

*А.П. Костин, П.С. Пинчуков*

*Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, Российская Федерация*

## **РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПОИСКА МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ В КОНТАКТНОЙ СЕТИ ДЛЯ ЦИФРОВЫХ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ**

**Аннотация.** *Целью работы является сокращение длительности перерыва электроснабжения тяговых потребителей в случае коротких замыканий в контактной сети за счет оптимизации алгоритма поиска места повреждения с применением технологий цифрового обмена между измерительным и расчетно-аналитическим блоками цифровых тяговых подстанций.*

*Наиболее распространенная причина вынужденных простоев поездов, а, следовательно, и экономических убытков, которые прямо пропорциональны времени, затраченному на поиск места, ликвидацию повреждения и началу движения поездов – это повреждение контактной сети. Повреждение может происходить вследствие обрыва или пережога контактного провода, перекрытия изоляторов, повреждения заземления опор контактной сети. Заявляемый способ определения места повреждения имеет преимущества перед известными аналогами за счет быстроты и точности производимых операций логического сравнения измеренных и расчетных величин. На новый способ определения места повреждения в контактной сети электрифицированных железных дорог получен патент на изобретение. Предлагаемым объектом внедрения нового способа являются участки железной дороги с высокой степенью цифровизации объектов, включая цифровые тяговые подстанции.*

**Ключевые слова:** *цифровая тяговая подстанция, короткое замыкание, релейная защита, место повреждения, контактная сеть.*

*A.P. Kostin, P.S. Pinchukov*

*Far Eastern State Transport University (FESTU), Khabarovsk, the Russian Federation*

## **DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR SEARCHING A DAMAGE IN A CONTACT NETWORK FOR DIGITAL TRACTION SUBSTATIONS**

**Abstract.** *The aim of the work is to reduce the duration of the power supply interruption to traction consumers in the event of short circuits in the contact network by optimizing the fault location search algorithm using digital exchange technologies between the measuring and analytical units of digital traction substations.*

*The most common reason for the forced downtime of trains, and, consequently, economic losses, which are directly proportional to the time spent on finding a place, eliminating the damage and starting the movement of trains, is damage to the contact network. Damage can occur due to breakage or burnout of the contact wire, overlapping insulators, damage to the grounding of the overhead contact network supports. The claimed method for determining the location of damage has advantages over known analogs due to the speed and accuracy of the operations performed for the logical comparison of measured and calculated values. A patent for an invention was obtained for a new method for determining the location of damage in the contact network of electrified railways. The proposed object for the implementation of the new method is railway sections with a high degree of digitalization of facilities, including digital traction substations.*

**Keywords:** *digital traction substation, short circuit, relay protection, damage point, contact network.*

### **Введение**

Элементы системы тягового электроснабжения, в том числе устройства контактной сети, зачастую работают в сложных условиях, таких как гололед, сильный и порывистый ветер, грозы, резкие перепады температур и т.п., приводящие к их повреждениям. Наряду с этим в системе тягового электроснабжения могут возникать короткие замыкания, также приводящие к повреждениям устройств контактной сети. Замыкания могут быть вызваны как обрывом контактного провода, так и перекрытием изоляторов контактной сети, что приводит к остановке в движении поездов. Поиск места произошедшего повреждения и ликвидация

последствий до полного восстановления электроснабжения производится, как правило, проведением детального осмотра всех элементов контактной сети и на это требуется значительное время. Как показывает опыт эксплуатации, мероприятия по поиску места повреждения и восстановлению электроснабжения, требующие перерыв в движении поездов, в основном, составляют от 1 до 3 часов. Причем, до 70% обозначенного времени (при условии, что произошло устойчивое короткое замыкание) занимает непосредственный поиск места повреждения [1-2].

#### **Существующие способы поиска места повреждения.**

Известны несколько методов определения места повреждения в контактной сети железных дорог, однако наиболее распространение нашли методы определения путем расчета расстояния от питающей подстанции до предполагаемого места повреждения контактной сети. Существуют разновидности методов, когда расстояние рассчитывается путем анализа распределения полных или реактивных сопротивлений, или на оценке токораспределения в тяговой сети. Указанные методы используются дистанционно: измерение расстояния до места повреждения происходит при помощи измерительной аппаратуры, установленной на тяговой подстанции или на диспетчерском пункте [3].

Суть указанных способов определения места КЗ в контактной сети заключается в определении расстояния ИКЗ от шин питающей тяговой подстанции до места короткого замыкания. Для определения расстояния  $I_{кз}$  проводят измерение величины тока того фидера контактной сети  $I_f$  в момент короткого замыкания, где произошло короткое замыкание, и величины напряжения  $U_{ш}$  на шинах тяговой подстанции.

Проблема существующих способов определения места повреждения в контактной сети заключается в низкой точности, что, как следствие, приводит к определению ложного места повреждения [2, 4]. Ошибка в определении места повреждения приводит к увеличению времени поиска истинного места повреждения, увеличивая время устранения аварии.

#### **Цифровые тренды в железнодорожной энергетике.**

Правительством Российской Федерации утверждена долгосрочная программа по развитию ОАО «РЖД» до 2025 года, куда входит план по переходу на «цифровую железную дорогу». Целью этой программы является повышение качества транспортных услуг за счет применения цифровых технологий [2, 4, 5]. Основная роль в этой технологии будет отведена интеллектуальным взаимодействиям между инфраструктурой железной дороги, системой управления движением поездов, конкретным транспортным средством (электровозом, тепловозом и т. п.) и непосредственно пользователем данной услуги [5].

Важная роль в комплексе цифровой железной дороги отводится цифровой тяговой подстанции, которая должна содержать «умное» оборудование: электронные трансформаторы тока, объединяющее оборудование (связующее между собой отдельные блоки), элементы системы автоматизированного мониторинга за электрическими параметрами присоединений подстанции.

Указанное оборудование будет использовать более широкий, чем в настоящее время, спектр данных, необходимых не только для понимания процессов, происходящих в контактной сети, но и для управления системой, принятия инженерных решений, прогнозирования ситуации и т. п. Также по этим данным можно будет определить и выявить возникновение не только самих неисправностей, но и причин, приводящих к ним.

Имеющийся опыт эксплуатации автоматизированных систем мониторинга за параметрами тяговых подстанций позволил уже сейчас иметь в распоряжении исследователей обширную базу данных, которые можно использовать для решения различных насущных задач эксплуатации, а также для проектирования и поэтапного применения технологии цифровой железной дороги [2, 7].

Согласно идее цифровой подстанции связь между оборудованием цифровой подстанции осуществляется при помощи протокола МЭК 61850 (стандарт «Сети и системы связи на подстанциях») [2]. Данный протокол связи поддерживается всеми современными отечественными и зарубежными производителями защитной аппаратуры, связи,

телемеханики и измерительных устройств. В реализуемом новом способе определения места повреждения рассматривается комплексная работа цифровых тяговых подстанций, оснащенных современными устройствами релейной защиты железных дорог, средствами измерения, системами имитационного моделирования и аналитическим блоком [2, 6].

### Новый способ определения места повреждения

Был разработан и запатентован способ определения места повреждения в контактной сети, который представляет собой алгоритм, совершаемый с базой данных измеренных и рассчитанных на основании измеренных ряда параметров короткого замыкания [2]. Способ предназначен прежде всего для реализации на цифровых тяговых подстанциях, на которых автоматизированная система мониторинга дает большие возможности анализа аварийных параметров, однако его применение возможно уже на стадии перехода от тяговых обычных подстанций к цифровым [3].

Алгоритм включает в себя взаимодействие между тремя элементами:

1. базой данных характеристик цепи короткого замыкания и схемы межподстанционной зоны, которую необходимо создать заблаговременно для множества точек короткого замыкания при помощи имитационного моделирования,
2. измеренными значениями характеристик схемы при возникшем коротком замыкании в определенной точке межподстанционной зоны,
3. рассчитанными на основании измеренных значениями тех же параметров, что описаны выше.

База данных должна представлять собой массивы данных, содержащие значения электрических параметров токов, сопротивлений и фазовых углов при различных вариантах расчетных схем питания и секционирования контактной сети рассматриваемой межподстанционной зоны, а так же при различных переходных сопротивлениях в месте возможного замыкания.

В данном методе поиск места короткого замыкания включает в себя следующие этапы. На первом, подготовительном, этапе совершаются расчетные операции, которые необходимо выполнить заблаговременно в имитационной модели до непосредственного возникновения повреждения. Имитационная модель создается для рассматриваемой межподстанционной зоны производством моделирование множества схем короткого замыкания и вариантов расположения точек короткого замыкания внутри этой зоны. Необходимо смоделировать всевозможные варианты расчетной схемы питания и секционирования контактной сети с отметками о расположении коммутационных аппаратов, получив таким образом своеобразный сектор базы данных, показанный на рис. 1.

Сектор базы данных расчетных значений параметров цепи короткого замыкания соответствует только одной расчетной схеме питания и секционирования контактной сети межподстанционной зоны и указанием для каждого высоковольтного выключателя установки места и включенного/отключенного положения [6].

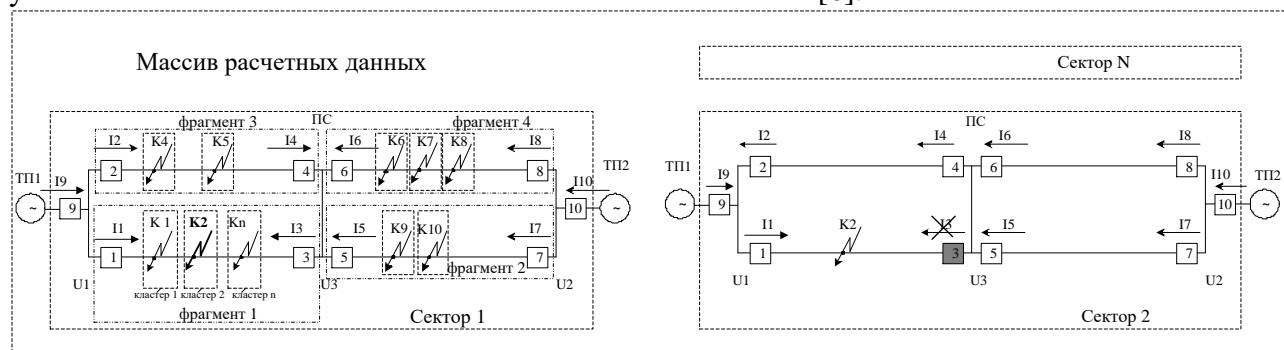


Рис.1. Пример составления базы данных для расчетной схемы межподстанционной зоны

Далее необходимо создать и записать кластер, в котором содержатся результаты расчетов напряжений, токов, фазовых углов и сопротивлений участка контактной сети для

одной точки замыкания с учетом дополнительных характеристик цепи короткого замыкания (сопротивление заземляющих спусков, переходное сопротивление рельс-земля, переходное сопротивление электрической дуги в месте короткого замыкания и т.д.). Такие кластеры будут объединяться внутри каждого сектора, пример табличного представления результатов показан в таблице 1.

Таблица 1. Параметры расчетной схемы межподстанционной зоны

Кластер / точка КЗ	Дополнительные характеристики цепи КЗ	Численные значения рассчитанных параметров							Итог
		$\Pi_{ij}$		$I_{ij}$		...	$A_{расч\ i, j}$		
кластер 1/ <b>К1</b>	<b>R<sub>П1</sub></b>	$\Pi_{1,1}$	$\Delta\Pi_{1,1}$	$I_{1,1}$	$\Delta I_{1,1}$	...	$A_{расч\ 1,1}$	$\Delta A_{расч\ 1,1}$	$\sum \Delta_{1,1}$
	<b>R<sub>П2</sub></b>	$\Pi_{1,2}$	$\Delta\Pi_{1,2}$	$I_{1,2}$	$\Delta I_{1,2}$	...	$A_{расч\ 1,2}$	$\Delta A_{расч\ 1,2}$	$\sum \Delta_{1,2}$
	<b>R<sub>П3</sub></b>	$\Pi_{1,3}$	$\Delta\Pi_{1,3}$	$I_{1,3}$	$\Delta I_{1,3}$	...	$A_{расч\ 1,3}$	$\Delta A_{расч\ 1,3}$	$\sum \Delta_{1,3}$
	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	<b>R<sub>Пк</sub></b>	$\Pi_{1,k}$	$\Delta\Pi_{1,k}$	$I_{1,k}$	$\Delta I_{1,k}$	...	$A_{расч\ 1,k}$	$\Delta A_{расч\ 1,k}$	$\sum \Delta_{1,k}$
кластер 2/ <b>К2</b>	<b>R<sub>П1</sub></b>	$\Pi_{2,1}$	$\Delta\Pi_{2,1}$	$I_{2,1}$	$\Delta I_{2,1}$	...	$A_{расч\ 2,1}$	$\Delta A_{расч\ 2,1}$	$\sum \Delta_{2,1}$
	<b>R<sub>П2</sub></b>	$\Pi_{2,2}$	$\Delta\Pi_{2,2}$	$I_{2,2}$	$\Delta I_{2,2}$	...	$A_{расч\ 2,2}$	$\Delta A_{расч\ 2,2}$	$\sum \Delta_{2,2} = \min$
	<b>R<sub>П3</sub></b>	$\Pi_{2,3}$	$\Delta\Pi_{2,3}$	$I_{2,3}$	$\Delta I_{2,3}$	...	$A_{расч\ 2,3}$	$\Delta A_{расч\ 2,3}$	$\sum \Delta_{2,3}$
	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	<b>R<sub>Пк</sub></b>	$\Pi_{2,k}$	$\Delta\Pi_{2,k}$	$I_{2,k}$	$\Delta I_{2,k}$	...	$A_{расч\ 2,k}$	$\Delta A_{расч\ 2,k}$	$\sum \Delta_{2,k}$
...	...	...	...	...	...	...	...	...	
кластер n/ <b>Кn</b>	<b>R<sub>П1</sub></b>	$\Pi_{n,1}$	$\Delta\Pi_{n,1}$	$I_{n,1}$	$\Delta I_{n,1}$	...	$A_{расч\ n,1}$	$\Delta A_{расч\ n,1}$	$\sum \Delta_{n,1}$
	<b>R<sub>П2</sub></b>	$\Pi_{n,2}$	$\Delta\Pi_{n,2}$	$I_{n,2}$	$\Delta I_{n,2}$	...	$A_{расч\ n,2}$	$\Delta A_{расч\ n,2}$	$\sum \Delta_{n,2}$
	<b>R<sub>П3</sub></b>	$\Pi_{n,3}$	$\Delta\Pi_{n,3}$	$I_{n,3}$	$\Delta I_{n,3}$	...	$A_{расч\ n,3}$	$\Delta A_{расч\ n,3}$	$\sum \Delta_{n,3}$
	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	<b>R<sub>Пк</sub></b>	$\Pi_{n,k}$	$\Delta\Pi_{n,k}$	$I_{n,k}$	$\Delta I_{n,k}$	...	$A_{расч\ n,k}$	$\Delta A_{расч\ n,k}$	$\sum \Delta_{n,k}$

В момент возникновения замыкания начинается функционирование следующего этапа алгоритма. Необходимо в момент короткого замыкания на одной или смежных тяговых подстанциях межподстанционной зоны выполнить измерения напряжения на шинах, величины и направления токов линий, питающих контактные сети путей межподстанционной зоны, где произошло замыкание, и фазовых углов токов. На основании измеренных значений рассчитывается ряд параметров, необходимых для дальнейшего сравнения. Однако, операцию сравнения в предлагаемом способе производят не со всем объемом имеющихся в базе данных значений, а только со значениями, записанными в определенный сектор и кластер. Сокращение вычислительной работы достигается путем однозначного определения поврежденного участка, т.к. выявлен идентификационный признак наличия замыкания именно на этом участке. Поврежденному участку соответствует только один сектор из всей базы данных.

На следующем этапе нужно из множества фрагментов созданной предварительно базы данных выбрать один, в котором в одном из секторов выбирается фрагмент, соответствующий поврежденному участку. Этот фрагмент выбирается по отличительному признаку повреждения – по признаку встречного направления протекающих по контактной сети токов в начале и конце участка. Выбрав таким образом только один определенный сектор из базы данных, далее нужно провести операции сравнения рассчитанных заблаговре-

менно и рассчитанных на основании измеренных в момент короткого замыкания значений. Также нужно вычислить относительную разницу между этими значениями, а потом рассчитать сумму относительных разниц, как показано в таблице 1.

Искомой точкой места повреждения назначают ту расчетную точку короткого замыкания из базы данных, для кластера которой найденная сумма относительных разниц рассчитанных на основании измеренных и расчетных значений цепи короткого замыкания является минимальной. В нашем примере минимальная сумма  $\Sigma\Delta_{2,2}=\min$  обведена жирным контуром в ячейке, которая относится к точке К2 одноименного кластера на рисунке 1, следовательно, искомое место замыкания соответствует местоположению точки короткого замыкания К2, обведенной жирной линией на рисунке 1. Таким образом, благодаря выявлению отличительного признака предлагаемый способ позволяет однозначно идентифицировать истинное место короткого замыкания и сократить время поиска места повреждения, и, как следствие, ускоряет начало проведения ремонтно-восстановительных работ по возобновлению электроснабжения, прерванного по вине возникшего замыкания.

### **Заключение**

Предложенный способ поиска места повреждения в контактной сети наиболее удобно осуществлять при помощи компьютерной техники, хотя его реализация возможна уже сейчас на обычных, не цифровых, тяговых подстанциях. Учитывая возможности цифровых технологий процессы производимых расчетов, передачи информации и сравнения, реализуемые при помощи нового разработанного авторами алгоритма, не потребует много времени. Сужение области поиска до одного сектора из объемной базы данных также ускоряет вычислительные процессы. Перспективы появления новых цифровых тяговых подстанций дает большие возможности использования синхронных измерений, формирования больших баз данных и реализации сложных алгоритмов обработки информации в применении нового способа определения места повреждения в контактной сети электрифицированных железных дорог, что поможет значительно упростить поиск места повреждения, повысить точность и сократить время поиска.

## **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Фигурнов Е. П. Релейная защита: учебник для студентов вузов железнодорожного транспорта: в 2 ч. Ч. 1: Основы релейной защиты // Изд. 3-е перераб. и доп. М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте : Транспортная книга, 2009. 414 с.
2. Пинчуков П.С., Макашёва С.И., Костин А.П. Повышение эффективности работы релейной защиты при цифровизации железной дороги // Проблемы транспорта Дальнего Востока. Доклады научно-практической конференции. 2019. Т. 1. С. 275-277.
3. Дынькин, Б. Е., Завражин В.В. Сравнительный анализ существующих методов определения повреждения тяговой сети // Актуальные вопросы технических наук : материалы I Международной научной конференции. Меркурий, 2011. — С. 53-56.
4. D-russia.ru [Электронный ресурс]. URL: <http://www.d-russia.ru/utverzhdyon-plan-perehoda-rzhd-na-tsifrovuyuzheleznuyu-dorogu.html>.
5. Цифровая железная дорога: настоящее и будущее [Электронный ресурс]. URL:<http://www.gudok.ru/newspaper/?ID=1348652>.
6. Пинчуков П.С., Макашева С.И., Костин А.П. Способ определения места короткого замыкания контактной сети электрифицированного транспорта. Патент на изобретение 2740304 С1, 13.01.2021. Заявка № 2020120458 от 15.06.2020.
7. Пинчуков П.С., Макашева С.И., Костин А.П. Комплексная оценка работы релейной защиты тяговой сети переменного тока // Вестник Брянского государственного технического университета. 2020. № 7 (92). С. 27-38.

## REFERENCES

1. Figurnov E.P. Relay Protection: textbook for railway college students: in 2 Parts Part 1: Fundamentals of Relay Protection // 3-d edition revised and supplemented. M.: Educational and Methodical Center for Education on Railway Transport: Transport Book, 2009. pp. 414.
2. Pinchukov P.S., Makasheva S.I., Kostin A.P. Povyshenie effektivnosti raboty releinoi zashchity pri tsifrovizatsii zheleznoi dorogi [Improving the efficiency of relay protection during digitalization of the railway]. Problemy transporta Dalnego Vostoka. Doklady nauchno-prakticheskoi konferentsii [Problems of transport of the Far East. Reports of the scientific and practical conference], 2019.No. 1, pp. 275-277.
3. Dyn'kin, B.E., Zavrazhin V.V. Sravnitelnyi analiz sushchestvuiushchikh metodov opredeleniia povrezhdeniia tiagovoi seti [Comparative analysis of existing methods for determining traction network damage]. Aktualnye voprosy tekhnicheskikh nauk : materialy I Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii [Actual problems of technical sciences: materials of the I International scientific conference]. Mercury, 2011, pp. 53-56.
4. D-russia.ru [Electronic resource]. URL: <http://www.d-russia.ru/utverzhdyon-plan-perehoda-rzhd-na-tsifrovuyuzheleznuyu-dorogu.html>
5. Digital railway: the present and the future [Electronic resource]. URL: <http://www.gudok.ru/newspaper/?ID=1348652>.
6. Pinchukov P.S., Makasheva S.I., Kostin A.P. Sposob opredeleniia mesta korotkogo замыкания контактной сети электрифицированного транспорта [A method for determining the location of a short circuit in the contact network of an electrified transport]. Invention patent 2740304 C1, 01.13.2021. Application No. 2020120458 dated 06.15.2020.
7. Pinchukov P.S., Makasheva S.I., Kostin A.P. Kompleksnaia otsenka raboty releinoi zashchity tiagovoi seti peremennogo toka [Comprehensive assessment of the operation of relay protection of the AC traction network]. Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Bryansk State Technical University], 2020. No. 7 (92), pp. 27-38.

## Информация об авторах

*Костин Алексей Петрович* – аспирант кафедры «Системы электроснабжения», Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, e-mail: [kostinlesha2704@mail.ru](mailto:kostinlesha2704@mail.ru)

*Пинчуков Павел Сергеевич* – к. т. н., доцент кафедры «Системы электроснабжения», Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, e-mail: [pinchukov-pavel@mail.ru](mailto:pinchukov-pavel@mail.ru)

## Information about the author

*Alexey Petrovich Kostin* – Graduate student Department of Power Supply Systems, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, e-mail: [kostinlesha2704@mail.ru](mailto:kostinlesha2704@mail.ru)

*Pavel Sergeevich Pinchukov* – Candidate of Technical Science, Associate Professor, Department of Power Supply Systems, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, e-mail: [pinchukov-pavel@mail.ru](mailto:pinchukov-pavel@mail.ru)