

ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ ФИДЕРОВ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

П.С. Пинчуков, pinchukov-pavel@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9461-6620>
С.И. Макашева, smakasheva@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0329-3836>
Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, Россия

Аннотация. В сложившихся условиях роста интенсивности и объемов движения тяжеловесных поездов по сети железных дорог РФ участившиеся случаи неправильного действия защит фидеров контактной сети в нормальном режиме приводят к нарушению графика движения поездов и, как следствие, к значительному материальному ущербу. Статья посвящена задаче оптимизации алгоритма работы дистанционной защиты фидеров контактной сети системы тягового электроснабжения 25 кВ, 50 Гц переменного тока, исключающего неправильную работу защиты в различных режимах. На основании натурных осциллограмм токов и напряжений фидеров контактной сети для нормальных и аварийных режимов выполнен анализ их гармонического состава, что позволило выявить новый отличительный признак режима короткого замыкания в контактной сети. Приведены графические зависимости изменения гармонических составляющих тока контактной сети за время переходных процессов в нормальных и аварийных режимах. Предложены новый алгоритм работы и новая функциональная схема устройства дистанционной защиты фидеров контактной сети, позволяющие исключить излишнее срабатывание дистанционной защиты фидеров контактной сети с учетом наличия повышенных токовых нагрузок.

Ключевые слова: электроснабжение железных дорог, фидер контактной сети, дистанционная защита, гармонические составляющие, нормальный режим, короткое замыкание, алгоритм

Благодарности. Работа поддержана персональным Грантом ОАО «РЖД» на развитие научно-педагогических школ железнодорожного транспорта № 4663593 от 27.12.2021 г., утвержденным на 2022–2023 гг.

Для цитирования: Пинчуков П.С., Макашева С.И. Повышение устойчивости функционирования дистанционной защиты фидеров контактной сети переменного тока // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2023. Т. 23, № 4. С. 24–33. DOI: 10.14529/power230403

Original article
DOI: 10.14529/power230403

INCREASING THE OPERATION STABILITY OF THE REMOTE PROTECTION OF AN AC TRACTION SYSTEM

P.S. Pinchukov, pinchukov-pavel@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9461-6620>
S.I. Makasheva, smakasheva@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0329-3836>
Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia

Abstract. The stable operation of AC railway catenary feeder protection depends on the accurate identification of its operation modes. Under existing conditions, the intensity and volume of heavy trains on the Russian railway network is growing rapidly, which causes frequent malfunctions of catenary feeder protection in the normal mode. This leads to disruptions in train schedules and to significant material damage. This paper is devoted to optimizing the algorithm of distance-based catenary feeder protection in AC traction power supply system (25 kV, 50 Hz), which prevents the protection's incorrect action in the load mode. Based on full-scale currents and voltage oscillograms of catenary feeders for load and short circuit modes, their harmonic compositions are analyzed. A new distinctive feature of the short circuit mode in the AC traction power system was identified as a result of harmonic analysis. The changes of harmonic components during transient processes in load and short circuit modes are presented in graphical form. A new algorithm and a functional scheme of a distance-based catenary feeder protection are proposed. This makes it possible to avoid excessive action of catenary feeder distance-based protection, taking into account the presence of increased current loads.

Keywords: railway power supply, catenary feeder, distance protection, harmonics, load mode, short circuit, algorithm

Acknowledgments. The research is supported by the Grant No. 4663593 dated December 27, 2021 from JSC "Russian Railways" for the development of the railway transport scientific and pedagogical school, approved for 2022–2023.

For citation: Pinchukov P.S., Makasheva S.I. Increasing the operation stability of the remote protection of an AC traction system. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2023;23(4):24–33. (In Russ.) DOI: 10.14529/power230403

Введение

В системах тягового электроснабжения (СТЭ) электрифицированных железных дорог контактная сеть для питания электроподвижного состава не имеет резерва, что делает особенно ответственным функционирование устройств ее защиты. Правильный порядок функционирования устройств защиты фидеров контактной сети (ФКС) подразумевает срабатывание устройств при коротком замыкании (КЗ) в защищаемой зоне и несрабатывание при отсутствии замыкания в защищаемой зоне или при замыкании за пределами защищаемой зоны [1, 2]. Однако в реальных условиях эксплуатации защита может работать неправильно в силу различных причин. Среди неправильных действий защит выделяют: ложные срабатывания (ЛС), излишние срабатывания (ИС) и отказ срабатывания (ОС) [1–3]. Интенсификация тяжеловесного движения предполагает как повышение массы поезда по сравнению с обычными весовыми нормами, так и сокращение межпоездного интервала попутного следования поездов. При этом, как показывают результаты анализа работы защит ФКС в условиях эксплуатации, наряду с достаточно эффективной защитой контактной сети от металлических КЗ, с ростом интенсивности тяжеловесного движения возрастает количество случаев неправильных действий как релейных, так и микропроцессорных защит в режиме нагрузки, что связано с ростом тяговых нагрузок вследствие увеличения массы поездов [3–14]. Таким образом, исследуемая проблема заключается в низкой способности защиты выполнить установленные требования по устойчивости функционирования в условиях тяжеловесного движения, что ведет к нарушению графика движения поездов, перерыву в электроснабжении и сопровождается значительным материальным ущербом.

Постановка цели и задач исследования

Устойчивость функционирования – одно из важнейших требований, предъявляемых к устройствам защиты электрических сетей, в том числе и к защитам элементов СТЭ. Целью работы является совершенствование алгоритма работы дистанционной защиты ФКС, гарантирующее её устойчивое функционирование в различных режимах работы тяговой сети железных дорог, электрифицированных по системе 25 кВ, 50 Гц переменного тока.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- анализ осциллограмм токов и напряжений ФКС, полученных экспериментальным путем в нормальном режиме и режиме КЗ;
- анализ параметров, характеризующих изменения гармонических составляющих кривых тока и напряжения в различных режимах работы СТЭ;
- выявление отличительных признаков для точной идентификации нормального режима и

режима КЗ с обоснованием возможности их применения для построения новых принципов срабатывания защиты;

– совершенствование алгоритма работы дистанционной защиты ФКС на основании предлагаемых отличительных признаков режима работы СТЭ.

Анализ особенностей существующих терминалов защиты и автоматики фидеров контактной сети

В настоящее время на сети электрифицированных железных дорог переменного тока 50 Гц нашей страны преимущественно применяются микропроцессорные защиты ФКС типа БМРЗ-ФКС, ЦЗА-27,5-ФКС и ИнТер-27,5-ФКС [1, 10, 12, 13]. Упомянутые терминалы в качестве основных защит от КЗ содержат ступени дистанционной защиты и дополнительную токовую отсечку. Для повышения устойчивости функционирования ступеней дистанционных защит в условиях повышенных токовых нагрузок помимо основных параметров (действующие значения напряжения и тока по контролируемому присоединению) терминалы фиксируют и дополнительные параметры, в том числе величины коэффициентов содержания нечетных гармонических составляющих в кривой тока. Как правило, контроль проводится по превалирующим гармоническим составляющим (третья, пятая и седьмая гармоники тока) [4, 7, 13, 14]. Контроль дополнительных параметров должен обеспечивать блокировку действий дистанционных защит для исключения неправильных действий в нагрузочных режимах. Однако, как показали исследования [4–6, 8–10, 12], контроль указанных выше параметров не исключает неправильных действий защит в условиях тяжеловесного движения поездов.

Для исключения неправильных действий защит ФКС предлагаются способы совершенствования алгоритмов функционирования защит, основанные на применении в качестве идентификационного показателя режима дополнительных электрических параметров. К примеру, скорость изменения напряжения на шинах тяговой подстанции, где подключено устройство защиты, рассматривается отечественными авторами [4, 8]. В терминалах защиты иностранных производителей также используются дополнительные параметры, что позволяет блокировать действия дистанционных защит в режимах нагрузки и исключать неправильные срабатывания. Например, в терминале цифровой защиты контактной сети переменного тока SIPROTEC 7ST6 от компании SIEMENS [14], распространенной в странах Европы, Китае, Австралии и Южной Америки в качестве дополнительного параметра для блокировки ступеней дистанционной защиты используются приращения тока или напряжения (соотношение di/dt и/или du/dt соответственно) [15]. Комплекты ступеней дистанционных

защит с дополнительными блокирующими параметрами нашли широкое применение на полигоне железных дорог Франции, Испании и Японии [14–17], поэтому использование дополнительных параметров для отстройки защит от нормального режима представляется перспективным для российских железных дорог. Вместе с тем особенностью решаемой задачи становится необходимость поиска таких дополнительных параметров, которые позволяли бы исключать неправильную работу защит в условиях значительных токовых перегрузок при тяжеловесном движении. В этой связи научный интерес представляет исследование особенностей формирования кривых тока и напряжения в условиях резкого увеличения нагрузки.

Исследование искажения формы кривых тока и напряжения в различных режимах работы СТЭ

Искажение синусоидальной формы тока или напряжения в электрической сети переменного тока относится к области проблемы электромагнитной совместимости всех элементов цепи электропитания – от источника до конечного потреби-

теля в СТЭ, так как искажение синусоидальности снижает эффективность как работы системы электроснабжения в целом, так и всех элементов, связанных с ней электромагнитно. В ходе регулярных многолетних наблюдений за параметрами СТЭ на шинах 27,5 кВ тяговых подстанций, находящихся в зоне ответственности Дальневосточной дирекции по энергообеспечению СП Трансэнерго – филиал ОАО «РЖД», были зафиксированы осциллограммы реально происходящих в тяговой сети КЗ посредством регистраторов аварийных событий (РАС). Также были записаны осциллограммы для нормального режима СТЭ, когда нагрузка ФКС резко увеличивалась в связи с прохождением по межподстанционной зоне тяжеловесного поезда.

Наличие обширной базы данных осциллограмм дало возможность провести детальное исследование гармонического состава кривых напряжения и тока на коротких (миллисекунды) временных интервалах отдельно для нормальных и аварийных режимов работы тяговой сети.

На рис. 1 приведены осциллограммы, записанные РАС за время резкого увеличения нагрузки ФКС с 100 до 409 А.

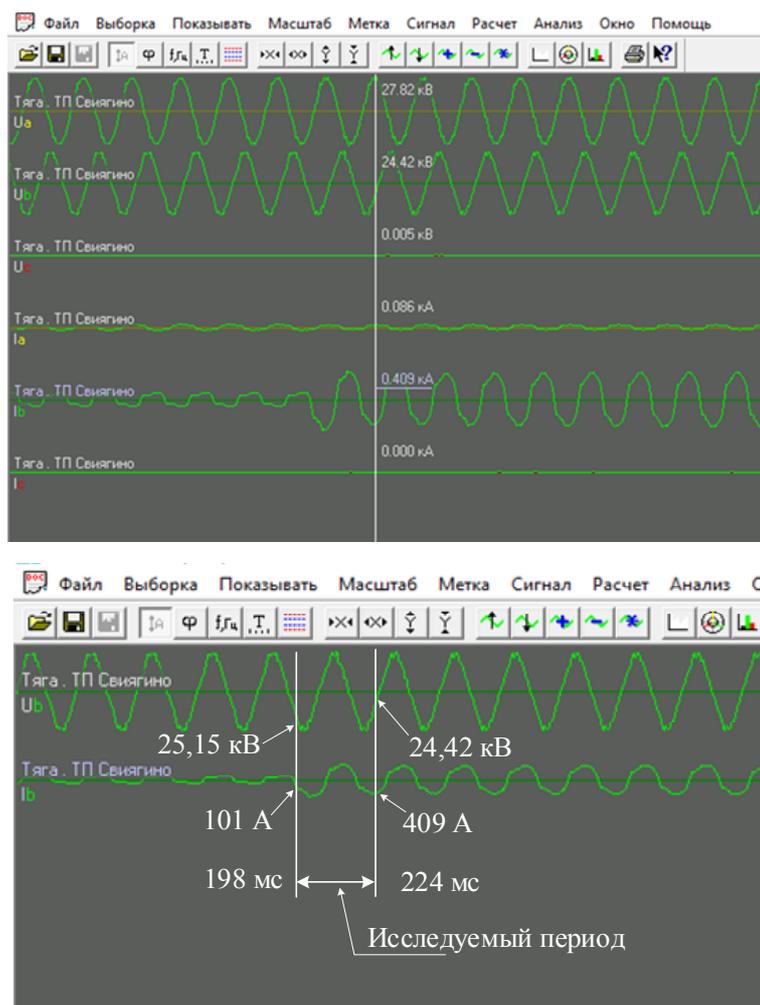


Рис. 1. Осциллограммы, записанные РАС при резком увеличении тока нагрузки ФКС
Fig. 1. Oscillograms during a sharp increase in the load current, stored by the emergency recorder

Гармонический анализ осциллограмм проводился для переходного процесса, который характеризуется присутствием в гармоническом спектре кривой тока ФКС постоянной гармонической составляющей, как ранее было более подробно описано авторами в [18]. Гармонический состав несинусоидальных периодических функций тока и напряжения определяется с помощью преобразования Фурье, которое встроено в алгоритмы используемых РАС. В результате обработки осциллограмм кривых тока и напряжения из рис. 1 в период переходного процесса за 26 мс были записаны численные значения действующих токов (I_d) и напряжений (U_d) и их гармонических составляющих. Для дальнейшего анализа были отобраны постоянные составляющие ($F0u$; $F0i$) и первые гармоники напряжения и тока ($F1u$; $F1i$), графики изменения которых представлены на рис. 2.

Из рис. 2 следует, что в кривой напряжения ФКС на исследуемом интервале времени значение постоянной гармонической составляющей во много раз меньше, чем действующие значения напряжения (наибольшее значение $F0u_{max} = 0,235$ кВ соответствует значению $U_d = 24,84$ кВ). В отличие от напряжения, постоянная гармоническая $F0i$ в кривой тока составляет более существенную долю. Так, в пиковом моменте своего роста на рис. 2 при $t = 210$ мс постоянная гармоническая составляющая тока равна $F0i_{max} = 158$ А при величине действующего тока $I_d = 318$ А. Вдобавок для кривой тока $F0i = f(t)$ характерен скачкообразный характер изменения в широких пределах против относительно незначительно и монотонно изменяющейся кривой напряжения $F0u = f(t)$. Таким образом, целесообразным представляется дальнейшее исследование именно кривых тока, нежели напряжения. Далее рассмотрим записи аварийных событий, представленных на рис. 3, когда возникшее КЗ отключалось каскадно.

Как следует из рис. 4, постоянные гармонические составляющие как тока $F0i$, так и напряжения

$F0u$ присутствуют в течение переходного процесса, что и в вышеописанном режиме роста нагрузки. Тем не менее, в отличие от нормального режима, при КЗ возрастает содержание и постоянной составляющей тока $F0i$, и постоянной составляющей напряжения $F0u$. Постоянная гармоническая составляющая тока $F0i$ имеет максимальное значение 385 А при значении действующего тока 614 А. Постоянная гармоническая составляющая напряжения $F0u$ достигает значения 3,848 кВ при действующем значении напряжения 24,12 кВ, что в процентном соотношении значительно больше, чем ранее было описано для нормального режима при росте нагрузки.

На этом этапе исследования можно сделать промежуточные выводы:

1) содержание постоянных гармонических составляющих $F0i$ и $F0u$ в режиме КЗ и в нагрузочном режиме различно;

2) доля $F0i$ и $F0u$ в режиме КЗ больше, чем в нагрузочном режиме;

3) доля содержания постоянной гармонической составляющей в кривой тока значительно больше, чем в кривой напряжения, как для нормального, так и для аварийного режимов.

Однако в контактной сети могут возникать КЗ, при которых остаточное напряжение на шинах тяговых подстанций соизмеримо с уровнем напряжения в нагрузочном режиме. Такие КЗ, как правило, удалены от шин тяговой подстанции и могут находиться за постами секционирования, т. е. в зоне резервирования, и их принято называть удаленными [1–3]. В этих случаях, как правило, работают третьи ступени дистанционных защит ФКС тяговых подстанций, которые являются резервными для защит ФКС постов секционирования [1, 2]. Осциллограмма такого удаленного КЗ приведена на рис. 5, а графики изменения действующих значений напряжения и тока ФКС и их гармонических составляющих, соответствующих этому режиму – на рис. 6.

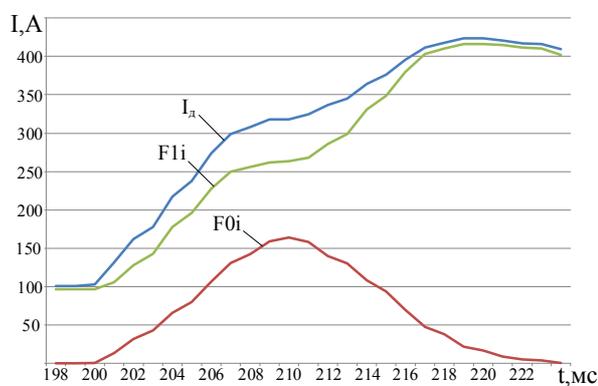
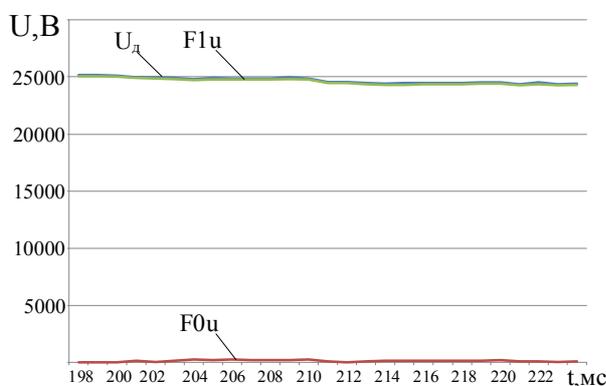


Рис. 2. Действующие значения напряжения (U_d), тока (I_d) ФКС и их гармонические составляющие ($F1u$; $F0u$; $F1i$; $F0i$) при резком росте нагрузки

Fig. 2. Feeder voltage (U_d) and current (I_d), and their harmonic components ($F1u$; $F0u$; $F1i$; $F0i$) with a sharp increase in the load

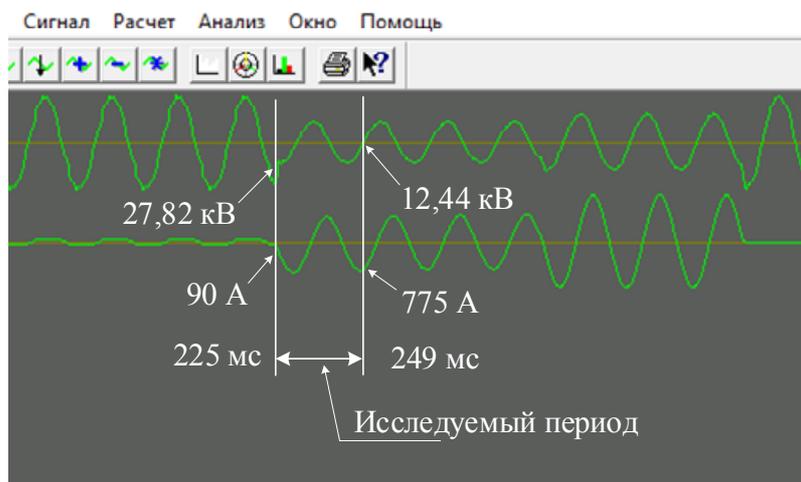


Рис. 3. Осциллограмма, записанная РАС при КЗ
Fig. 3. A short circuit mode oscillogram, stored by the emergency recorder

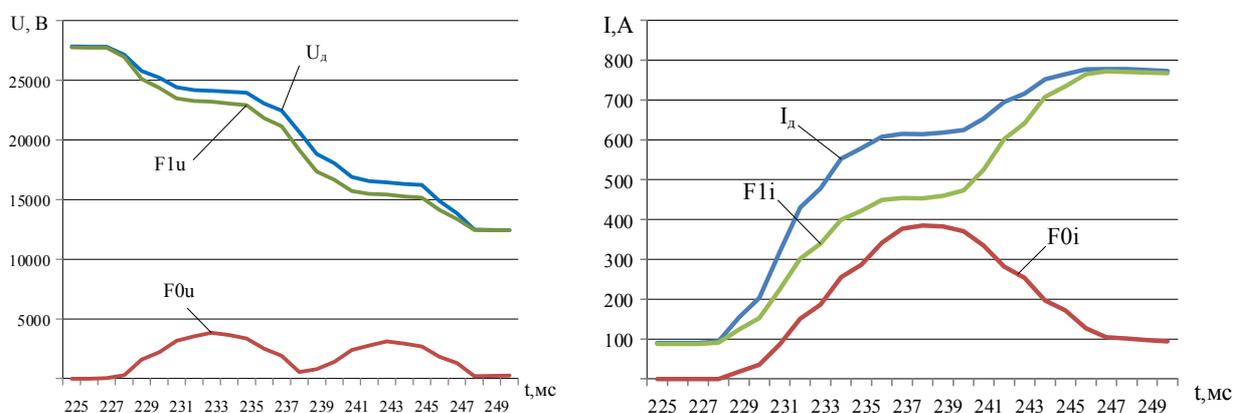


Рис. 4. Действующие значения напряжения (U_d), тока (I_d) ФЭС и их гармонические составляющие ($F1u$; $F0u$; $F1i$; $F0i$) при коротком замыкании

Fig. 4. Feeder voltage (U_d) and current (I_d), and their harmonic components ($F1u$; $F0u$; $F1i$; $F0i$) in short circuit mode

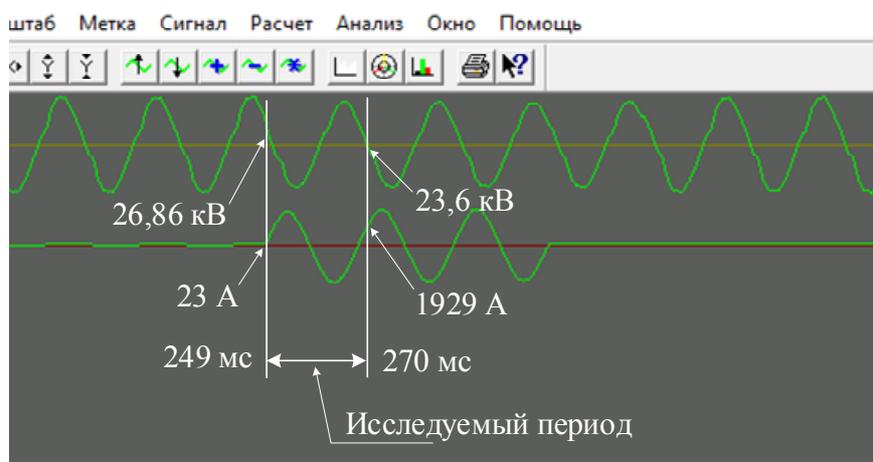


Рис. 5. Осциллограмма, записанная РАС при удаленном КЗ
Fig. 5. Oscillogram recorded by the emergency recorder at remote short circuit

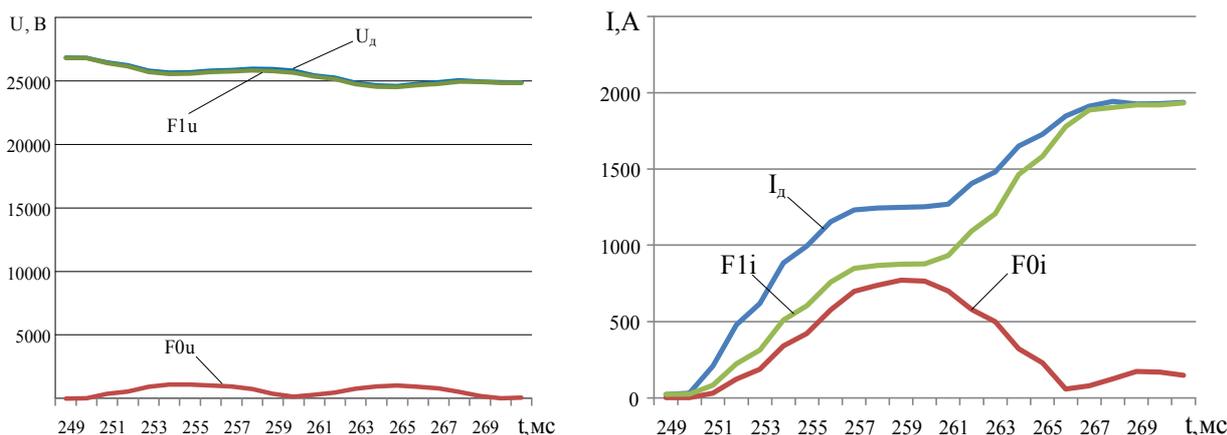


Рис. 6. Действующие значения напряжения (U_d), тока (I_d) ФКС и их гармонические составляющие ($F1u$; $F0u$; $F1i$; $F0i$) при удаленном КЗ

Fig. 6. Feeder voltage (U_d) and current (I_d), and their harmonic components ($F1u$; $F0u$; $F1i$; $F0i$) at remote short circuit

Анализ данных, зафиксированных РАС, показал, что, в отличие от режима близкого КЗ, минимальный уровень напряжения ФКС при удаленном КЗ составил 23,6 кВ. В процессе эксплуатации подобное снижение напряжения часто фиксируется и в нагрузочных режимах при пропуске поездов повышенной массы [4, 5, 8, 11]. Для КЗ, иллюстрируемого рис. 6, постоянная гармоническая составляющая в кривой напряжения достигает значения 1,092 кВ при действующем значении напряжения 25,67 кВ. При этом постоянная гармоническая составляющая тока достигает значения $F0i = 772$ А при действующем значении тока 1249 А, что свидетельствует о значительном (более 60 %) её содержании в кривой тока.

В соответствии с широко распространенными расчетными и нормативными методиками [17–20] значения гармонических составляющих принято записывать не только в именованных значениях (Амперы или Вольты), но и в процентном соотношении, а также в децибелах (дБ).

Расчет процентного содержания в кривой напряжения постоянной гармонической составляющей $F0u$ показал, что в режиме роста нагрузки его максимальное значение составило 0,96 %, в режиме близкого КЗ – 19,39 %, удаленного КЗ – 4,26 %. Наибольшее из трех обозначенных значений $F0u$ при близком КЗ объясняется значительным снижением напряжения U_d и высокой скоростью его изменения dU_d/dt . Подобного эффекта не наблюдается при удаленных КЗ с незначительным изменением величины напряжения U_d и низкой скоростью его изменения dU_d/dt . Исходя из этого, было принято решение не рассматривать далее величину $F0u$ в качестве признака, по которому можно отличить режим нагрузки от режима КЗ. Во всех вышеозначенных режимах доля содержания постоянной гармонической составляющей тока $F0i$

значительно больше, чем напряжения $F0u$, поэтому дальнейший анализ проводился для кривых тока. Изменения $F0i$ за время переходного процесса рассматривались для нормального режима, близкого и удаленного КЗ. Рассчитанные значения процентного содержания $F0i$ для каждого режима представлены на рис. 7.

Анализ осциллограмм для нормального режима работы ФКС показал, что пиковое значение $F0i_{max}$ наиболее часто имеет значение менее 40 %, и только при резком (в 3–5 раз) увеличении нагрузки приближается к 55–60 %, пример такого изменения приведен на рис. 7а, и соответствует осциллограмме рис. 1.

Для режимов КЗ (как близких, так и удаленных) значения $F0i_{max}$ существенно превышали значения, зафиксированные в нормальном режиме. Так, в нормальном режиме для осциллограммы рис. 1 величина $F0i_{max}$ достигла 60,7 %, как показано на рис. 7а. Для осциллограммы близкого КЗ, изображенной на рис. 3, $F0i_{max}$ достигло значения 80,63 %, как показано на рис. 7б. Для режима удаленного КЗ, осциллограмма для которого приведена на рис. 5, значение $F0i_{max}$ достигло 78,5 %, как показано на рис. 7с. Общее количество осциллограмм, подвергнутых анализу, для случаев КЗ различной удаленности составило 17 шт., и во всех случаях пиковые значения $F0i_{max}$ превышали 75 %. Таким образом, базируясь на результатах проведенного исследования, предлагается в качестве нового дополнительного параметра для отличия нормального режима от режима КЗ применять постоянную составляющую тока ФКС $F0i$, появление которой в кривой тока ФКС соответствует началу переходного процесса. Величину пикового значения $F0i_{max}$ свыше 75 % на интервале 20–30 мс от момента ее появления предлагается считать маркером идентификации режима КЗ.

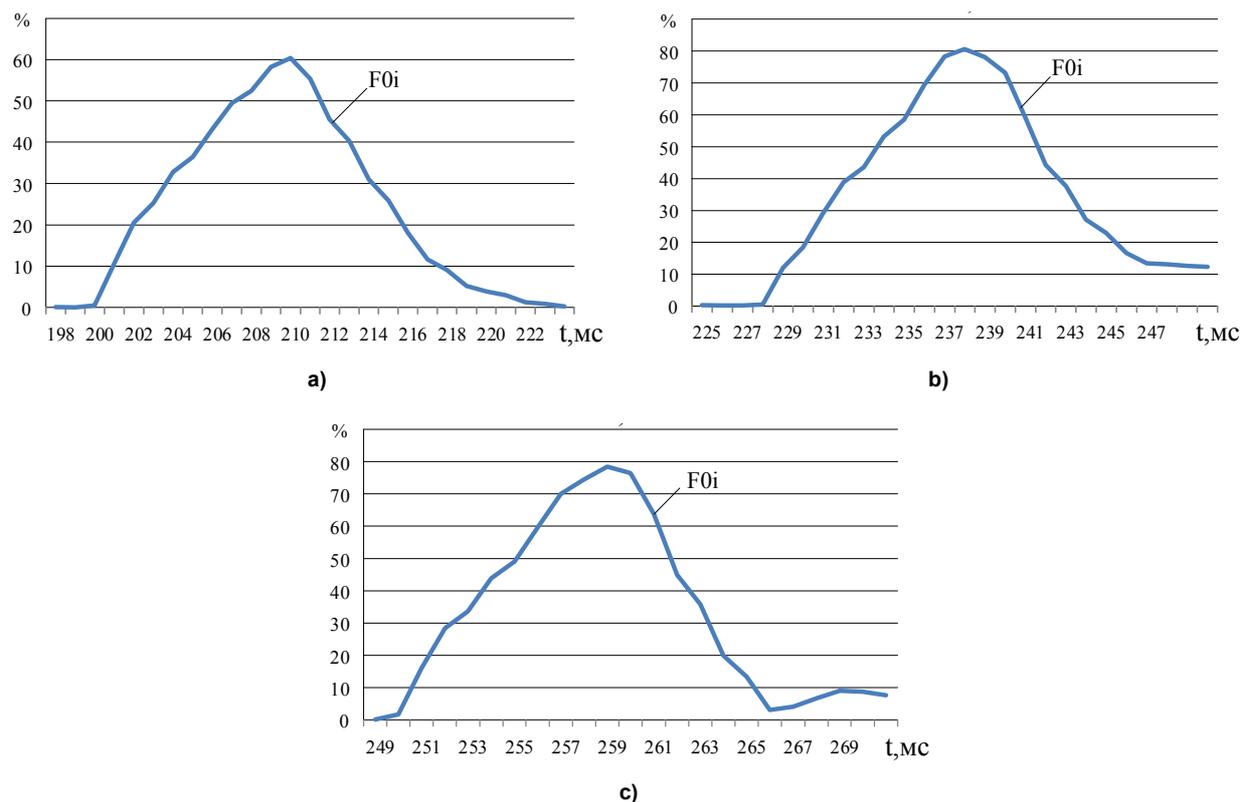


Рис. 7. Постоянная гармоническая составляющая тока ФКС F_{0i} за время переходного процесса: а – при росте нагрузки; б – близкое КЗ; с – удаленное КЗ

Fig. 7. The constant harmonic component of the current F_{0i} at transient process of: а – the a sharp increase of the load; б – close short circuit; с – remote short circuit

Дистанционная защита с блокировкой по постоянной симметричной составляющей тока

В современных микропроцессорных терминалах защиты и автоматики, которыми оснащены ФКС, возможно построение алгоритма работы дистанционных защит с использованием постоянной гармонической составляющей в качестве дополнительного признака аварийного режима для исключения случаев неправильной работы и, тем самым, повышения устойчивости их функционирования. В условиях тяжеловесного движения и резкого увеличения нагрузочных токов ФКС возможно предложить новый алгоритм работы дистанционной защиты, который будет строиться на принципе блокировки дистанционной защиты в нормальном режиме даже при резком росте тяговой нагрузки и использовании дополнительного маркера идентификации режима. В общем виде функциональную схему ступени дистанционной защиты с блокировкой по предлагаемому дополнительному маркеру (F_{0i}) можно представить в виде рис. 8.

Функциональная схема защиты, показанная на рис. 8, состоит из следующих элементов, обозначенных цифрами: 1 – датчик тока; 2 – датчик напряжения; 3 – орган вычисления полного сопротивления; 4 – пороговый элемент сопротивления;

5 – орган вычисления постоянной составляющей кривой тока F_{0i} ; 6 – пороговый элемент постоянной составляющей кривой тока F_{0i} ; 7 – логический элемент И; 8 – элемент регулирования выдержки времени; 9 – выходной элемент. При достижении постоянной гармонической составляющей F_{0i} значений больше выбранной уставки (предварительно можно принять уставку 65–75 %) будет поступать разрешение на срабатывание ступени дистанционной защиты через логический элемент & (элемент И под номером 7 на рис. 8). При увеличении нагрузки значение постоянной гармонической составляющей F_{0i} будет менее выбранной уставки, и даже если величины входного сопротивления будут попадать в зону срабатывания ступени дистанционной защиты, то будет происходить блокировка срабатывания защиты логическим элементом &. Такой принцип действия будет способствовать исключению неправильного действия защиты, что повышает устойчивость её функционирования. Данный алгоритм будет актуален к применению в схемах третьей и второй ступеней дистанционной защиты ФКС. Для третьей ступени (резервной для защит постов секционирования) работа по такому алгоритму наиболее востребована, так как именно третья ступень, по многолетним статистическим данным, имеет наибольшее количество неправильных срабатываний

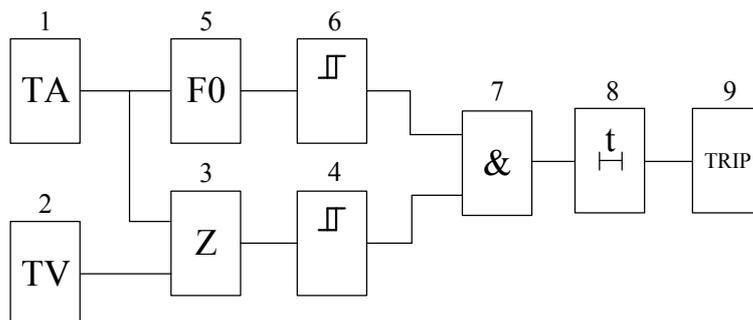


Рис. 8. Функциональная схема ступени дистанционной защиты с блокировкой по постоянной симметричной составляющей тока
 Fig. 8. Functional scheme of distance-based protection with blocking by a current constant symmetrical component

в нагрузочных режимах. Для второй ступени такой алгоритм также желателен, особенно для защит ФКС на участках с протяженными межподстанционными зонами и затяжными подъемами, где неправильные срабатывания защит также наблюдаются с высокой частотой.

Заключение

В результате проведенных исследований можно заключить следующее.

1. Проведенный анализ натуральных осциллограмм токов и напряжений ФКС для нормальных и аварийных режимов работы СТЭ позволил выделить ряд параметров изменения гармонических составляющих кривых тока и напряжения, пригодных для идентификации режима.

2. Предложено использование нового параметра – постоянной гармонической составляющей тока $F0i$, %, для точной идентификации нормального режима работы СТЭ и режима КЗ, что способствует повышению устойчивости функционирования защит ФКС.

3. Приведены числовые значения отличительных параметров для нормального и аварийных режимов работы СТЭ, позволяющие производить выбор уставок для срабатывания дистанционной защиты ФКС.

4. Предложена новая функциональная схема ступени дистанционной защиты с блокировкой по постоянной симметричной составляющей тока, позволяющая улучшить алгоритм работы дистанционной защиты ФКС за счет использования нового отличительного признака режима работы СТЭ.

5. Предлагаемые решения могут быть реализованы в современных микропроцессорных терминалах защиты и автоматики ФКС, обладающих скоростными аналого-цифровыми преобразователями, что позволяет использовать их вычислительные функции для онлайн-обработки спектра сигнала и формировать новые, более сложные алгоритмы функционирования этих устройств с учетом роста токовых нагрузок при обращении поездов повышенной массы.

Список литературы

1. Фигурнов Е.П. Релейная защита: учеб. для студентов вузов железнодорожного транспорта: в 2 ч. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2009.
2. Шалин А.И. Надежность и диагностика релейной защиты: учеб. Новосибирск: НГТУ, 2002. 383 с.
3. Симаков А.В., Харламов В.В., Чернев М.Ю. Разработка математической модели функционирования электротехнических комплексов релейной защиты цифровых подстанций // Омский научный вестник. 2023. № 1 (185). С. 93–98. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-185-93-98
4. Филиппов С.А., Трифонов Р.С., Соловьева О.А. Факторный анализ работы дистанционной защиты фидеров контактной сети в условиях организации тяжеловесного движения // Транспорт Урала. 2020. № 1 (64). С. 94–99. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-1-94-99
5. Pinchukov P.S., Makasheva S.I. Research of AC Traction Network's Relay Protection Operating under Heavy Haul Traffic Conditions // IOP Conference Series Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 272 (2). P. 022069. DOI: 10.1088/1755-1315/272/2/022069
6. Mariscotti A., Sandrolini L. Detection of Harmonic Overvoltage and Resonance in AC Railways Using Measured Pantograph Electrical Quantities // Energies. 2021. Vol. 14 (18). P. 5645. DOI: 10.3390/en14185645
7. Трифонов Р.С., Роголев А.В., Соловьева О.А. Исследование распределения параметров системы тягового электроснабжения, контролируемых релейной защитой фидеров контактной сети на примере тяговой подстанции «Сохондо» Забайкальской железной дороги // Наука и техника транспорта. 2022. № 4. С. 68–75.

8. Филиппов С.А., Яковлев Д.А., Трифионов Р.С. Исследование влияния движения поездов повышенного веса на работу резервной ступени дистанционной защиты фидеров контактной сети // Вестник транспорта Поволжья. 2015. № 2 (50). С. 31–39.
9. Research on Feeder Protection for a Traction Network Based on Adaptive Parameter Calculation / J-Q. Guo, M-X. Yuan, B-Y. Liu, L-L. Li // International Journal of Computer, Consumer and Control. 2016. Vol. 4 (5). P. 34–42.
10. Герман Л.А., Ишкин Д.В., Якунин Д.В. Совершенствование алгоритмов автоматики интеллектуального терминала ИнТер-27,5 НИИЭФА-ЭНЕРГО // Электроника и электрооборудование транспорта. 2016. № 2. С. 27–32.
11. Пехота Д.А., Федорова В.А., Титов В.А. Исследование возможности применения искусственных нейронных сетей для повышения устойчивости функционирования релейной защиты // Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. тр. конф., Новосибирск, 30 ноября – 04 декабря 2020 г. Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2020. Ч. 4. С. 154–157.
12. Повышение селективности работы микропроцессорных терминалов ЦЗА-27,5-ФКС(ФТС) с целью снижения числа отключений по неустановленным причинам / Е.А. Морозов, В.В. Фаренък, М.В. Востриков, В.А. Тихомиров // Молодая наука Сибири. 2022. № 3 (17). С. 63–76.
13. Блок микропроцессорный релейной защиты БМРЗ-ФКС-01. Руководство по эксплуатации. Часть 2. ДИВГ. 648228.082-14.01 РЭ1. URL: <https://www.mtrele.ru/files/filedoc/releynaya-zashita/bmrz-gd/bmrz-fks-01.pdf> (дата обращения: 07.07.2023).
14. SIPROTEC Numerical Overhead Contact Line Protection for AC Traction Power Supply 7ST6. V4.6. Manual. URL: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:9b92a2aa-9384-4230-8aa2-1af7ff1c161c/7st6xxmanuala6v4.60en.pdf> (дата обращения: 07.07.2023).
15. Enríquez A.C. Overcurrent Relay Advances for Modern Electricity Networks. Academic Press, 2022. 375 p.
16. Daliloltejari R. Midland line catenary distance protection review and implementation. Diss. Murdoch University, 2019. 113 p.
17. A New Distance Protection Scheme Based on Improved Virtual Measured Voltage / Y. Liang, W. Li, Z. Lu et al. // IEEE Transactions on Power Delivery. 2019. Vol. 35 (2). P. 774–786. DOI: 10.1109/TPWRD.2019.2926295
18. Pinchukov P., Makasheva S. Harmonic Monitoring in Normal and Short-Circuit Modes of AC Traction Network // Transportation Research Procedia. 2023. Vol. 68. P. 980–986. DOI: 10.1016/j.trpro.2023.02.136
19. IEEE Draft Guide for Applying Harmonic Limits on Power Systems, in IEEE P519.1/D12, July 2012. P. 1–124. URL: https://standards.ieee.org/project/519_1.html (дата обращения: 25.04.2020).
20. Ignatova V., Villard D., Hypolite J.-M. Simple Indicators for an Effective Power Quality Monitoring and Analysis // 2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC). 2015. P. 1104–1108. DOI: 10.1109/EEEIC.2015.7165321

References

1. Figurnov E.P. *Releynaya zashchita: uchebnik dlya studentov vuzov zheleznodorozhnogo transporta: v 2 ch.* [Relay protection: textbook for students of railway transport universities: in 2 parts]. 3rd ed. Moscow: Educational and Methodological Center for Education in Railway Transport Publ.; 2009. (In Russ.)
2. Shalin A.I. *Nadezhnost' i diagnostika releynoy zashchity: uchebnik* [Reliability and diagnostics of relay protection: textbook]. Novosibirsk: NSTU Publ.; 2002. 383 p. (In Russ.)
3. Simakov A.V., Harlamov V.V., Chernev M.Yu. Development of the mathematical model for operation of digital substations relay protection complexes. *Omsk scientific bulletin = Omskiy nauchnyy vestnik*. 2023;1(185):93–98. (In Russ.) DOI: 10.25206/1813-8225-2023-185-93-98
4. Filippov S.A., Trifonov R.S., Solovyeva O.A. Factor analysis of operation of catenary feeders' distance protection in conditions of heavy-load trains operation. *Transport of the Urals*. 2020;1(64):94–99. (In Russ.) DOI: 10.20291/1815-9400-2020-1-94-99
5. Pinchukov P.S., Makasheva S.I. Research of AC Traction Network's Relay Protection Operating under Heavy Haul Traffic Conditions. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2019;272(2):022069. DOI: 10.1088/1755-1315/272/2/022069
6. Mariscotti A., Sandrolini L. Detection of Harmonic Overvoltage and Resonance in AC Railways Using Measured Pantograph Electrical Quantities. *Energies*. 2021;14(18):5645. DOI: 10.3390/en14185645
7. Trifonov R.S., Rogalyov A.V., Solovyova O.S. Parametrization study of traction power supply system parameters controlled with relay protection of contact network feeders on example of Sokhondo traction substation of Trans-Baikal railway. *Nauka i tehnika transporta = Science and Technology in Transport*. 2022;4:68–75. (In Russ.)
8. Filippov S.A., Yakovlev D.A., Trifonov R.S. [Investigation of the Effect of High-Weight Train Traffic on the Operation of the Backup Stage of Distance Protection of Contact Network Feeders]. *Vestnik transporta Povolzhya*. 2015;2(50):31–39. (In Russ.)

9. Guo J-Q., Yuan M-X., Liu B-Y., Li L-L. Research on Feeder Protection for a Traction Network Based on Adaptive Parameter Calculation. *International Journal of Computer, Consumer and Control*. 2016;4(5):34–42.
10. German L.A., Ishkin D.V., Yakunin D.V. Improvement of algorithm of automation digital terminals In-Ter-27,5 NIEFA-ENERGO. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta = Electronics and electrical equipment of transport*. 2016;2:27–32. (In Russ.)
11. Pekhota D.A., Fedorova V.A., Titov V.A. [Investigation of the Possibility of Using Artificial Neural Networks to Increase the Relay Protection Functioning Stability]. In: *Nauka. Tekhnologii. Innovatsii: sbornik nauchnykh trudov konferentsii* [The Science. Technologies. Innovations: Collection of Scientific Conference Papers]. Novosibirsk: NSTU Publ.; 2020. Part 4. P. 154–157. (In Russ.)
12. Morozov E.A., Farenik V.V., Vostrikov M.V., Tihomirov V.A. [Increasing the Selectivity of the operation of Microprocessor Terminals CZA-27,5-FCS(FTS) in Order to Reduce the Number of Outages for Unknown Reasons. *Young Science of Siberia*. 2022;3(17):63–76. (In Russ.)
13. *Blok mikroprotsessornyy reley noy zashchity BMRZ-FKS-01. Rukovodstvo po ekspluatatsii. Chast' 2. DIVG.648228.082-14.01 RE1* [Microprocessor relay protection unit BMRZ-FKS-01. Manual. Part 2. DIVG.648228.082-14.01 RE1]. (In Russ.) Available at: <https://www.mtrele.ru/files/filedoc/releynaya-zashita/bmrz-gd/bmrz-fks-01.pdf> (accessed 07.07.2023).
14. SIPROTEC Numerical Overhead Contact Line Protection for AC Traction Power Supply 7ST6. V4.6. Manual. Available at: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:9b92a2aa-9384-4230-8aa2-1af7ff1c161c/7st6xxmanuala6v4.60en.pdf> (accessed 07.07.2023).
15. Enriquez A.C. *Overcurrent Relay Advances for Modern Electricity Networks*. Academic Press; 2022. 375 p.
16. Daliloltehari, Reza. *Midland Line Catenary Distance Protection Review and Implementation*. Diss. Murdoch University; 2019. 113 p.
17. Liang Y., Li W., Lu Z., Xu G., Wang C. A New Distance Protection Scheme Based on Improved Virtual Measured Voltage. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2019;35(2):774–786. DOI: 10.1109/TPWRD.2019.2926295
18. Pinchukov P., Makasheva S. Harmonic Monitoring in Normal and Short-Circuit Modes of AC Traction Network. *Transportation Research Procedia*. 2023;68:980–986. DOI: 10.1016/j.trpro.2023.02.136
19. IEEE Draft Guide for Applying Harmonic Limits on Power Systems, in IEEE P519.1/D12, July 2012. P. 1–124. Available at: https://standards.ieee.org/project/519_1.html (accessed 25.04.2020).
20. Ignatova V., Villard D., Hypolite J.-M. Simple Indicators for an Effective Power Quality Monitoring and Analysis. In: *2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*. 2015. P. 1104–1108. DOI: 10.1109/EEEIC.2015.7165321

Информация об авторах

Пинчуков Павел Сергеевич, канд. техн. наук, доц., доц. кафедры систем электроснабжения, Электроэнергетический институт, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, Россия; pinchukov-pavel@mail.ru.

Макашева Светлана Игоревна, канд. техн. наук, доц., доц. кафедры систем электроснабжения, Электроэнергетический институт, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, Россия; smakasheva@gmail.com.

Information about the authors

Pavel S. Pinchukov, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Power Supply Systems, Institute of Power Engineering, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia; pinchukov-pavel@mail.ru.

Svetlana I. Makasheva, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Power Supply Systems, Institute of Power Engineering, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia; smakasheva@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 14.07.2023; одобрена после рецензирования 13.09.2023; принята к публикации 08.11.2023.

The article was submitted 14.07.2023; approved after review 13.09.2023; accepted for publication 08.11.2023.