
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.332:621.316.728

EDN QCGPMP

СНИЖЕНИЕ ПОТЕРЬ НАПРЯЖЕНИЯ И ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ КОНДЕНСАТОРНОЙ УСТАНОВКОЙ В ТЯГОВОЙ СЕТИ С ОДНОСТОРОННИМ ПИТАНИЕМ

Л.А. Германe-mail: lagerman@mail.ru

Нижегородский институт путей сообщения –
филиал Приволжского государственного университета путей сообщения»
Нижний Новгород, Россия

В.А. Мараловаe-mail: maralova-v@mail.ru

ОАО «РЖД». Горьковская дирекция по энергообеспечению
Нижний Новгород, Россия

Статья посвящена исследованию влияния поперечной емкостной компенсации в тяговой сети с односторонним питанием. При раздельном питании тяговой сети контактная сеть работает консольно с питанием тяговой сети от одной подстанции или от двух, но с разделом на посту секционирования с введением нейтральной вставки. Выбор конкретного варианта схемы электроснабжения определяется технико-экономическими расчетами. Если введение нейтральной вставки не обеспечивает нормированный уровень напряжения, то включают установки поперечной емкостной компенсации. Предложены расчетные схемы и выполнены расчеты потерь напряжения и потерь мощности при различных схемах включения конденсаторных установок.

Ключевые слова: конденсаторная установка, контактная сеть, нейтральная вставка, поперечная емкостная компенсация, потери напряжения, потери мощности, пост секционирования, раздельное питание.

Для цитирования: Герман Л.А., Маралова В.А. Снижение потерь напряжения и потерь мощности конденсаторной установкой в тяговой сети с односторонним питанием // Интеллектуальная Электротехника. 2025. № 2. С. 122-133. EDN QCGPMP

REDUCTION OF VOLTAGE LOSSES AND POWER LOSSES OF CAPACITOR UNIT IN TRACTION NETWORK WITH ONE-WAY POWER SUPPLY

L.A. German

e-mail: lagerman@mail.ru

Nizhny Novgorod Institute of Railway Engineering –
branch «Volga State University of Railway Engineering»

Nizhny Novgorod, Russia

V.A. Maralova

e-mail: maralova-v@mail.ru

JSC «Russian Railways». Gorky directorate for energy supply

Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article is devoted to the study of the influence of reactive power compensation in a traction network with a one-way supply. In the case of a separate supply of the traction network, the contact network operates as a console with the supply of the traction network from one or two substations, but with a section at the sectioning post with the introduction of a neutral link. The choice of a specific version of the power supply scheme is determined by technical and economic calculations. If the introduction of a neutral link does not provide a required voltage level, then reactive power compensation units are included. Calculation schemes are proposed and calculations of voltage losses and power losses are performed for various connection schemes of capacitor units.

Keywords: capacitor unit, contact network, neutral link, reactive power compensation, voltage losses, power losses, sectioning post, separate power supply.

For citation: L.A. German and V.A. Maralova, “Reduction of voltage losses and power losses of capacitor unit in traction network with one-way power supply”, *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 122-133, 2025. EDN QCGPMP

I. Введение

В ряде случаев при особых условиях работы системы внешнего электроснабжения необходимо выполнять раздельное питание тяговой сети, т.е. в этом варианте контактная сеть работает консольно [1, 2] с питанием тяговой сети от одной подстанции или от двух, но с разделом по посту секционирования (ПС). На отечественных железных дорогах таких межподстанционных зон (МПЗ) около 7 % [3], одна из причин – стыковка двух энергосистем у тяговой подстанции (ТП). В этом случае наблюдаются пониженное напряжение на токоприемниках и повышенные потери мощности в тяговой сети. Достаточно подробно о необходимости раздела питания на стыке двух энергосистем рассмотрено в [4]. Для исключения указанных недостатков была предпринята попытка [5] выполнить схему питания МПЗ с встречно-

консольным питанием, установив на ПС пятый высоковольтный коммутационный аппарат (выключатель или контактор), осуществляющий раздел контактной сети по ПС, с его автоматическим включением при проходе токоприемника у ПС [6, 7]. Однако опыт эксплуатации [8] показал, что на двухпутном участке ресурс существующих высоковольтных выключателей на включение и отключение с шунтированием раздела контактной сети явно недостаточен, даже для вакуумных выключателей он составляет не более 50 тысяч переключений, а необходимо в несколько раз больше. Поэтому приходится раздел по ПС выполнять нейтральной вставкой (НВ) на контактной сети без автоматики ее шунтирования при проходе токоприемника.

Эксплуатационные требования к проходу НВ рассмотрены в [9]. При подходе к НВ установлен знак «выключить ток» и после прохода НВ (как правило, 200 м) для электровозов действует знак «включить ток». Однако при наличии поперечной емкостной компенсации – конденсаторной установки (КУ), повышающей уровень напряжения на токоприемниках электроподвижного состава (ЭПС) в МПЗ, можно исключить установку НВ, что недостаточно рассмотрено в существующей технической литературе. Таким образом, в статье показаны преимущества и недостатки включения НВ в схеме с разделом питания по ПС и предложены целесообразные точки включения КУ (у ПС и (или) в конце МПЗ) в этом случае.

Для расчетов использован метод равномерно распределенной нагрузки [1]: изменяющиеся во времени и по месту расположения нагрузки МПЗ заменяются равномерно распределенной нагрузкой, приходящейся на единицу длины (так называемая удельная нагрузка, А/км). Параметры удельной нагрузки рассчитаны в [1] в зависимости от расхода энергии в данной МПЗ. Конечно, результаты расчетов по этому методу будут всегда заниженными, однако этот метод часто оказывается весьма полезным при всевозможных быстрых расчетах и, главным образом, для определения не абсолютных значений, а относительных величин при изменении какого-либо параметра.

Для оценки технических возможностей установки КУ составим упрощенный вариант схемы замещения (рис. 1). Распределенная нагрузка в схеме замещения заменена на узловые токи у тяговых подстанций и ПС. На рис. 1 а схема замещения с двусторонним питанием без раздела по контактной сети, на рис. 1 б раздел по ПС с НВ. На рис. 1 в консольная тяговая сеть до отключенной смежной тяговой подстанции, НВ отсутствует.

На участке между тяговыми подстанциями ТП А и ТП В среднее значение суммарной равномерно распределенной нагрузки на участках от ТП до ПС равно $(P+jQ)/U$, где P – активная мощность, Q – реактивная мощность, U – среднее напряжение.

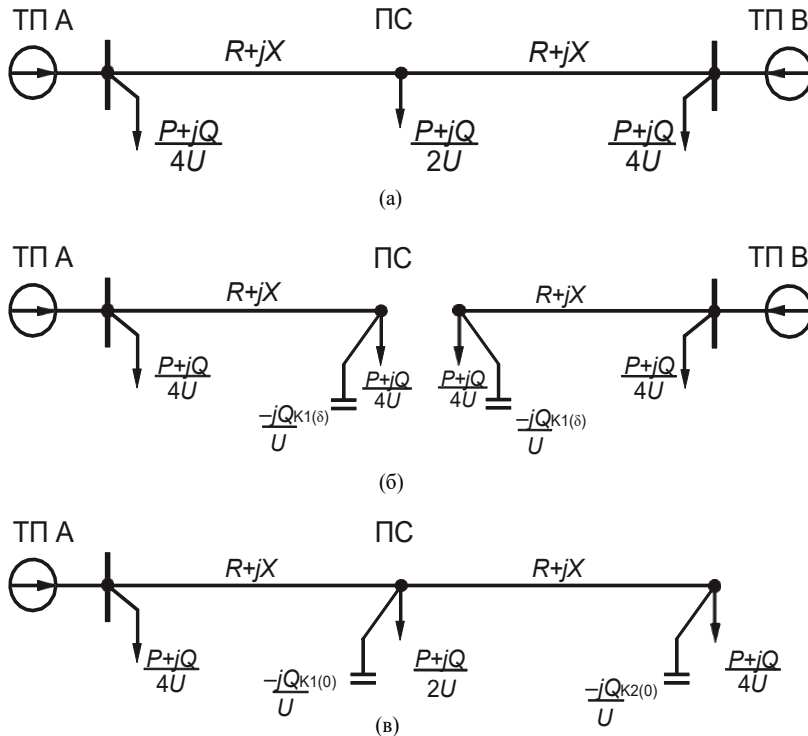


Рис. 1. Схемы замещения: системы электроснабжения с двусторонним питанием (а); встречно-консольной схемы питания с КУ и разделом по ПС (б); консольная схема питания с КУ (в)

Fig. 1. Equivalent circuits: power supply systems with two-way power supply (a); counter-console power supply circuit with a capacitor unit and a section by substation (b); console power supply circuit with a capacitor unit (в)

Таким образом, средние значения активной и реактивной мощности в схемах замещения равны:

$$P = \frac{W}{T}; \quad \frac{P}{Q} = \operatorname{tg} \varphi;$$

$$P = S \cdot \cos \varphi; \quad Q = S \cdot \sin \varphi,$$

где W – расход активной энергии на МПЗ за расчетный период T в кВт·ч; φ – фаза среднего значения тягового тока; S – полная мощность тяговой нагрузки на МПЗ.

Принимаем для тяговой нагрузки $\cos\varphi = 0,8$ и $\sin\varphi = 0,6$, $P = S \cdot \cos\varphi$, $Q = S \cdot \sin\varphi$. Согласно [1], при использовании установок поперечной емкостной компенсации в расчетах принимается синусоидальная тяговая нагрузка.

II. Расчет потерь напряжения

Принимая нагрузки узлов по схемам замещения (рис. 1), зависящих от суммарной мощности МПЗ $P+jQ$, потери напряжения равны:

– до ПС при двустороннем питании МПЗ и при разделе питания по ПС:

$$\Delta U = \frac{PR + QX}{4U}; \quad (1)$$

– в конце контактной сети при консольном питании до смежной ТП:

$$\Delta U = 3 \frac{PR + QX}{4U} + \frac{PR + QX}{4U}. \quad (2)$$

С учетом составного сопротивления тяговой сети:

$$Z_{\text{сост}} = R \cdot \cos\varphi + X \cdot \sin\varphi,$$

перепишем (1) и (2):

$$\Delta U = \frac{SZ_{\text{сост}}}{4U} = \frac{0,125SZ_{\text{сост}}}{U}; \quad (1a)$$

$$\Delta U = \frac{SZ_{\text{сост}}}{U}. \quad (2a)$$

Таким образом, при встречно-консольной схеме питания потери напряжения в четыре раза меньше, чем при консольной схеме питания. Столь большие потери напряжения при консольной схеме питания объясняют известное решение принять встречно-консольную схему питания и установить нейтральную вставку у ПС [3].

По указанным формулам проведем расчеты по схемам замещения на рис. 1.

Решение задачи снижения повышенных потерь напряжения достигается включением регулируемой КУ (СГРМ) в тяговой сети на консоли

участка и/или у ПС [5]. Если мощности КУ на консоли и на ПС равны реактивным мощностям узлов, то потери напряжения от реактивных нагрузок узлов равны нулю. Поэтому в этом случае потери напряжения с КУ равны:

– при двусторонней схеме питания:

$$\Delta U = \frac{0,8SZ_{\text{сост}}}{4U} = \frac{0,2SZ_{\text{сост}}}{U}; \quad (3)$$

– при консольном питании:

$$\Delta U = \frac{0,8SZ_{\text{сост}}}{U}. \quad (4)$$

Результаты расчета потерь напряжения приведены в табл. 1.

Таблица 1.
Результаты расчета потерь напряжения в тяговой сети

Table 1.
Results of calculation of voltage losses in the traction network

Расчетная схема	ΔU без КУ		ΔU с КУ	
	до ПС	на консоли	до ПС	на консоли
параллельная	$0,25 S \cdot Z_{\text{сост}}/U$	-	$0,2 S \cdot Z_{\text{сост}}/U$	-
раздел по ПС	$0,25 S \cdot Z_{\text{сост}}/U$	-	$0,2 S \cdot Z_{\text{сост}}/U$	-
консоль	-	$S \cdot Z_{\text{сост}}/U$	-	$0,8 S \cdot Z_{\text{сост}}/U$

Важно добавить, что при увеличении мощности КУ можно достичь любых, в том числе нулевых, потерь напряжения. Таким образом, КУ решает проблему необходимого понижения потерь напряжения и, следовательно, обеспечивает работу контактной сети без установки нейтральной вставки у ПС.

Повышение напряжения в тяговой сети возможно и целесообразно выполнить и при одиночном включении КУ: или на ПС, или в конце консоли, причем уровень напряжения будет зависеть от мощности КУ.

III. Расчет снижения скорости при проходе тяжеловесного поезда НВ

Как указано, проход НВ осуществляется на выбеге, поэтому важно знать, как снижается скорость тяжеловесного поезда при проходе НВ. С запасом считаем, что электровоз по НВ в режиме выбега проходит примерно 400 м. Тогда путь, проходимый ЭПС при изменении скорости от V_1 (при отключении тока перед заездом на НВ) и до V_2 (при включении тока после съезда с НВ) под действием удельной замедляющей силы $w_{\text{ох}}$ равен [9, 10]:

$$\Delta l = \frac{500(V_1^2 - V_2^2)}{\zeta w_{\text{ок}}} [\text{м}], \quad (5)$$

где ζ – ускорение поезда в км/ч² при действии удельной замедляющей силы в 1 Н/кН тяжеловесного поезда. В [10] для грузового поезда $\zeta = 120$ км/ч².

В качестве примера принимаем для расчетов: $V_1 = 50$ км/ч, $V_2 = 48$ км/ч. Результат расчета по (5) свидетельствует, что скорость снижается незначительно – на 1,5 км/ч при проходе НВ на участке $\Delta l = 387$ м. Массовые расчеты показывают, что снижение скорости составляет не более 2...3 км/ч.

IV. Расчет потерь мощности в тяговой сети

Рассмотрим потери мощности в двух схемах: при разделе по ПС и в консольной схеме питания. Потери активной мощности в схемах с двусторонним питанием (рис. 1 а), а также для встречно-консольной схемы питания с разделом по ПС (рис. 1 б) равны:

$$\Delta P = \left(\frac{S}{2U} \right)^2 \cdot \frac{R}{2} = \frac{S^2 R}{8U^2} = \frac{0,125 S^2 R}{U^2}; \quad (6)$$

$$S^2 = P^2 + Q^2, \quad (7)$$

где $P = 0,8S$, $Q = 0,6S$.

Для схемы с консольным питанием потери мощности равны:

$$\Delta P = \left(\frac{3S}{4U} \right)^2 \cdot R + \left(\frac{S}{4U} \right)^2 \cdot R = \frac{5S^2 R}{8U^2} = \frac{0,625 S^2 R}{U^2}. \quad (8)$$

При установке КУ в тяговой сети снижаются потери мощности и повышаются напряжения. Проведем анализ снижения потерь мощности при различной расстановке КУ.

Двустороннее питание. Наименьшие потери мощности в тяговой сети будут при двусторонней схеме питания и, если на ПС установлена одиначная КУ1 (табл. 2), полностью компенсирующая реактивную мощность в этом узле, то:

$$\Delta P = \left(\frac{S}{2} - jQ_{\text{к1}} \right)^2 \cdot \frac{R}{2U^2}, \quad (9)$$

и при $Q_{к1} = Q/2$:

$$\Delta P = \frac{0,08S^2 R}{U^2}. \quad (10)$$

Одностороннее питание. Если на ПС и на консоли участка установлены КУ (табл. 2), полностью компенсирующие реактивную мощность узлов, то:

$$\Delta P = 5 \left(\frac{P}{U} \right)^2 \cdot \frac{R}{8} = 5 \left(\frac{S \cos \varphi}{U} \right)^2 \cdot \frac{R}{8} = 5 \left(\frac{0,8S}{U} \right)^2 \cdot \frac{R}{8} = \frac{0,4S^2 R}{U^2}. \quad (11)$$

При этом мощность КУ на ПС $Q_{к1} = Q/2$, а на консоли $Q_{к2} = Q/4$.

Как видно, при консольной схеме питания потери мощности с КУ снижаются до $0,4(S/U)^2 R$, то есть уменьшение в 1,56 раз.

Таблица 2.
Мощности КУ

Table 2.
Power of the capacitor unit

Схемы КУ	Мощность КУ		
	на ПС	на консоли	Сумма на ПС или на участок
Двустороннее (рис. 1, б)	$Q/4$	–	$Q/2$
Одностороннее КУ на ПС и на консоли (рис. 1, в)	$Q/2$	$Q/4$	$3Q/4$
Одностороннее (рис. 1, в): – КУ1 только ПС – КУ2 только на консоли	$3Q/4$ –	– $Q/2$	$3Q/4$ $Q/2$

При одностороннем питании также целесообразно дополнительно рассмотреть варианты включения одиночной КУ или на ПС, или в конце консольного участка. Для наименьших потерь мощности в тяговой сети в первом случае мощности КУ $Q_{к1} = 3Q/4$, а во втором $Q_{к2} = Q/2$ (табл. 2). В этом случае потери при КУ равны (табл. 3):

– при консольной схеме с КУ $Q_{к1}$:

$$\Delta P = \frac{0,422S^2 R}{U^2}; \quad (12)$$

– при консольной схеме с КУ $Q_{к2}$:

$$\Delta P = \frac{0,445 S^2 R}{U^2}. \quad (13)$$

В обоих вариантах с КУ снижение потерь мощности в $0,625(S/U)^2 R / 0,422(S/U)^2 R = 1,48$ и $0,625(S/U)^2 R / 0,445(S/U)^2 R = 1,4$ практически равные. Поэтому в технико-экономических расчетах (ТЭР) сравнения мест включения КУ следует тщательно выбирать исходные данные по нагрузкам и расстояниям участков до ПС. Таким образом, по потерям мощности варианты консольной схемы с одиночными КУ сравнительно мало отличаются от схемы с двумя КУ на ПС и на консоли. Это определяет возможность при консольной схеме питания установить только одно КУ: или на ПС или в конце консоли, что уточняется в расчете конкретного участка с учетом места расположения ремонтной бригады.

Таблица 3.
Потери мощности в тяговой сети

Table 3.
Power losses in the traction network

Схемы	Результаты расчета потерь мощности в кВт			
	без КУ	с КУ на консоли и ПС	с КУ на ПС	с КУ на консоли
Двусторонняя без раздела	$0,125(S/U)^2 R$	—	$0,08 (S/U)^2 R$	—
То же с разделом по ПС	$0,125(S/U)^2 R$	—	$0,08 (S/U)^2 R$	—
Консоль	$0,625(S/U)^2 R$	$0,4(S/U)^2 R$	$0,422(S/U)^2 R$	$0,445(S/U)^2 R$

Выполненные расчеты определяют стратегию выбора той или иной схемы электроснабжения при разделе питания по контактной сети между тяговыми подстанциями.

При технико-экономическом сравнении места включения КУ следует учитывать место постоянного нахождения ремонтной бригады, чтобы учесть в расчетах затраты на перемещение ремонтной бригады на обслуживание КУ. Постоянное обслуживание КУ необходимо из-за наличия постоянно вращающихся мощных вентиляторов, предназначенных для обдува силовых транзисторов КУ. Поэтому ТЭР КУ в тяговой сети в общем случае рассматриваются в трех вариантах в зависимости от реальной загрузки тяговой сети в зонах от ПС до тяговых подстанций, реальных расстояниях от

ТП до ПС, и места постоянного нахождения ремонтной бригады: КУ установлена на ПС, КУ установлена на консоли у ТП и КУ установлены в обоих указанных точках.

Определяющими факторами выбора схемы электроснабжения являются повышенные потери напряжения и мощности в тяговой сети (в 3-4 раза при консольной схеме питания), а также дополнительные расходы на обслуживание и ремонт КУ в точках их включения. В связи с малым изменением скорости тяжеловесного поезда при проходе НВ и повышенными потерями напряжения и мощности при консольном питании, показана целесообразность разделения питания тяговой сети по ПС с введением НВ у ПС. При необходимости повышения напряжения на токоприемниках ЭПС в контактной сети необходимо включить КУ.

Практика установки КУ в тяговой сети [5] подтверждает эффект по снижению потерь напряжения и потерь мощности, а также обеспечивает повышение пропускной способности. Поэтому установка КУ при разделе питания тяговой сети является эффективным техническим решением.

V. Выводы

При особых условиях работы системы внешнего электроснабжения (например, при стыковке энергосистем) приходится выполнять раздельное питание тяговой сети. В этом случае в тяговой сети наблюдаются пониженное напряжение на токоприемниках и повышенные потери мощности в тяговой сети. Для предотвращения существенных пониженных напряжений на токоприемнике и снижения потерь напряжения выполняют встречно-консольное питание контактной сети с монтажом нейтральной вставки у ПС. Если указанное техническое решение окажется недостаточным, то на МПЗ необходимо использовать установки поперечной емкостной компенсации.

Используя метод равномерно распределенной нагрузки, удалось оценить режимы напряжения и потерь мощности при различных схемах тяговых сетей с односторонним питанием с применением установок поперечной емкостной компенсации. Рассмотрены рациональные схемы питания. При наличии нейтральной вставки КУ целесообразно устанавливать на ПС или на консоли тяговой сети у ТП. Место установки необходимо определить на основании ТЭР с учетом снижения потерь мощности в тяговой сети и повышения затрат на обслуживание КУ при удаленном расположении ремонтной бригады от КУ.

Если принято решение консольного питания без НВ, то целесообразно провести технико-экономические расчеты с установкой одной КУ или в конце консольного участка, или на ПС.

Поступила в редакцию 02.11.2024

Принята к публикации 13.01.2025

Received 02.11.2024

Accepted 13.01.2025

Библиографический список

- [1] Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
- [2] СП 224. 1326000.2014. Тяговое электроснабжение железной дороги. Введ. 2014-12-01. – 79 с.
- [3] Герман Л.А., Субханвердиев К.С., Герман В.Л. Автоматизация электроснабжения тяговой сети переменного тока. М.: ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2021. – 208 с.
- [4] Кузнецов Г.В. Мероприятия и технические средства снижения уравнильных токов: автореф. дис. канд. техн. наук, Ростов. ин-т инж. желез. тран-та, Ростов-на-Дону, 1991. – 20 с.
- [5] Гапанович В.Д. [и др.]. Энергосбережение на железнодорожном транспорте. М.: Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», 2012. – 619 с.
- [6] Кващук В.А., Кондратьев Ю.В., Черемисин В.Т. Система для управления устройством раздела питания тяговой сети переменного тока электрических железных дорог, Пат. 2248282 RU, заявл. 17.02.03; опубл. 20.03.05. – Бюл. № 8.
- [7] Кващук В.А., Кондратьев Ю.В., Лапенко Н.М., Черемисин В.Т. Система управления устройством раздела питания тяговой сети переменного тока электрических железных дорог, Пат. 2291069 RU, заявл. 10.04.06; опубл. 10.01.07. – Бюл. № 1.
- [8] Герман Л.А. Совершенствование тягового электроснабжения переменного тока для повышения пропускной способности железных дорог. М.: ГОУ УМЦ, 2024.
- [9] Правила тяговых расчетов для поездной работы. Введ. 1980-08-15. М.: Транспорт, 1985. – 287 с.
- [10] Осипов С.И., Осипов С.С. Основы тяги поездов. М.: УМК МПС России, 2000. – 592 с.

References

- [1] K.G. Marquardt, *Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog* [Power supply of electrified railways]. Moscow: Transport, 1982 (in Russian).
- [2] Traction power supply of railways, SP 224. 1326000.2014, December 2014.
- [3] L.A. German, K.S. Subkhanverdiev and V.L. German, *Avtomatizatsiya elektrosnabzheniya tyagovoy seti peremennogo toka* [Automation of power supply of the AC traction network]. Moscow: Federal state budgetary educational institution of additional professional education “Educational and methodological center for education in railway transport”, 2021 (in Russian).
- [4] G.V. Kuznetsov, “*Meropriyatiya i tekhnicheskie sredstva snizheniya uravnitel'nykh tokov* [Measures and technical means of reducing equalizing currents]”, Cand. of Tech. S. thesis, Rostov. in-t eng. railway transport, Rostov-on-Don, Russia, 1991 (in Russian).

- [5] V.D. Gapanovich et al., *Energoberezhenie na zheleznodorozhnom transporte [Energy saving in railway transport]*. Moscow: National University of Science and Technology "MISiS", 2012 (in Russian).
- [6] V.A. Kvashchuk, Yu.V. Kondratyev and V.T. Cheremisin, "System to control supply divider of electrified railway ac traction system", Patent RU 2248282, Mar. 20, 2005.
- [7] V.A. Kvashchuk, Yu.V. Kondratyev, N.M. Lapenko and V.T. Cheremisin, "System to control power supply divider of ac traction system of electrified railways", Patent RU 2291069, Jan. 10, 2007.
- [8] L.A. German, *Sovershenstvovanie tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka dlya povysheniya propusknoy sposobnosti zheleznih dorog [Improvement of AC traction power supply to increase the capacity of railways]*. Moscow: State Educational Institution of the Russian Academy of Sciences, 2024 (in Russian).
- [9] Rules for traction calculations for train operation, August 1985.
- [10] S.I. Osipov and S.S. Osipov, *Osnovy tyagi poezdov [Basics of train traction]*. Moscow: UMK MPS of Russia, 2000 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Герман Леонид Абрамович, доктор технических наук, профессор Нижегородского института путей сообщения – филиал «Приволжский государственный университета путей сообщения», г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Leonid A. German, D. Sci. (Eng.), professor of the Nizhny Novgorod Institute of Railway Engineering - branch "Volga State University of Railway Engineering", Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Маралова Виктория Алексеевна, инженер Горьковской дирекции по энергообеспечению ОАО «РЖД», г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Victoria A. Maralova, engineer of the JSC «Russian Railways» Gorky directorate for energy supply, Nizhny Novgorod, Russian Federation.