

4.3.2. ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ, ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ И ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)

Научная статья

УДК 632.311

DOI: 10.53914/issn2071-2243_2026_2_102

EDN: HFYLGs

Основные показатели надежности электроснабжения сельских потребителей от электрических сетей железных дорог

Сергей Викторович Кириллов¹, Александр Владимирович Виноградов^{2✉},
Алина Васильевна Виноградова³

¹ Проектно-конструкторское бюро по инфраструктуре – филиал ОАО «Российские железные дороги», Москва, Россия; Мичуринский государственный аграрный университет, Мичуринск, Россия

^{2,3} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия, info@rgau-msha.ru

^{2,3} Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина, Орел, Россия

³ Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Россия.

² winaleksandr@gmail.com✉

Аннотация. В электросетевых компаниях на основании учета количества и продолжительности отключений рассчитываются такие статистические показатели, как поток отказов, среднее время восстановления электроснабжения и др., которые позволяют анализировать ситуацию с надежностью электроснабжения потребителей. Электрические сети железных дорог являются частью железнодорожной инфраструктуры и имеют существенные особенности по сравнению с классическими схемами сетей других электросетевых организаций, обуславливающие различие причин отключений и их продолжительности, для учета которых требуется разработка специализированных основных показателей надежности электроснабжения потребителей, получающих питание от электрических сетей железных дорог. В качестве методологической основы исследования использованы общенаучные методы, методы теории надежности. Информационно-эмпирическую базу составили статистические данные за 2020–2024 гг. по количеству аварийных, плановых и внеплановых отключений, а также длительности перерывов электроснабжения сельских населенных пунктов и предприятий АПК, питаемых от электрических сетей железных дорог, выполненных по системе «два дополнительных провода – рельс» номинальным напряжением 25 кВ. Анализируемые сети территориально расположены в трех регионах Центрального федерального округа России. Составлен перечень причин отключений и представлена система показателей надежности электроснабжения потребителей, учитывающая специфику электрических сетей железных дорог. В дополнение к известным показателям надежности электрических сетей предложены показатели, обусловленные особенностями технического исполнения данных сетей – количество и продолжительность отключений, связанных с переводом питания ЛЭП на другой источник, работами на инфраструктуре железной дороги. По результатам исследования сделан вывод, что применение предложенной системы показателей позволяет эффективно осуществлять обработку и анализ информации об отключениях в электрических сетях железных дорог.

Ключевые слова: российские железные дороги, электрические сети, электроснабжение, частота отключений, недоотпуск электроэнергии, отключенная мощность, надежность электроснабжения, показатели надежности

Для цитирования: Кириллов С.В., Виноградов А.В., Виноградова А.В. Основные показатели надежности электроснабжения сельских потребителей от электрических сетей железных дорог // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2026. Т. 19, № 2(89). С. 102–117. https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2026_2_102–117.

4.3.2. ELECTROTECHNICS, ELECTRICAL EQUIPMENT AND ELECTRICAL POWER SUPPLY FOR AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX (ENGINEERING SCIENCES)

Original article

Key indicators of power supply reliability of rural consumers fed from railway electrical grids

Sergey V. Kirillov¹, Aleksandr V. Vinogradov^{2✉}, Alina V. Vinogradova³

¹ Infrastructure Design Bureau – Branch of Russian Railways, Moscow, Russia; Michurinsk State Agrarian University, Michurinsk, Russia

^{2,3} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia

^{2,3} Orel State Agrarian University named after N.V. Parakhin, Orel, Russia

³ Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia

² winaleksandr@gmail.com[✉]

Abstract. In electric grid companies, statistical indicators such as the failure rate, the average recovery time, etc. are calculated based on the number of outages and their duration, which make it possible to analyze the situation with the reliability of power supply to consumers. Railway electric grids are part of the railway infrastructure and have significant differences from the classical schemes of other electric grid organizations, which determine the difference in the causes of outages and their duration, which require the development of specialized basic indicators of the reliability of electricity supply to consumers fed from railway electric grids. General scientific methods and methods of reliability theory were used as the methodological basis of the research. The information and empirical base was compiled by statistical data for 2020-2024 on the number of emergency, planned and unplanned outages, as well as the duration of power outages in rural settlements and agricultural enterprises fed from railway electric grids made according to the “two wires – rail” (TWR) system with a rated voltage of 25 kV. The analyzed networks are geographically located in three regions of the Central Federal District of Russia. A list of reasons for outages has been compiled and a system of indicators for the reliability of electricity supply to consumers has been presented, taking into account the specifics of railway electrical grids. In addition to the well-known reliability indicators of electrical networks, indicators related to the technical features of these grids are proposed, such as the number and duration of outages associated with switching power lines to another source, and work on the railway infrastructure. Based on the results of the study, it was concluded that the application of the proposed system of indicators makes it possible to effectively process and analyze information on outages in railway electric grids.

Keywords: Russian railways, electric power grids, power supply, frequency of outages, under-supply of electricity, disconnected power, reliability of power supply, reliability indicators

For citation: Kirillov S.V., Vinogradov A.V., Vinogradova A.V. Key indicators of power supply reliability of rural consumers fed from railway electrical grids. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2026;19(2):102-117. (In Russ.). https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2026_2_102-117.

Введение

Открытое акционерное общество «Российские железные дороги» является второй по величине электросетевой организацией в Российской Федерации после ПАО «Российские сети». На балансе компании сосредоточено значительное количество электросетевых активов (подстанций и линий электропередач). Значительная часть сторонних потребителей, включая сельские поселения и предприятия агропромышленного комплекса (АПК), которые расположены вблизи железных дорог, используют железнодорожные электрические сети в качестве источника электроснабжения. Это стало возможным благодаря техническим решениям, заложенным при проектировании и строительстве электрических железных дорог [13].

Железнодорожные системы электроснабжения сельских потребителей имеют распространенную функциональную реализацию по уровням напряжений для экономичной передачи энергии: ВН – СН – НН. В качестве центров питания используются тяговые подстанции, питаемые высоким напряжением (ВН) уровня 220 или 110 кВ [6, 13]. Сети низкого напряжения (НН) в большинстве своем не отличаются от широко применяемых в РФ распределительных сетей напряжением 0,4 (0,23) кВ с глухозаземленной нейтралью [5, 6, 13], и данный сегмент в системе электроснабжения достаточно изучен, включая показатели работы данных сетей [1–4, 11, 15].

Особенностью питающих сетей электрических железных дорог является то, что в качестве сети среднего уровня напряжения (СН) используется система «два дополнительных провода – рельс» (ДПР) номинальным напряжением 25 кВ, которая расположена на опорных конструкциях контактной сети, и в качестве одного проводника фазы высокого напряжения используются рельсы. Данная система электроснабжения является частью инфраструктуры железной дороги, особенности которой и возникающие проблемы при ее эксплуатации более подробно рассмотрены Л.Н. Герасимовым [7], С.В. Кирилловым и А.В. Виноградовым [13], А.В. Крюковым и И.А. Любченко [16], Е.А. Третьяковым [23] и др.

Надежность обеспечения потребителей электрической энергией и ее качество входят в сферу ответственности субъектов электроэнергетики, обеспечивающих поставки электрической энергии (энергосбытовые организации, гарантирующие поставщики, системообразующие территориальные сетевые организации и территориальные сетевые организации) [19]. Указанные субъекты отвечают перед потребителями за неисполнение или ненадлежащее исполнение обязательств по соответствующим договорам, в том числе за надежность снабжения их электрической энергией и ее качество в соответствии с техническими регламентами и иными обязательными требованиями. В договорах оказания услуг по передаче электрической энергии и энергоснабжения определяется категория надежности снабжения потребителя электрической энергией. Для первой и второй категорий надежности допустимое число часов отключения в год и сроки восстановления энергоснабжения определяются сторонами в зависимости от конкретных параметров схемы электроснабжения, наличия резервных источников питания и особенностей технологического процесса потребителя, но не могут быть более соответствующих величин, предусмотренных для третьей категории надежности. Для третьей категории надежности допустимое число часов отключения в год составляет 72 часа, но не более 24 часов подряд, включая срок восстановления энергоснабжения, за исключением случаев, когда для производства ремонта объектов электросетевого хозяйства необходимы более длительные сроки, согласованные с федеральным органом исполнительной власти по государственному энергетическому надзору [19].

Показатели надежности электроснабжения сельских потребителей, такие как количество отказов и плановых отключений, время восстановления и время плановых перерывов, суммарное время перерывов в электроснабжении относятся к зависимым от воздействия природных факторов, технического состояния электрических сетей и сетей электроснабжения, а также от проведения плановых и неплановых работ на устройствах электроснабжения [1, 16, 22].

Большинство научных работ по надежности электроснабжения посвящено анализу аварийных отключений, в том числе их причин, характерных для разных регионов России и других стран, величины недоотпуска электроэнергии с учетом времени года и др. [3, 8, 11, 14, 15]. В некоторых работах рассматриваются особенности функционирования и показателей надежности системы электроснабжения электрических железных дорог, в первую очередь как системы тягового электроснабжения [1, 6, 7] и др.

Следует отметить, что имеются определенные особенности реализации электрических сетей железных дорог, которые оказывают существенное влияние на эксплуатационные показатели электроснабжения различных потребителей, в том числе сельскохозяйственных, которые подробно рассмотрены в [12, 13, 16]. В этой связи необходим комплексный подход для оценки надежности электроснабжения сельских потребителей от электрических сетей железных дорог, основанный на анализе специфики причин нарушения их электроснабжения.

Материалы и методы

В качестве методологической основы исследования применялись общенаучные методы, методы теории надежности. В частности, использовались расчетные показатели надежности согласно [8, 9, 17, 18, 20, 21], а также вводились новые показатели с учетом имеющейся специфики работы системы электроснабжения потребителей от электрических сетей железных дорог.

Информационно-эмпирическую базу составили государственные и отраслевые нормативные документы, статистические данные за 2020–2024 гг. по количеству аварийных, плановых и внеплановых отключений, а также длительности перерывов электроснабжения сельских населенных пунктов и предприятий АПК, питаемых от электрических сетей железных дорог, выполненных по системе «два дополнительных

провода – рельс» номинальным напряжением 25 кВ. Анализируемые сети территориально расположены в трех регионах Центрального федерального округа России.

В ходе анализа статистических данных по количеству отключений потребителей, питаемых от электрических сетей железных дорог, установлено, что все отключения можно разделить на следующие виды:

- аварийные;
- для производства работ на линиях электропередачи, подстанциях и другом оборудовании, участвующем в электроснабжении;
- для переключений питания ВЛ 25 кВ на другой смежный питающий центр (тяговую подстанцию);
- для проведения работ на инфраструктуре железной дороги и объектах, имеющих приближение к железной дороге (путепроводы, мосты, здания, высотные конструкции и т. п.), которые требуют снятия напряжения с линий электропередачи и других устройств электроснабжения по требованиям электробезопасности;
- для проведения работ на инфраструктуре железной дороги в связи с разборкой рельсового пути, участвующего в питании подстанций 25/0,4 кВ системы ДПР в качестве проводника фазы высокого напряжения.

Причины аварийных отключений в электрических сетях железной дороги практически совпадают с причинами отключений в классических питающих и распределительных сетях сетевых компаний РФ:

- аварии или повреждения линий электропередачи и других устройств электроснабжения (высоковольтные линии электропередачи 25 кВ или трансформаторные подстанции 25/0,4 кВ);
- падение дерева, нарушение технологии работ на смежных устройствах (падение предметов, нарушение минимально допустимых расстояний при работе машин и механизмов и др.) и собственные повреждения оборудования элементов системы электроснабжения;
- прекращение внешнего электроснабжения;
- природные факторы (атмосферные перенапряжения, ветровые явления, гололедообразование и налипание снега на провода и т. п.);
- воздействие животных или птиц;
- ошибочные действия персонала;
- неселективная работа устройств релейной защиты и автоматики (ложные срабатывания и несрабатывания устройств РЗА) и др.

Производство работ на линиях электропередачи, подстанциях и другом оборудовании, участвующем в электроснабжении, является также стандартной причиной, и данный статистический показатель отключений учитывается в классических питающих и распределительных сетях электросетевых организаций РФ. Отключения, связанные с данными работами, разделяются на плановые, которые выполняются в соответствии с графиками и регламентами обслуживания устройств электроснабжения, и преднамеренные, которые предусматриваются в связи с выявленными неисправностями в ходе осмотров и различных видов диагностики.

Следует отметить, что система железнодорожного электроснабжения отличается от классических питающих и распределительных сетей. Схема питания ЛЭП ДПР обладает возможностью подать напряжение на линию от одной из двух питающих тяговых подстанций. В нормальном режиме ЛЭП ДПР на всем протяжении между подстанциями питается по консольной схеме от одной из смежных подстанций. Данная линия может секционироваться с возможностью выделения отдельной станции или перегона для производства работ на определенном участке железной дороги. На рисунке 1 представлена схема питания и секционирования контактной сети и ЛЭП ДПР номинальным напряжением 25 кВ.

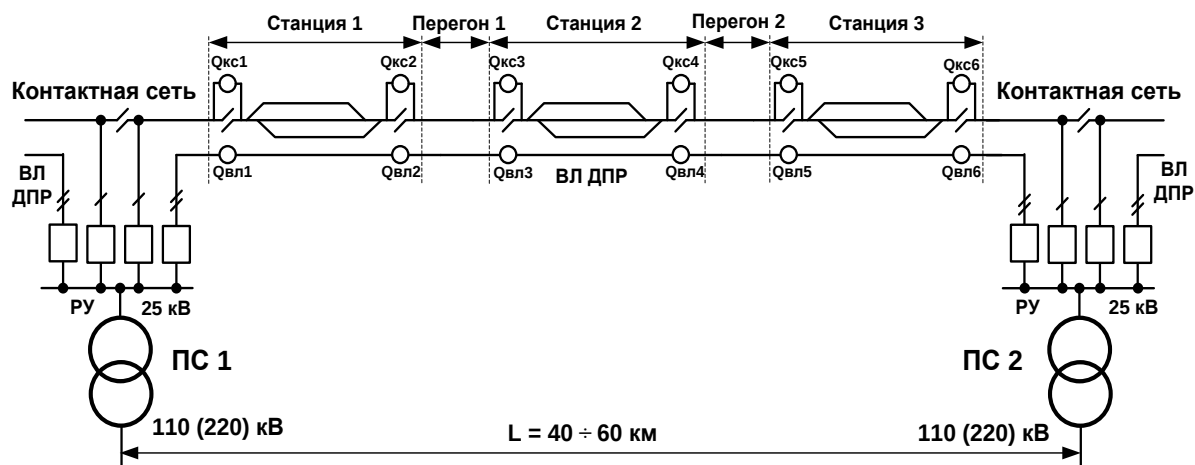


Рис. 1. Схема питания и секционирования контактной сети и ВЛ ДПР при системе тягового электроснабжения 25 кВ: ПС 1, ПС 2 – тяговые подстанции переменного тока номинальным напряжением 25 кВ; ВЛ ДПР – воздушная линия системы ДПР; $Q_{ксi}$ – разъединители, секционирующие участки контактной сети; $Q_{влj}$ – разъединители, секционирующие участки воздушной линии ДПР

С учетом схемы, представленной на рисунке 1, подготовка рабочего места на инфраструктуре железной дороги производится по следующему алгоритму:

- 1) отключаются ЛЭП ДПР на всем протяжении между смежными тяговыми подстанциями;
- 2) выделяется необходимый участок на данной ЛЭП ДПР путем отключения необходимых разъединителей, секционирующих участки воздушной линии ДПР – $Q_{влj}$;
- 3) подается напряжение на ЛЭП ДПР от смежных тяговых подстанций.

Восстановление подачи напряжения производится в обратном порядке с обеспечением односторонней схемы питания.

Таким образом, имеют место периодические отключения ЛЭП ДПР на всем протяжении межподстанционной зоны, в том числе для производства переключений питания ВЛ 25 кВ на другой смежный питающий центр (тяговую подстанцию), которые необходимо учитывать как отдельную причину, оказывающую влияние на надежность электроснабжения потребителей.

Также необходимо учитывать, что работы на железной дороге для обслуживания железнодорожной инфраструктуры, связанной с обеспечением движения поездов, проводятся в «окна» в соответствии с требованиями [10]. Для производства работ на инфраструктуре железной дороги предоставляются «окна» продолжительностью от 2 до 4 часов. Для производства крупных работ предоставляются «окна» большей продолжительностью. «Окно» – это время, в течение которого прекращается движение поездов по перегону, отдельным путям перегона или путям железнодорожной станции для производства работ на инфраструктуре.

Длительное закрытие (перегона, пути перегона, станционного пути) – «окно», предоставляемое для ремонта, реконструкции или строительства железнодорожной инфраструктуры, продолжительностью более 24 часов.

Длительное закрытие (закрытый перегон) необходимо при производстве работ капитального характера по ремонту пути, контактной сети или других объектов широким фронтом, когда производится закрытие пути и снятие напряжения с контактной сети и линии ДПР на несколько суток (как правило, от 1 до 7), в среднем продолжительность одного закрытия составляет трое суток. Как правило, в данные «окна» произ-

водится разборка рельсового пути на протяжении нескольких километров, отсоединение заземления опор контактной сети от рельсов, демонтаж и монтаж устройств, расположенных на опорах контактной сети, в т. ч. устройств линии ДПР с отключением КТП 25/0,4 кВ, питающих сельскохозяйственных и других потребителей. И очевидно, что на весь период проведения «окна» с отключением линии ДПР отсутствует возможность подачи напряжения потребителям, подключенным к линии ДПР.

Таким образом, из-за особенностей технического исполнения линий ДПР, имеются еще две причины, оказывающие влияние на надежность электроснабжения – производство переключений и производство работ на инфраструктуре железной дороги.

Работы, производимые на инфраструктуре железной дороги, бывают плановые и внеплановые. Дата и период проведения плановых работ определяются на основании требований государственных и отраслевых нормативных документов с заданной периодичностью [10].

Внеплановые работы могут возникнуть по следующим причинам:

- отступления от норм эксплуатации и содержания объектов инфраструктуры железной дороги, выявленные средствами диагностики, в результате обходов и осмотров, например остродефектный рельс, нарушение состояния балластной призмы, наклон или повреждение опорной конструкции и т. п.;
- повреждения объектов инфраструктуры вследствие воздействия природных факторов, техногенных аварий, катастроф, незаконного вмешательства посторонних лиц и объектов и др.

При производстве работ на инфраструктуре железной дороги достаточно часто основанием отключений является совокупность указанных выше причин по требованиям электробезопасности, а также разборка рельсового пути.

В современных методиках и системах оценки показателей надежности электроснабжения отсутствует учет отдельных показателей по каждому из рассмотренных выше видов отключений. По мнению авторов, анализ каждого вида отключения позволит разработать меры по сокращению количества и продолжительности данных видов перерывов в электроснабжении. В связи с этим предлагается усовершенствованная система основных показателей надежности для условий системы электроснабжения, являющейся частью инфраструктуры железной дороги.

Результаты и их обсуждение

Предлагаемая система включает в себя приведенные ниже основные показатели надежности электроснабжения.

Частота отключений электроснабжения, вызванных аварийными отключениями (отказами), на 100 км линии (100 ед. оборудования), $\mu_{ав}$, год⁻¹, определяемая по формуле (1)

$$\mu_{ав} = \frac{n_{ав}^{cp}}{L_{ЛЭП}} \times 100, \quad (1)$$

где $n_{ав}^{cp}$ – среднее количество всех видов аварийных отключений (отказов) за год в ЛЭП одного класса напряжения на участке железной дороги;

$L_{ЛЭП}$ – протяженность ЛЭП электроснабжения потребителей одного класса напряжения участка железной дороги.

Частота отключений электроснабжения, связанных с плановыми работами в устройствах электроснабжения, приведенная к 100 км линии (100 ед. оборудования), $\mu_{пл.эс}$, год⁻¹, определяемая по формуле (2)

$$\mu_{\text{пл.эс}} = \frac{n_{\text{пл.эс}}^{\text{ср}}}{L_{\text{ЛЭП}}} \times 100, \quad (2)$$

где $n_{\text{пл.эс}}^{\text{ср}}$ – среднее количество плановых отключений ЛЭП за год, связанных с обслуживанием устройств электроснабжения, в линии одного класса напряжения на участке железной дороги.

Частота преднамеренных отключений электроснабжения, связанных с внеплановыми работами в устройствах электроснабжения, приведенная к 100 км линии (100 ед. оборудования), $\mu_{\text{пр.эс}}$, год⁻¹, определяемая по формуле (3)

$$\mu_{\text{пр.эс}} = \frac{n_{\text{пр.эс}}^{\text{ср}}}{L_{\text{ЛЭП}}} \times 100, \quad (3)$$

где $n_{\text{пр.эс}}^{\text{ср}}$ – среднее количество преднамеренных отключений ЛЭП за год для проведения внепланового ремонта устройств электроснабжения в линии одного класса напряжения на участке железной дороги.

Частота отключений, связанных с переключением на другой центр питания ЛЭП за год, в линии одного класса напряжения, приведенная к 100 км сети (100 ед. оборудования), $\mu_{\text{пер}}$, год⁻¹, определяемая по формуле (4)

$$\mu_{\text{пер}} = \frac{n_{\text{пер}}^{\text{ср}}}{L_{\text{ЛЭП}}} \times 100, \quad (4)$$

где $n_{\text{пер}}^{\text{ср}}$ – среднее количество отключений в год, связанных с переключением питания ЛЭП, в линии одного класса напряжения на участке железной дороги.

Частота отключений электроснабжения, связанных с плановыми работами на инфраструктуре железной дороги, приведенная к 100 км (100 ед. оборудования) линии, $\mu_{\text{пл.жд}}^{\text{ср}}$, год⁻¹, определяемая по формуле (5)

$$\mu_{\text{пл.жд}}^{\text{ср}} = \frac{n_{\text{пл.жд}}^{\text{ср}}}{L_{\text{ЛЭП}}} \times 100, \quad (5)$$

где $n_{\text{пл.жд}}^{\text{ср}}$ – среднее количество отключений ЛЭП за год, связанных с проведением плановых работ на инфраструктуре железной дороги, в линии одного класса напряжения на участке железной дороги.

Частота отключений электроснабжения, связанных с внеплановыми работами на инфраструктуре железной дороги, приведенная к 100 км (100 ед. оборудования) линии, $\mu_{\text{внепл.жд}}^{\text{ср}}$, год⁻¹, определяемая по формуле (6)

$$\mu_{\text{внепл.жд}}^{\text{ср}} = \frac{n_{\text{внепл.жд}}^{\text{ср}}}{L_{\text{ЛЭП}}} \times 100, \quad (6)$$

где $n_{\text{внепл.жд}}^{\text{ср}}$ – среднее количество отключений ЛЭП за год, связанных с проведением внеплановых работ на инфраструктуре железной дороги, в линии одного класса напряжения на участке железной дороги.

Среднее время продолжительности (математическое ожидание) одного отключения электроснабжения, вызванного аварийным отключением (отказом), приведенное к 100 км линии (100 ед. оборудования) за рассматриваемый период (год), $t_{\text{ав}}^{\text{ср}}$, часы, определяемое по формуле (7)

$$t_{ав}^{cp} = \frac{t_{ав}^{cp}}{n_{ав}^{cp}} \times \frac{100}{L_{ЛЭП}}, \quad (7)$$

где $\Sigma t_{ав}^{cp}$ – среднее значение суммарной продолжительности всех видов аварийных отключений (отказов) ЛЭП за год в линии одного класса напряжения участка железной дороги.

Среднее время продолжительности (математическое ожидание) одного отключения электроснабжения, вызванного плановыми работами в устройствах электроснабжения, приведенное к 100 км линии (100 ед. оборудования) за рассматриваемый период (год), $t_{пл.эс}^{cp}$, часы, определяемое по формуле (8)

$$t_{пл.эс}^{cp} = \frac{t_{пл.эс}^{cp}}{n_{пл.эс}^{cp}} \times \frac{100}{L_{ЛЭП}}, \quad (8)$$

где $t_{пл.эс}^{cp}$ – среднее значение суммарной продолжительности плановых отключений ЛЭП за год, связанных с обслуживанием устройств электроснабжения, в линии одного класса напряжения на участке железной дороги, часы.

Среднее время (математическое ожидание) продолжительности одного преднамеренного отключения электроснабжения, связанного с внеплановыми работами в устройствах электроснабжения, приведенное к 100 км линии (100 ед. оборудования) за рассматриваемый период (год), $t_{пр.эс}^{cp}$, часы, определяемое по формуле (9)

$$t_{пр.эс}^{cp} = \frac{t_{пр.эс}^{cp}}{n_{пр.эс}^{cp}} \times \frac{100}{L_{ЛЭП}}, \quad (9)$$

где $t_{пр.эс}^{cp}$ – среднее значение суммарной продолжительности преднамеренных отключений ЛЭП за год для проведения внепланового ремонта устройств электроснабжения в линии одного класса напряжения на участке железной дороги, часы.

Среднее время продолжительности (математическое ожидание) одного отключения электроснабжения, связанного с переключением на другой центр питания ЛЭП за год, в линии одного класса напряжения, приведенное 100 км сети (100 ед. оборудования) за рассматриваемый период (год), $t_{пер}^{cp}$, часы, определяемое по формуле (10)

$$t_{пер}^{cp} = \frac{t_{пер}^{cp}}{n_{пер}^{cp}} \times \frac{100}{L_{ЛЭП}}, \quad (10)$$

где $t_{пер}^{cp}$ – среднее значение суммарной продолжительности отключений за год, связанных с переключением питания ЛЭП, в линии одного класса напряжения на участке железной дороги, часы.

Среднее время продолжительности (математическое ожидание) одного отключения электроснабжения, связанного с плановыми работами на инфраструктуре железной дороги, приведенное на 100 км (100 ед. оборудования) линии за рассматриваемый период (год), $t_{пл.жд}^{cp}$, часы, определяемое по формуле (11)

$$t_{пл.жд}^{cp} = \frac{t_{пл.жд}^{cp}}{n_{пл.жд}^{cp}} \times \frac{100}{L_{ЛЭП}}, \quad (11)$$

где $t_{пл.жд}^{cp}$ – среднее значение суммарной продолжительности отключений ЛЭП за год, связанных с проведением плановых работ на инфраструктуре железной дороги, в линии одного класса напряжения на участке железной дороги.

Среднее время продолжительности (математическое ожидание) одного отключения электроснабжения, связанного с проведением внеплановых работ на инфраструктуре железной дороги, приведенное к 100 км (100 ед. оборудования) линии за рассматриваемый период (год), $t_{\text{внепл.жд}}^{\text{ср}}$, часы, определяемое по формуле (12)

$$t_{\text{внепл.жд}}^{\text{ср}} = \frac{t_{\text{внепл.жд}}^{\text{ср}}}{n_{\text{внепл.жд}}^{\text{ср}}} \times \frac{100}{L_{\text{ЛЭП}}}, \quad (12)$$

где $t_{\text{внепл.жд}}^{\text{ср}}$ – среднее значение суммарной продолжительности отключений ЛЭП за год, связанных с проведением внеплановых работ на инфраструктуре железной дороги, в линии одного класса напряжения на участке железной дороги.

Вероятность отсутствия напряжения из-за отказа (аварийного отключения) в устройствах электроснабжения, приведенная к 100 км линии (100 ед. оборудования) за рассматриваемый период (год) для участка железной дороги, $q_{\text{ав}}$, безразм., определяемая по формуле (13)

$$q_{\text{ав}} = \frac{\mu_{\text{ав}} \cdot t_{\text{ав}}^{\text{ср}}}{8760}. \quad (13)$$

Вероятность отсутствия электроснабжения, вызванного плановыми работами в устройствах электроснабжения, приведенная к 100 км линии (100 ед. оборудования) за рассматриваемый период (год) для участка железной дороги, $q_{\text{пл.эс}}$, безразм., определяемая по формуле (14)

$$q_{\text{пл.эс}} = \frac{\mu_{\text{пл.эс}} \cdot t_{\text{пл.эс}}^{\text{ср}}}{8760}. \quad (14)$$

Вероятность отсутствия электроснабжения, связанного с преднамеренными отключениями электроснабжения и проведением внеплановых работ в устройствах электроснабжения, приведенная к 100 км линии (100 ед. оборудования) за рассматриваемый период (год), $q_{\text{пр.эс}}$, безразм., определяемая по формуле (15)

$$q_{\text{пр.эс}} = \frac{\mu_{\text{пр.эс}} \cdot t_{\text{пр.эс}}^{\text{ср}}}{8760}. \quad (15)$$

Вероятность отсутствия электроснабжения, связанного с переключением на другой центр питания ЛЭП за год, в линии одного класса напряжения, приведенная к 100 км сети (100 ед. оборудования) за рассматриваемый период (год), $q_{\text{пер}}$, безразм., определяемая по формуле (16)

$$q_{\text{пер}} = \frac{\mu_{\text{пер}} \cdot t_{\text{пер}}^{\text{ср}}}{8760}. \quad (16)$$

Вероятность отсутствия электроснабжения, связанного с плановыми работами на инфраструктуре железной дороги, приведенная к 100 км (100 ед. оборудования) линии за рассматриваемый период (год), $q_{\text{пл.жд}}$, безразм., определяемая по формуле (17)

$$q_{\text{пл.жд}} = \frac{\mu_{\text{пл.жд}} \cdot t_{\text{пл.жд}}^{\text{ср}}}{8760}. \quad (17)$$

Вероятность отсутствия электроснабжения, связанного с внеплановыми работами на инфраструктуре железной дороги, приведенная к 100 км (100 ед. оборудования) линии за рассматриваемый период (год), $q_{\text{внепл.жд}}$, безразм., определяемая по формуле (18)

$$q_{\text{внепл.жд}} = \frac{\mu_{\text{внепл.жд}} \cdot t_{\text{пер}}^{\text{ср}}}{8760}. \quad (18)$$

Вероятность отсутствия электроснабжения потребителей на 100 км (100 ед. оборудования) линии на участке железной дороги за рассматриваемый период (год), q , безразм., определяемая по формуле (19)

$$q = q_{ав} + q_{пл.эс} + q_{пр.эс} + q_{пер} + q_{пл.жд} + q_{внепл.жд} \quad (19)$$

Коэффициент готовности (вероятность безотказной работы) системы электроснабжения на 100 км (100 ед. оборудования) линии на участке железной дороги за рассматриваемый период (год), P , безразм., определяемый по формуле (20)

$$P = 1 - q \quad (20)$$

Суммарное время перерывов электроснабжения потребителей на рассматриваемом участке железной дороги, $t_{сумм}$, часы, определяемое по формуле (21)

$$t_{сумм} = \sum t_{ав} + \sum t_{пл.эс} + \sum t_{пр.эс} + \sum t_{пер} + \sum t_{пл.жд} + \sum t_{внепл.жд}, \quad (21)$$

где $\sum t_{ав}$ – суммарная продолжительность аварийных отключений (отказов всех видов) ЛЭП за год в линии одного класса участка железной дороги, часы;

$\sum t_{пл.эс}$ – суммарная продолжительность плановых отключений ЛЭП за год, связанных с обслуживанием устройств электроснабжения, в линии одного класса напряжения на участке железной дороги, часы;

$\sum t_{пр.эс}$ – суммарная продолжительность преднамеренных отключений ЛЭП для проведения внепланового ремонта устройств электроснабжения в линии одного класса напряжения на участке железной дороги, часы;

$\sum t_{пер}$ – суммарная продолжительность отключений, связанных с переключением питания ЛЭП, за год в линии одного класса напряжения на участке железной дороги, часы;

$\sum t_{пл.жд}$ – суммарная продолжительность отключений ЛЭП за год, связанных с проведением плановых работ на инфраструктуре железной дороги, в линии одного класса напряжения на участке железной дороги, часы;

$\sum t_{внепл.жд}$ – суммарная продолжительность отключений ЛЭП за год, связанных с проведением внеплановых работ на инфраструктуре железной дороги, в линии одного класса напряжения на участке железной дороги, часы.

Средняя суммарная мощность потребителей, питаемых от ЛЭП одного класса напряжения на рассматриваемом участке железной дороги, МВт, определяемая по формуле (22)

$$\sum P_{ср.потр} = \frac{\sum W_{год}}{8760 - t_{сумм}}, \quad (22)$$

где $\sum W_{год}$ – общее количество электрической энергии, потребляемой всеми электроприемниками системы электроснабжения за рассматриваемый период (год), МВт·ч.

Количество недоотпущенной электроэнергии вследствие отсутствия электроснабжения (по всем причинам) за рассматриваемый период T ($T = 8760$ часов) на рассматриваемом участке железной дороги, $\Delta \mathcal{E}$, МВт·ч, определяемое по формуле (23)

$$\Delta \mathcal{E} = \sum P_{ср.потр} \cdot t_{сумм} \quad (23)$$

В таблице приведены результаты расчета с применением системы основных показателей надежности электроснабжения потребителей от сетей железных дорог за период 2020–2024 гг.

Пример результатов расчета основных показателей надежности электроснабжения потребителей от сетей железных дорог

№ п/п	Показатель	Ед. изм.	Значение показателя		
			Среднее	Мин.	Макс.
1	2	3	4	5	6
1	Параметр потока отказов (частота отключений), вызванных аварийными отключениями (отказами), на 100 км линии (100 ед. оборудования) в год	год ⁻¹	12,835	9,055	16,929
2	Частота отключений электроснабжения, связанных с плановыми работами в устройствах электроснабжения, на 100 км линии (100 ед. оборудования) в год	год ⁻¹	56,614	44,882	66,142
3	Частота преднамеренных отключений электроснабжения, связанных с внеплановым работами в устройствах электроснабжения, на 100 км линии (100 ед. оборудования) в год	год ⁻¹	6,535	3,543	8,661
4	Частота отключений, связанных с переключением на другой центр питания ЛЭП за год, в линии одного класса напряжения на 100 км сети	год ⁻¹	32,598	28,346	35,827
5	Частота отключений электроснабжения, связанных с плановыми работами на инфраструктуре железной дороги, на 100 км линии в год	год ⁻¹	84,173	28,346	98,031
6	Частота отключений электроснабжения, связанных с внеплановыми работами на инфраструктуре железной дороги, на 100 км линии в год	год ⁻¹	11,732	8,268	14,173
7	Среднее время продолжительности (математическое ожидание) одного отключения электроснабжения, вызванного аварийным отключением (отказом), на 100 км линии за рассматриваемый период (год)	часы	0,327	0,292	0,352
8	Среднее время продолжительности (математическое ожидание) одного отключения электроснабжения, вызванного плановыми работами в устройствах электроснабжения, на 100 км линии за рассматриваемый период (год)	часы	0,941	0,847	1,131
9	Среднее время продолжительности (математическое ожидание) одного преднамеренного отключения электроснабжения, связанного с внеплановыми работами в устройствах электроснабжения, на 100 км линии за рассматриваемый период (год)	часы	0,764	0,718	1,159
10	Среднее время продолжительности (математическое ожидание) одного отключения электроснабжения за год, связанного с переключением на другой центр питания ЛЭП, в линии одного класса напряжения на 100 км сети за рассматриваемый период (год)	часы	0,015	0,015	0,016
11	Среднее время продолжительности (математическое ожидание) одного отключения электроснабжения, связанного с плановыми работами на инфраструктуре железной дороги, на 100 км линии за рассматриваемый период (год)	часы	1,765	1,712	2,681
12	Среднее время продолжительности (математическое ожидание) одного отключения электроснабжения, связанного с проведением внеплановых работ на инфраструктуре железной дороги, на 100 км линии за рассматриваемый период (год)	часы	0,987	0,970	1,232
13	Среднее время продолжительности (математическое ожидание) всех отключений электроснабжения, на 100 км линии за рассматриваемый период (год)	часы	223,081	196,083	247,174
14	Вероятность отсутствия напряжения из-за отказа (аварийного отключения) в устройствах электроснабжения, на 100 км линии за рассматриваемый период (год) для участка железной дороги	безразм.	0,0004789	0,0003636	0,0006667
15	Вероятность отсутствия электроснабжения, вызванного плановыми работами в устройствах электроснабжения, на 100 км линии за рассматриваемый период (год) для участка железной дороги	безразм.	0,0060802	0,0057948	0,0063957

1	2	3	4	5	6
16	Вероятность отсутствия электроснабжения, связанного с преднамеренными отключениями электроснабжения и проведением с внеплановых работ в устройствах электроснабжения, на 100 км линии за рассматриваемый период (год)	безразм.	0,0005697	0,0004689	0,0007095
17	Вероятность отсутствия электроснабжения за год, связанного с переключением на другой центр питания ЛЭП, в линии одного класса напряжения на 100 км сети за рассматриваемый период (год)	безразм.	0,0000559	0,0000504	0,0000609
18	Вероятность отсутствия электроснабжения, связанного с плановыми работами на инфраструктуре железной дороги, на 100 км линии за рассматриваемый период (год)	безразм.	0,0169597	0,0145437	0,0188140
19	Вероятность отсутствия электроснабжения, связанного с внеплановыми работами на инфраструктуре железной дороги, на 100 км линии за рассматриваемый период (год)	безразм.	0,0013214	0,0011625	0,0015695
20	Средняя вероятность отсутствия электроснабжения потребителей на 100 км линии на участке железной дороги за рассматриваемый период (год)	безразм.	0,0254659	0,0223839	0,0282162
21	Коэффициент готовности (вероятность безотказной работы) системы электроснабжения на участке железной дороги за рассматриваемый период (год)	безразм.	0,9745341	0,9776161	0,9717838
22	Суммарное время перерывов электроснабжения потребителей на рассматриваемом участке железной дороги	часы	1439,23	1265,05	1594,67
23	Средняя суммарная мощность потребителей, питаемых от ЛЭП одного класса напряжения на рассматриваемом участке железной дороги	МВт	2,9214758	2,6574593	3,2925691
24	Количество недоотпущенной электроэнергии вследствие отсутствия электроснабжения (по всем причинам) за рассматриваемый период T ($T = 8760$ часов) на рассматриваемом участке железной дороги	МВт·ч	4204,67	3361,81	5250,561

Источник: составлено и рассчитано авторами.

На рисунке 2 представлена визуализация средних значений частоты отключений электроснабжения от сетей электрических дорог, рассчитанных за период наблюдений 2020–2024 гг. и приведенных к 100 км линии.

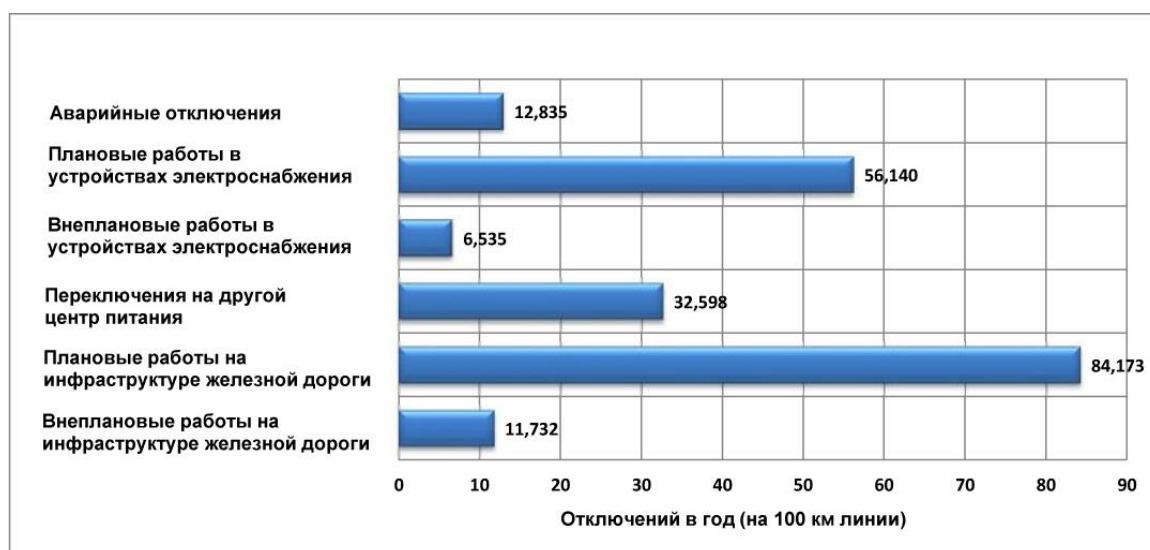


Рис. 2. Среднее значение частоты отключений электроснабжения потребителей от сетей электрических дорог в год, приведенное к 100 км линии, за период 2020–2024 гг.

Источник: составлено авторами по данным таблицы 3.

На рисунке 3 представлена визуализация значений средней продолжительности отключений электроснабжения от сетей электрических дорог, рассчитанных за период наблюдений 2020–2024 гг. и приведенных к 100 км линии.

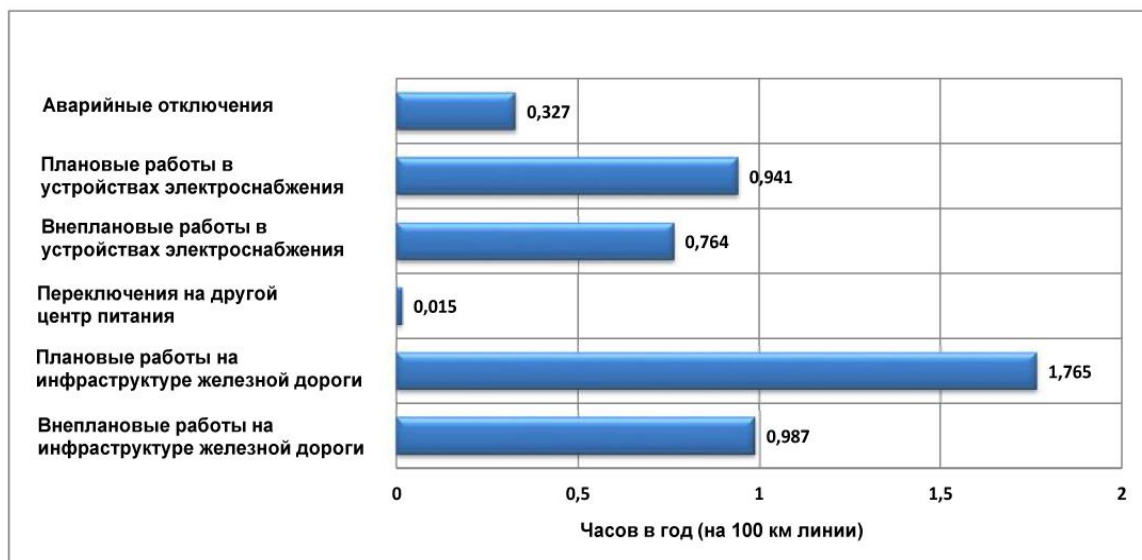


Рис. 3. Средняя продолжительность отключений электроснабжения потребителей от сетей электрических дорог в год, приведенная к 100 км линии, за период 2020–2024 гг.

Источник: составлено авторами по данным таблицы 3.

Таким образом, расширение перечня основных показателей надежности электроснабжения позволяет более объективно оценивать работу электрических сетей железных дорог в части электроснабжения сельских потребителей. Анализ абсолютных и средних значений отключений как в количественном выражении, так и по их продолжительности показывает, что главной причиной перерывов в электроснабжении являются плановые и внеплановые работы на инфраструктуре электрической железной дороги. В этой связи перед планированием данных работ и отключением электроснабжения необходимо принимать меры организационного и технического характера, направленные на сокращение количества и продолжительности отключений или на обеспечение электроснабжения различными техническими методами, более подробно изложенными в [12, 13, 22].

На основе предложенных основных показателей надежности можно определить и другие параметры по каждому виду отключений и в привязке к конкретному участку железной дороги. Среди расчетных показателей следует отметить такие, как вероятность безотказной работы, расчетное время перерывов в электроснабжении и др. С учетом приведенных в таблице данных целесообразно разработать практические рекомендации по повышению надежности электроснабжения потребителей на рассматриваемом участке железной дороги.

Выводы

Обзор литературных источников и проведенный анализ условий эксплуатации электроснабжения потребителей от сетей железных дорог выявил необходимость совершенствования основных показателей надежности электроснабжения потребителей, питаемых от электрических сетей железных дорог с учетом особенностей, характеризующих как перерывы в электроснабжении, связанные с эксплуатацией самой системы электроснабжения, так и перерывы, обусловленные особенностями железнодорожных электрических сетей и их интеграции в инфраструктуру железной дороги.

При анализе надежности электроснабжения потребителей, питаемых от электрических сетей железных дорог, необходимо рассчитывать предложенные дополнительные показатели надежности электроснабжения производимых работ на инфраструктуре железной дороги, в том числе отключений электроснабжения, связанных с переключением на другой центр питания, и отключений, вызванных производством плановых и внеплановых работ на инфраструктуре железной дороги.

Выполненный по предложенной системе показателей надежности электроснабжения потребителей от сетей железных дорог расчет (на примере отдельного участка железной дороги) подтвердил их применимость. Выявлено, что основной причиной перерывов в электроснабжении потребителей являются плановые и внеплановые работы на инфраструктуре электрической железной дороги. Так, количество аварийных отключений в год на 100 км линий составило 12,8, а количество плановых отключений – более 84. Расчеты на основе предложенной системы показателей рационально использовать для проведения анализа надежности электроснабжения и разработки мероприятий по ее повышению.

Список источников

1. Алексеенко В.А., Крюков А.В. Применение статистических методов для анализа повреждаемости устройств электроснабжения железных дорог // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2011. № 1(29). С. 101–105.
2. Бандурин И., Садченкова О. Повышение надежности электроснабжения распределительных сетей сельскохозяйственного назначения // Электроэнергия. Передача и распределение. 2015. № 5(32). С. 46–52.
3. Васильева Т.Н., Лопатин Е.И. Анализ причин отказов электрического оборудования распределительных сетей 0,38...10 кВ // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. 2011. № 3(11). С. 64–66.
4. Виноградова А.В., Виноградов А.В. Удельные показатели надежности по причинам отключений электрических сетей 0,4 кВ // Техника и оборудование для села. 2025. № 7(337). С. 39–43. DOI: 10.33267/2072-9642-2025-7-39-43.
5. Виноградов А.В., Лансберг А.А., Виноградова А.В. Анализ конфигурации электрических сетей 0,4 кВ Орловской области // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2023. Т. 70, № 4(53). С. 22–29. DOI: 10.22314/2658-4859-2023-70-4-22-29.
6. Вуколов В.Ю., Колесников А.А., Обалин М.Д. и др. Особенности обеспечения надежности электроснабжения нетяговых потребителей железных дорог // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: материалы 95-го заседания Международного научного семинара (пос. Хужир, оз. Байкал, 09–15 июля 2023 г.). Иркутск: Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, 2023. Вып. 74. С. 431–440.
7. Герасимов Л.Н. Расчет показателей надежности оборудования и систем электроснабжения железнодорожного транспорта // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2013. Т. 2. С. 102–107.
8. Горбунов И.Н., Захаренко С.Г., Малахова Т.Ф. Показатели надежности систем электроснабжения // Энергетика и энергосбережение: теория и практика: материалы III Всероссийской научно-практической конференции (Кемерово, 13–15 декабря 2017 г.). Кемерово: Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, 2017. С. 215.
9. ГОСТ 33947-2016. Межгосударственный стандарт. Железнодорожное электроснабжение. Номенклатура показателей надежности и функциональной безопасности. Москва: Стандартинформ, 2017. 8 с.
10. Инструкция о порядке планирования, предоставления, использования и учета «окон» для работ на инфраструктуре ОАО «РЖД»: утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 28.12.2023 № 3403/р [Электронный ресурс]. URL: https://internet-law.ru/documents/prod/akt_forma/0/instr.html (дата обращения: 25.03.2026).
11. Исупова А.М., Хорольский В.Я., Мастепаненко М.А. и др. Оценка эксплуатационной надежности сельских электрических сетей по статистическим данным об отключениях // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2023. № 5(74). С. 121–139. DOI: 10.24411/2078-1318-2023-5-121-139.
12. Кириллов С.В., Виноградов А.В. Обоснование использования земли в качестве одной из фаз питания трансформаторной подстанции 25/0,4 кВ системы электроснабжения сельскохозяйственных потребителей // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2025. № 2(74). С. 72–82. DOI: 10.31563/1684-7628-2025-74-2-72-82.
13. Кириллов С.В., Виноградов А.В. Развитие схем электроснабжения сельских потребителей от электрических сетей железных дорог // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2025. Т. 72, № 2(59). С. 36–45. DOI: 10.22314/2658-4859-2025-72-2-36-45.

14. Ковалев Г.Ф., Чернов Д.В. Методика комплексной оценки надежности электроснабжения и качества электроэнергии в сельских распределительных сетях // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2009. № 5. С. 104–114.
15. Коннов А.А. Анализ аварийности в электрических сетях 0,4 кВ Нижегородской области // Актуальные научные исследования в современном мире. 2020. № 5-1(61). С. 127–130.
16. Крюков А.В., Любченко И.А. Улучшение качества электроэнергии в системах электроснабжения стационарных объектов железнодорожного транспорта // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23, № 6. С. 53–65. DOI: 10.30724/1998-9903-2021-23-6-53-65.
17. Методика расчета и нормирования показателей надежности объектов железнодорожного электроснабжения: утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 06.12.2019 № 2762/р. [Электронный ресурс]. URL: https://internet-law.ru/documents/prod/metodika/0/metod_38033.html (дата обращения: 25.01.2026).
18. Надежность систем энергетики и их оборудования: справочник в 4-х т.; под ред. Ю.Н. Руденко. Т. 2: Надежность электроэнергетических систем; ред. М.Н. Розанов. Москва: Энергоатомиздат, 2000. 566 с.
19. Об электроэнергетике: Федеральный закон от 26.03.2003 № 354-ФЗ (ред. от 23.03.2026) [Электронный ресурс]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_41502/71ca306c624a4f313cf976323f4f5930a5124b0d/ (дата обращения: 25.03.2026).
20. Овсейчук В.А., Непомнящий В.А. Нормирование надежности и качества электроснабжения потребителей // Инноватика и экспертиза: научные труды. 2016. № 1(16). С. 175–185.
21. РД 34.20.574 (СО 153-34.20.574). Указания по применению показателей надежности элементов энергосистем и работы блоков с паротурбинными установками: утверждены Главным техническим управлением по эксплуатации энергосистем Минэнерго СССР. 1984. [Электронный ресурс]. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/5eb/4294817220.pdf> (дата обращения: 25.01.2026).
22. Терешко О. Расчет показателей надежности электроснабжения конечных потребителей // Электроэнергия. Передача и распределение. 2016. № 3(36). С. 48–52.
23. Третьяков Е.А. Регулирование параметров режима в системе электроснабжения нетяговых потребителей железных дорог // Омский научный вестник. 2015. № 2(140). С. 155–159.

References

1. Alekseenko V.A., Kryukov A.V. Application of statistical methods for the railway electrical power supply devices damageability analysis. *Modern Technologies. System Analysis. Modeling*. 2011;1(29):101-105. (In Russ.).
2. Bandurin I., Sadchenkova O. Increasing the reliability of power supply in agricultural distribution networks. *Electric Power. Transmission and Distribution*. 2015;5(32):46-52. (In Russ.).
3. Vasileva T.N., Lopatin E.I. The analysis of causes of failures of the electric equipment of 0,38 ... 10 kv distributive networks. *Bulletin of the Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev*. 2011;3(11):64-66. (In Russ.).
4. Vinogradova A.V., Vinogradov A.V. Specific indicators of power supply reliability depending on the reasons of 0.4 kV power grid outages. *Machinery and equipment for rural areas*. 2025;7(337):39-43. DOI: 10.33267/2072-9642-2025-7-39-43. (In Russ.).
5. Vinogradov A.V., Lansberg A.A., Vinogradova A.V. Analysis of the configuration of 0.4 kV electrical grids in the Orel region. *Electrical engineering and electrical equipment in agriculture*. 2023;70(4):22-29. DOI: 10.22314/2658-4859-2023-70-4-22-29. (In Russ.).
6. Vukolov V.Yu., Kolesnikov A.A., Obalin M.D. et al. Features of ensuring the reliability of electricity supply to non-traction consumers of railways. In: Methodological issues of studying the reliability of large energy systems: Proceedings of the 95th Session of the International Scientific Seminar (Khuzhir, Lake Baikal, July 9-15, 2023). Irkutsk: Melentiev Energy Systems Institute (Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences). 2023;74:431-440. (In Russ.).
7. Gerasimov L.N. Calculation of reliability indicators for equipment and power supply systems of railway transport. *Transport infrastructure of the Siberian region*. 2013;2:102-107. (In Russ.).
8. Gorbunov I.N., Zakharenko S.G., Malakhova T.F. Reliability indicators of power supply systems. In: Energy and energy saving: theory and practice: Proceedings of the III All-Russian Research-to-Practice Conference (Kemerovo, December 13-15, 2017). Kemerovo: T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University; 2017:215. (In Russ.).
9. GOST 33947-2016. Interstate standard. Railway power supply. Nomenclature of dependability and functional safety indices. Moscow: Standartinform Publishers; 2017. 8 p. (In Russ.).
10. Instructions on the procedure for maintenance windows' planning, providing, using and accounting for work on the infrastructure of RZD: approved by ОАО RZD Order of December 28, 2023 No. 3403. URL: https://internet-law.ru/documents/prod/akt_forma/0/instr.html. (In Russ.).
11. Isupova A.M., Khorolsky V.Ya., Mastepanenko M.A. et al. Assessment of operational reliability of rural electrical networks by statistical data on outages. *Izvestiya of Saint Petersburg State Agrarian University*. 2023;5(74):121-139. DOI: 10.24411/2078-1318-2023-5-121-139. (In Russ.).
12. Kirillov S.V., Vinogradov A.V. Justifying the use of the earth as one of the power phases for a 25/0.4 kV transformer substation of the agricultural power supply system. *Bulletin of the Bashkir State Agrarian University*. 2025;2(74):72-82. DOI: 10.31563/1684-7628-2025-74-2-72-82. (In Russ.).

13. Kirillov S.V., Vinogradov A.V. Development of power supply schemes for rural consumers from rail-road power grids. *Electrical engineering and electrical equipment in agriculture*. 2025;72(2):36-45. DOI: 10.22314/2658-4859-2025-72-2-36-45. (In Russ.).
14. Kovalev G.F., Chernov D.V. A technique for integrated assessment of power supply reliability and power quality in rural distribution networks. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*. 2009;5:104-114. (In Russ.).
15. Konnov A.A. Analysis of emergency in electric networks 0.4 kV Nizhny Novgorod region. *Actual Scientific Research in the Modern World*. 2020;5-1(61):127-130. (In Russ.).
16. Kryukov A.V., Lyubchenko I.A. Improving the quality of electricity supply systems in stationary objects of railway transport. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2021;23(6):53-65. DOI: 10.30724/1998-9903-2021-23-6-53-65. (In Russ.).
17. Methodology for calculating and standardizing reliability indicators for railway power supply facilities: approved by OAO RZD Order of December 6, 2019 No. 2762/r. URL: https://internet-law.ru/documents/prod/metodika/0/metod_38033.html/. (In Russ.).
18. Reliability of energy systems and their equipment: handbook in 4 volumes (editor Yu.N. Rudenko). Vol. 2: Reliability of electric power systems (editor M.N. Rozanov). Moscow: Energoatomizdat; 2000. 566 p. (In Russ.).
19. Concerning the Electric Power Industry: Federal Law of 26.03.2003 No. 354-FZ. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_41502/71ca306c624a4f313cf976323f4f5930a5124b0d/. (In Russ.).
20. Ovseichuk V.A., Nepomnyashchii V.A. Regulation of reliability and quality of electricity supply. *Innovatics and expert examination*. 2016;1(16):175-185. (In Russ.).
21. RD 34.20.574 (SO 153-34.20.574). Guidelines for the application of reliability indicators for power system elements and the operation of units with steam turbine plants: Approved by the Main Technical Department for the Operation of Power Systems of the Ministry of Energy of the USSR in 1984. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/5eb/4294817220.pdf>. (In Russ.).
22. Tereshko O. Calculation of power supply reliability indicators for end consumers. *Electric Power. Transmission and Distribution*. 2016;3(36):48-52. (In Russ.).
23. Tretyakov E.A. Regulation of the parameters in the system mode power supply not-traction consumers on railways. *Omsk Scientific Bulletin*. 2015;2(140):155-159. (In Russ.).

Информация об авторах

С.В. Кириллов – кандидат технических наук, доцент, инженер-технолог, Проектно-конструкторское бюро по инфраструктуре – филиал ОАО «РЖД»; доцент кафедры агроинженерии и электроэнергетики ФГБОУ ВО «Мичуринский государственный аграрный университет», kirill_mich@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-5412-5441>.

А.В. Виноградов – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электроснабжения и теплоэнергетики имени академика И.А. Будзко ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; профессор кафедры электроснабжения ФГБОУ ВО «Орловский государственный аграрный университет», winaleksandr@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8845-9718>.

А.В. Виноградова – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории электроснабжения, электрооборудования и возобновляемой энергетики ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»; доцент кафедры электроснабжения ФГБОУ ВО «Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина»; преподаватель технологического колледжа ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», alinawin@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8935-7086>.

Information about the authors

S.V. Kirillov, Candidate of Engineering Sciences, Docent, Engineering Technologist, Infrastructure Design Bureau – Branch of Russian Railways; Docent, the Dept. of Agroengineering and Electric Power Industry, Michurinsk State Agrarian University, kirill_mich@mail, <https://orcid.org/0009-0006-5412-5441>.

A.V. Vinogradov, Doctor of Engineering Sciences, Docent, Professor, the Dept. of Electric Power Supply and Heat Power Industry named after Academician I.A. Budzko, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Professor, the Dept. of Electric Power Supply, Orel State Agrarian University named after N.V. Parakhin, winaleksandr@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8845-9718>.

A.V. Vinogradova, Candidate of Engineering Sciences, Leading Research Scientist, Laboratory of Electric Power Supply, Electrical Equipment and Renewable Energy, Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Docent, the Dept. of Electric Power Supply, Orel State Agrarian University named after N.V. Parakhin; Lecturer, College of Technology, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, alinawin@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8935-7086>.

Статья поступила в редакцию 14.05.2026; одобрена после рецензирования 20.06.2026; принята к публикации 23.06.2026.

The article was submitted 14.05.2026; approved after reviewing 20.06.2026; accepted for publication 23.06.2026

© Кириллов С.В., Виноградов А.В., Виноградова А.В., 2026