

ТРАНСПОРТНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.331 : 621.311 + 06

DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_80

*П. А. Логунова***ОРГАНИЗАЦИЯ УЧЕТА РАСХОДА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ
НА ТЯГУ ПОЕЗДОВ НА ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЯХ
ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы определения расхода электроэнергии на нужды тяги для электрифицированных железных дорог постоянного тока, а также основные проблемы, с которыми связана сложность непосредственного измерения расхода электроэнергии на тягу поездов. В качестве метода, позволяющего решить поставленную задачу без необходимости установки на электроподвижной состав устройств ГЛОНАСС, предлагается метод, который основан на прямых измерениях токов и напряжений в нескольких точках тяговой сети. Представленный в статье алгоритм обработки этих данных позволяет определить все исходные величины, необходимые для расчетов расхода электроэнергии на тягу.

Ключевые слова: потери мощности, метод восстановления поездной ситуации, двухпутная вставка, расчет мгновенных схем.

Для цитирования: Логунова, П. А. Организация учета расхода электроэнергии на тягу поездов на тяговых подстанциях железных дорог постоянного тока / П. А. Логунова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 4. – С. 80–86. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_80.

Введение

Энергия в жизни любого человека, общества и государства занимает сегодня особое, можно сказать, определяющее место. Наличие энергетических ресурсов у государств определяет способность к существованию и развитию, о чем свидетельствуют события, развивающиеся на мировой арене в последние годы. В нашей стране вопросу обеспечения топливно-энергетическими ресурсами уделяется особое внимание. Указом Президента РФ от 13 мая 2019 года № 216 утверждена «Доктрина энергетической безопасности Российской Федерации», документ стратегического планирования, затрагивающий сферу национальной безопасности нашей страны, в котором отражаются официальные взгляды на обеспечение энергетической безопасности Российской Федерации. Одним из основных требований для обеспечения энергетической безопасности является способность производств к рациональному использованию топливно-энергетических ресурсов (ТЭР). Таким образом, задача государства заключается не только в обеспечении достаточных запасов ТЭР, но и в организации энергоэффективного производства во всех сферах экономики, где будут исключены нерациональное потребление и потери ТЭР.

Стратегия развития холдинга ОАО «РЖД» в числе первоочередных задач, в частности инфраструктурного бизнес-блока, включает в себя задачи оптимизации издержек за счет роста энергоэффективности, задачи перехода на тяжеловесное движение, а также задачи модернизации инфраструктуры для обеспечения требуемого объема перевозок грузов и пассажиров. На сегодняшний день обеспечение энергосбережения и повышение энергетической эффективности является важнейшим направлением в основной деятельности ОАО «РЖД». С учетом того что одним из основных видов энергии, используемой в процессе перевозок, является электрическая энергия, в статье рассмотрен вопрос об упорядочении учета ее расхода на тягу для электрифицированных железных дорог постоянного тока.

Основная часть

Реализация задачи повышения энергоэффективности в системе тягового электроснабжения и обеспечения энергосбережения при организации перевозочного процесса является одной из приоритетных задач. Основной причиной такого пристального внимания к данному вопросу является тот факт, что потребление ТЭР на тягу поездов занимает порядка 80 % от общего потребления ТЭР всеми структурами холдинга ОАО «РЖД». Несмотря на все предпринимаемые усилия, в настоящее время вопрос оперативного мониторинга потребления ТЭР на тягу, в частности электрической энергии, остаётся открытым [1, 2]. Причин такого состояния вопроса несколько, но в качестве основного следует

отметить распределенный характер системы электропотребления и наличие постоянно перемещающихся нагрузок с переменным значением величины потребляемой электроэнергии. В данной работе рассматривается вопрос разработки подходов непрерывного мониторинга величины электроэнергии, потребляемой на тягу поездов, для электрифицированных железных дорог постоянного тока.

Расход электроэнергии на тягу за определенный интервал времени Δt в системе электроснабжения участка железной дороги постоянного тока можно представить как сумму нескольких составляющих, каждая из которых в общем случае характеризуется целым рядом независимых факторов [3, 4]:

$$W_T = W_{\text{ЭПС}} + \Delta W_{\text{ТС}} + \Delta W_{\text{ВИП}} + \Delta W_{\text{ТР}} + \Delta W_{\text{ВЭС}}, \quad (1)$$

где W_T – расход электроэнергии на тягу, кВт·ч; $W_{\text{ЭПС}}$ – расход электроэнергии электроподвижным составом за время t , кВт·ч; $\Delta W_{\text{ТС}}$ – потеря энергии в тяговой сети участка железной дороги за время t , кВт·ч; $\Delta W_{\text{ВИП}}$ – потеря энергии в выпрямительно-инверторных преобразователях за время t , кВт·ч; $\Delta W_{\text{ТР}}$ – потеря энергии в главных понизительных трансформаторах за время t , кВт·ч; $\Delta W_{\text{ВЭС}}$ – потеря энергии на элементах внешнего электроснабжения за время t , кВт·ч.

Важно отметить, что последнее слагаемое $\Delta W_{\text{ВЭС}}$ не учитывается счетчиками электроэнергии тяговых подстанций и не несет дополнительных затрат для компании ОАО «РЖД», однако, при необходимости может быть учтено при рассмотрении вопроса влияния тяговой нагрузки в разрезе внешней энергосистемы. Рассмотрим поэлементно все составляющие выражения (1), для того чтобы выделить все составляющие, для которых необходимо организовать непрерывный мониторинг и фиксацию величины.

Величина энергии, заточиваемая ЭПС на совершение полезной работы в пределах участка железной дороги за время $t = (t_1 - t_2)$, в общем случае может быть определена по выражению

$$W_{\text{ЭПС}} = \sum_{k=1}^n \int_{t_2}^{t_1} (u_k \cdot i_k) dt, \quad (2)$$

где n – число ЭПС на участке в интервале времени $t = (t_1 - t_2)$; u_k – мгновенное значение напряжения на пантографе k -го электровоза, В; i_k – мгновенное значение тока, потребляемого k -м электровозом, А.

При условии, что значения токов и напряжений, входящих в выражение (2), будет дискретным, измеренным через известные промежутки времени Δt , выражение (2) примет вид

$$W_{\text{ЭПС}} = \sum_{k=1}^n \sum_{v=1}^m (U_{k,v} \cdot I_{k,v}) \Delta t, \quad (3)$$

где n – число ЭПС на участке в интервале времени $t = (t_1 - t_2)$; $U_{k,v}$ – напряжение на пантографе k -го электровоза, полученное на v -м замере, В; $I_{k,v}$ – значение тока, потребляемого k -м электровозом, полученное на v -м замере, А.

Входящая в выражение переменная m определяется как

$$m = \frac{t}{\Delta t}. \quad (4)$$

Для определения составляющей потери энергии в тяговой сети постоянного тока в общем случае следует использовать выражение

$$\Delta W_{\text{ТС}} = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{n_j} \Delta U_{k,j} \cdot I_{k,j} \cdot \Delta t, \quad (5)$$

где j – число путей участка, для которого ведется расчет; n_j – число элементов тяговой сети j -го участка, в пределах которых ток неизменен; $\Delta U_{k,j}$ – падение напряжения на j -м участке тяговой сети, В; $I_{k,j}$ – значение тока на j -м участке тяговой сети, А.

Составляющая потерь энергии $\Delta W_{\text{ВИП}}$ включает в себя потери в трансформаторе преобразователя и потери в элементах самого преобразователя, в общем случае величина потерь может быть определена как

$$\Delta W_{\text{ВИП}} = \Delta W_{\text{ПТ}} + \Delta W_{\text{ВЛ}}. \quad (6)$$

Составляющие выражения:

$$\Delta W_{\text{ПТ}} = \sum_{k=1}^n \left[\Delta P_x + \Delta P_k \left(\frac{S}{S_H} \right)^2 \right] \cdot \Delta t, \quad (7)$$

где ΔP_x – потери холостого хода трансформатора преобразователя, кВт; ΔP_k – потери короткого замыкания трансформатора преобразователя, кВт; S – фактически потребляемая мощность на расчетном интервале времени Δt , кВА; S_H – номинальная мощность трансформатора, кВА;

$$\Delta W_{\text{ВП}} = \sum_{k=1}^n \left[U_B \cdot I_k + \frac{3R_D I_k^2}{a \cdot m \cdot n_b} \right] \cdot \Delta t \cdot b, \quad (8)$$

где U_B – пороговое напряжение вентилей, В; R_D – динамическое сопротивление вентилей, Ом; I_k – фактическое значение тока на расчетном интервале времени Δt , А; a – число параллельных ветвей в фазе; m – число фаз, n_b – число выпрямительных агрегатов; b – число последовательно соединенных вентилях в фазе.

Для расчета потерь мощности в главных понизительных трансформаторах также следует воспользоваться выражением [4]

$$\Delta W_{\text{ТР}} = \sum_{k=1}^n \left[\Delta P_x + \Delta P_k \left(\frac{S}{S_H} \right)^2 \right] \cdot \Delta t. \quad (9)$$

Здесь обозначения аналогичны обозначениям, принятым в выражении (7), однако характеристики следует брать для главных понизительных трансформаторов.

Следует отметить, что составляющие потерь, определяемые выражениями (7) и (9), могут быть определены непосредственно в результате измерений на тяговой подстанции, при этом составляющая $\Delta W_{\text{ВП}}$ будет нести информацию о потерях энергии, вызванных только воздействием тяговой нагрузки, а составляющая $\Delta W_{\text{ТР}}$ является результатом суммарного электропотребления от тяговой подстанции аналогично (9). Однако основным энергоемким потребителем тяговых подстанций в большинстве случаев является тяговая нагрузка, поэтому основной вклад в величину потерь энергии в главных понизительных трансформаторах вносят, очевидно, токи тяги.

Иначе обстоит дело с составляющими расхода энергии $W_{\text{ЭПС}}$ и $\Delta W_{\text{ТС}}$, определяемыми по выражениям (3) и (5) соответственно. Непосредственное измерение этих величин связано с рядом трудностей. Расход энергии электроподвижным составом $W_{\text{ЭПС}}$ может быть определен по счетчикам электроэнергии ЭПС, однако здесь возникает целый комплекс проблем. Первой проблемой является перемещающаяся тяговая нагрузка. ЭПС в процессе электропотребления пересекает границы межподстанционных зон, в результате на стадии расчета доли электропотребления от каждой подстанции определяются в соответствии с принятыми методиками, что не всегда соответствует истине. Второй проблемой является проблема точности учета расхода электроэнергии непосредственно на ЭПС, а занижение фактического расхода ведет в итоге к искажению итоговых результатов. Также к числу прочих сложностей следует отнести человеческий фактор.

Отдельно следует отметить тот факт, что непосредственное определение составляющей $\Delta W_{\text{ТС}}$ методом прямых измерений организовать на практике невозможно [5]. Точки, от которых происходит разветвление токов в пределах одной межподстанционной зоны, постоянно перемещаются, так как их координата совпадает с точкой соприкосновения пантографа ЭПС с контактным проводом. Непосредственно измерить ток в произвольном сечении контактной сети также весьма затруднительно ввиду конструктивных особенностей последней [6, 7].

Анализ соотношений (3) и (5), а также (7)–(9) показывает, что часть величин, входящих в эти выражения, являются справочными величинами либо заранее известными величинами для каждой конкретной межподстанционной зоны и могут быть однозначно определены. К изменяющимся величинам следует отнести токи и падения напряжения на всех элементах тяговой сети, а также напряжение на пантографе каждого ЭПС. Для выполнения расчета расхода энергии по (1) необходимо владеть указанными сведениями, получаемыми с интервалом времени, определяемым шагом дискретизации измерения, обозначенным в данной работе Δt .

Рассмотрим на примере однопутного участка постоянного тока протяженностью l км методику получения перечисленных исходных данных [8]. Ввиду того что рассматривается система электроснабжения постоянного тока, влияние смежных путей многопутных участков отсутствует и приводимые ниже рассуждения можно распространить и на многопутные участки.

На рис. 1 показана межподстанционная зона, по которой перемещается электроподвижной состав, потребляющий ток I_X . Будем полагать, что величина этого тока непостоянна во времени, а координата ЭПС определяется расстоянием от левой по схеме тяговой подстанции «А» и обозначена переменной x .

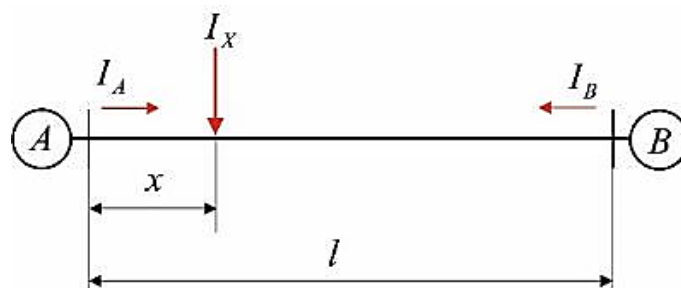


Рис. 1. Расчетная межподстанционная зона

Для дальнейшей работы рассмотрим схему замещения, составленную без учета влияния высших гармоник в кривой выпрямленного напряжения (рис. 2).

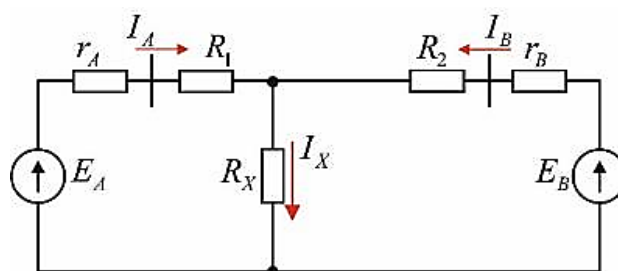


Рис. 2. Схема замещения межподстанционной зоны

На рис. 2 приняты следующие обозначения: r_A и r_B – сопротивления, включающие сопротивление трансформатора тяговой подстанции, выпрямительных агрегатов и внешней энергосистемы; R_1 и R_2 – сопротивления тяговой сети до потребителя слева и справа соответственно; R_X – мгновенное значение сопротивления потребителя с нагрузкой I_X .

Для левого и правого по схеме (см. рис. 2) контуров запишем соотношения:

$$I_A \cdot r_A + I_A \cdot R_1 + I_X \cdot R_X = E_A; \quad (10)$$

$$I_B \cdot r_B + I_B \cdot R_2 + I_X \cdot R_X = E_B. \quad (11)$$

Вычитая из выражения (11) выражение (10), запишем:

$$E_B - I_B \cdot r_B - I_B \cdot R_2 - E_A + I_A \cdot r_A + I_A \cdot R_1 = 0. \quad (12)$$

Для точки, где расположен электровоз, справедливо соотношение

$$I_B = I_X - I_A. \quad (13)$$

Выражение (12) с учетом (13) примет вид

$$E_B - (I_X - I_A) \cdot r_B - (I_X - I_A) \cdot R_2 - E_A + I_A \cdot r_A + I_A \cdot R_1 = 0. \quad (14)$$

Преобразуем выражение:

$$I_A \cdot (r_B + R_2 + r_A + R_1) = I_X \cdot r_B + I_X \cdot R_2 - E_B + E_A. \quad (15)$$

С учетом влияния внутреннего сопротивления источника напряжение на шинах будет определяться соотношением

$$\begin{aligned}U_1 &= E_A - I_A \cdot r_A; \\U_2 &= E_B - I_B \cdot r_B.\end{aligned}$$

Подставив данное соотношение в выражение (15), получим

$$I_A = I_x \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} + \frac{U_1 - U_2}{R_1 + R_2}. \quad (16)$$

Преобразуем выражение (16) с учетом того, что

$$\begin{aligned}R_1 &= x \cdot r; \\R_2 &= (\ell - x) \cdot r,\end{aligned}$$

где r – удельное сопротивление тяговой сети, Ом/км.

$$I_A = I_A \cdot \frac{\ell - x}{\ell} + I_B \cdot \frac{\ell - x}{\ell} + \frac{U_1 - U_2}{\ell \cdot r}.$$

Выразим координату « x »:

$$x = \frac{I_B}{I_A + I_B} \cdot \ell + \frac{U_1 - U_2}{r \cdot (I_A + I_B)}. \quad (17)$$

Все величины, входящие в выражение (10), являются либо заранее заданными константами, либо непрерывно измеряются в контрольных точках заданного участка. Ток нагрузки ЭПС определяется выражением (13). Проанализируем полученное выражение (13). Токи I_A и I_B являются токами фидеров тяговых подстанций, их можно измерять непрерывно, что соответствует ранее выдвинутым требованиям. Длина участка и данные об удельном сопротивлении тяговой сети для конкретной межподстанционной зоны могут быть заданы заранее [9]. Напряжения U_1 и U_2 – это напряжения на шинах тяговых подстанций, их также возможно измерять непрерывно. С учетом современных телекоммуникационных возможностей территориальная удаленность двух тяговых подстанций не является помехой для сбора и обработки в одном месте данных о токах и напряжениях на нескольких объектах.

Таким образом, показан алгоритм для определения координаты нагрузки и величины тока, потребляемой этой нагрузкой. Для использования выражения (3) необходима информация о величине напряжения на пантографе электровоза, но, владея информацией, собираемой для расчета по (17), определить данный параметр возможно. Также использование приводимого алгоритма позволит определять в режиме реального времени величину падения напряжения и токи на элементах тяговой сети, необходимые для расчета по выражению (5). Следует отметить, что в данном случае рассмотрен самый простой пример – на участке только одна нагрузка. Увеличение числа нагрузок, естественно, приведет к усложнению системы сбора данных о токах и напряжениях, появится потребность в организации дополнительных точек измерения, однако никаких ограничений на использование предложенного подхода данный факт не накладывает.

Выводы

Внедрение методики, основанной на прямых измерениях токов и напряжений в конкретных точках тяговой сети, позволит расчетным методом определять потребление электроэнергии на тягу поездов и одновременно рассчитывать величину потерь энергии, вызываемых этой нагрузкой. Отличительной особенностью предлагаемого подхода является отсутствие необходимости в оборудовании всех единиц электроподвижного состава приборами для точного определения геолокации, устройствами сбора данных с перемещающихся объектов. Предлагаемая методика предполагает полностью стационарную систему сбора данных, использующую в качестве каналов связи помехозащищенную систему ВОЛС-ЖТ. Независимость предлагаемого алгоритма от действий оператора, возможность полностью автоматизировать процесс учета расхода электроэнергии на нужды тяги на тяговых подстанциях постоянного тока позволят более эффективно проводить работу по повышению энергетической эффективности электрифицированных железных дорог.

Список литературы

1 Efficient and secure logistics transportation system / M. V. Kolesnikov, N. N. Lyabakh, E. A. Mamaev, M. V. Bakalov. – 2020. – Vol. 918, Parte 1. – DOI 10.1088/1757-899X/918/1/012031.

2 **Morais, J. L.** Martins (2018) Modeling and validation of the dynamics and energy consumption for train simulation 2018 International Conference on Intelligent Systems (IS) / J. L. Morais, A. P. Afonso // Funchal – Madeira, Portugal, 2018. – P. 288–295.

3 **Осипов, В. А.** Методика определения составляющих для построения мгновенной схемы участка железной дороги постоянного тока / В. А. Осипов, П. А. Логунова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 4 (76). – ISSN 0201-727X.

4 **Марквардт, К. Г.** Электроснабжение электрифицированных железных дорог: учебник для вузов железнодорожного транспорта / К. Г. Марквардт – Москва : Транспорт, 1965. – 464 с.

5 **Sukhanov, A. V.** Railway Rolling Stock Tracking Based on Computer Vision Algorithms (2020) Advances in Intelligent Systems and Computing / A. V. Sukhanov. – 2020. – Vol. 1127 AISC. – P. 56–63. – DOI 10.1007/978-3-030-39216-1_6.

6 **Трубицин, М. А.** К вопросу расчета установившихся режимов электроэнергетических систем / М. А. Трубицин, Е. Ю. Микаэльян // Инженерный вестник Дона. – 2020. – № 9 (69). – С. 49–55. – EDN GYHRIY.

7 Mathematical Simulation of Decision Error Functions in Tolerance Control of the Performance of Measuring Techniques Measurement Techniques / R. Z. Khayrullin, A. S. Kornev, A. S. Kostoglotov, S. V. Lazarenko – 2020. – Vol. 63, Parte 9. – P. 680–685. – DOI 10.1007/s11018-021-01839-y.

8 **Осипов, В. А.** Определение метрологической неопределенности величины потерь энергии в тяговой сети постоянного тока / В. А. Осипов, П. А. Логунова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 4 (80). – С. 139–144. – DOI 10.46973/0201-727X20204139.

9 Патент **RU2572797C2, МПК В60М3/00, В60L3/12, G01R21/133.** Способ определения технологических потерь электроэнергии в тяговой сети железнодорожного транспорта : № 2014110999/11 : заявл. 21.03.2014 : опубл. 20.01.2016 / А. Л. Каштанов, В. Л. Незевак,

References

1 Efficient and secure logistics transportation system / M. V. Kolesnikov, N. N. Lyabakh, E. A. Mamaev, M. V. Bakalov. – 2020. – Vol. 918, Parte 1. – DOI 10.1088/1757-899X/918/1/012031.

2 **Morais, J. L.** Martins (2018) Modeling and validation of the dynamics and energy consumption for train simulation 2018 International Conference on Intelligent Systems (IS) / J. L. Morais, A. P. Afonso // Funchal – Madeira, Portugal, 2018. – P. 288–295.

3 **Osipov, V. A.** Methodology for determining the components for constructing an instantaneous circuit of a direct current railway section / V. A. Osipov, P. A. Logunova // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2019. – No. 4 (76). – ISSN 0201-727X.

4 **Marquardt, K. G.** Power supply of electrified railways : a textbook for universities of railway transport / K. G. Marquardt – Moscow : Transport, 1965. – 464 p.

5 **Sukhanov, A. V.** Railway Rolling Stock Tracking Based on Computer Vision Algorithms (2020) Advances in Intelligent Systems and Computing / A. V. Sukhanov. – 2020. – Vol. 1127 AISC. – P. 56–63. – DOI 10.1007/978-3-030-39216-1_6.

6 **Trubitsin, M. A.** On the issue of calculating the steady-state modes of electric power systems / M. A. Trubitsin, E. Y. Mikaelyan // Engineering Journal of Don. – 2020. – No. 9 (69). – P. 49–55. – EDN GYHRIY.

7 Mathematical Simulation of Decision Error Functions in Tolerance Control of the Performance of Measuring Techniques Measurement Techniques / R. Z. Khayrullin, A. S. Kornev, A. S. Kostoglotov, S. V. Lazarenko – 2020. – Vol. 63, Parte 9. – P. 680–685. – DOI 10.1007/s11018-021-01839-y.

8 **Osipov, V. A.** Determination of the metrological uncertainty of the magnitude of energy losses in a DC traction network / V. A. Osipov, P. A. Logunova // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2020. – No. 4 (80). – P. 139–144. – DOI 10.46973/0201-727X20204139.

9 Patent **RU2572797C2, MPC B60M3/00, B60L 3/12, G01R 21/133.** Method for determining technological losses of electric power in the traction network of railway transport : No. 2014110999/11 : declared 21.03.2014 : published 20.01.2016 / A. L. Kashtanov,

М. М. Никифоров, С. Ю. Ушаков, В. Т. Черемисин (РФ). – Бюл. № 2.

V. L. Nezevak, M. M. Nikiforov, S. Yu. Ushakov, V. T. Cheremisin (RF). – Bulletin No. 2.

P. A. Logunova

**ORGANIZATION OF ACCOUNTING OF ELECTRICITY CONSUMPTION
FOR TRAIN TRACTION AT TRACTION SUBSTATIONS
OF DC RAILWAYS**

Abstract. The article considers the issues of determining the consumption of electricity for traction needs for electrified DC railways, as well as the main problems associated with the complexity of direct measurement of electricity consumption for train traction. As a method to solve this problem without the need to install GLONASS devices on an electric rolling stock, a method is proposed that is based on direct measurements of currents and voltages at several points of the traction network. The algorithm for processing these data presented in the article allows us to determine all the initial values necessary for calculating the consumption of electric power for traction.

Keywords: power loss, method of restoring the train situation, double-track insertion, calculation of instantaneous circuits.

For citation: Logunova, P. A. Organization of accounting of electricity consumption for train traction at traction substations of DC railways / P. A. Logunova // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 4. – P. 80–86. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_80.

Сведения об авторах

Логунова Полина Александровна

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Теоретические основы
электротехники»,
старший преподаватель,
e-mail: polina_buteneva@mail.ru

Information about the authors

Logunova Polina Alexandrovna

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Theoretical Foundations of Electrical
Engineering»,
Senior Lecturer,
e-mail: polina_buteneva@mail.ru