

УДК 621.391.8

Использование геопозиционирования объекта для повышения точности работы защиты питающих линий системы тягового электроснабжения

А. Ю. Сулимин, С. М. Куценко, М. А. Иванов

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Сулимин А. Ю., Куценко С. М., Иванов М. А. Использование геопозиционирования объекта для повышения точности работы защиты питающих линий системы тягового электроснабжения // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 4. С. 954–964. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-954-964

Аннотация

Цель: ложные срабатывания на питающих линиях контактной сети при проезде изолирующего сопряжения приводят к появлению опасных ситуаций на железной дороге, например, отжигу и пережогу контактных проводов, возникновению электрической дуги. Также ложные отключения могут приводить к остановке подвижного состава на руководящем уклоне и тем самым снижать пропускную и провозную способности. Для решения проблемы, а именно исключения ложных срабатываний быстродействующих выключателей, в статье предлагается способ использования передатчиков GPS/ГЛОНАСС для усовершенствования устройств защиты на питающих линиях. **Методы:** исследование проводится на основе теоретических знаний о новых разработках, связанных с геопозиционированием подвижного состава, теории электрических и магнитных цепей и теории тягового электроснабжения. **Результаты:** сформулирована и изучена концепция загробления уставки устройств защиты питающих линий на основе данных о местоположении токоприемника на электроподвижном составе относительно изолирующего сопряжения. Также подробно расписаны все блоки комплекса устройств и принципы их действия. Построены графики изменения тока уставки быстродействующих выключателей, предложен вариант модернизации их конструкции для оперативного изменения тока уставки. **Практическая значимость:** результат работы имеет значение в первую очередь для обеспечения надежности, бесперебойной работы системы тягового электроснабжения и увеличения пропускной и провозной способностей. Представленная работа задает новое направление развития устройств защиты в системе тягового электроснабжения постоянного тока с использованием нового типа передаваемых данных — географического положения подвижного состава. Таким образом, работа демонстрирует возможность внедрения новых технологий определения положения объекта в систему релейной защиты контактной сети.

Ключевые слова: система геопозиционирования, повышение эффективности устройств защиты, система тягового электроснабжения, уставки защиты, быстродействующие выключатели, ложные срабатывания

Введение

В настоящее время в системе тягового электроснабжения (СТЭ) для филиала ОАО «РЖД» — «Трансэнерго» существует актуальная проблема — ложные срабатыва-

ния быстродействующих выключателей (БВ) при проезде изолирующего сопряжения (ИС) контактной сети. Ранее физические процессы были изучены во многих научных работах, например [1–5]. Для решения проблемы ложных срабатываний предлагается использовать систему геопозиционирования GPS/ГЛОНАСС для точного определения положения электроподвижного состава (ЭПС) относительно ИС для корректировки работы устройств защиты. При приближении ЭПС к ИС устройство, принимающее данные о положении ЭПС, создает необходимое воздействие для корректной работы БВ.

Около 95% всех срабатываний БВ при проезде ИС являются ложными [5, 6], поэтому можно считать, что дополнительная характеристика местоположения ЭПС на участке дороги позволит внести существенные коррективы в работу устройств защиты. Таким образом, при приближении поезда к ИС система автоматически будет предотвращать ложное срабатывание БВ. Также в случае отсутствия ЭПС вблизи ИС при появлении резкого «броска» тока в питающей линии (ПЛ), например при коротком замыкании (КЗ), защита будет работать в штатном режиме, без загробления уставки срабатывания. Это позволит ввести дополнительную селективность в работу защиты.

Общая часть

Проблема ложных срабатываний связана с резким переходом питания ЭПС от параллельных ПЛ1 и ПЛ2 к питанию только от ПЛ2 при прохождении ИС. В новом образовавшемся контуре постоянная времени переходного процесса после разрыва очень мала из-за низкого значения индуктивности контура. Этот параметр приводит к резкому нарастанию тока, величина и скорость такого

нарастания соизмеримы с характеристиками тока КЗ. Это инициализирует ложное срабатывание устройства защиты в ПЛ2, так как величина рабочего тока I_p и скорость его нарастания превышают ток уставки защиты I_y и уставку скорости срабатывания [1].

В связи с этим для корректной работы устройств защиты предлагается добавить в СТЭ следующие три блока: блок передачи данных, или передающее устройство (ПерУ), который устанавливается на ЭПС; блок-приемник, или приемное устройство (ПриУ), — на тяговой подстанции (ТП); исполняющее устройство (ИУ), которое будет воздействовать на устройства защиты (рис. 1).

При нахождении ЭПС в непосредственной близости от ИС система блокирует устройства защиты. Достигается блокировка путем изменения значения суммарной индуктивности шунта размагничивающего витка БВ. Подобный принцип описывается в [2], но имеет обратный эффект, когда добавление шунта снижает динамическую уставку защиты, ускоряя срабатывание БВ.

Таким образом, при изменении значения индуктивности шунта время достижения тока уставки увеличивается с t_{01} до t_{02} , изменяя верхний порог срабатывания защиты. На рис. 2 пунктирной линией изображен график тока уставки в штатном режиме, сплошной — при работе устройства.

Для корректной работы способа регулирования времени срабатывания БВ требуется информация о нахождении ЭПС на участке дороги относительно ИС. На данный момент существует способ определения положения ЭПС с помощью занятости рельсовых цепей (рис. 3).

Такой способ применяется для систем СЦБ, в которых занятость блок-участков позволяет регулировать движение поездов

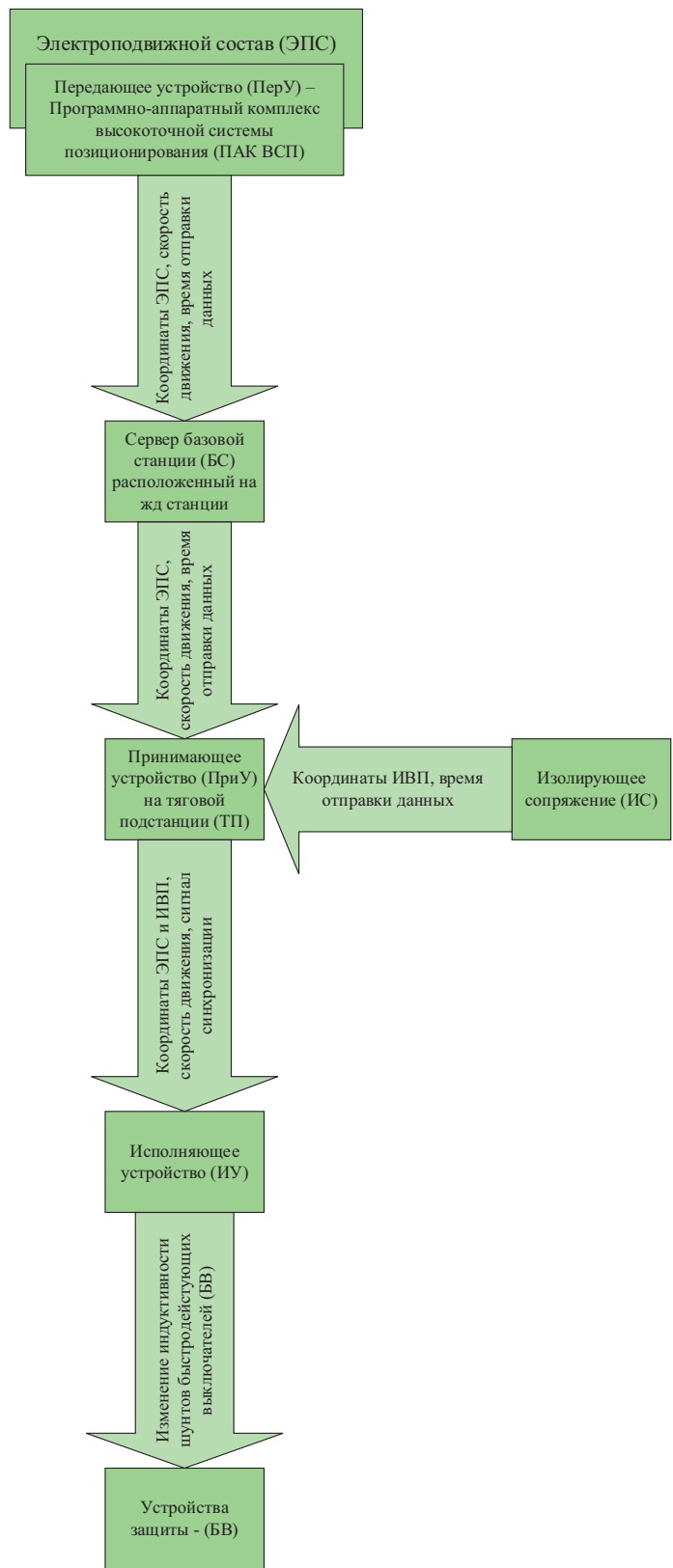


Рис. 1. Схема работы устройства регулирования времени достижения тока уставки защиты

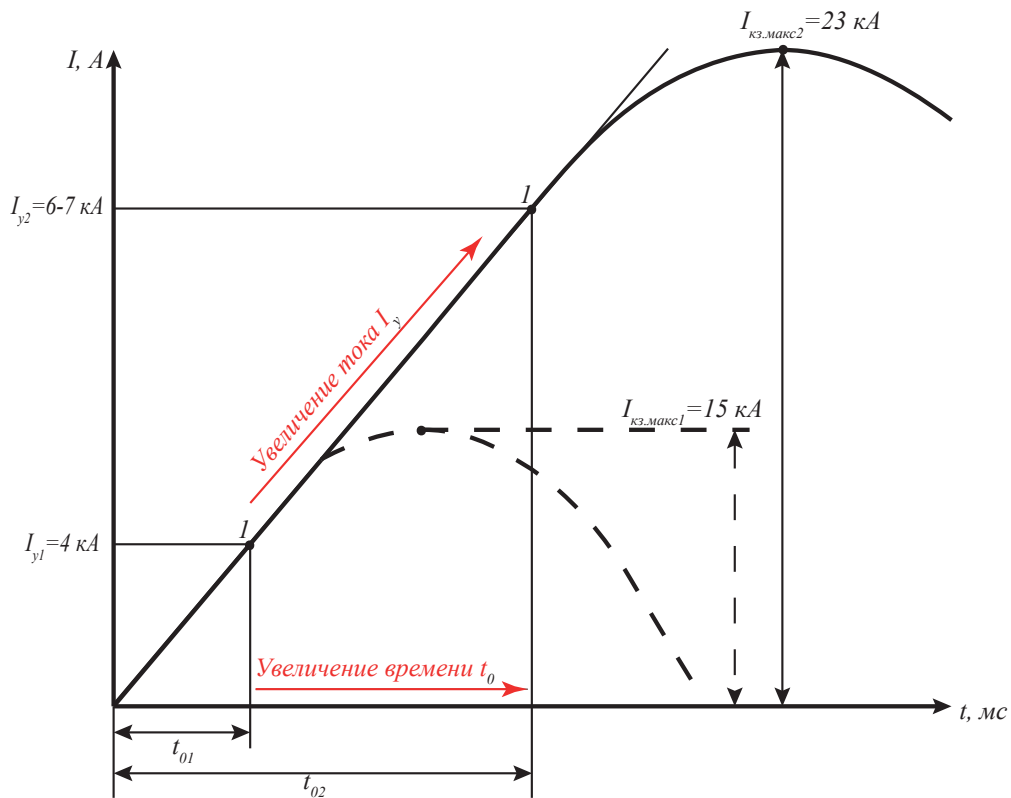


Рис. 2. Характеристика регулирования времени срабатывания БВ [2, стр. 24]:

t_{01}, t_{02} — время достижения тока уставки;

t_c — собственное время срабатывания выключателя;

t_r — время гашения дуги;

I_{y1}, I_{y2} — ток уставки защиты;

$I_{кз.макс1}, I_{кз.макс2}$ — максимальный ток короткого замыкания при срабатывании защиты

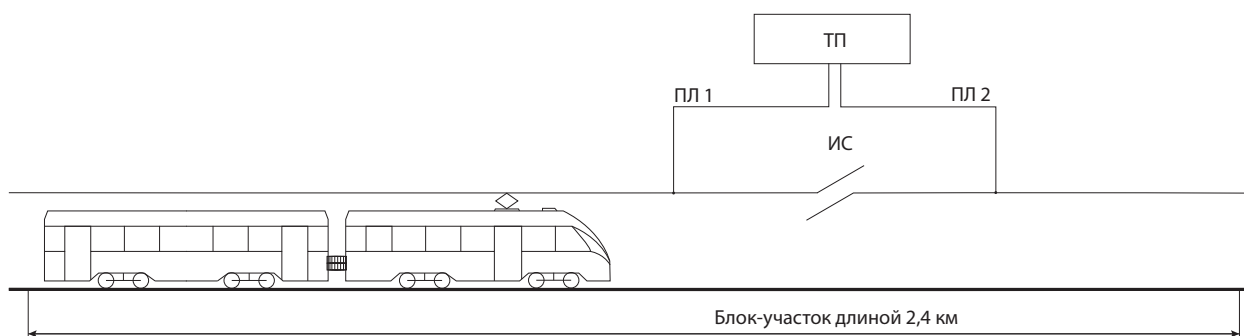


Рис. 3. Использование системы рельсовых цепей на блок-участках [7]:

ТП — тяговая подстанция; ПЛ — питающая линия;

ИС — изолирующее сопряжение

в системах с автоблокировкой. Однако использование рельсовых цепей имеет существенный недостаток — определение положения ЭПС происходит с точностью до одного блок-участка длиной около 2,4 км.

С 2012 года в компании ОАО «РЖД» применяется программно-аппаратный комплекс высокоточной системы позиционирования (ПАК ВСП) [8]. Аналогичный программно-аппаратный комплекс высокоточного позиционирования транспортного средства (ПАК ВТП ТС) применяется и на городском общественном транспорте [9]. Эти системы позволяют определять положение транспорта с точностью до 0,5 м (рис. 4).

ПАК ВСП с помощью спутников передает в реальном времени данные глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) о местоположении локомотива на сервер, установленный на базовой станции, а далее — на тяговую подстанцию с предварительно заданными координатами ИС [8, 9].

Принцип работы устройства

Собственное местоположение, как ранее было указано, ПАК ВСП определяет с точностью до 0,5 м. Блок программно-аппаратного комплекса устанавливается на крышу локомотива над кабиной машиниста (1–2 м от передней части). Для определения точного местоположения токоприемника относительно ИС необходимо учитывать упреждающий коэффициент, зависящий от вида ЭПС (рис. 5–7).

Например, для электровозов ЭП20 и 2ЭС4К упреждающий коэффициент равен 3–4 м в сторону хвоста ЭПС относительно блока ПАК ВСП, а для электропоезда ЭС2Г — 20 м, так как ближайший к кабине токоприемник у электропоезда располагается на следующей моторвагонной секции.

Для корректного функционирования устройств защиты в ИУ вводится алгоритм работы на основе данных, полученных от ПриУ (рис. 8 и 9).

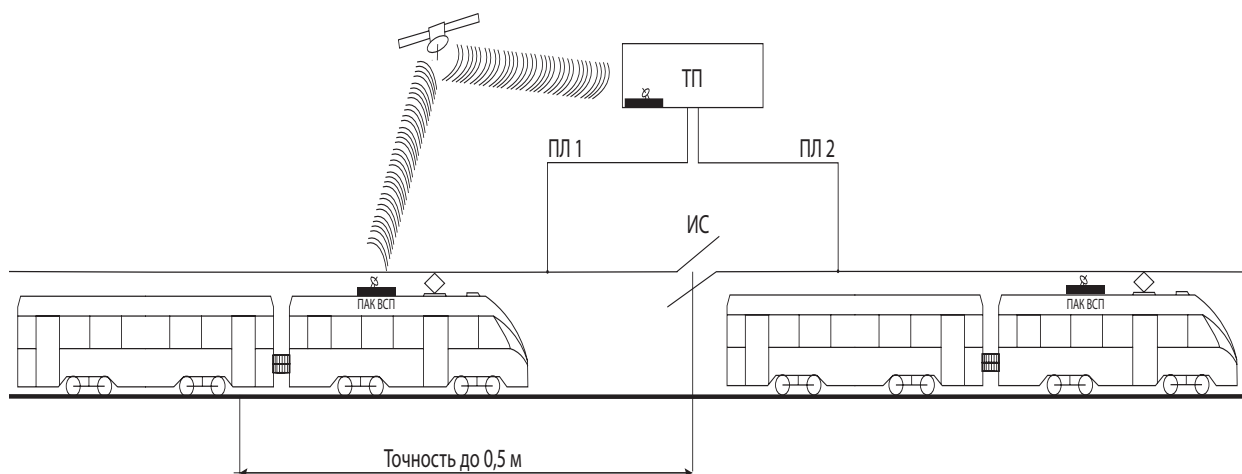


Рис. 4. Использование спутников определения положения [6, 7]:

ТП — тяговая подстанция;

ПЛ — питающая линия;

ИС — изолирующее сопряжение;

ПАК ВСП — комплекс высокоточной системы позиционирования

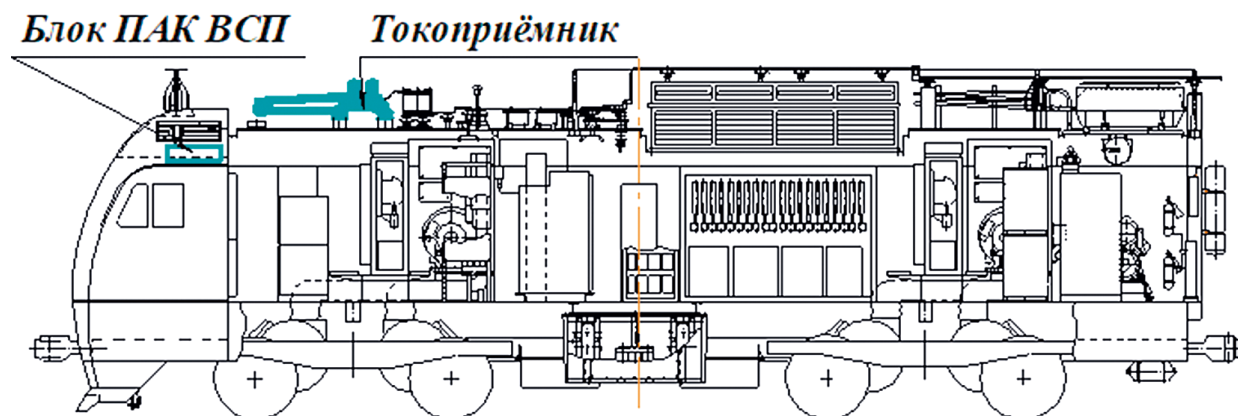


Рис. 5. Расположение блока ПАК ВСП и токоприемника на 2ЭС4К [11]

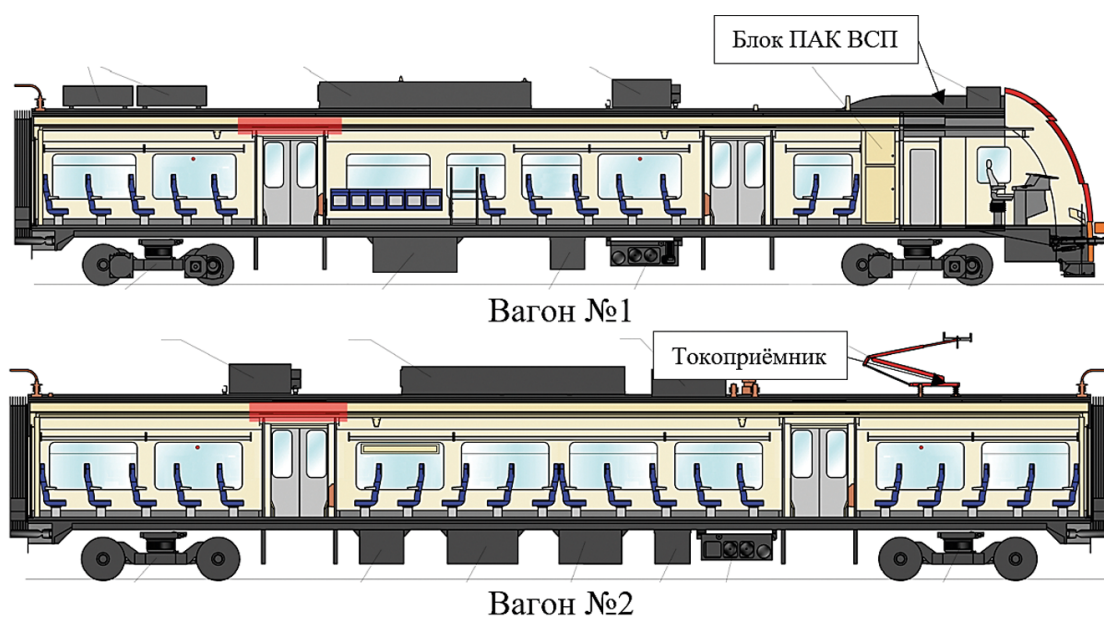


Рис. 6. Расположение блока ПАК ВСП и токоприемника на ЭС2Г [12]

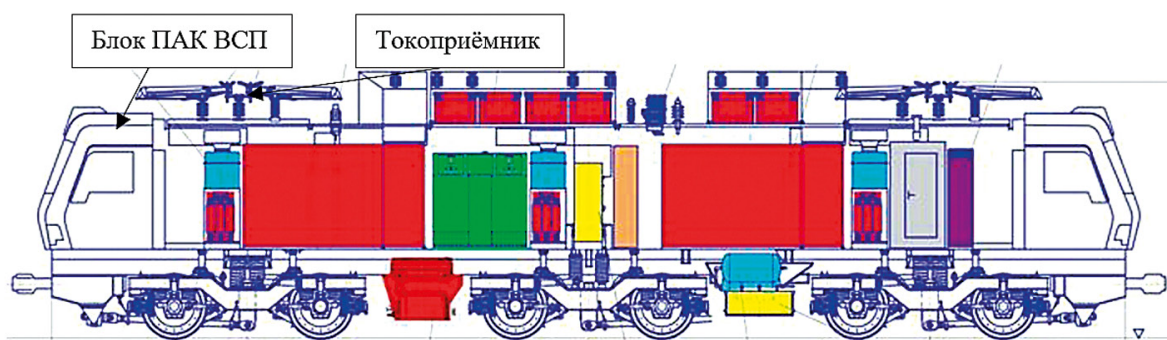


Рис. 7. Расположение блока ПАК ВСП и токоприемника на ЭП20 [13]

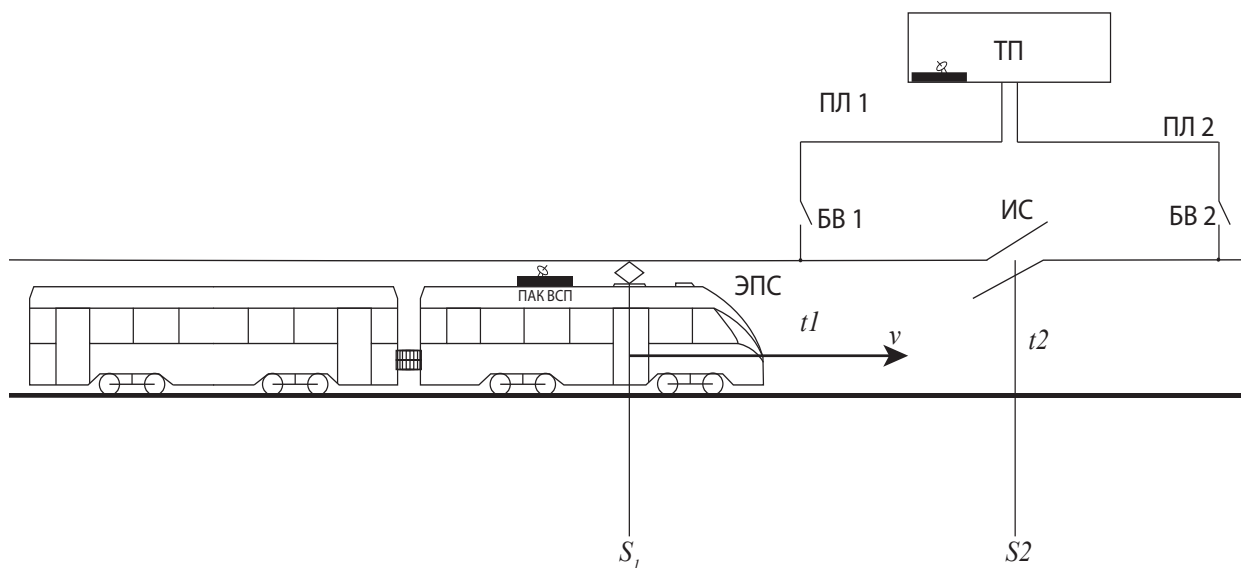


Рис. 8. Схематическое пояснение работы алгоритма исполняющего устройства:

- ТП — тяговая подстанция;
- ПЛ 1, ПЛ 2 — питающие линии;
- БВ 1, БВ 2 — быстродействующие выключатели;
- ИС — изолирующее сопряжение;
- ЭПС — электроподвижной состав;
- ПАК ВСП — программно-аппаратный комплекс высокоточной системы позиционирования;
- t_1 — время отправки данных с ЭПС;
- t_2 — время отправки данных с ТП;
- S_1 — координаты токоприемника ЭПС;
- S_2 — координаты ИС;
- v — скорость движения ЭПС

Таким образом, блок ПАК ВСП передает на ИУ следующие данные: координаты положения токоприемника с учетом корректирующего коэффициента; скорость движения ЭПС; время отправления данных. После попадания на сервер, расположенный на железнодорожной станции, данные отправляются на ближайшую по ходу движения ЭПС тяговую подстанцию. По значениям координат и скорости рассчитывается предполагаемое время проезда ИС. Данные о времени отправки обеспечивают синхронизацию работы

трех блоков. При этом также учитываются собственные временные затраты на передачу. После вычислений исполняющее устройство воздействует на БВ, изменяя динамическую уставку защиты.

Значение динамической уставки, как было сказано выше, зависит от индуктивности добавочного шунта РВ БВ. Изменение магнитного потока приводит к увеличению значения индуктивности шунта. Предлагаемый вариант модернизации схемы шунта РВ БВ изображен на рис. 10.

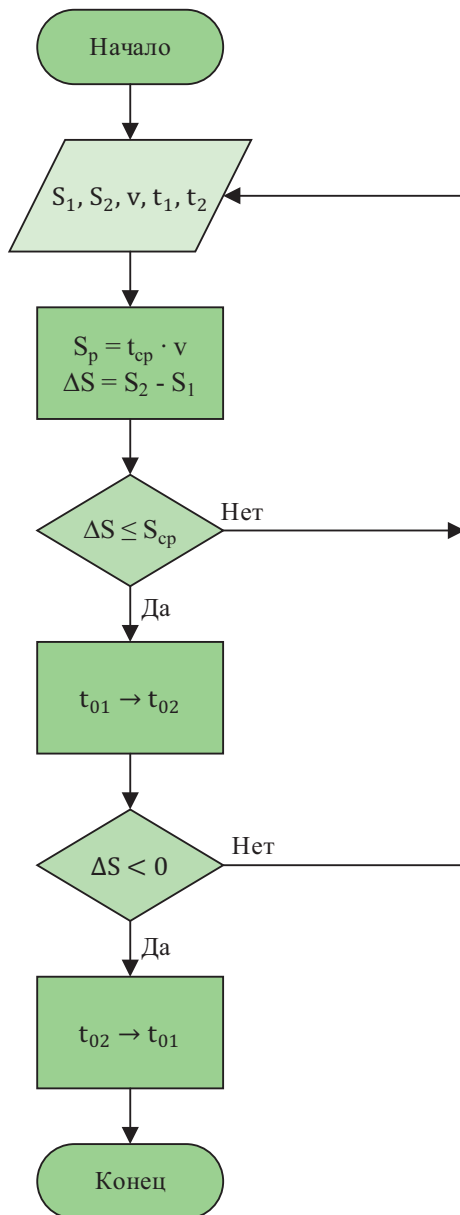


Рис. 9. Блок-схема работы исполняющего устройства:

- t_1 — время отправки данных с ЭПС;
- t_2 — время отправки данных с ТП;
- S_1 — координаты токоприемника ЭПС;
- S_2 — координаты ИС;
- v — скорость движения ЭПС;
- $S_{p.з}$ — расстояние, которое ЭПС проходит за время переключения уставки защиты;
- ΔS — расстояние от ЭПС до ИС;
- t_{01}, t_{02} — время достижения тока уставки

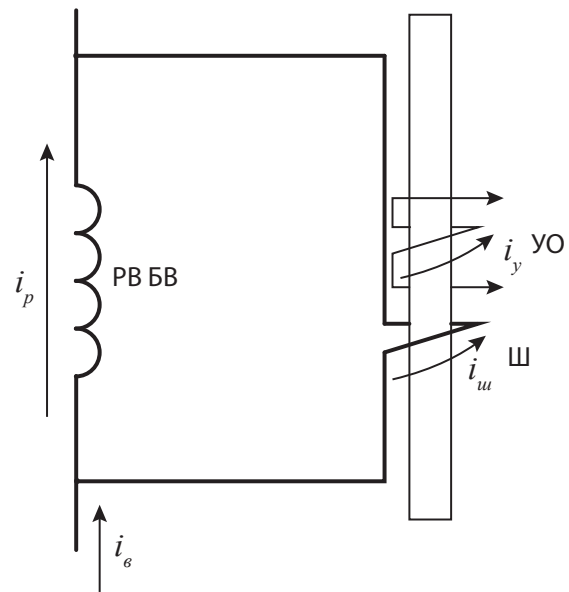


Рис. 10. Схема подключения шунта с управляемой обмоткой к размагничивающему витку БВ:

- РВ БВ — размагничивающий виток быстродействующего выключателя;
- Ш — индуктивный шунт;
- УО — управляемая обмотка;
- i_e — ток, проходящий через быстродействующий выключатель;
- i_p — ток размагничивающего витка;
- $i_{ш}$ — ток шунта;
- i_{oy} — ток управляемой обмотки

По формуле (1) магнитный поток управляемой обмотки:

$$\Phi = L \cdot I; L = \frac{\Phi}{I}, \quad (1)$$

где Φ — магнитный поток;

L — индуктивность;

I — ток в управляемой катушке.

При протекании тока через УО в шунте создается дополнительный магнитный поток. Сонаправленные магнитные потоки УО и Ш суммируются, увеличивая итоговое значение индуктивности шунта $L_{ит.ш}$ по формуле (1).

Также постоянная времени переходного процесса пропорциональна времени t_{01} , t_{02} из рис. 2:

$$\tau = \frac{L_{\text{общ}}}{R_{\text{общ}}}, \quad (2)$$

где $L_{\text{общ}} = \frac{1}{\frac{1}{L_{\text{шт.ш}}} + \frac{1}{L_{\text{рв}}}}$ — общая индуктивность

шунта и управляемой обмотки $L_{\text{шт.ш}}$ и РВ БВ ($L_{\text{бв}}$);

$R_{\text{общ}}$ — общее сопротивление.

При подаче тока управления время достижения тока уставки увеличивается с t_{01} до t_{02} согласно рис. 2.

Для нулевого значения тока управления индуктивность шунта выбирается по условиям уставки защиты в штатном режиме.

Заключение

Исследованный в статье метод регулирования уставки устройств защиты не изменяет исходную характеристику надежности БВ. При этом он предотвращает их ложные срабатывания, которые влекут за собой существенные нарушения функционирования и эффективности работы тяговой сети и подвижного состава.

Предложенное техническое решение позволяет повысить пропускную и провозную способности за счет отсутствия прерывания питания ЭПС от контактной сети. Благодаря исключению ложных срабатываний БВ при проезде ИС существенно снижаются денежные затраты на ремонт контактной сети, устройств электроснабжения и подвижного состава.

Результаты проведенного научного исследования открывают новые направления развития систем защиты в СТЭ с применением технологий геопозиционирования подвижного состава.

Библиографический список

1. Векслер М. И. Защита тяговой сети постоянного тока от токов короткого замыкания. М.: Транспорт, 1976. 120 с.
2. Хариков В. Ф. Защита контактной сети постоянного тока от коротких замыканий. М.: Транспорт, 1987. 95 с.
3. Фигурнов Е. П. Релейная защита: учебник для вузов ж.-д. трансп. М.: Желдориздат, 2002. 720 с.
4. Заторская Л. П. Проезд электровоза под током изолирующего воздушного промежутка тяговой сети постоянного тока // Наука и техника транспорта. 2018. № 3. 66 с.
5. Хусаинов Е. К. Повышение эффективности эксплуатации системы тягового электроснабжения за счет совершенствования устройств защиты контактной сети постоянного тока в вынужденных режимах: дисс. ... канд. техн. наук. Омск: ОмГУПС, 2021. 144 с.
6. Демиденко И. С. Повышение эффективности защиты тяговой сети постоянного тока: дисс. ... канд. техн. наук. Новосибирск: НГТУ, 2013. 167 с.
7. Теоретические основы железнодорожной автоматики и телемеханики: учебник для вузов ж.-д. трансп. / А. М. Брылеев [и др.]. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Транспорт, 1977. 376 с.
8. Комплекс высокоточной системы позиционирования. URL: <https://niias.ru/products-and-services/products/bortovye-kompleksy/programmno-apparatnyy-kompleks-vysokotochnoy-sistemy-pozitsionirovaniya/>
9. Программно-аппаратный комплекс высокоточного позиционирования транспортного средства (ПАК ВТП ТС): патент РФ № 2803992 / Е. П. Горелик [и др.]. 2022.
10. Тяговые подстанции: учебник для вузов ж.-д. трансп. / Ю. М. Бей [и др.]. М.: Транспорт, 1986. 310 с.
11. Электровоз 2ЭС4К: руководство по эксплуатации. Кн. 2. Описание и работа. Компонировка оборудования. Монтаж электрический. Система вентили-

ляции. ИДМБ.661141.004 РЭ2 (ЗТС.000.003 РЭ2). Новочеркасск, 2006. 50 с.

12. Электропоезд с асинхронным тяговым приводом типа ЭГЭ серии ЭС2Г: руководство по эксплуатации ЭС2Г.0.00.000.000 РЭ. ООО «Уральские локомотивы», 2014. 297 с.

13. Индикация и стабилизация напряжения блок электроники / А. Д. Шнайдер [и др.] // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». 2018. 252 с.

14. Аржанников Б. А. Основные положения трехфазной системы электрической тяги: монография. Екатеринбург: УрГУПС, 2023. 263 с.

Дата поступления: 09.10.2024

Решение о публикации: 18.11.2024

Контактная информация:

СУЛИМИН Артем Юрьевич — студент 5-го курса группы ЭС-004 факультета АиТ;

sulimin.artem@gmail.com

КУЦЕНКО Сергей Михайлович — канд. техн. наук, доцент, декан факультета безотрывных форм

обучения; kutsenko@pgups.ru

ИВАНОВ Михаил Александрович — старший преподаватель кафедры «Электроснабжение железных дорог»; m-a-ivanov@yandex.ru

The use of the object geopositioning for the increase of the accuracy of the protection operation of the supply lines of the traction power supply system

A. Yu. Sulimin, S. M. Kutsenko, M. A. Ivanov

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: *Sulimin A. Yu., Kutsenko S. M., Ivanov M. A.* The use of the object geopositioning for the increase of the accuracy of the protection operation of the supply lines of the traction power supply system // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 4. P. 954–964. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-954-964

Abstract

Purpose: false tripping on the supply lines of the contact network when passing an insulating interface leads to dangerous situations on the railroad, e.g. annealing and burning of contact wires, arcing. Also false disconnections can lead to stoppage of rolling stock on the guiding gradient and, thus, reduce throughput and transportation capacity. To solve the problem, namely to exclude false tripping of fast-acting switches, the paper proposes a method of using GPS/GLONASS transmitters to improve protection devices on supply lines. **Methods:** the research is carried out on the basis of theoretical knowledge of new developments related to geopositioning of rolling stock, theory of electric and magnetic circuits and theory of traction power supply. **Results:** this paper formulates and studies the concept of loading the set point of feeder line protection devices based on the data of current collector location on the electric rolling stock relative to the isolating coupling. Also each block of the complex of devices and principles of their operation are described in detail. The graphs of change of current setting of fast-acting switches are constructed and the variant of modernization of their design for operative change of current setting is offered. **Practical significance:** the result of the work is of importance, first of all, for ensuring reliability, uninterrupted operation of the traction power supply system and increasing the throughput and carrying capacity. The presented work sets a new direction for the development of protection devices in the DC traction power supply system using a new type of transmitted data – the geographical position of the rolling stock. Thus, the work demonstrates the

possibility of introducing new technologies for determining the position of the object in the relay protection system of the contact network.

Keywords: geopositioning system, increasing the efficiency of protection devices, traction power supply system, protection setpoints, high-speed circuit breakers, false alarms

Reference

1. Veksler M.I. Zashchita tyagovoj seti postoyannogo toka ot tokov korotkogo zamykaniya. M.: Transport, 1976. 120 s. (In Russian)
2. Harikov V.F. Zashchita kontaktnoj seti postoyannogo toka ot korotkih zamykanij. M.: Transport, 1987. 95 s. (In Russian)
3. Figurnov E.P. Relejnaya zashchita: uchebnik dlya vuzov zh.-d. transp. M.: Zheldorizdat, 2002. 720 s. (In Russian)
4. Zatorskaya L.P. Proezd elektrovoza pod tokom izoliruyushchego vozdušnogo promezhnutka tyagovoj seti postoyannogo toka // Nauka i tekhnika transporta. 2018. No. 3. 66 s. (In Russian)
5. Husainov E.K. Povyshenie effektivnosti ekspluatsii sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya za schet sovershenstvovaniya ustrojstv zashchity kontaktnoj seti postoyannogo toka v vyzhdenykh rezhimakh: diss. ... kand. tehn. nauk. Omsk: OmGUPS, 2021. 144 s. (In Russian)
6. Demidenko I.S. Povyshenie effektivnosti zashchity tyagovoj seti postoyannogo toka: diss. ... kand. tehn. nauk. Novosibirsk: NGTU, 2013. 167 s. (In Russian)
7. Teoreticheskie osnovy zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki: uchebnik dlya vuzov zh.-d. transp / A. M. Bryleev [i dr.]. Izd. 2-e, pererab. i dop. M.: Transport, 1977. 376 s. (In Russian)
8. Kompleks vysokotochnoj sistemy pozicionirovaniya. URL: <https://niias.ru/products-and-services/products/bortovye-kompleksy/programmno-apparatnyj-kompleks-vysokotochnoy-sistemy-pozitsionirovaniya/> (In Russian)
9. Programmno-apparatnyj kompleks vysokotochnogo pozicionirovaniya transportnogo sredstva (PAK VTP TS): patent RF № 2803992 / E. P. Gorelik [i dr.] 2022. (In Russian)
10. Tyagovye podstancii: uchebnik dlya vuzov zh.-d. transp. / Yu. M. Bej [i dr.]. M.: Transport, 1986. 310 s. (In Russian)
11. Elektrovoz 2ES4K: rukovodstvo po ekspluatsii. Kn. 2. Opisanie i rabota. Komponovka oborudovaniya. Montazh elektricheskij. Sistema ventilyacii. IDMB.661141.004 RE2 (3TS.000.003 RE2). Novochebkersk, 2006. 50 s. (In Russian)
12. Elektropoezd s asinhronnym tyagovym privodom tipa EGE serii ES2G: rukovodstvo po ekspluatsii ES2G.0.00.000.000 RE. OOO "Ural'skie lokomotivy", 2014. 297 s. (In Russian)
13. Indikaciya i stabilizaciya napryazheniya blok elektroniki / A.D. Shnajder [i dr.] // Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma "Nadezhnost' i kachestvo". 2018. 252 s. (In Russian)
14. Arzhannikov B.A. Osnovnye polozheniya trekhfaznoj sistemy elektricheskoy tyagi: monografiya. Ekaterinburg: UrGUPS, 2023. 263 s. (In Russian)

Received: 09.10.2024

Accepted: 18.11.2024

Author's information:

Artyom Yu. SULIMIN — 5th year Student of group ES-004 of the Faculty of AiT;

sulimin.artem@gmail.com

Sergey M. KUTSENKO — PhD in Engineering, Associate Professor, Dean of the Faculty of Continuous Forms of Education; kutsenko@pgups.ru

Mikhail A. IVANOV — Senior Lecturer of the Department "Electrical power supply of railroads"; m-a-ivanov@yandex.ru