

УДК 621.3.053

Разработка стационарного устройства по диагностике малообслуживаемой системы заземления опор контактной сети на переменном токе

А. В. Агунов, И. А. Терёхин, Д. Д. Лаврухин, И. А. Баранов

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

Для цитирования: Агунов А. В., Терёхин И. А., Лаврухин Д. Д., Баранов И. А. Разработка стационарного устройства по диагностике малообслуживаемой системы заземления опор контактной сети на переменном токе // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 3. — С. 515–527. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-515-527

Аннотация

Цель: Разработка устройства диагностики и мониторинга состояния системы заземления опор контактной сети в режиме реального времени для создания комплексного решения проблемы малообслуживаемой системы заземления опор контактной сети. **Методы:** Сравнение характеристик элементной базы для устройства в зависимости от географической зоны применения, электрические расчеты для выбора элементов из существующих на рынке. **Результаты:** Рассмотрены различные варианты решения, а также выявлены и сведены наиболее оптимальные решения для создания устройства диагностики и мониторинга состояния системы заземления опор контактной сети в режиме реального времени. **Практическая значимость:** Показана острая необходимость в существующих реалиях создания и внедрения устройств диагностики и мониторинга в режиме реального времени систем электроснабжения, в том числе систем электроснабжения железных дорог, системы заземления опор контактной сети. Приведены расчеты для данного устройства по географическим зонам, а также показаны реальные наиболее оптимальные элементы для такого устройства из существующих на рынке.

Ключевые слова: Малообслуживаемая система, система заземления, диагностика и мониторинг, переменный ток, опора контактной сети.

Введение

Классическим способом обеспечения высоких показателей надежности является резервирование и увеличение запаса прочности. Так, при скорости движения свыше 160 км/ч запрещена эксплуатация контактного провода с износом, превышаю-

щим 20 % от номинального сечения. При этом на линиях с низкой скоростью движения допускается износ в 30 %. Идентичная ситуация с натяжением контактных проводов и тросов, входящих в состав контактной подвески. Несмотря на положительное влияние увеличения натяжения на качество

токосяема, его ограничивают на уровне около 50 % от предела текучести материала.

Описанные причины привели к тому, что эксплуатация контактной сети в настоящее время подразумевает замену контактных проводов значительно раньше достижения ими критического износа, а также приводит к понижению динамических характеристик работы системы токосяема. Исключительную актуальность имеют проблемы, связанные с увеличением допустимых скоростей движения и ресурса контактных проводов в условиях перехода на высокоскоростное движение, при проектировании высокоскоростных скоростных магистралей.

При эксплуатации заданные проектом характеристики регулировки контактной сети способны выходить за допустимые значения в результате воздействий электроподвижного состава, климатических условий и токовых нагрузок, что ведет к отказам. Для обеспечения качественного и надежного токосяема необходимо постоянно контролировать состояние контактной сети и тяговой сети в целом. Совершенствование технологий эксплуатации контактной сети с применением постоянно действующей системы диагностики и мониторинга способствует снижению потребности ОАО «РЖД» в поставках элементов тяговой сети с повышенными прочностными характеристиками, а также увеличению периоды его замены, обеспечит возможность высокоскоростного движения на участках со стандартными конструктивными решениями.

Также контактная сеть имеет некоторые особенности своей конструкции, из-за которых возможность контролировать в режиме реального времени параметры ее работы затруднительно. К таким особенностям относятся: колоссальная протяженность, высокий уровень напряжения, а также ограничения, предъявляемые требованиями к массе устройств, закрепленных на контактных проводах. Согласно «Стратегии научно-

технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 г. и на перспективу до 2030 года» [1] и «Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 г.» [2], ключевой задачей в сфере транспорта железных дорог является повышение надежности и эффективности технического обслуживания системы электроснабжения железных дорог за счет применения программно-аппаратных комплексов и устройств, которые могут диагностировать систему электроснабжения железных дорог в автономном режиме. Применение автономных устройств диагностики и мониторинга, связанных в единую систему, позволит повысить качество и эффективность обслуживания и ремонта, а также снизить потребность в высококвалифицированном персонале.

В настоящее время, согласно Инструкции ЦЭ-191 «По заземлению устройств электроснабжения на электрифицированных железных дорогах» от 10 июня 1993 г. [3], эксплуатация заземляющих устройств заключается в своевременном проведении работ по техническому обслуживанию, текущему ремонту и капитальному ремонту. Выполнение данных требований влечет за собой высокие трудозатраты. Например, для замены индивидуального заземления опоры контактной сети требуется 32,4 чел.-ч, а для проверки и ремонта 1 пролета группового заземления опор контактной сети 31,1 чел.-ч.

Разработка стационарного устройства

Кафедрой «Электроснабжение железных дорог» ПГУПС разработаны новые конструкции системы заземления опор контактной сети (рис. 1), которые позволяют за счет применения электропроводящего бетона [4] полностью отказаться от заземляющих спусков, искровых промежутков и иной заземляющей арматуры. В новой системе заземления опоры контактной сети выступают в качестве естественных заземлителей [5]. Однако и

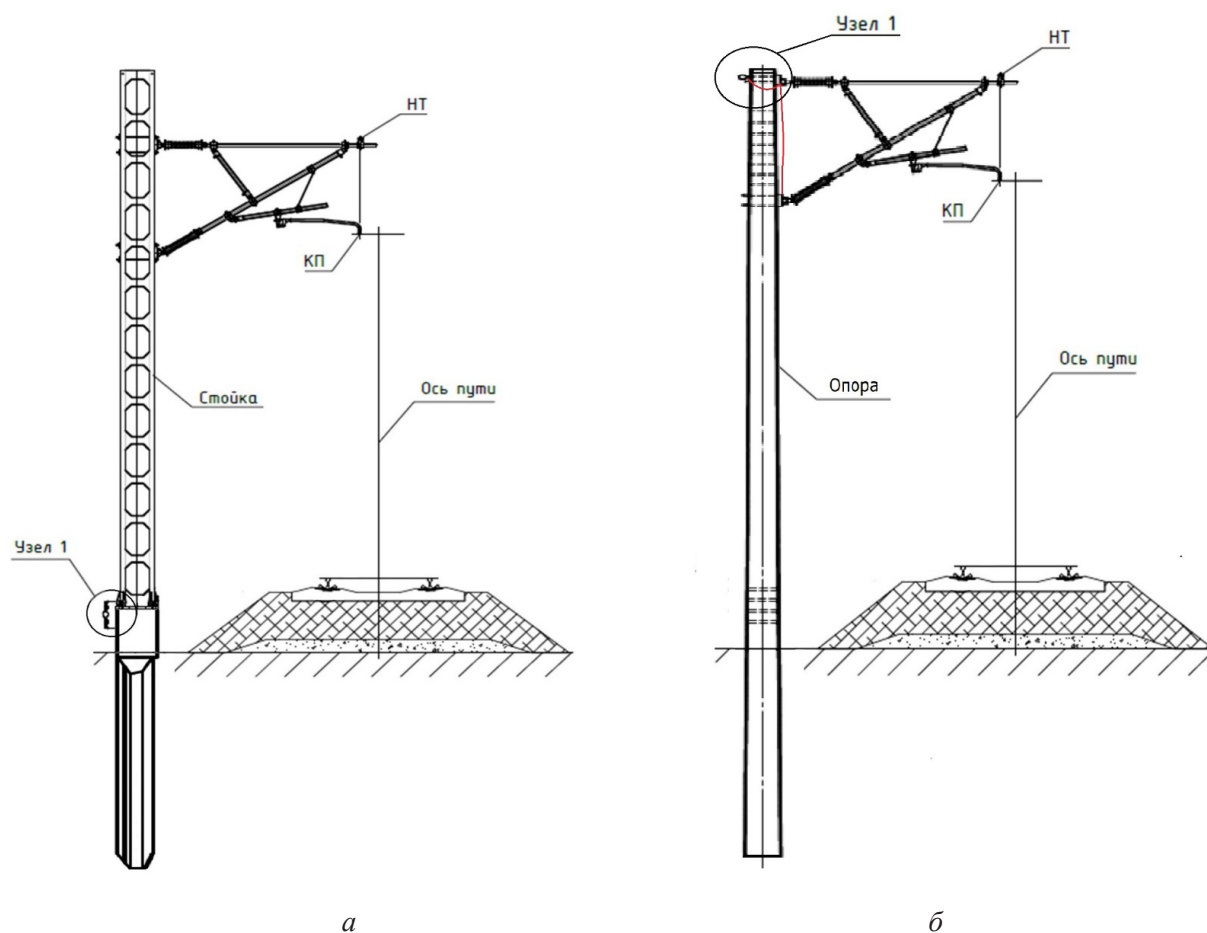


Рис. 1. Новые конструкции системы заземления опор контактной сети:
а — для металлических стоек опор; *б* — для нераздельных железобетонных опор
 (Узел 1 — соединение металлических элементов, способных попасть под напряжение в аварийном режиме с арматурой фундамента (опоры))

при такой системе заземления необходимо также контролировать параметр сопротивления [6], что не делает данную систему заземления малообслуживаемой. Для реализации проекта малообслуживаемой системы заземления необходимо в автоматическом режиме контролировать сопротивление заземления.

На рис. 2 представлена функциональная схема стационарного устройства по диагностике малообслуживаемой системы заземления опор контактной сети на переменном токе.

Данное стационарное устройство обладает следующей элементной базой:

- «передатчик» (компонент, осуществляющий сбор и передачу информации об измеряемом параметре);
- аккумуляторная батарея, отвечающая за автономное питание устройства в целом;
- источник электрической энергии для аккумулятора (в качестве возможных вариантов питания, для соблюдения условия малообслуживаемости, а также в соответствии с одной из целей стратегии развития РЖД до 2030 г. [2] по приоритету «зеленым» технологиям и обеспечением снижения нагрузки на окружающую среду в 2 раза, рассматриваются солнечные батареи).

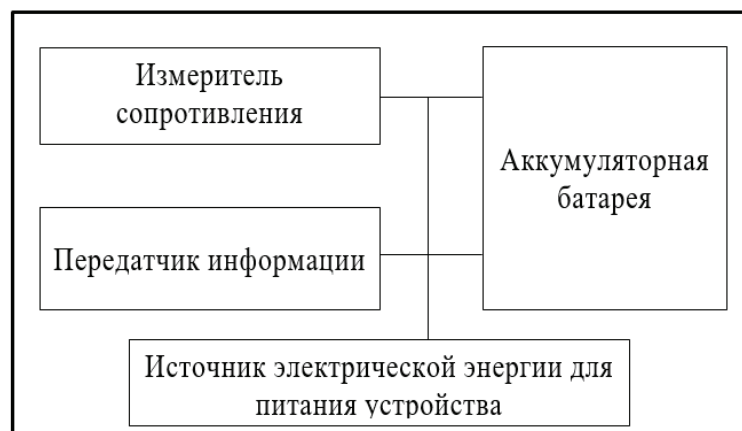


Рис. 2. Функциональная схема стационарного устройства по диагностике малообслуживаемой системы заземления опор контактной сети на переменном токе

С точки зрения алгоритма работы (рис. 3) устройство функционирует следующим образом. Устройство располагается на металлическом проводнике в районе «узла 1» (см. рис. 1) или, если применяется групповое заземление, на спуске троса группового заземления к арматуре опоры контактной сети (данный вариант и рассмотрим далее) [7].

Устройство находится во включенном состоянии на постоянной основе, обеспечивая непрерывный процесс диагностики и мониторинга уровня сопротивления заземления. Статус работоспособности определяется самодиагностикой устройства. В случае отсутствия напряжения внутри устройства оператор в контролируемом пункте на ближайшей тяговой подстанции получает извещение об этом путем смены цветовой индикации датчика конкретного устройства с зеленого цвета (работоспособный режим) на красный цвет (нарушение работоспособного режима).

При отсутствии нарушений в работе устройства в штатном режиме, после успешно пройденной самодиагностики производится измерение сопротивления группы опор. Далее происходит сравнение измеренного параметра сопротивления с оптимальными параметрами, заданными и внесенными в устройство при установке. В течение

срока эксплуатации задаваемые оптимальные параметры могут быть изменены, так как это обусловлено необходимостью подстраивать предельно допустимый уровень сопротивления для корректной работы релейной защиты электрифицированного участка.

В случае, если сравнение не выявило выхода параметра уровня сопротивления за предельно допустимое значение, контроль уровня сопротивления продолжается, возвращая работу устройства на этап сразу после успешного прохождения самодиагностики. Если сравнение выявило нарушение предельно допустимого значения, предупреждающий сигнал об этом поступает на рабочее место оператора в контролируемый пункт на тяговой подстанции. После уведомления оператора устройство продолжает работу в штатном режиме, выполняя этап непрерывного измерения сопротивления группы опор.

Так как группы опор могут быть объединены тросом группового заземления в двух вариациях, по Т-образной или Г-образной схемам, это предполагает различие в местах установки разрабатываемого устройства на электрифицированной линии железных дорог. Схематичное изображение с местами расположения представлено на рис. 4 и 5.



Рис. 3. Блок-схема алгоритма работы устройства

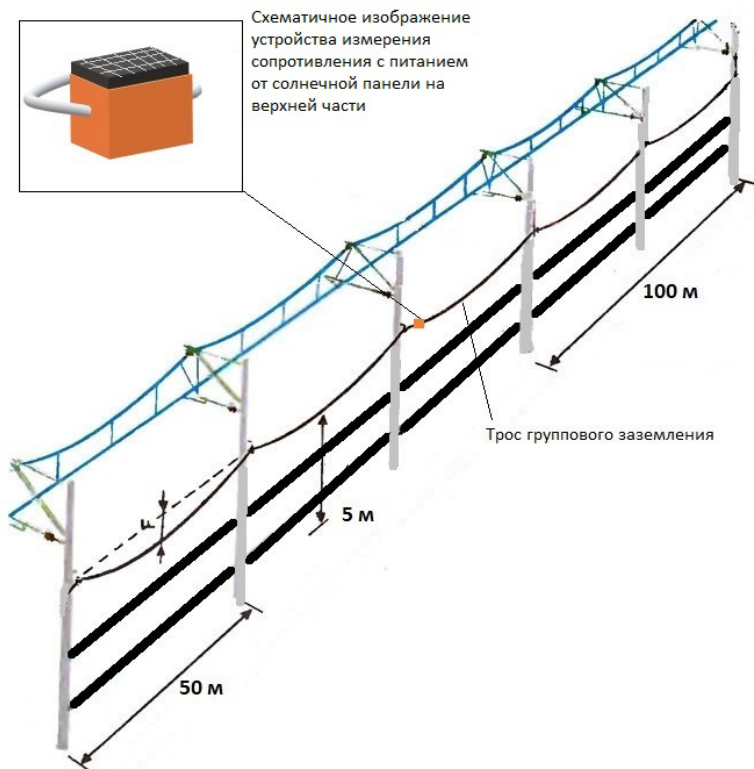


Рис. 4. Месторасположение устройства при Т-образной схеме объединения заземления опор

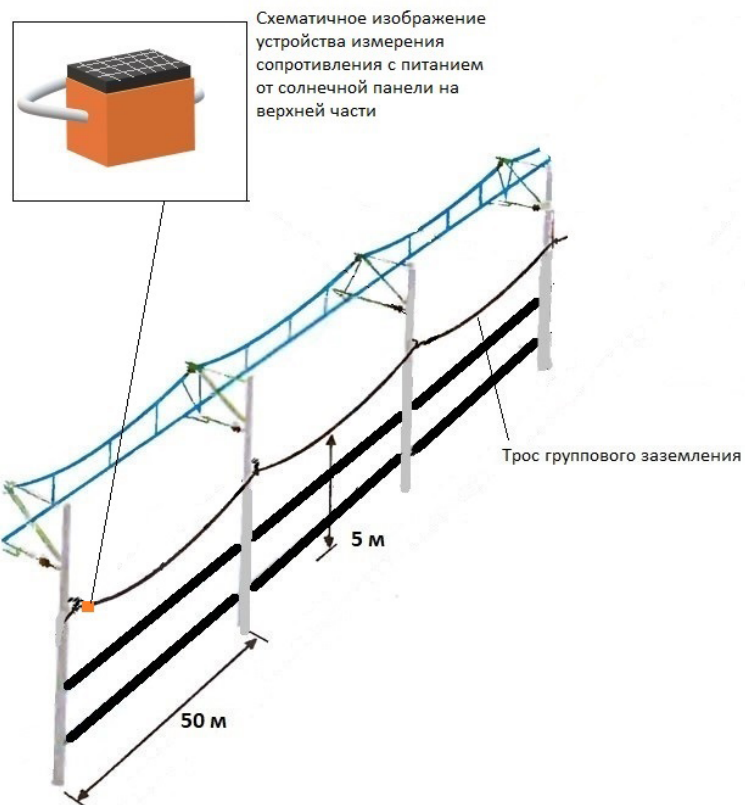


Рис. 5. Месторасположение устройства при Г-образной схеме объединения заземления опор

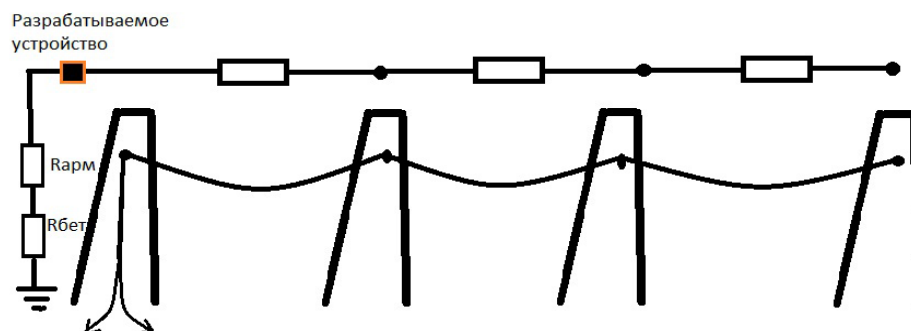


Рис. 6. Схема сопротивлений модернизированной системы заземления при Г-образном соединении

Электрическая схема, отражающая параметр сопротивления в электрической цепи при объединении группы опор тросом группового заземления по Г-образной схеме, изображена на рис. 6.

Таким образом, исходя из понимания требуемых функций устройства, его месторасположения, наличия основных его компонентов, алгоритма работы, далее следует описать принцип работы прибора по измерению сопротивления заземления и провести технический расчет. Расчет должен отражать мощность, потребляемую устройством, с учетом непрерывной его работы, аккумуляторную батарею, достаточную для такой мощности, а также солнечную панель, способную питать соответствующий аккумулятор. Несмотря на обозначенные ранее иные виды альтернативных источников электрической энергии (ветроэнергетика, электромагнитные волны), при расчетах используются данные для построения конструкции разрабатываемого устройства только с применением солнечной энергетики, так как на сегодняшний день именно этот вид возобновляемого источника энергии является наиболее распространенным. Из этого факта следует глубокая степень изученности технических тонкостей использования, а также относительная дешевизна разработки и производства.

Принцип измерения сопротивления заземления состоит в следующем: измеряется испытательный

ток, протекающий по заземляющему проводнику или шине, которые в данном случае являются вторичной обмоткой. После чего с помощью вольтметра снимается показание действующего напряжения в цепи. Для вычисления искомого сопротивления достаточно воспользоваться законом Ома.

Непрерывная работа разрабатываемого устройства напрямую сказывается на потребляемой им энергии. Для расчета данной величины необходимо знать параметры всех величин, по которым ее можно вычислить. Таковыми являются сила тока (I), напряжение (U) и время (t). При условии непрерывной работы время будет составлять 24 часа. Электрические параметры принимаются приблизительно, в соответствии с таковыми у других приборов по измерению сопротивления заземления. Параметр силы электрического тока составляет 30 миллиампер, параметр напряжения составляет 30 вольт. Для корректности производимых расчетов необходимо привести параметры в соответствие международной системе единиц (СИ). Таким образом, суточное потребление энергии рассчитывается по формуле:

$$W = I \cdot U \cdot t, (1)$$

где $I = 30 \text{ мА} = 0,03 \text{ А}$;

$U = 30 \text{ В}$;

$t = 24 \text{ ч} = 86\,400 \text{ с}$.

$$W = 0,03 \cdot 30 \cdot 86400 = 77\,760 \text{ Дж} = \\ = 0,0216 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Солнечные дни

Так как для питания разрабатываемого устройства выбрана солнечная энергетика, довольно значимым фактором становится среднегодовое количество солнечных дней, потому что именно во время солнечной ясной погоды солнечная панель работает на полную мощность. Карта Российской Федерации, отражающая среднегодовое количество солнечных часов и дней в году, изображена на рис. 7.

Исходя из этой карты, а также прочих источников информации по продолжительности солнечного сияния в течение года, территорию страны можно условно разделить на 7 зон по количеству солнечных часов и дней:

- 1 зона (2400 часов и более — 100 дней и более);
- 2 зона (от 2200 часов до 2400 часов — от 91 до 100 дней);
- 3 зона (от 2000 часов до 2200 часов — от 83 до 91 дня);
- 4 зона (от 1800 часов до 2000 часов — от 75 до 83 дней);
- 5 зона (от 1600 часов до 1800 часов — от 66 до 75 дней);
- 6 зона (от 1400 часов до 1600 часов — от 58 до 66 дней);
- 7 зона (менее 1400 часов — до 58 дней).

Несмотря на тот факт, что наиболее распространены в применении на производствах и в бытовых нуждах являются поликристаллические солнечные панели, которые не слишком сильно зависят от прямых солнечных лучей и вполне

КОЛИЧЕСТВО СОЛНЕЧНЫХ ДНЕЙ В ГОДУ ПО ГОРОДАМ РОССИИ



Рис. 7. Карта солнечных часов и дней в году на территории Российской Федерации

ТАБЛИЦА 1. Минимально необходимая емкость аккумулятора для обеспечения автономности

№ зоны	1	2	3	4	5	6	7
Емкость АКБ, А · ч	не менее 15,12	не менее 15,84	не менее 16,56	не менее 17,28	не менее 18	не менее 18,72	не менее 19,44

ТАБЛИЦА 2. Подбор аккумулятора, удовлетворяющего условиям

№ зоны	1	2	3	4	5	6	7
Производитель	Delta Battery	Delta Battery	Delta Battery	Delta Battery	Varta	Varta	Delta Battery
Емкость АКБ, А · ч	16	16	17	18	19	19	20
Масса, кг	6,09	6,09	5,7	5,9	7,04	7,04	5,5
Габарит: Д × Ш × В, мм	207 × 72 × 164	207 × 72 × 164	181 × 77 × 167	182 × 76 × 167	175 × 101 × 156	175 × 101 × 156	181 × 77 × 167
Стоимость, руб.	5150	5150	4500	4600	6600	6600	6200

работоспособны в облачную и даже пасмурную погоду, параметр количества солнечных дней нельзя оставлять без внимания. Емкость аккумулятора разрабатываемого устройства должна быть выбрана с учетом «запаса» и в зависимости от «солнечной зоны» места предполагаемой установки устройства для обеспечения автономности.

Источник питания

Таким образом, на основании имеющихся данных необходимо произвести расчет ориентировочной емкости аккумуляторной батареи для обеспечения автономности в условиях отсутствия солнечного излучения, способного восполнить заряд аккумулятора с помощью солнечной панели. Расчет емкости состоит в вычислении ежемесячного количества дней без солнца по зонам, а затем, учитывая известное суточное потребление энергии, в вычислении необходимой емкости для полного покрытия потребления мощности за известный период времени. Результаты вычислений по всем зонам сведены в табл. 1.

Теперь, имея представление о необходимых емкостях аккумуляторной батареи, необходимо для каждой отдельной зоны подобрать свой аккумулятор, пользуясь различными их классификациями.

Аккумуляторные батареи используются для автономного питания в широком диапазоне производств и техники, поэтому и требования, предъявляемые к этим устройствам, тоже весьма различны [8].

Примеры аккумуляторов с подходящими параметрами по «солнечным зонам» отражены в табл. 2.

Солнечная панель

Способы изготовления солнечных панелей с применением аморфного кремния значительно отличается от производства солнечных панелей на кристаллических фотоэлектрических элементах. Особенность заключается в применении не чистого кремния, а гидрид кремния, что позволяет его парам осажаться на подложку панели. Итогом такого технологического решения является отсутствие классических кристаллов и существенное снижение затрат на производство. В настоящее время известно уже несколько поколений солнечных панелей, изготовленных по такой технологии, с каждым новым поколением возрастает КПД таких панелей. Так, первые образцы модулей имели КПД порядка 4–5 %, на данный момент наиболее распространены модели следующего поколения с эффективностью 8–9 %. Также разработаны и постепенно входят в рас-

ТАБЛИЦА 3. Подбор солнечной панели, удовлетворяющей условиям

№ зоны	1	2	3	4	5	6	7
Производитель	Delta Battery	Delta Battery	One-Sun	Delta Battery	One-Sun	Delta Battery	One-Sun
Отдача электро-энергии, Вт	200	200	280	280	280	280	280
Габарит: Д × Ш, мм	1300 × 991	1300 × 991	1640 × 992	1640 × 990	1640 × 992	1640 × 990	1640 × 992
Стоимость, руб.	10 000	10 000	11 500	12 000	11 500	12 000	11 500

пространение панели с КПД до 12 %, однако их стоимость достаточно велика.

Ключевой особенностью технологии создания солнечных панелей с применением аморфного кремния является то, что они позволяют изготавливать модули на гибкой подложке, что является причиной их широкого применения в гибких тонкопленочных солнечных модулях. Однако, что очевидно, такое исполнение солнечной панели имеет более высокую стоимость [9].

Для генерации электроэнергии физико-химическая структура гидрида кремния обладает способностью хорошо поглощать фотоны слабого рассеянного света. Ввиду чего обуславливается эффективность применения данной технологии в северных районах.

Важно отметить, что и при высокой температуре работоспособность модулей на основе гидроксида кремния не снижается, хоть и уступает модулям из арсенида галлия.

В заключение можно указать следующие преимущества солнечных панелей на основе гидроксида кремния:

- возможность изготовления в жестком исполнении и в гибком, что, как следствие, дает возможность придания любой архитектурной формы при размещении на зданиях и сооружениях;
- практически полное отсутствие негативного влияния от высоких температур на работоспособность;
- простота и надежность конструкции, ввиду чего такие панели практически не ломаются;

– меньшие потери производительности при загрязнении поверхности, чем у аналогов;

– поддержание высокой эффективности при слабом рассеянном свете.

Срок службы панелей из аморфного кремния составляет около 25 лет при потере мощности за весь срок не более чем на 15 %. Главным недостатком рассмотренного оборудования является необходимость иметь большие площади для размещения оборудования заданной мощности.

Основными параметрами, по которым определяется пригодность использования солнечной панели в разрабатываемом устройстве, являются отдача электрической энергии, габариты панели и стоимость. В первую очередь солнечная панель должна удовлетворять параметру мощности, будучи достаточной для питания определенного аккумулятора в соответствии с зоной установки. Примеры панелей с подходящими параметрами по «солнечным зонам» отражены в табл. 3.

На основании полученных данных по предложенным солнечным панелям для каждой конкретной зоны можно сделать вывод о том, что каждая из панелей подходит для установки в разрабатываемое устройство, габаритные размеры и стоимость отличаются незначительно.

Применение инвертора не является необходимым, так как разрабатываемое устройство питается от аккумулятора 12 В, а инверторы применяют для преобразования постоянной энергии, получаемой панелями от солнца, превращая в переменную с повышением напряжения до 220 В [10].

Заключение

По результатам расчета параметров разрабатываемого устройства и подбора удовлетворяющих параметры основных его компонентов можно сделать следующие выводы.

При всей неоспоримой перспективности подобного устройства по автоматическому контролю уровня сопротивления заземления опор контактной сети на переменном токе как неотъемлемой части малообслуживаемой системы заземления нельзя не учитывать возникшие в процессе разработки сложности, связанные с особенностями технического исполнения. Одной из главнейших проблем является автономность работы устройства и способ ее поддержания за счет применения солнечной энергетики.

Необходимо учитывать, что устройство находится во включенном состоянии на протяжении всего времени эксплуатации, для чего используется энергоемкий аккумулятор, разнообразие которого в свободной продаже достаточно велико. Гораздо важнее, чтобы солнечная панель, функционирующая в составе устройства, круглогодично имела возможность подпитывать данный аккумулятор. В результате размер подобной панели получается довольно большим, что влечет за собой некоторые сложности во взаимном расположении компонентов разрабатываемого устройства на спуске троса группового заземления. Также нельзя не учитывать такие факторы, как влияние местоположения на выработку энергии, угол наклона солнечной панели, ее КПД в течение года, учет потерь энергии, взаимную совместимость всех компонентов и некоторые другие параметры.

Затронутые вопросы требуют серьезного научного подхода в процессе научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Однако при их проведении и подтверждении эффективности технологии со всех точек зрения имеет место шанс ее распространения, доход от которого окупит затраченные средства.

Библиографический список

1. Стратегия научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 г. и на перспективу до 2030 г. / Утв. Распоряжением ОАО «РЖД» от 17 апреля 2018 г. № 769/р.
2. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 г. / Утв. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 июня 2008 г. № 877-р.
3. Инструкции ЦЭ-191 «По заземлению устройств электроснабжения на электрифицированных железных дорогах» от 10 июня 1993 г.
4. Терёхин И. А. Разработка оптимального состава электропроводящего бетона / И. А. Терёхин, А. В. Агунов, Е. Г. Абишов и др. // III Бетанкуровский Международный инженерный форум: сборник трудов, Санкт-Петербург, 02–03 декабря 2021 г. — СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2021. — С. 164–165.
5. Баранов И. А. Совершенствование системы заземления опор контактной сети за счет применения электропроводящих фундаментов / И. А. Баранов, А. В. Агунов, И. А. Терёхин // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы: сборник трудов LXXXI Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 19–26 апреля 2021 г. — СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2021. — С. 109–113.
6. Титова Т. С. Оценка условий электробезопасности при применении опор контактной сети в качестве естественных заземлителей / Т. С. Титова, Т. П. Сацук, И. А. Терёхин, И. В. Тарабин // Электротехника. — 2021. — № 2. — С. 7–11.
7. Правила устройства электроустановок. Изд. 7. Общие правила. Заземление и защитные меры безопасности. Утверждены Приказом № 204 Министерства энергетики Российской Федерации от 8 июля 2002 г.
8. ГОСТ Р МЭК 62485-2—2011. Батареи аккумуляторные и установки батарейные. Требования безопасности. Ч. 2. Стационарные батареи / Утв. приказом

Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 13 декабря 2011 г. № 1196-ст.

9. Казанский А. Г. Тонкопленочные кремниевые солнечные элементы на гибких подложках / А. Г. Казанский // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. — 2015. — Т. 7. — № 1. — С. 15–24. — DOI: 10.17725/rensit.2015.07.015.

10. Изучение солнечных фотоэлектрических элементов: учебно-методическое пособие / В. В. Бессель, В. Г. Кучеров, Р. Д. Мингалеева. — М.: Издательский центр РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина, 2016. — 90 с.

Дата поступления: June 21, 2022

Решение о публикации: August 29, 2022

Контактная информация:

АГУНОВ Александр Викторович — д-р техн. наук, проф.; alexagunov@mail.ru

ТЕРЁХИН Илья Александрович — канд. техн. наук, доц.; terekhin@pgups.ru

ЛАВРУХИН Дени Дмитриевич — студент; denislavr@mail.ru

БАРАНОВ Иван Александрович — аспирант; baranov@pgups.ru

Development of Stationary Device for Diagnostics of Low-Maintenance Grounding System of Catenary Poles Being on Alternating Current

A. V. Agunov, I. A. Terekhin, D. D. Lavrukhin, I. A. Baranov

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Agunov A. V., Terekhin I. A., Lavrukhin D. D., Baranov I. A. Development of a Stationary Device for Diagnostics of Low-Maintenance Grounding System of Catenary Poles Being on Alternating Current // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 3, pp. 515–527. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3 -515-527

Summary

Purpose: Development of the device for diagnostics and monitoring the state of grounding system of catenary poles in real time to create a comprehensive solution to the problem of low-maintenance grounding system of catenary poles. **Methods:** Comparison of the characteristics of element base for the device depending on application geographical area; electrical calculations for element selection from existing elements on the market. **Results:** Different solutions are considered as well as the most optimal ones for creating the device for diagnosing and monitoring the state of grounding system for catenary poles in real time are identified and summarized. **Practical significance:** Urgent necessity in the existing realities in creating and implementing devices for real-time diagnosing and monitoring power supply systems, including power supply ones of railroads, grounding system for catenary poles, is shown. Calculations for the given device by geographical zones are presented and also, real, the most optimal elements for such device from existing ones on the market are shown.

Keywords: Low-maintenance system, grounding system, diagnostics and monitoring, alternating current, catenary pole.

References

1. *Strategiya nauchno-tehnologicheskogo razvitiya kholdinga «RZhD» na period do 2025 goda i na perspektivu do 2030 goda. / Utv. rasporyazheniem OAO «RZhD» ot 17 aprelya 2018 g. № 769/r* [The strategy of scientific and

technological development of the Russian Railways holding for the period up to 2025 and for the future up to 2030. / Approved. by order of Russian Railways OJSC dated April 17, 2018 No. 769/r]. (In Russian)

2. *Strategiya razvitiya zhelezнодорожного transporta v Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda / Utv. rasporyazheniem Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 17.06.2008 g. № 877-r* [Strategy for the development of railway transport in the Russian Federation until 2030 / Approved. Decree of the Government of the Russian Federation dated June 17, 2008 No. 877-r]. (In Russian)

3. *Instruktsii TsE-191 «Po zazemleniyu ustroystv elektrosnabzheniya na elektrifitsirovannykh zheleznnykh dorogakh» ot 10.06.1993 g.* [Instructions TsE-191 “On grounding of power supply devices on electrified railways” dated 10.06.1993]. (In Russian)

4. Terekhin I. A., Agunov A. V., Abishov E. G. Razrabotka optimal'nogo sostava elektroprovodyashchego betona [Development of the optimal composition of electrically conductive concrete]. *III Betankurovskiy mezhdunarodnyy inzhenernyy forum: Sbornik trudov, Sankt-Peterburg, 02–03 dekabrya 2021 goda* [III Betancourt International Engineering Forum: Proceedings, St. Petersburg, December 02–03, 2021 of the year]. St. Petersburg: Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Imperatora Aleksandra I Publ., 2021, pp. 164–165. (In Russian)

5. Baranov I. A., Agunov A. V., Terekhin I. A. Sovershenstvovanie sistemy zazemleniya opor kontaktnoy seti za schet primeneniya elektroprovodyashchikh fundamentov [Improvement of the grounding system of contact network supports through the use of electrically conductive foundations]. *Transport: problemy, idei, perspektivy: sbornik trudov LXXXI Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh, Sankt-Peterburg, 19–26 aprelya 2021 goda* [Transport: problems, ideas, prospects: Proceedings of the LXXXI All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, graduate students and young scientists, St. Petersburg, April 19–26, 2021]. St. Petersburg: Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Imperatora Aleksandra I Publ., 2021, pp. 109–113. (In Russian)

6. Titova T. S., Satsuk T. P., Terekhin I. A., Tarabin I. V. Otsenka usloviy elektrobezopasnosti pri primenenii opor kontaktnoy seti v kachestve estestvennykh zazemliteley [Evaluation of electrical safety conditions when

using contact network supports as natural ground electrodes]. *Elektrotekhnika* [Electrotechnics]. 2021, I. 2, pp. 7–11. (In Russian)

7. *Pravila ustroystva elektroustanovok 7e izdanie. Obshchie pravila. Zazemlenie i zashchitnye mery bezopasnosti. Utverzhdeny Priказом № 204 Ministerstva energetiki Rossiyskoy Federatsii ot 08.07.2002* [Rules for electrical installations 7th edition. General rules. Grounding and safety precautions. Approved by Order No. 204 of the Ministry of Energy of the Russian Federation dated July 8, 2002]. (In Russian)

8. GOST R MEK 62485-2—2011 Batarei akkumulyatornye i ustanovki batareynye. Trebovaniya bezopasnosti. Chast' 2. Statsionarnye batarei. [GOST R IEC 62485-2—2011 Batteries and battery installations. Safety requirements. Part 2. Stationary batteries]. *Utv. prikazom Federal'nogo agentstva po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii ot 13.12.2011 g. № 1196-st* [Approved. by order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology of December 13, 2011 No. 1196-st]. (In Russian)

9. Kazanskiy A. G. Tonkoplennyye kremnievyye solnechnyye elementy na gibkikh podlozhkakh [Thin-film silicon solar cells on flexible substrates]. *Radioelektronika. Nanosistemy. Informatsionnyye tekhnologii* [Radioelectronics. Nanosystems. Information Technology]. 2015, vol. 7, I. 1, pp. 15–24. DOI: 10.17725/rensit.2015.07.015. (In Russian)

10. Bessel' V. V., Kucherov V. G., Mingaleeva R. D. *Izuchenie solnechnyykh fotoelektricheskikh elementov* [Study of solar photovoltaic cells]. Moscow: RGU nefi i gaza (NIU) imeni I.M. Gubkina Publ., 2016. 90 p. (In Russian)

Received: June 21, 2018

Accepted: August 29, 2022

Author's information:

Alexander V. AGUNOV — Dr. Sci in Engineering, Professor; alexagunov@mail.ru

Ilya A. TEREKHIN — PhD in Engineering, Associate Professor; terekhin@pgups.ru

Denis D. LAVRUKHIN — Student; denislavr@mail.ru

Ivan A. BARANOV — Postgraduate Student; baranov@pgups.ru