

УДК 621.316.722

EDN SOFFMT

**РАСЧЕТ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В ТЯГОВОЙ СЕТИ
С ТЯЖЕЛОВЕСНЫМИ ПОЕЗДАМИ И СТАТИЧЕСКИМ
ГЕНЕРАТОРОМ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ
НА ПОСТУ СЕКЦИОНИРОВАНИЯ**

Л.А. ГерманORCID: 0000-0003-4988-2107 e-mail: lagerman@mail.ru

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

И.А. Саликовe-mail: ilya_leonov_00_00@mail.ru

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

Анализируется проблема повышения пропускной способности электрифицированных участков железной дороги за счет применения статических генераторов реактивной мощности (СГРМ). Представлены методы расчета потерь мощности в тяговой сети с тяжеловесным поездом и СГРМ на постах секционирования. На примере двухпутного участка системы 25 кВ с СГРМ мощностью 15 Мвар выполнены исследования влияния выбора уровня стабилизации напряжения СГРМ на потери мощности в тяговой сети. Для расчета двухпутного участка контактной сети использована схема замещения «треугольника», позволившая получить относительно простые схемы расчета потерь напряжения и мощности сложного участка железной дороги. Результаты расчета потерь мощности при различных уровнях стабилизации напряжения СГРМ показали возможности более точной оценки уровня напряжения СГРМ.

Ключевые слова: потери мощности, статический генератор реактивной мощности, стабилизация напряжения, тяговая сеть.

Для цитирования: Герман Л.А., Саликов И.А. Расчет потерь мощности в тяговой сети с тяжеловесными поездами и статическим генератором реактивной мощности на посту секционирования // Интеллектуальная Электротехника. 2025. № 4. С. 106-116. EDN SOFFMT

CALCULATION OF POWER LOSSES IN TRACTION NETWORK WITH HEAVY-DUTY TRAINS AND STATIC REACTIVE POWER GENERATOR AT SECTIONING STATION

L.A. German

ORCID: 0000-0003-4988-2107 e-mail: lagerman@mail.ru

Nizhny Novgorod Institute of Railways branch of the Volga State Transport University
Nizhny Novgorod, Russia

I.A. Salikov

e-mail: ilya_leonov_00_00@mail.ru

Transenergo – Branch of JSC «Russian Railways». Gorky Directorate for Energy Supply
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. This article examines the problem of increasing the capacity of electrified railway sections through the use of static reactive power generators (SRPGs). The paper presents methods for calculating power losses in a traction network with a heavy-haul train and SRPGs at sectioning stations. Using a double-track section of a 25 kV system with a 15 Mvar SRPG, the effect of selecting the SRPG voltage stabilization level on power losses in the traction network was studied. A delta equivalent circuit was used to calculate the double-track section of the overhead line, allowing for relatively simple calculation schemes for voltage and power losses on a complex railway section. The results of power loss calculations for various SRPG voltage stabilization levels demonstrated the potential for more accurate SRPG voltage stabilization assessments.

Keywords: power losses, static reactive power generator, voltage stabilization, traction network.

For citation: L.A. German and I.A. Salikov, “Calculation of power losses in traction network with heavy-duty trains and static reactive power generator at sectioning station”, *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 106-116, 2025. EDN SOFFMT

I. Введение

Статические генераторы реактивной мощности (СГРМ) начали устанавливать в тяговой сети у постов секционирования (ПС) с 2015 г. с целью повышения пропускной способности путем пропуска тяжеловесных и соединенных поездов. При этом принят режим работы СГРМ – «стабилизация напряжения» [1]. Сегодня на сети отечественных железных дорогах СГРМ уже более 30 и число их растет. Они применяются также при специфической работе тяговой сети, например, при тяжелых профилях пути, при консольном питании зоны, при длинных туннелях и т.д. Положительный эффект

СГРМ объясняется установленным повышенным напряжением на ПС, что положительно сказывается на повышение пропускной способности электрифицированных участков железной дороги. Однако официальные данные по нормативам на уровни стабилизированного напряжения отсутствуют и применяются в эксплуатации интуитивно, обычно 27 или 28 кВ. По всей видимости, должна быть разработана методика расчета напряжения СГРМ на ПС для участков различной грузонапряженности и интенсивности тяжеловесного движения. Опыт работы с СГРМ [2] подтвердил их эффективность при повышенной нагрузке тяговой сети и повышении пропускной способности, но, к сожалению, показал повышенные потери электроэнергии при этом. Причины повышенных потерь вызваны установленным повышенным уровнем напряжения на посту секционирования и определяются следующим:

- перекомпенсацией реактивной мощности в тяговой сети и соответствующим увеличением токов тяговой сети;
- повышенным потреблением реактивной мощности электроподвижным составом (ЭПС) до 25 % в связи с повышенным напряжением на токоприемнике;
- уравнительными токами между ПС и тяговыми подстанциями;
- повышенными потерями мощности в СГРМ.

Первые данные по работе СГРМ и данные по их эксплуатации на Западно-Сибирской железной дороге появились в [3], расчеты потерь мощности в СГРМ – в [4], опыт работы СГРМ на отечественных железных дорогах представлен в работах [3, 5].

На Горьковской железной дороге движение грузовых поездов повышенной массы стало обязательной. На Южном ходу тяжеловесные поезда массой до 9 тыс. тонн с трехсекционными электровозами формируются 7-8 раз в сутки, соединенные поезда массой до 12 тыс. тонн с трехсекционными локомотивами в голове и середине состава – 2-3 раза в сутки. На Северном ходу движение тяжеловесных поездов еще более интенсивное. В настоящее время акцентируется стремление включать СГРМ на железных дорогах Восточного направления. Поэтому установить рациональный режим электроснабжения с пониженным расходом электроэнергии является для электрифицированных железных дорог актуальнейшей задачей.

Цель статьи: сформировать методы расчета потерь мощности в тяговой сети с тяжеловесным поездом и СГРМ на ПС и показать на конкретном примере увеличение потерь мощности в тяговой сети при повышенном уровне стабилизации напряжения СГРМ. Кроме того, важно показать, что выбор уровня стабилизации напряжения СГРМ влияет на потери мощности в тяговой сети.

Расчеты тяговой сети с СГРМ, в частности, потерь напряжения и потерь мощности, выполнены в настоящей работе на конкретном примере по схеме электроснабжения с заданными исходными данными.

II. Выбор расчетной схемы электроснабжения и исходных данных

Рассматривается двухпутный участок системы 25 кВ (рис. 1) с постом секционирования, на котором установлена СГРМ мощностью 15 Мвар, из которых 5 Мвар предназначены для компенсации 3 и 5 гармоник тока, а 10 Мвар – для компенсации реактивной мощности тяговой сети (ток компенсации $I_{сгрм}$). Контактная сеть КС1 и КС2 длиной 30 км и КС3, и КС4 длиной 25 км с погонным сопротивлением $Z_{21} = 0,17 + j0,4$ Ом/км.

Обычно тяжеловесные поезда курсируют по одному пути, хотя могут идти и по обоим путям. В расчетной схеме средний часовой ток эквивалентного тяжеловесного поезда $I_{13} = 300$ А, который расположен в середине участка КС1. Остальная суммарная тяговая нагрузка участка с током 200 А эквивалентирована между узлами шин 27,5 кВ тяговых подстанций (с токами 54 А и 46 А) и постом секционирования (с током $I_{23} = 100$ А).

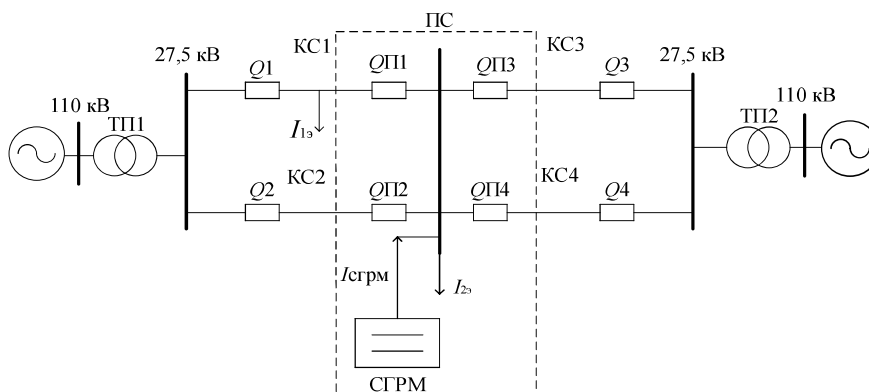


Рис. 1. Двухпутный участок системы 25кВ с постом секционирования с установленным СГРМ мощностью 15 Мвар

Fig. 1. A two-track section of a 25 kV system with a sectioning station with an installed SRPG with a capacity of 15 Mvar

III. Схема замещения СГРМ в тяговой сети

В расчете в основном интересует взаимодействие тяжеловесного поезда и генератора СГРМ, поэтому схему замещения сформируем относительно их нагрузочных узлов. Схема замещения (рис. 2) позволяет производить расчеты параметров режима тяговой сети со статическим генератором реактивной мощности (СГРМ) в его различных режимах с оценкой потерь мощности.

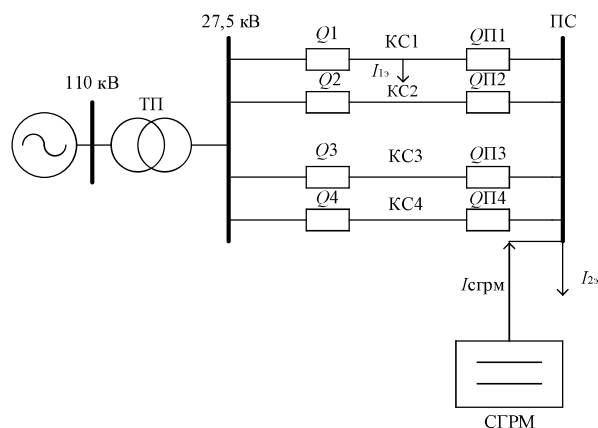


Рис. 2. Схема замещения

Fig. 2. Equivalent circuit

Принимаем одинаковыми напряжения холостого хода шин 27,5 кВ на ТП1 и ТП2, тогда объединяем системы электроснабжения ТП1 и ТП2 в единую систему электроснабжения с суммарной мощностью трансформатора ТП. Далее объединяем КС2, КС3, КС4 в одну ветвь с сопротивлением $Z1$, а ветви КС1 от шин 27,5 кВ ТП1 и от ПС до тока I_{13} обозначим соответственно $Z2$ и $Z3$. Тогда получим схему замещения (рис. 3). Напряжение в узле 2 – напряжение шин 27,5кВ (U_{27}).

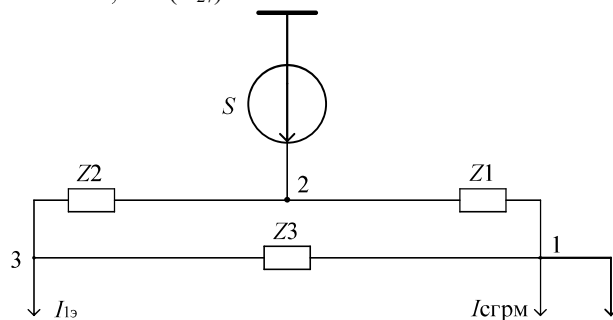


Рис. 3. Схема замещения

Fig. 3. Equivalent circuit

Для удобства дальнейших расчетов выполним преобразование схемы «треугольника» в схему «звезда» [6] (рис. 4)

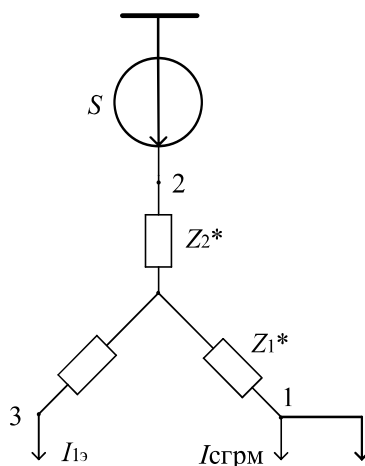


Рис. 4. Схема замещения «звезда»

Fig. 4. The «star» equivalent circuit

IV. Расчет напряжений на ПС

Расчет напряжений в системе электроснабжения с СГРМ позволяет предварительно оценить параметры напряжения стабилизации. Используя формулу [7] потерь напряжения как суммы активной и реактивной составляющих потерь напряжения, по схеме замещения на рис. 4 определим напряжение в узле 1:

$$U_{\text{сгрм}} = U_{27} - [(-I_{\text{сгрм}} + I_{29}'') \cdot X_1^* + (-I_{\text{сгрм}} + I_{29}'' + I_{13}'') \cdot X_2^* + I_{29}' \cdot R_1^* + (I_{13}' + I_{29}') \cdot R_2^*], \quad (1)$$

где $I_{\text{сгрм}}$ – емкостной ток генерации СГРМ; I_{13}'', I_{29}'' – реактивные составляющие токов нагрузки; I_{13}', I_{29}' – активные составляющие токов нагрузки; R^* и X^* – активная и реактивная составляющие сопротивлений $Z1$ и $Z2$.

В правой части (1) выражение в квадратных скобках обозначим как потери напряжения в узле 1 – ΔU_1 , тогда:

$$U_{\text{сгрм}} = U_{27} - \Delta U_1 \quad (2)$$

Задавая тем или иным значением напряжения стабилизации (при этом $U_{\text{стаб}} = U_{\text{сгрм}}$), можно определить в этом случае ток генерации $I_{\text{сгрм}}$.

Для примера покажем токи СГРМ для $U_{\text{стаб}}$ 27 кВ и 28 кВ в схеме замещения по рис. 4, для которой укажем полученные по расчету исходные данные:

- параметры схемы замещения [8] по рис. 4;
- $R_1^* = R_2^* = 0,578 \text{ Ом}; R_3^* = 0,974 \text{ Ом};$
- $X_1^* = X_2^* = 1,366 \text{ Ом}; X_3^* = 2,317 \text{ Ом};$
- параметры тяговой нагрузки: $\sin\varphi = 0,6, \cos\varphi = 0,8; I' = I \cos\varphi;$
 $I'' = I \sin\varphi, I'_{13} = 300 \cdot 0,8 = 240 \text{ А}; I''_{13} = 300 \cdot 0,6 = 180 \text{ А}; I'_{23} = 100 \cdot 0,8 = 80 \text{ А}, I''_{23} = 100 \cdot 0,6 = 60 \text{ А}.$

Если принять стабилизацию $U_{\text{стаб}} = 28 \text{ кВ}$ и $\Delta U_1 = 28000 - 27000 = 1000 \text{ В}$, то из (1) получим $I_{\text{сгрм}} = 679 \text{ А}$, а при $U_{\text{стаб}} = 27 \text{ кВ}$ $\Delta U_1 = 0$ и $I_{\text{сгрм}} = 313 \text{ А}$. По указанным данным мощность СГРМ равна $27,5 \cdot 679 = 18672 \text{ кВар}$ и $27,5 \cdot 313 = 8607 \text{ кВар}$. Расчеты свидетельствуют о том, что стабилизацию в 28 кВ в этом примере выполнить нельзя, так как задана мощность 15 МВар .

Важно отметить, что от заданного уровня стабилизации напряжения зависит мощность СГРМ.

V. Расчет потерь мощности тяговой сети

Активные потери мощности в тяговой сети определяются суммой потерь мощности на каждом сопротивлении схемы замещения (рис. 4).

Потери мощности равны:

$$\Delta P = I_{13}^2 \cdot R_3^* + [(-I_{\text{сгрм}} + I_{23}'')^2 + (I_{13}')^2] \cdot R_1^* + [(-I_{\text{сгрм}} + I_{13}'')^2 + (I_{13}')^2 \cdot (I_{23}'')^2] \cdot R_1^* \quad (3)$$

Для всех режимов СГРМ выполним расчеты и результаты сведем в табл. 1.

Таблица 1.
Расчеты потерь мощности

Table 1.
Power loss calculations

Режим СГРМ	$I_{\text{сгрм}}, \text{ А} /$ $Q_{\text{сгрм}}, \text{ Мвар}$	Потери активной мощности	
		$\Delta P, \text{ кВт}$	Уменьшаются/ увеличиваются
Без СГРМ	—	185,9	—
Стабилизация 27кВ	313/8,6	175,5	Уменьшаются в 1,06 раза
Стабилизация 27,5кВ	417,6/11,5	262,9	Увеличиваются в 1,41 раза
Стабилизация 28кВ	679/18,7	456,9	Увеличиваются в 2,45 раза

Представленный пример расчета позволяет оценить режимы работы СГРМ в эксплуатационных условиях. При стабилизации 28 кВ потери мощности в тяговой сети по сравнению с отсутствием СГРМ увеличились на

271 кВт, т.е. увеличение потерь в 2,45 раза. Это результат перекомпенсации реактивной мощности в тяговой сети. Переход на режим стабилизации 27 кВ в рассматриваемом примере резко снижает потери мощности – до 175,5 кВт. Поэтому в условиях эксплуатации целесообразно проверить возможность снижения уровня стабилизации повышенного напряжения для уменьшения потерь мощности [9, 10].

В рассмотренном примере определены часовые потери мощности при проходе тяжеловесного поезда с током I_{13} . Обычно в графике движения на межподстанционной зоне ограничиваются одним тяжеловесным поездом, время хода которого в зоне системы 25кВ около одного часа. При проходе другого тяжеловесного поезда с другим током I_{13} следует повторить расчеты. При необходимости расчета суточных потерь мощности следует в исходных данных задать средний ток тяговой нагрузки за сутки.

VI. Выводы

В тяговых сетях переменного тока для повышения пропускной способности устанавливают статические генераторы реактивной мощности на полупроводниковых элементах. При их положительном эффекте по пропуску тяжеловесных поездов, к сожалению, увеличиваются потери электроэнергии в тяговой сети, так как на СГРМ ПС устанавливается повышенное напряжения в контактной сети.

Новизна исследований состоит в том, что впервые в расчетах двухпутных участков контактной сети применена схема замещения «треугольника», преимущество которой в следующем:

- получены достаточно простые и наглядные схемы расчета потерь напряжения и потерь мощности сложных схем двухпутного участка железной дороги с постом секционирования и СГРМ при движении тяжеловесных поездов;
- достаточно просто и наглядно показан рост потерь мощности в тяговой сети при увеличении уровня стабилизации напряжения СГРМ;
- предлагаемый метод расчета мощности СГРМ может в дальнейшем быть основой для оценки уровня стабилизации напряжения СГРМ.

Предложены методы расчета напряжения стабилизации СГРМ по параметрам тяговой сети и тяговой нагрузки и в зависимости от уровня стабилизации напряжения выполнен расчет потерь мощности в тяговой сети. Происходит более осознанный выбор мощности СГРМ. Расчеты потерь мощности при разных уровнях стабилизации напряжения СГРМ дают возможность более правильно оценить в эксплуатации рациональный уровень напряжения СГРМ.

Поскольку изменение уровня стабилизации значительно влияет на изменение потерь мощности в тяговой сети, предлагается рассматривать

расширенный диапазон уровней стабилизации с учетом возможных различных средних напряжений на тяговых шинах подстанций: 26,5 кВ, 27 кВ, 27,5 кВ, 28 кВ.

© Герман Л.А., 2025

© Саликов И.А., 2025

Поступила в редакцию 28.07.2025

Принята к публикации 02.10.2025

Received 28.07.2025

Accepted 02.10.2025

Библиографический список

- [1] Каталог продукции. Статические генераторы реактивной мощности RU-DRIVE SVG // ООО НПП «РУ-Инжиниринг». [Электронный ресурс]. URL: <https://ru-drive.com/> (дата обращения 01.10.2024).
- [2] Герман Л.А. Совершенствование тягового электроснабжения переменного тока для повышения пропускной способности железных дорог. Н. Новгород: СамГУПС, 2024. – 186 с.
- [3] Никонов А.В. Улучшение эксплуатационных показателей системы тягового электроснабжения за счет совершенствования работы регулируемых устройств поперечной компенсации реактивной мощности: автореф. дис. канд. тех. наук, ОмГУПС, Омск, 2019. – 21 с.
- [4] Никонов А.В. Потери мощности в основном оборудовании статических тиристорных компенсаторов и пути их снижения // Всерос. молодежная науч.-практ. конф. с межд. уч. «Интеллектуальная энергетика на транспорте и в промышленности», Октябрь 04-05, 2018, Омск, Россия: ОмГУПС, 2018. С. 255-263.
- [5] Черемисин В.Т., Никонов А.В. Сравнение энергетических показателей регулируемых устройств поперечной компенсации реактивной мощности в условиях эксплуатации на постах секционирования // Транспорт Урала. 2018. № 1 (56). С. 30-34. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-1-30-34
- [6] Татур Т.А., Татур В.Е. Установившиеся и переходные процессы в электрических цепях. М.: Высшая школа, 2001. – 407 с.
- [7] Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
- [8] Фигурнов Е.П. Релейная защита. Ч. 2. М.: УМЦ ЖДТ, 2009. – 604 с.
- [9] Герман Л. А., Чивенков А. И., Галкин К.В. Способ регулирования статического генератора реактивной мощности, Пат. 2819464 RU, заявл. 27.06.23; опубл. 21.05.24. – Бюл. № 1.
- [10] Герман Л.А., Галкин К.В. Рациональный режим статического генератора реактивной мощности в тяговой сети // Железнодорожный транспорт. 2025. № 6. С. 36-38.

References

- [1] Katalog produkci. Statische generatory reaktivnoj moshchnosti RU-DRIVE SVG [Product Catalog. Static Reactive Power Generators RU-DRIVE SVG]. [Online]. Available at: <https://rudrive.com/> [Accessed: Oct. 1, 2024] (in Russian).

- [2] L.A. German, *Sovershenstvovanie tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka dlya povyshcheniya propusknoi sposobnosti zheleznyh dorog [Improving AC traction power supply to increase railway capacity]*. N. Novgorod: SamGUPS, 2024 (in Russian).
- [3] A.V. Nikonov, “*Uluchshenie ekspluatatsionnyh pokazatelej sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya za schet sovershenstvovaniya raboty reguliruemyyh ustroystv poperechnoj kompensacii reaktivnoj moshchnosti [Improving the performance of the traction power supply system by improving the operation of adjustable shunt reactive power compensation devices]*”, Cand. of Tech. S. thesis, OSTU, Omsk, Russia, 2019 (in Russian).
- [4] A.V. Nikonov, “Power losses in the basic equipment of static tiristor compensators and the ways of their reduction”, in proc. *All-Russian youth scientific and practical conference with international students Intellektual'naya energetika na transporte i v promyshlennosti [Intelligent energy in transport and industry]*, Oct. 4-5, 2018, Omsk, Russia, pp. 255-263 (in Russian).
- [5] V.T. Cheremisin and A.V. Nikonov, “Comparison of energy indices of regulated devices for reactive shunt compensation in conditions of operation in section switch boxes”, *Transport of the Urals*, vol. 1, no. 56, pp. 30-34, 2018. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-1-30-34
- [6] T.A. Tatur and V.E. Tatur, *Ustanovivshiesya i perekhodnye processy v elektricheskikh cepyah [Steady-state and transient processes in electrical circuits]*. Moscow: Higher School of Economics, 2001 (in Russian).
- [7] K.G. Markvardt, *Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannyh zheleznyh dorog [Power supply for electrified railways]*. Moscow: Transport, 1982 (in Russian).
- [8] E.P. Figurnov, *Releynaya zashchita. [Relay protection]. Part 2*. Moscow: UMC ZDT, 2009 (in Russian).
- [9] L.A. German, A.I. Chivenkov and K.V. Galkin, “*Sposob regulirovaniya staticheskogo generatora reaktivnoj moshchnosti [Method of regulating a static reactive power generator]*”, Patent RU 2819464, May 21, 2024 (in Russian).
- [10] L.A. German and K.V. Galkin, “The rational mode of a static reactive power generator in a traction network”, *Railway Transport*, no. 6, pp. 36-38, 2025.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Герман Леонид Абрамович, доктор технических наук, профессор Нижегородского института путей сообщения – филиал Приволжского государственного университета путей сообщения, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Leonid A. German, D. Sci. (Eng.), professor of the Nizhny Novgorod Institute of Railways branch of the Volga State Transport University, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Саликов Илья Александрович, инженер Горьковской дистанции электро-снабжения – структурного подразделения Горьковской дирекции по энергообеспечению – структурного подразделения Трансэнерго – филиала ОАО «РЖД», г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Илья А. Salikov, engineer of the Gorky Power Supply Distance – Branch of the Gorky Directorate for Energy Supply of the Transenergo – Branch of JSC «Russian Railways», Nizhny Novgorod, Russian Federation.