

ТРАНСПОРТНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.331 : 621.311 + 06

DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_30

*В. А. Осипов***К ВОПРОСУ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ТЯГОВОЙ СЕТИ С ЭКРАНИРУЮЩИМ И УСИЛИВАЮЩИМ ПРОВОДАМИ ***

Аннотация. Исследованы закономерности изменения эквивалентного сопротивления при параллельном подключении дополнительных проводников к активно-индуктивным цепям. На основе аналитических зависимостей рассмотрены случаи подключения активного сопротивления, активно-индуктивного элемента без взаимоиндуктивной связи и проводников, связанных взаимной индукцией. Выполненные расчеты показали существование области параметров, в которой подключение дополнительного проводника приводит не к снижению, а к увеличению активной составляющей эквивалентного сопротивления. Установлены граничные условия возникновения данного эффекта, показано его влияние на распределение токов в системе. Полученные результаты распространены на тяговую сеть с экранирующим проводом. Доказано, что применение экранирующего проводника не всегда обеспечивает снижение активных потерь мощности. При определенных соотношениях параметров рельсовой цепи и экранирующего провода возможно увеличение активного сопротивления эквивалентной цепи обратного тока, несмотря на уменьшение полного сопротивления сети. Сделан вывод о необходимости индивидуальной оценки эффективности применения экранирующих проводов для каждого конкретного участка железной дороги с учетом параметров тяговой сети и режимов ее работы.

Ключевые слова: тяговая сеть, система с экранирующим проводником, потери энергии в тяговой сети.

Для цитирования: Осипов, В. А. К вопросу энергетической эффективности тяговой сети с экранирующим и усиливающим проводами / В. А. Осипов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 2. – С. 30–36. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_30.

Введение

Тяговые сети являются одним из основных элементов системы электроснабжения электрифицированных железных дорог однофазного переменного тока. Энергетическая эффективность каждого отдельного типа тяговой сети определяется величиной потерь при передаче электрической энергии от тяговых подстанций к электроподвижному составу с показателем минимального уровня напряжения на токоприемнике электровоза. В условиях роста грузонапряженности железнодорожных линий и прогнозируемого увеличения массы поездов задача повышения пропускной способности участков становится все более актуальной. Одним из основных факторов, ограничивающих возможности существующих систем тягового электроснабжения, является такой показатель, как удельное сопротивление тяговой сети.

Тяговая сеть железной дороги представляет собой частный случай двухпроводной линии электропередачи, конструкция которой в значительной степени отличается от обычных линий, предназначенных для передачи электроэнергии от источника к потребителю. Особенность тяговой сети заключается в том, что ток нагрузки протекает по разнесенным в пространстве проводникам прямого и обратного тока. В качестве проводника прямого тока выступает контактная подвеска, а в качестве проводника обратного тока – рельсовый путь и земля. Значительное расстояние между контактными проводами и рельсами ведет к увеличению магнитного потока рассеяния и, как следствие, к росту индуктивности тяговой сети. В результате увеличивается удельное сопротивление линии, ограничивающее максимальную нагрузочную способность участка.

* Публикация осуществлена в рамках реализации гранта ОАО «РЖД» на развитие научно-педагогических школ в области железнодорожного транспорта

Основная часть

Для уменьшения реактивного сопротивления тяговой сети в различные периоды развития железнодорожной энергетики были предложены и внедрены технические решения, основанные на использовании в системе тягового электроснабжения дополнительных проводников. Наибольшее распространение получили системы с усиливающим проводом, системы с экранирующим проводом и системы с экранирующим и усиливающим проводом. Наибольший эффект достигается при совместном использовании усиливающего и экранирующего проводов. В системе с ЭУП усиливающий провод принимает на себя часть прямого тока, а экранирующий провод – часть обратного тока. В результате расстояние между эквивалентными проводниками прямого и обратного тока существенно уменьшается. С точки зрения теории электромагнитного поля такая система приближается к двухпроводной линии передачи энергии с относительно малым расстоянием между проводниками. Одним из вариантов создания электрически скомпенсированной сети является сеть с экранирующим проводом, в этом случае усиливающий провод не используется. При этом также достигается снижение реактивного сопротивления, что приводит к повышению напряжения на токоприемниках электропоездов и улучшению условий работы ЭПС.

Для дальнейшей оценки эффективности введения в систему дополнительных проводников перейдем вначале к простейшему случаю параллельного подключения – к сосредоточенному активно-индуктивному сопротивлению проводника с чисто активным сопротивлением. Очевидно, что при этом эквивалентное сопротивление такой цепочки ожидаемо снизится. Исследуем, как будет происходить изменение величины активной составляющей эквивалентного сопротивления при изменении сопротивления подключаемого проводника. Для расчета используем соотношение

$$R = \operatorname{Re} \left[\frac{(R_1 + jX_1) \cdot R_2}{R_1 + jX_1 + R_2} \right] = \frac{R_1^2 R_2 + R_1 R_2^2 + R_2 X_1^2}{(R_1 + R_2)^2 + X_1^2}. \quad (1)$$

Для анализа динамики изменения активной составляющей эквивалентного сопротивления, рассчитанного по выражению (1), примем следующие исходные данные: $R_1 = 0,15$ (Ом), $X_1 = 0,5$ (Ом). Сопротивление R_2 примем изменяющимся в широких пределах от 0 до 100 (Ом).

Как видно из представленной зависимости, с ростом сопротивления R_2 увеличивается и эквивалентное активное сопротивление. Следует отметить, что при достижении некоторого значения, эквивалентное активное сопротивление становится больше сопротивления R_1 и, достигая максимума в некоторой точке, начинает снижаться, асимптотически приближаясь к значению R_1 (рис. 1).

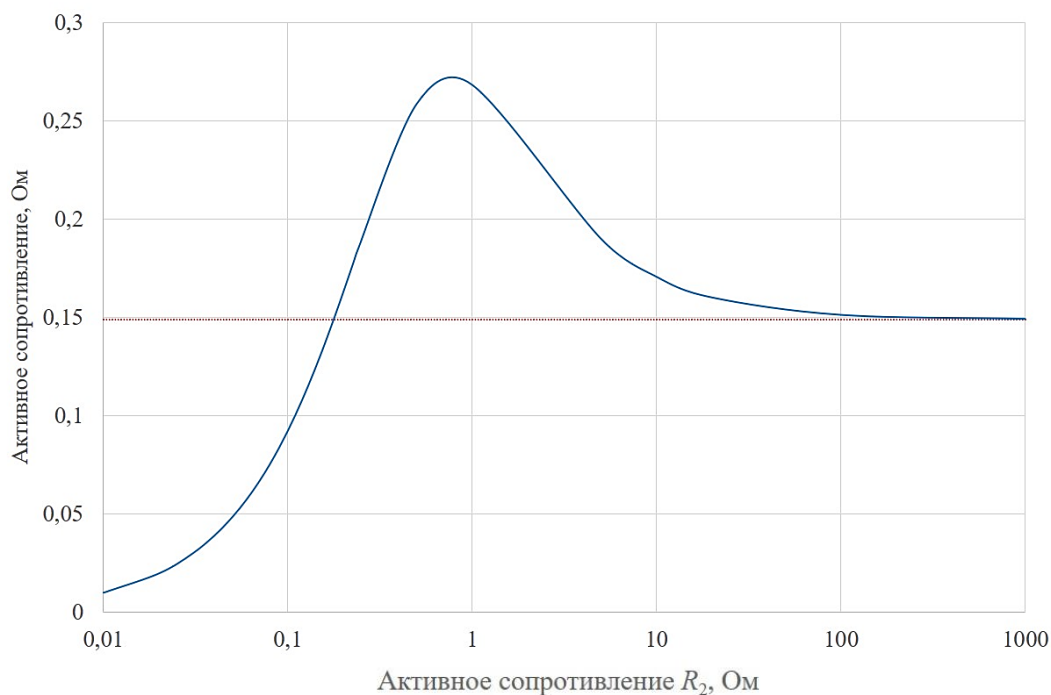


Рис. 1. Диаграмма зависимости активного сопротивления цепочки от параметров параллельных ветвей

Для определения граничного значения сопротивления R_2 , после которого дальнейшее увеличение приведет к росту активной компоненты эквивалентного сопротивления, приравняем левую часть уравнения (1) и R_2 , затем, решив полученное уравнение, получим

$$R_2 = \frac{R_1^3 + X_1^2 R_1}{X_1^2 - R_1^2}. \quad (2)$$

Используя выражение (2), несложно получить, что предельное значение $R_2 = 0,671$ (Ом), при котором еще не наступает рост активной составляющей эквивалентного сопротивления. Другая особенность полученного выражения – это его область допустимых значений. Очевидно, что при условии равенства активной и реактивной составляющей первого сопротивления величина R_2 обращается в бесконечность, а в случае дальнейшего роста активной составляющей описанный эффект пропадает. Таким образом, условием возникновения описанного явления является условие $R_1 < X_1$, что выполняется практически для всех воздушных линий, в том числе для тяговой сети без дополнительных проводников.

Исследуем, сохранится ли данный эффект в случае подключения к активно-индуктивному сопротивлению другого активно-индуктивного элемента, при этом магнитные потоки этих сопротивлений не пересекаются, явления взаимоиндукции нет.

$$R = \operatorname{Re} \left[\frac{(R_1 + jX_1) \cdot (R_2 + jX_2)}{R_1 + jX_2 + R_2 + jX_2} \right] = \frac{(R_1 + R_2)(R_1 R_2 - X_1 X_2) + (X_1 + X_2)(X_1 R_2 + R_1 X_2)}{(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2}. \quad (3)$$

Выполним расчет, аналогичный проворимому ранее, параметры первого сопротивления такие же, как и в первом случае. Полученная зависимость, приведенная на рис. 2, свидетельствует о том, что эффект сохраняется, однако зависит от реактивной составляющей параллельно подключаемого сопротивления.

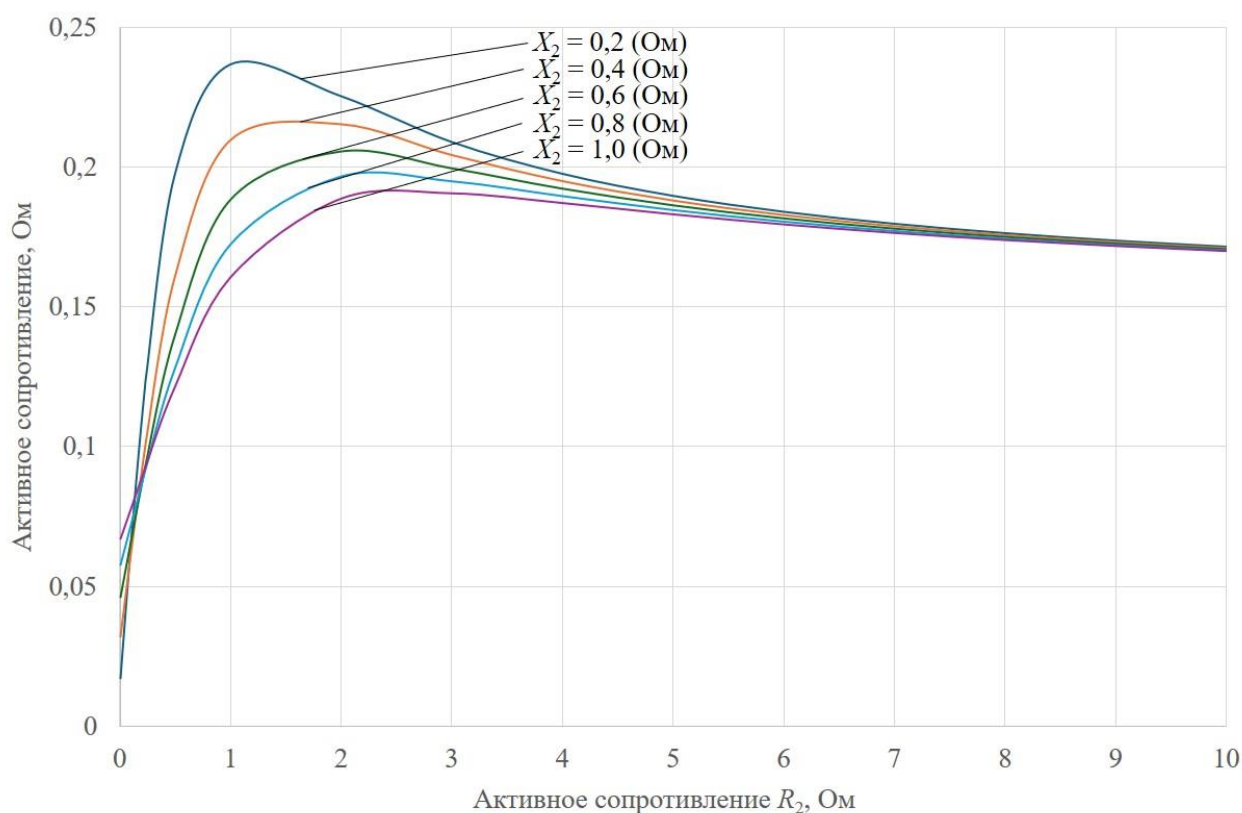


Рис. 2. Зависимость активного сопротивления цепочки от параметров параллельных ветвей при активно-индуктивных элементах

Для определения граничного значения сопротивления R_2 , как и в предыдущем случае, приравняем левую часть уравнения (3) и R_2 , после чего, решив полученное уравнение, получим

$$R_2 = \frac{R_1^3 + X_1^2 R_1 + 2 X_1 X_2 R_1}{X_1^2 - R_1^2}. \quad (4)$$

Таким образом, установлено, что при соединении двух активно-индуктивных сопротивлений, не имеющих взаимной индуктивной связи, активное сопротивление проводника, эквивалентного исходной параллельной схеме, не всегда будет меньше обоих значений активных составляющих проводников.

Перейдем к рассмотрению эквивалентного сопротивления двух проводников, имеющих взаимную индуктивную связь. Эквивалентное сопротивление в таком случае при условии, что токи в этих проводниках направлены в одну сторону, а следовательно, магнитосвязанные цепи включены согласно, будет определяться выражением

$$Z_{\text{экв}} = \frac{Z_1 Z_2 - Z_{12}^2}{Z_1 + Z_2 - 2 \cdot Z_{12}}. \quad (5)$$

Для поиска активной составляющей эквивалентного сопротивления перепишем выражение в виде:

$$Z_{\text{экв}} = \frac{(R_1 + jX_1)(R_2 + jX_2) + X_{12}^2}{R_1 + jX_1 + R_2 + jX_2 - 2 \cdot jX_{12}} = \frac{(R_1 R_2 - X_1 X_2 + X_{12}^2) + j(R_1 X_2 + R_2 X_1)}{(R_1 + R_2) + j(X_1 + X_2 - 2X_{12})}; \quad (6)$$

$$R = \text{Re}(Z_{\text{экв}}) = \frac{(R_1 + R_2)(R_1 R_2 - X_1 X_2 + X_{12}^2) + (X_1 + X_2 - 2X_{12})(R_1 X_2 + R_2 X_1)}{(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2 - 2X_{12})^2}. \quad (7)$$

Результаты расчета по выражению (7) с использованием ранее указанных данных и принятием дополнительного сопротивления взаимной индукции $X_{12} = 0,29$ (Ом) приведены на рис. 3.

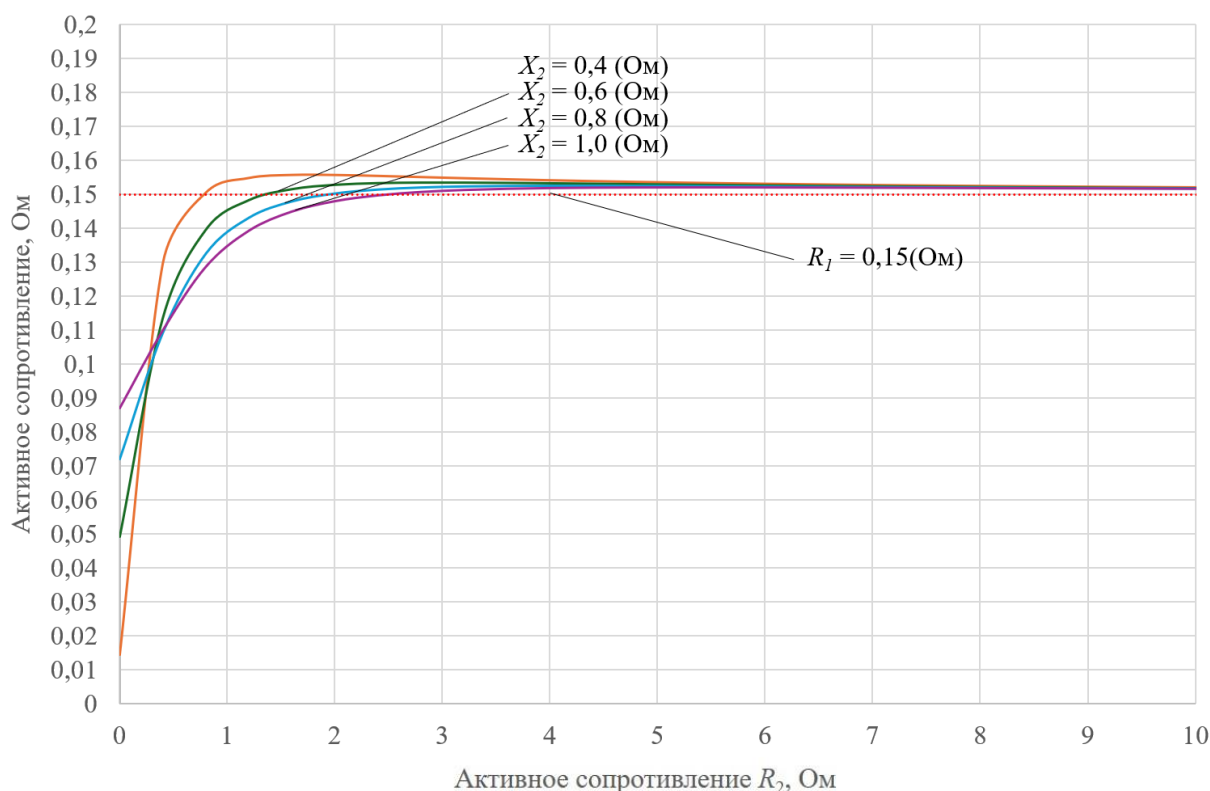


Рис. 3. Зависимость активного сопротивления цепочки от параметров параллельных ветвей при активно-индуктивных элементах и наличии взаимной индуктивной связи

На полученной зависимости отчетливо просматривается участок, на котором также наблюдается рост активной составляющей эквивалентного сопротивления.

Рассмотрим тяговую сеть с экранирующим проводом (рис. 4). Более подробно в объеме работы рассмотрим только цепь обратного тока – рельсовый путь и экранирующий проводник. Собственные сопротивления проводников обозначим как Z_K – для эквивалентного контактного провода, Z_P – для эквивалентного рельса и $Z_Э$ – для экранирующего провода. В расчете будем полагать, что рельсовая цепь и экран соединены параллельно в весьма большом числе мест.

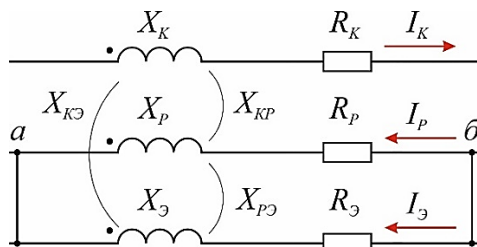


Рис. 4. Участок тяговой сети

Для участка тяговой сети, показанной на рис. 4, справедливы соотношения:

– ток в эквивалентном проводнике

$$\dot{I} = \dot{I}_P \frac{Z_P + Z_Э - 2 \cdot Z_{ЭП}}{Z_Э - Z_{ЭП}} + \dot{I}_K \frac{Z_{КЭ} - Z_{КП}}{Z_Э - Z_{ЭП}}; \quad (8)$$

– ток в рельсе

$$\dot{I}_P = \frac{\dot{I}(Z_Э - Z_{ЭП}) + \dot{I}_K(Z_{КЭ} - Z_{КП})}{Z_P + Z_Э - 2 \cdot Z_{ЭП}}; \quad (9)$$

– ток в экранирующем проводнике

$$\dot{I}_Э = \frac{\dot{I}(Z_P - Z_{ЭП}) + \dot{I}_K(Z_{КЭ} - Z_{КП})}{Z_P + Z_Э - 2 \cdot Z_{ЭП}}. \quad (10)$$

Коэффициент, который стоит при токе в рельсах в выражении (8), в точности повторяет выражение (5), являясь эквивалентным сопротивлением параллельно включенных рельсового пути и экранирующего проводника. Как было показано выше, при превышении некоторого значения сопротивления проводника (в данном случае экранирующего), подключаемого параллельно существующему (рельсовая цепь), вместо ожидаемого снижения активного сопротивления, а следовательно, и активных потерь будет наблюдаться рост активной составляющей при снижении модуля эквивалентного сопротивления. Аналогичный эффект можно показать при использовании усиливающих проводов, следовательно, приводимые рассуждения можно распространить на тяговые сети с экранирующим и усиливающим проводами.

Выводы

В результате проведенного исследования показано, что параллельное подключение активно-индуктивных элементов к рельсовым цепям может дать обратный эффект и вместо ожидаемого снижения потерь привести к возрастанию активного сопротивления со всеми вытекающими из этого результатами. Расчеты, приводимые в работе, выполнялись для значений сопротивлений, соизмеримых

с удельными значениями активных и реактивных значений для существующих марок проводов и тросов. Принимая решение об использовании дополнительных проводников, необходимо с осторожностью подходить к их выбору, проверяя в каждом конкретном случае, какой эффект дает такое решение на конкретном участке железной дороги.

Список литературы

- 1 **Осипова, А. И.** Расчет токов короткого замыкания сети постоянного тока при использовании двухуровневой системы группового заземления опор / А. И. Осипова, Ю. И. Жарков // Инженерный вестник Дона. – 2023. – № 6. – URL: ivdon.ru/magazine/archive/n6y2023/8489 (дата обращения 26.06.2026).
- 2 Техника высоких напряжений / И. М. Богатенков, Ю. Н. Бочаров, Н. И. Гумерова, Г. М. Иманов ; под общей редакцией профессора Г. С. Кучинского. – Санкт-Петербург : Энергоатомиздат. Санкт-Петербургское отделение, 2003. – 608 с. – ISBN 5-283-04757-1.
- 3 **Микаэльян, Е. Ю.** Моделирование электромагнитных полей участка железной дороги переменного тока / Е. Ю. Микаэльян, В. Н. Черных // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 2. – URL: ivdon.ru/magazine/archive/n8y2019/6155 (дата обращения: 26.06.2026).
- 4 **Лысенко, В. Г.** Определение границ участка тяговой сети с устойчивым коротким замыканием / В. Г. Лысенко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 1. – С. 145–152. – ISSN 0201-727X.
- 5 **Безуглый, А. В.** Актуальные проблемы повышения энергетической эффективности в современных условиях / А. В. Безуглый, В. Н. Черных // Сборник научных трудов «Транспорт : наука, образование, производство». Том 2. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2023. – С. 16–19. – ISBN 978-5-907295-89-6.
- 6 **Трубицин, М. А.** Продление срока службы электрооборудования / М. А. Трубицин // Сборник научных трудов «Транспорт : наука, образование, производство». Том 3. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2022. – С. 51–54. – ISBN 978-5-907295-68-1.
- 7 **Осипов, В. А.** Определение электрических параметров тяговых сетей, интегрированных с волоконно-оптическими линиями связи / В. А. Осипов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 1 (101). – С. 28–35. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_1_28.
- 8 **Патент № 2492074 С1 Российская Федерация, МПК В60М 3/02.** Тяговая сеть электрифицированных железных дорог переменного тока : № 2012106369/11 : заявл. 21.02.2012 : опубл. 10.09.2013 / В. А. Осипов, А. А. Капкаев. – EDN VSILCS.

References

- 1 **Osipova, A. I.** Calculation of short-circuit currents of the DC network when using a two-level system of group grounding system of supports. – Text : electronic / A. I. Osipova, Yu. I. Zharkov // Engineering Journal of Don. – 2023. – No. 6. – URL: ivdon.ru/magazine/archive/n6y2023/8489 (date of access: 06/26/2026).
- 2 High voltage engineering / I. M. Bogatenkov, Yu. N. Bocharov, N. I. Gumerova, G. M. Imanov ; edited by professor G. S. Kuchinsky. – Saint Petersburg : Energoatomizdat. Saint Petersburg Branch, 2003. – 608 p. – ISBN 5-283-04757-1.
- 3 **Mikaelyan, E. Yu.** Modeling of electromagnetic fields of an AC Railway Section. – Text : electronic / E. Yu. Mikaelyan, V. N. Chernykh // Engineering Journal of Don. – 2019. – No. 2. – URL: ivdon.ru/magazine/archive/n8y2019/6155 (date of access: 06/26/2026).
- 4 **Lysenko, V. G.** Defining the boundaries of a traction network section with a stable short circuit / V. G. Lysenko // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2020. – No. 1. – P. 145–152. – ISSN 0201-727X.
- 5 **Bezugly, A. V.** Actual problems of increasing energy efficiency in modern conditions / A. V. Bezugly, V. N. Chernykh // Transport : science, education, production : collection of scientific papers of the International scientific and practical conference. Vol. 2. – Rostov-on-Don : RSTU, 2023. – P. 16–19. – ISBN 978-5-907295-89-6.
- 6 **Trubitsin, M. A.** Prolongation of the service life of electrical equipment / M. A. Trubitsin // Transport : science, education, production : collection of scientific papers of the International scientific and practical conference. Vol. 3. – Rostov-on-Don : RSTU, 2022. – P. 51–54. – ISBN 978-5-907295-68-1.
- 7 **Osipov, V. A.** Determination of electrical parameters of traction networks integrated with fiber-optic communication lines / V. A. Osipov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 1 (101). – P. 28–35. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_1_28.
- 8 **Patent No. 2492074 C1 Russian Federation, IPC B60M 3/02.** Traction network of electrified railways with alternating current : No. 2012106369/11 : declared. 21.02.2012: publ. 10.09.2013 / V. A. Osipov, A. A. Kapkaev. – EDN VSILCS.

V. A. Osipov

**ON THE ISSUE OF ENERGY EFFICIENCY
OF A TRACTION NETWORK
WITH SHIELDING AND REINFORCING WIRES**

Abstract. The patterns of changes in equivalent resistance during parallel connection of additional conductors to active-inductive circuits are investigated. Based on analytical dependencies, cases of connection of an active resistance, an active-inductive element without an inter-inductive coupling and conductors connected by mutual induction are considered. The calculations performed have shown the existence of a parameter range in which the connection of an additional conductor leads to an increase, rather than a decrease, in the active component of the equivalent resistance. The boundary conditions for the occurrence of this effect are established, and its effect on the current distribution in the system is shown. The results obtained are extended to a traction network with a shielding wire. It is proved that the use of a shielding conductor does not always provide a reduction in active power losses. With certain correlations of the parameters of the track circuit and the shielding wire, it is possible to increase the active resistance of an equivalent reverse current circuit, despite a decrease in the total network resistance. The conclusion is made about the need for an individual assessment of the effectiveness of the use of shielding wires for each specific section of the railway, taking into account the parameters of the traction network and its operating modes.

Keywords: traction network, system with shielding conductor, energy losses in traction network.

For citation: Osipov, V. A. On the issue of energy efficiency of a traction network with shielding and reinforcing wires / V. A. Osipov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 2. – P. 30–36. – DOI 10.46973/0201–727X_2026_2_30.

Сведения об авторах

Осипов Владимир Александрович

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

Information about the authors

Osipov Vladimir Alexandrovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Theoretical Foundations of Electrical
Engineering”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor, Dean, Head of the Chair,
e-mail: dw_@rambler.ru