luchkevich, “Ustroistvo opredeleniya zony povrezhdeniya kontaktnoi seti peremennogo toka [Device for determining the damage zone of the AC contact network]”, Patent RU 104323, May 10, 2011 (in Russian).
- [24] L.A. German, V.A. Korneev, D.S. Popov and D.V. Yakunin, “Post sektsionirovaniya kontaktnoi seti peremennogo toka [AC contact network section post]”, Patent RU 160050, Feb. 2, 2016 (in Russian).
- [25] L.A. German and A.Yu. Popov, “Operativno opredelyat’ zonu povrezhdeniya v otklyuchyonnoi koontaktnoi seti [Quickly identify the damage zone in the disconnected contact network]”, *Lokomotiv [Locomotive]*, vol. 1, no. 661, pp. 36-38, 2012 (in Russian).
- [26] L.A. German, V.L. German, A.V. Samorukov, A.Yu. Popov and D.S. Popov, “Up-to-date automation facilities of electrical power supply in electric traction AC network”, *Electronics and Electrical Equipment of Transport*, no. 1, pp. 6-12, 2013.
- [27] L.A. German, V.A. Korneev, A.V. Maksimov, P.A. Mureev, D.A. Kurov and M.S. Parfenov, “Tyagovaya set’ avtomatizirovana [The traction network is automated]”, *Lokomotiv [Locomotive]*, vol. 6, no. 702, pp. 41-43, 2015 (in Russian).
- [28] E.A. Arzhannikov, V.Yu. Lukoyanov and M.Sh. Misrikhanov, *Opreделение mesta korotkogo zamykaniya na vysokovoltnykh liniyah elektroperedachi [Determining the location of a short circuit on high-voltage power lines]*. Moscow: Energoatomizdat, 2003 (in Russian).

- [29] S.D. Mrykhin, D.S. Mrykhin, B.P. Peretokin and E.P. Figurnov, “Method of and device for revealing places of damaged insulation in contact system”, Patent RU 2187438, Aug. 20, 2002.
- [30] Yu.I. Zharkov, Yu.G. Semenov and M.V. Mikaelyan, “Topographic method of determining a place of short circuit in a threshold AC network”, Patent RU 2668663, Oct. 2, 2018.
- [31] W. Baldauf, B. Landwehr, B. Sarnes and G. Tiffe, “Short-circuit point detecting and locating device for pipeline facility of railway track, has transponders activated or deactivated in short-circuit region by short circuit current, which exceeds preset threshold value”, Patent DE 102006018471, Oct. 25, 2007.
- [32] A.L. Kulikov, A.A. Loskutov and P.S. Pelevin, “Principy realizatsii releinoi zashchity, osnovannoi na raspoznavanii volnovykh portretov [Principles of implementation of relay protection based on recognition of wave portraits]”, in proc. *V Int. youth forum Intellektual’nye energosistemy [Intellectual power systems]*, Oct. 09-13, 2017, Tomsk, Russia, pp. 59-63 (in Russian).
- [33] G.M. Lyovin, “Ustroistvo dlya opredeleniya rasstoyaniya do mesta povrezhdeniya kontaktnoi seti [Device for determining the distance to the point of damage to the contact network]”, Patent SU 207964, Dec. 29, 1967 (in Russian).
- [34] G.M. Lyovin, “Pogreshnost’ volnovoogo metoda pri opredelenii rasstoyaniya do mesta povrezhdeniya kontaktnoi seti postoyannogo toka [Error of the wave method in determining the distance to the location of fault to the DC contact network]”, *Trudy VNIIZhT [Proceedings of VNIIZhT]*, vol. 315, pp. 67–75, 1966 (in Russian).
- [35] V.N. Pupynin and M.V. Shevlyugin, “Method for determining distance from short circuit location in multi-path traction nets of alternating and direct current and device for realization of said method (variants)”, Patent RU 2237905, Oct. 10, 2004.
- [36] A. Koji and U. Tetsuo, “Failure location method, device, program, and computer-readable recording medium”, Patent JP 2005315842, Nov. 10, 2005.
- [37] A.N. Popov and R.Z. Galinurov, “Fiber optic technologies in the automatic train control systems and monitoring of railway infrastructure”, *Transport of the Urals*, vol. 3, no. 58, pp. 48-54, 2018. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-3-48-54
- [38] A.Yu. Efremov, “Conference WDF 2017: development of DAS technology for railways”, *Zheleznnye Dorogi Mira [Railways of the World]*, no. 11, pp. 67-74, 2017 (in Russian).
- [39] “Opredelenie mest korotkikh замыканий v tyagovykh setyah pri pomoshchi tehnologii DAS [Locating short circuits in traction networks using DAS technology]”, *Zheleznnye Dorogi Mira [Railways of the World]*, no. 12, pp. 58-63, 2017 (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.