

В. А. Осипов, А. В. Бойко, В. Н. Черных

ВАРИАНТЫ ОРГАНИЗАЦИИ ЕМКОСТНОГО ОТБОРА МОЩНОСТИ НА ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Аннотация. Исследования, изложенные в статье, направлены на решение задачи организации точек питания электропотребителей, располагающихся вдоль полотна электрифицированных железных дорог. Такие точки питания предназначены прежде всего для питания маломощных потребителей, таких как устройства измерения, контроля, наблюдения и освещения. В качестве базового источника энергии в статье предлагается использовать напряжение, распределяемое по цепи изоляторов в гирлянде, а именно падение напряжения на первом изоляторе, имеющем непосредственный контакт с заземленной арматурой. В качестве примера предложен вариант подключения к линиям ДПР, прокладываемым вдоль полотна электрифицированных железных дорог. Такой подход может быть использован в системах, позволяющих осуществлять отбор электроэнергии с последующим её преобразованием и накоплением специальным устройством.

Ключевые слова: емкостной делитель напряжения, электроснабжение, емкостная связь, контактная сеть, электрические железные дороги.

Для цитирования: Осипов, В. А. Варианты организации емкостного отбора мощности на электрифицированных железных дорогах переменного тока / В. А. Осипов, А. В. Бойко, В. Н. Черных // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 4. – С. 211–218. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_4_211.

Введение

Задача питания потребителей, расположенных вдоль полотна электрифицированных железных дорог, довольно распространена. Организация освещения переездов, электроснабжение датчиков мониторинга различных сложных технических устройств, установленных на перегонах, и т. д. требует использования электроэнергии. Установка понизительных трансформаторных подстанций с точки зрения капиталовложений может быть нецелесообразна, так как работа самих трансформаторов будет происходить в основном в режимах, близких к режиму холостого хода [1]. Например, для реализации технической диагностики применяют комплекс специализированных устройств и приборов. Цель контроля – прогнозирование экстремальных нагрузок и вероятность возникновения последствий их воздействия. Очевидным решением будет применение устройств или измерительных систем, с помощью которых возможно осуществлять мониторинг состояния контактной сети с помощью таких параметров, как температура воздуха, скорость воздушного потока, натяжение контактного провода. Такое устройство будет способствовать поддержанию благоприятных условий работы контактной сети. Внедрение систем мониторинга состояния элементов контактной сети требует организации питания измерительных и передающих узлов измерительной системы.

Источник питания должен отвечать ряду требований, а именно обладать климатической стойкостью, располагаться на опоре, обеспечивать качество электроснабжения, сохранять работоспособность устройств при возникновении аварий. На сегодняшний день известно применение солнечных батарей и аккумуляторов для обеспечения работы измерительных устройств [2], однако в зимнее время при непродолжительном солнечном дне и высокой облачности эффективность работы таких устройств может снижаться. Несмотря на очевидную близость питающих проводов, контактной сети и линии ДПР, непосредственное питание узлов измерительной системы от них затруднено, а порой невозможно. Преобразование напряжения с коэффициентом трансформации 2500, обеспечение гальванической развязки, защищенность от коротких замыканий делают задачу непосредственного присоединения преобразователей к линиям 25 кВ нерентабельной изначально. Возникает задача организации отбора мощности без фактического присоединения к линиям высокого напряжения. В данной статье предложен путь решения поставленной задачи за счет организации емкостного отбора мощности от элементов тяговой сети, находящихся в нормальном режиме под высоким напряжением. Качество напряжения, которое может обеспечить такое устройство, будет зависеть от конструкции инверторного

преобразователя устройства, а его мощность будет определяться сопротивлением связи с питающими высоковольтными проводами.

Проведенный анализ показал возможность организации бесконтактного отбора активной мощности за счет емкостной связи порядка 5–8 Вт. Актуальность темы бесконтактного отбора мощности подтверждается запросом на инновации «Использование энергии наведенного напряжения от контактного провода и беспроводной передачи электроэнергии для снабжения систем освещения пассажирских платформ» холдинга ОАО «РЖД».

Организация системы отбора мощности на электрифицированной железной дороге

Тяговая сеть электрифицированных железных дорог переменного тока представляет собой протяженную двухпроводную линию электропередачи, прямой и обратный подводник которой разнесены в пространстве на значительное расстояние. Такая особенность тяговой сети дает основание классифицировать ее как некомпенсированную линию электропередачи, создающую в окружающем пространстве сильное электромагнитное поле [3]. В качестве примера рассмотрим картину потенциалов электрического поля контактной сети переменного тока, показанную на рис. 1.

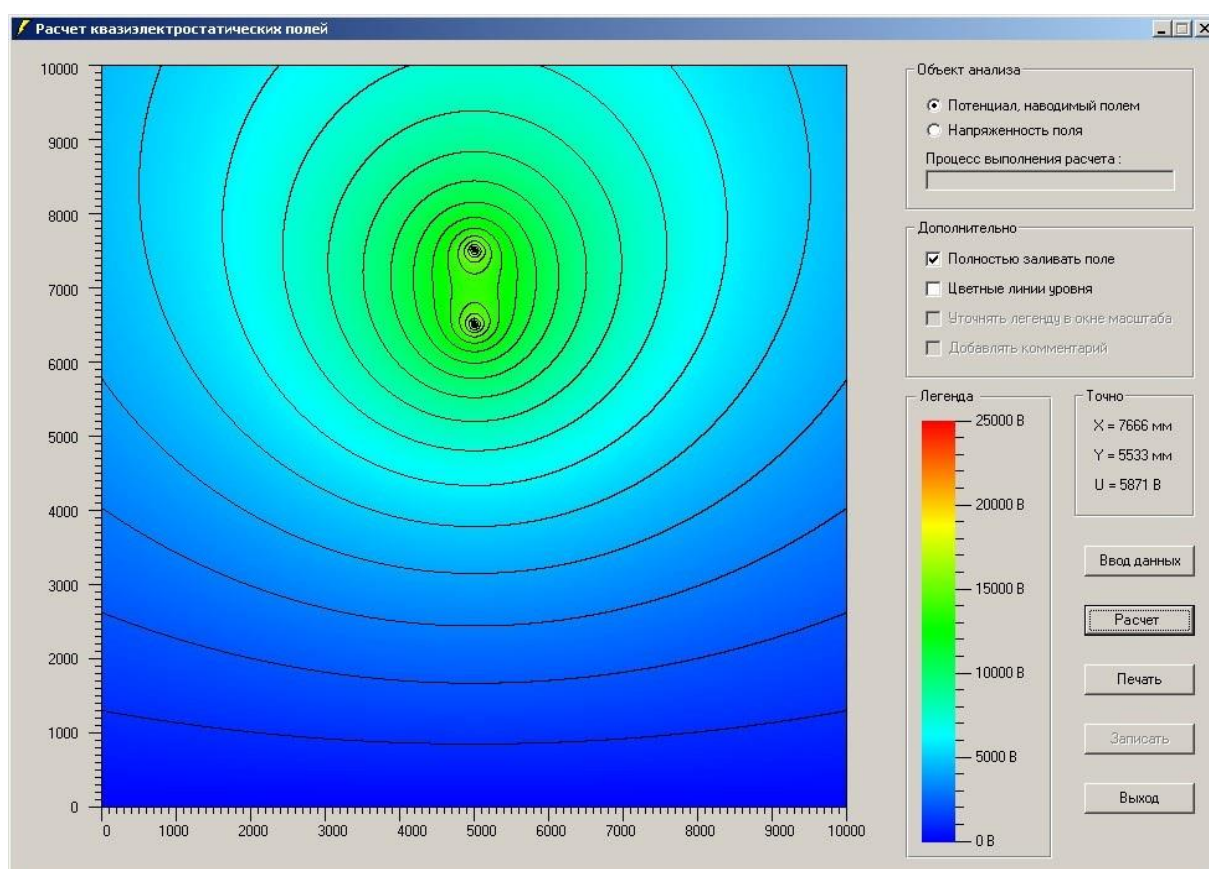


Рис. 1. Распределение потенциала, в пространстве вокруг контактной подвески

Из представленной диаграммы видно, что на расстоянии 4–5 метров от оси пути на уровне подвеса контактного провода наводимый потенциал достигает значений в 5–7 кВ. Если на опорах контактной сети с полевой стороны на высоте 7 метров подвесить изолированный от земли проводник, то, очевидно, вследствие ёмкостной связи с контактной подвеской на этом проводнике будет наводиться потенциал 5–7 кВ [4]. Однако непосредственное подключение такого проводника к потребителю или к понижающему трансформатору невозможно, так как величина ёмкостного сопротивления связи «контактная подвеска – изолированный проводник» очень велика и определяется рядом параметров, в том числе расстоянием между этими проводниками. Для дальнейшего анализа выполним расчет величины частичных емкостей для данной модели и определим значение емкости изолированного проводника относительно контактной подвески и относительно земли. Для расчета будем использовать третью группу формул Максвелла, полагая, что поверхность земли идеально ровная, и в системе отсутствуют другие питающие и заземлённые проводники [5–7]. Результаты представлены в таблице.

Как ранее указывалось, описанный выше подход требует подвеса на достаточной высоте дополнительного изолированного проводника. При высоте подвеса проводника равной 3 метрам эквивалентная емкость провода относительно контактной подвески составит порядка 60 пФ, при этом емкость относительно земли возрастет на 100–120 пФ из-за применения изоляторов и составит 560–580 пФ, что очевидно снизит значение наводимого на провод потенциала с 3,14 до 2,41 кВ. В качестве альтернативы описанному выше решению рассмотрим возможность использования энергии емкостной связи изоляторов, используемых в цепях ДПР и подвешиваемых с полевой стороны пути. Для этого рассмотрим распределение величины напряжения по поверхности изоляторов.

Расчетные значения ёмкости проводников относительно друг друга и относительно земли

| Высота подвеса провода, м | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Расчетный параметр | | | | | | | | |
| Емкость провод – земля, пФ/м | 8,699 | 7,762 | 7,095 | 6,583 | 6,192 | 5,908 | 5,72 | 5,611 |
| Емкость провод – контактная сеть пФ/м | 0,789 | 1,114 | 1,426 | 1,705 | 1,922 | 2,039 | 2,041 | 1,95 |

Известно, что переменное и импульсное напряжение распределяется по изоляторам неравномерно [8]. При этом чем больше количество изоляторов, тем сильнее выражена эта неравномерность. Рассмотрим изоляторы системы ДПР, подвешенные с полевой стороны опоры контактной сети (рис. 2). Для точки «А», соответствующей пестика первого изолятора левой гирлянды изоляторов, можно выделить следующие емкостные связи: C_1 – собственная емкость изолятора, C_2 – емкостная связь с проводником, находящимся под напряжением, C_3 – связь с проводящими заземленными конструкциями опоры контактной сети, C_4 – емкость между левой и правой гирляндами.

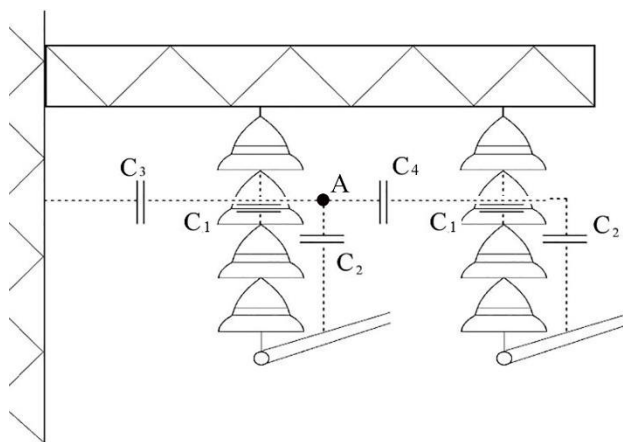


Рис. 2. Изоляторы системы «два провода – рельс» и присутствующие емкостные связи

Гирлянды для устройств систем электроснабжения, как правило, комплектуют однотипными изоляторами [9], поэтому их собственные емкости изоляторов примем одинаковыми. Из-за наличия емкостных связей C_2 и C_3 напряжение по гирлянде распространяется неравномерно. Влиянием емкости C_4 пренебрегаем, так как связь точки «А» с правым (см. рис. 2) проводником системы ДПР будет осуществляться через последовательно включенные C_4 и эквивалентную ёмкость правой гирлянды изоляторов. Поперечной ёмкостью C_2 также пренебрегаем ввиду того, что влияние ёмкости C_2 , оказываемое на падение напряжения в части изолятора, мало, по сравнению со связью с конструкциями, находящимися под напряжением. Рассмотрим упрощенную схему замещения гирлянды изоляторов (рис. 3, а).

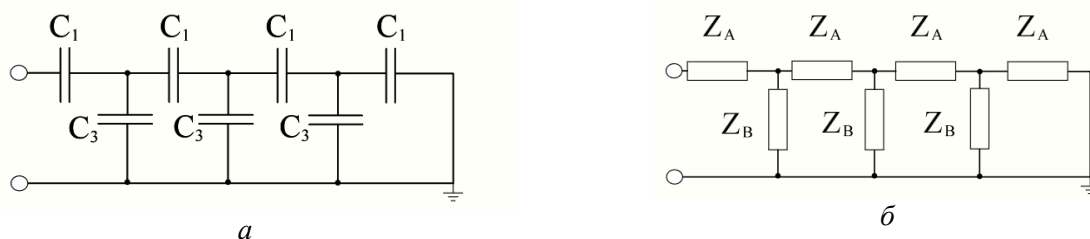


Рис. 3. Упрощенные схемы замещения гирлянды изоляторов:

а – с использованием электрической ёмкости, *б* – с использованием реактивных сопротивлений

Для того чтобы рассчитать падение напряжения на каждом элементе, перейдем к реактивным сопротивлениям и найдем эквивалентное сопротивление схемы (рис. 3, б). Примем, что ёмкостная связь частей изолятора с проводником на протяжении всего изолятора не изменяется.

$$Z' = \frac{Z_A Z_B}{Z_A + Z_B} \quad Z'' = \frac{(Z_A + Z') Z_B}{Z_A + Z' + Z_B}.$$

$$Z_{\text{экв}} = Z_A + \frac{(Z_A + Z'') Z_B}{Z_A + Z'' + Z_B}.$$

Найдем общий ток в цепи:

$$I_{\text{общ}} = \frac{U}{Z_{\text{экв}}}.$$

Далее найдем падение напряжения на конденсаторе:

$$U_1 = U - I \cdot Z_A.$$

Построим диаграмму зависимости падения напряжения от количества изоляторов в гирлянде. По диаграмме (рис. 4) видно, что если бы ёмкость изоляторов гирлянды была $C_k = C/n$, где n – число изоляторов гирлянды, и было намного больше значений ёмкостных связей, то напряжения распределялись бы практически с линейной зависимостью, однако реальная характеристика показывает, что влияние ёмкостных связей существенно снижает напряжение на каждом изоляторе, поскольку при большой длине гирлянды ёмкость C_2 составляет порядка 10^{-12} Ф [10].

Из полученных зависимостей следует, что на изоляторе 4 падение напряжения составляет порядка 6 кВ. Подключив параллельно четвертому изолятору через управляемый электронный ключ конденсатор, можно организовать отбор электрической мощности без необходимости завешивания дополнительного изолированного проводника. Логика управления электронным ключом совпадает с работой однополупериодного выпрямителя, однако непосредственное применение высоковольтных диодов в данном случае практически затруднено ввиду очень малых зарядных токов, протекающих в течение положительного полупериода напряжения, падающего на конденсаторе. Для управления процессом преобразования переменного тока на стадии заряда ёмкости необходимо выполнить разработку высоковольтного управляющего ключа, реализованного, например, на высоковольтных полевых транзисторах с индуцированным каналом. Такое решение позволит избавиться схему от избыточных потерь энергии в цепях управления, одновременно обеспечив процесс выпрямления переменного напряжения. Следует учитывать тот факт, что при подключении дополнительного конденсатора изменится распределение падений напряжения вдоль гирлянды изоляторов. Примем, что ёмкость подключаемого конденсатора равна ёмкости одного изолятора в гирлянде и рассчитаем зависимость падений напряжения на изоляторах. Указанная зависимость примет вид, показанный на рис. 5. В случае подключенного конденсатора параллельно последнему звену гирлянды падение напряжения на четвертом изоляторе составляет порядка 3,5 кВ.

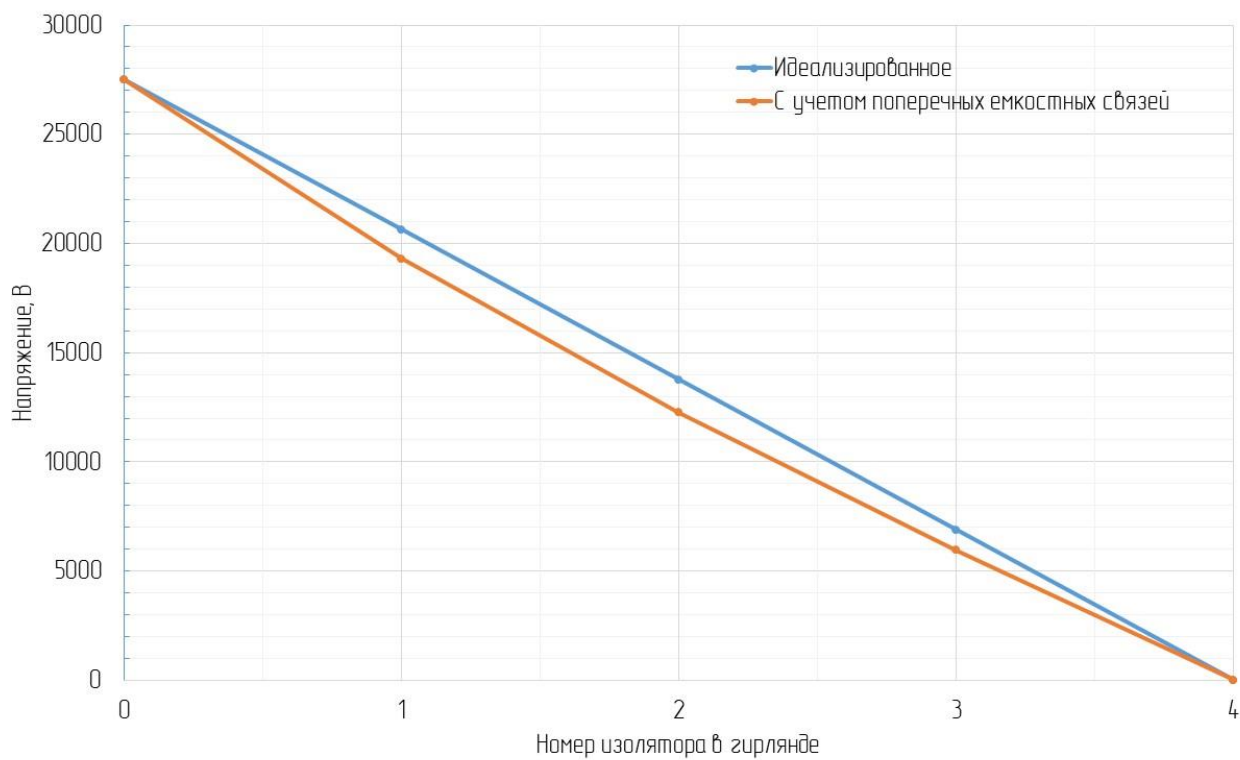


Рис. 4. Зависимость падения напряжения от количества изоляторов

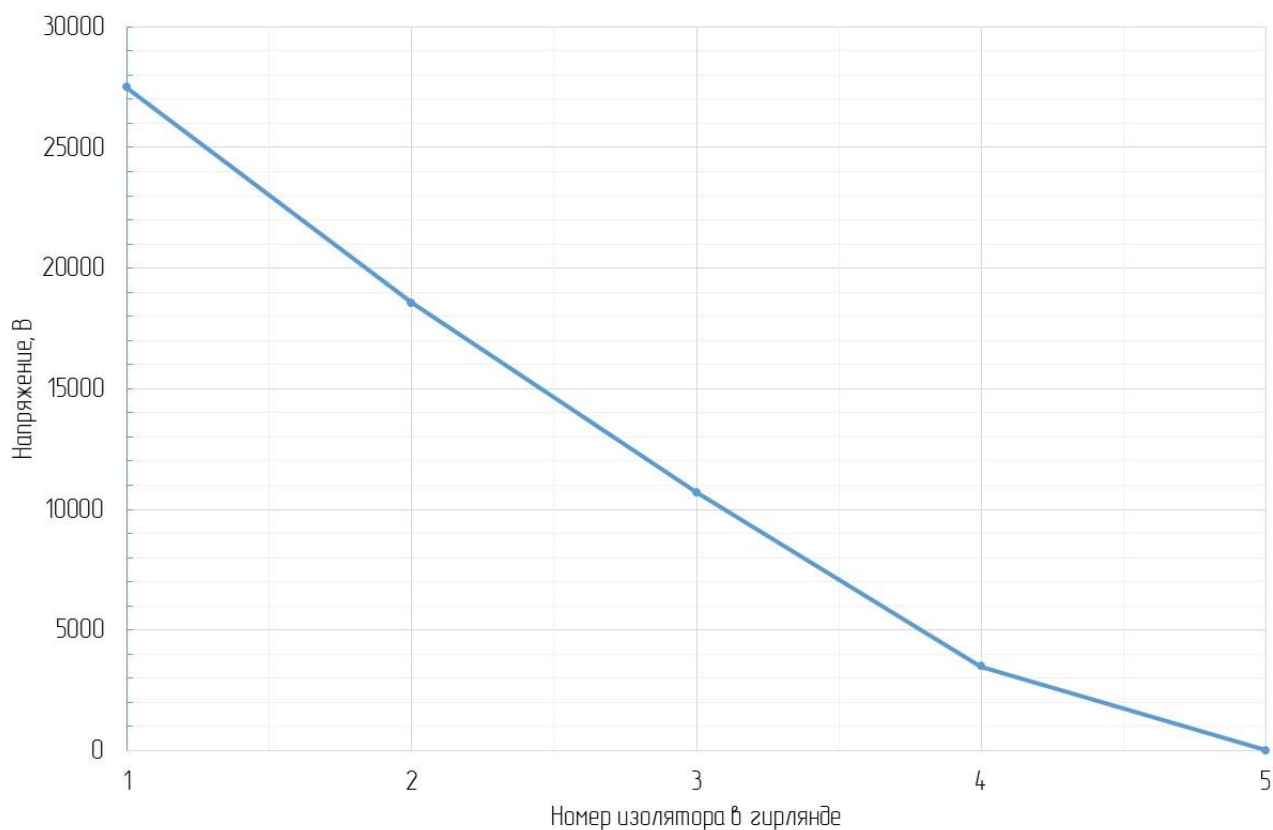


Рис. 5. Зависимость падения напряжения от количества изоляторов

Очевидно, что непосредственное подключение системы отбора мощности к существующим гирляндам изоляторов приведет к снижению величины разрядного напряжения всей гирлянды, которое будет вызвано шунтированием последнего изолятора. Для решения данной проблемы предлагается снабдить систему отбора мощности собственным изолятором, который можно включать в рассечку между несущей конструкцией и существующей гирляндой изоляторов. Такое решение позволит избежать необходимости использовать защитную аппаратуру, так как перекрытие дополнительного изолятора не скажется на надёжности работы существующей гирлянды изоляторов. Снижение высоты подвески проводов системы ДПП при этом будет несущественным для нормального функционирования.

Выводы

Результаты исследования, изложенные в статье, свидетельствуют о возможности организации отбора мощности от питающей линии за счет подключения к первому изолятору в гирлянде изоляторов. Отбираемая разность потенциалов и сопротивление ёмкостной связи с питающей линией в таком случае будет сопоставимо с аналогичными параметрами при использовании антенны – дополнительного проводника, завешиваемого с полевой стороны между опорами контактной сети. Дальнейшее развитие данной темы требует практической разработки схемного решения преобразователя, позволяющего осуществить конвертацию в синусоидальное напряжение высокого напряжения, получаемого через ёмкостную связь, при условии ничтожно малых токов ёмкостной связи.

Список литературы

1 **Грачева, Е. И.** Учет холостого хода трансформаторов в период эксплуатации при расчете потерь электроэнергии в распределительных сетях / Е. И. Грачева, О. В. Наумов, Р. Р. Садыков // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2016. – № 1–2. – С. 53–63. – EDN VXLFSB.

2 **Кушпиль, И. В.** Использование фотоэлектрических модулей для питания устройств железнодорожной автоматики и телемеханики / И. В. Кушпиль, А. Н. Бут // Автоматика на транспорте. – 2017. – Т. 3, № 2. – С. 202–215. – EDN ZFNEWP.

3 **Микаэльян, Е. Ю.** Моделирование электромагнитных полей участка железной дороги переменного тока / Е. Ю. Микаэльян, В. Н. Черных // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 2. – URL: ivdon.ru/magazine/archive/n8y2019/6155.

4 **Осипов, В. А.** Энергия электромагнитного поля контактной сети и способы ее использования / В. А. Осипов, С. С. Колесников // Приоритетные направления развития науки и образования : материалы IX Междунар. научно-практической конференции (Чебоксары, 26 авг. 2016 г.). – Чебоксары : ЦНС «Интерактив плюс», 2016. – С. 164–166. – ISSN 2411-9652.

5 **Бодров, П. А.** Инженерная методика для расчета емкостных связей в многопроводных системах «контактная сеть – воздушная линия» / П. А. Бодров, Н. А. Попова, Ю. Г. Семенов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 2. – С. 132–139. – ISSN 0201-727X.

References

1 **Gracheva, E. I.** Accounting losses of idling of transformers in the period of exploitation at calculation losses of the electric power in distributive networks / E. I. Gracheva, O. V. Naumov, R. R. Sadykov // News of higher educational institutions. Energy problems. – 2016. – No. 1–2. – P. 53–63. – EDN VXLFSB.

2 **Kushpil, I. V.** Use photovoltaic modules for powering signaling centralization and blocking devices / I. V. Kushpil, A. N. But // Automation in transport. – 2017. – Vol. 3, No. 2. – P. 202–215. – EDN ZFNEWP.

3 **Mikaeliyan, E. Yu.** Investigation of electromagnetic fields of an AC railway section / E. Yu. Mikaeliyan, V. N. Chernykh // Inzhenernyy vestnik Dona. – 2019. – No. 2. – URL: ivdon.ru/magazine/archive/n8y2019/6155.

4 **Osipov, V. A.** Electromagnetic field energy of the contact network and ways to use it // V. A. Osipov, S. S. Kolesnikov // Priority directions for the development of science and education: materials of the IX International Scientific and Practical Conference (Cheboksary, Aug. 26, 2016). – Cheboksary : Central Research Center «Interactive Plus», 2016. – P. 164–166. – ISSN 2411-9652.

5 **Bodrov, P. A.** Engineering methodology for calculation of capacitive connections in multiconductor systems "contact network – overhead line" / P. A. Bodrov, N. A. Popova, Yu. G. Semenov // Vestnik Rostovskogo

6 **Капкаев, А. А.** О возможности применения бесконтактной передачи электроэнергии для питания маломощных потребителей от проводников контактной сети электрических железных дорог переменного тока / А. А. Капкаев, А. В. Бойко // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 2. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2019/6158.

7 **Бессонов, Л. А.** Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле : учебник / Л. А. Бессонов. – 10-е изд., стереотипное. – Москва : Гардарики, 2003. – 317 с. – ISBN 5-8297-0158-8.

8 **Базуткин, В. В.** Техника высоких напряжений: изоляция и перенапряжения в электрических системах : учебник для вузов / В. В. Базуткин, В. П. Ларионов, Ю. С. Пипталь ; Под ред. В. П. Ларионова. – 3-е изд., перераб и доп. – Москва : Энергосамиздат, 1986. – 464 с.

9 **СТО 56947007-29.240.059-2010.** Инструкция по выбору изоляции электроустановок : утвержден и введен в действие : приказом ПАО «ФСК ЕЭС» от 22.09.2010 № 714 ИЗМЕНЕНИЯ ВВЕДЕНЫ : Приказом ПАО «ФСК ЕЭС» / ПАО «Россети» от 29.12.2020 № 430 / 624, пункт 10.1.

10 **Кузнецов, А. А.** Моделирование и экспериментальные исследования распределения электростатического поля на гирляндах подвесных фарфоровых изоляторов / А. А. Кузнецов, А. Ю. Кузьменко, А. Г. Зверев // Известия Транссиба. – 2016. – № 3(27). – С. 91–99. – EDN XDEITH.

Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2019. – No. 2. – P. 132–139. – ISSN 0201-727X.

6 **Капкаев, А. А.** On the possibility of application of contactless transmission of electric power for supplying low-power consumers from conductors of the contact network of AC electric railways / A. A. Kapkaev, A. V. Boyko // Inzhenernyy vestnik Dona. – 2019. – No. 2. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2019/6158.

7 **Bessonov, L. A.** Theoretical foundations of electrical engineering. Electromagnetic field : textbook / L. A. Bessonov. – 10th ed., stereotypical. – Moscow : Gardariki, 2003. – 317 p. – ISBN 5-8297-0158-8.

8 **Bazutkin, V. V.** High voltage engineering: isolation and overvoltage in electrical systems : textbook for universities / V. V. Bazutkin, V. P. Larionov, Yu. S. Piptal, Edited by V. P. Larionov. – 3rd ed., revised and supplemented. – Moscow : Energosamizdat, 1986. – 464 p.

9 **СТО 56947007-29.240.059-2010.** Instructions for choosing the insulation of electrical installations : approved and put into effect : by Order of PJSC FGC UES dated 09/22/2010 No. 714 AMENDMENTS INTRODUCED : By Order of PJSC FGC UES / PJSC ROSSETI dated 12/29/2020 No. 430 / 624, paragraph 10.1.

10 **Kuznecov, A. A.** Modeling and experimental investigation of the distribution of the electrostatic field on a garland suspended porcelain insulators / A. A. Kuznecov, A. Ju. Kuzmenko, A. G. Zverev // Izvestiya Transsiba. – 2016. – No. 3(27). – P. 91–99. – EDN XDEITH.

V. A. Osipov, A. V. Boyko, V. N. Chernykh

OPTIONS FOR THE ORGANIZATION OF CAPACITIVE POWER TAKE-OFF ON ELECTRIFIED AC RAILWAYS

Abstract. The research presented in this paper is aimed at solving the problem of organizing power supply points for electric consumers located along the track of electrified railways. Such power points are primarily designed to power low-power consumers, such as measuring, monitoring, surveillance and lighting devices. As a basic energy source, the paper proposes to use the voltage distributed along the circuit of insulators in the garland, namely, the voltage drop on the first insulator having direct contact with the grounded armature. As an example, the option of connecting to the DPR lines laid along the track of electrified railways is proposed. This approach can be used in systems that allow the extraction of electricity with its subsequent conversion and accumulation by a special device.

Keywords: capacitive voltage divider, power supply, capacitive coupling, contact network, electric railways.

For citation: Osipov, V. A. Options for the organization of capacitive power take-off on electrified AC railways / V. A. Osipov, A. V. Boyko, V. N. Chernykh // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 4. – P. 211–218. – DOI 10.46973/0201–727X_2023_4_211.

Сведения об авторах

Осипов Владимир Александрович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Теоретические основы электротехники»,
заведующий кафедрой,
декан гуманитарного факультета,
e-mail: dw_@rambler.ru

Бойко Андрей Владимирович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Теоретические основы электротехники»,
ассистент,
e-mail: andreibojko111@yandex.ru

Черных Владимир Николаевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Теоретические основы электротехники»,
ассистент,
e-mail: v014nd94@yandex.ru

Information about the authors

Osipov Vladimir Alexandrovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Theoretical Basis of Electrical Engineering»,
Head of the Chair,
Dean of Humanitarian Faculty,
E-mail: dw_@rambler.ru

Boyko Andrey Vladimirovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Theoretical Basis of Electrical Engineering»,
Assistant,
e-mail: andreibojko111@yandex.ru

Chernykh Vladimir Nikolaevich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Theoretical Basis of Electrical Engineering»,
Assistant,
e-mail: v014nd94@yandex.ru