

УДК 621.331.3

Предел передаваемой мощности в системе тягового электроснабжения

М. А. Иванов, В. В. Серонос

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Иванов М. А., Серонос В. В. Предел передаваемой мощности в системе тягового электроснабжения // Бюллетень результатов научных исследований. 2024. Вып. 2. С. 64–74. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-02-64-74

Аннотация

Цель: понятие предела передаваемой мощности широко используется в общепромышленной энергетике для сравнения различных способов усиления электрической сети. В данной работе предложено использовать его и для оценки работы тяговых сетей железных дорог. Задание тяговой нагрузки мощностью использовано в нескольких программах имитационного моделирования систем тягового электроснабжения. Но работа с ними требует больших затрат времени. В результате разработана экспресс-методика сравнения различных способов усиления тягового электроснабжения является актуальной задачей. **Методы:** в работе использованы методы математического моделирования на базе теории электрических цепей. В качестве средства моделирования был использован программный пакет MATLAB. **Результаты:** получены выражения для расчета предельной передаваемой мощности в зависимости от длины межподстанционной зоны. Проанализирована зависимость передаваемой мощности от минимального напряжения на токоприемнике, эквивалентного сопротивления тяговых подстанций для участков постоянного тока. Для участков переменного тока проанализирована зависимость передаваемой мощности от коэффициента мощности тяговой нагрузки. Сделан вывод об актуальности повышения коэффициента мощности электроподвижного состава переменного тока. **Практическая значимость:** предлагаемая методика позволит быстро оценить эффект от использования различных способов усиления системы тягового электроснабжения.

Ключевые слова: пропускная способность по устройствам тягового электроснабжения, усиление системы тягового электроснабжения, мощность электровоза, напряжение на токоприемнике, коэффициент мощности электровоза.

В большинстве работ по тяговому электроснабжению нагрузку принято задавать током [1, 2]. Однако этот способ обладает рядом недостатков. Электроэнергия, передаваемая поезду, в конечном счете расходуется на его перемещение вдоль железнодорожного пути. Соблюдение перегонных времен хода (а значит, технической скорости) в настоящее время довольно жестко контролируется не только у пассажирских, но и у грузовых поездов. Работа по перемещению поезда, совершаемая за заданное время, позволяет определить среднюю мощность. Поэтому можно считать, что пропускная и провозная способность участка по устройствам тягового электроснабжения определяется мощностью, которую система электроснабжения способна передавать электроподвижному составу (ЭПС). Учет тяговой нагрузки через ее мощность предлагается в работах [3, 4], а также, например,

в программных продуктах [5, 6]. Но во всех вышеперечисленных работах речь идет об имитационном моделировании системы тягового электроснабжения. Такое моделирование требует большого количества исходных данных и машинного времени. В то же время существует потребность в экспресс-сравнении различных систем тягового электроснабжения либо способов их усиления. Указанное сравнение тоже можно сделать через предельную передаваемую мощность. Эта мощность будет ограничена несколькими факторами: потерей напряжения в сети, нагревом проводов контактной подвески, возможностью реализации надежной защиты от аварийных режимов. Наиболее чувствительным параметром обычно оказывается потеря напряжения или уровень напряжения на токоприемнике ЭПС. Под напряжением на токоприемнике здесь понимается разность между потенциалом токоприемника и рельсов, то есть напряжение на ЭПС. ГОСТ 6962-75 [7] нормирует минимальные напряжения: в тяговой сети постоянного тока — 2,2 кВ, переменного тока — 19 кВ. ПТЭ железных дорог требует, чтобы минимальное напряжение на любом блок-участке не опускалось ниже 2,7 кВ при постоянном токе и 21 кВ — при переменном [8]. Напряжения, приведенные в ГОСТ 6962-75, являются условием работоспособности подвижного состава. Минимальные напряжения, указанные в ПТЭ, призваны обеспечить требуемую пропускную способность участка при интенсивном движении.

Мощность, передаваемая ЭПС постоянного тока, определяется выражением:

$$P_3 = I_3 \cdot U_3, \quad (1)$$

где I_3 — ток ЭПС, А;

U_3 — напряжение на токоприемнике ЭПС, В.

Ток ЭПС может быть выражен через падение напряжения до него и суммарное сопротивление тяговой сети (R_Σ):

$$I_3 = \frac{U_{xx} - U_3}{R_\Sigma}, \quad (2)$$

где U_{xx} — напряжение холостого хода на шинах тяговой подстанции, В.

В результате мощность:

$$P_3 = \frac{(U_{xx} - U_3) \cdot U_3}{R_\Sigma}. \quad (3)$$

При известных значениях U_{xx} , задавшись минимально допустимым напряжением на токоприемнике, можно определить и предельную передаваемую мощность для любой точки тяговой сети (изменение координаты точки вызывает изменение сопротивления R_Σ). Рассмотрим зависимость передаваемой мощности от координаты ЭПС на примере межподстанционной зоны системы тягового

электроснабжения постоянного тока 3 кВ с известными параметрами. На рис. 1 представлены основные параметры типового однопутного участка постоянного тока длиной 25 км.

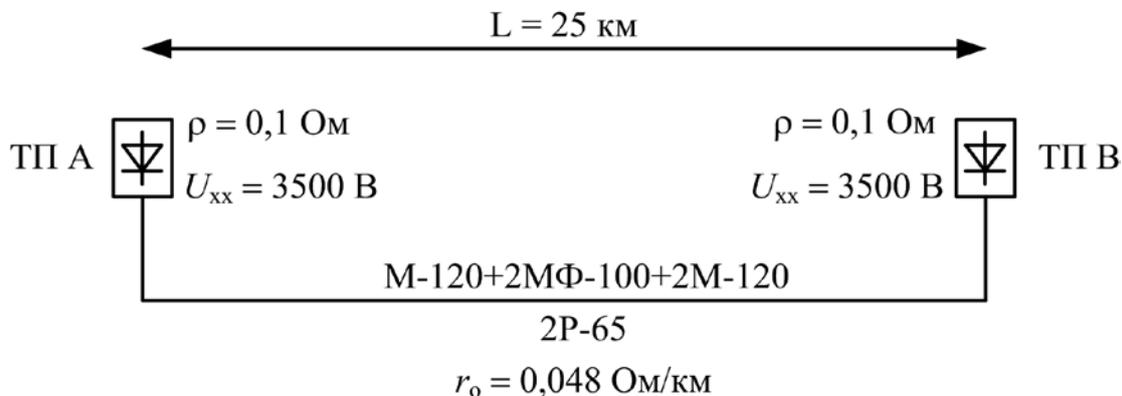


Рис. 1. Основные параметры участка постоянного тока

Сопротивление тяговой сети при двухстороннем ее питании в зависимости от координаты x может быть определено из выражения:

$$R_{\Sigma} = \frac{(\rho + r_o \cdot x) \cdot (\rho + r_o \cdot (L - x))}{2 \cdot \rho + r_o \cdot L}, \quad (4)$$

где ρ — внутреннее сопротивление тяговой подстанции, Ом;

r_o — удельное сопротивление тяговой сети, Ом/км;

x — координата ЭПС, км.

Дополнительно в расчет добавляется ограничение по максимальному току питающей линии — 3300 А (например, по условию срабатывания защиты или по нагреву проводов контактной подвески). Для этого одновременно с расчетом по выражению (3) необходимо определить ток подстанций А и Б. Его можно рассчитать по формуле (на примере подстанции А):

$$I_A = \frac{U_{xx} - U_{\text{э}}}{R_A}, \quad (5)$$

где R_A — сопротивление участка тяговой сети от подстанции А до ЭПС, Ом.

$$R_A = \rho + r_o \cdot x, \quad (6)$$

Если ток I_A окажется выше тока ограничения $I_{\text{огр}}$, то для расчета предельной мощности вместо выражения (3) необходимо использовать следующее:

$$P_{\text{эо}} = I_{\text{огр}} \cdot \frac{R_A}{R_{\Sigma}} \cdot (U_{xx} - I_{\text{огр}} \cdot R_A). \quad (7)$$

Аналогичным образом учитывается и ограничение по току тяговой подстанции В.

На рис. 2 показаны результаты расчета предельной передаваемой мощности для участка, изображенного на рис. 1, при минимальном напряжении у токоприемника 2700, 2400 и 2200 В.

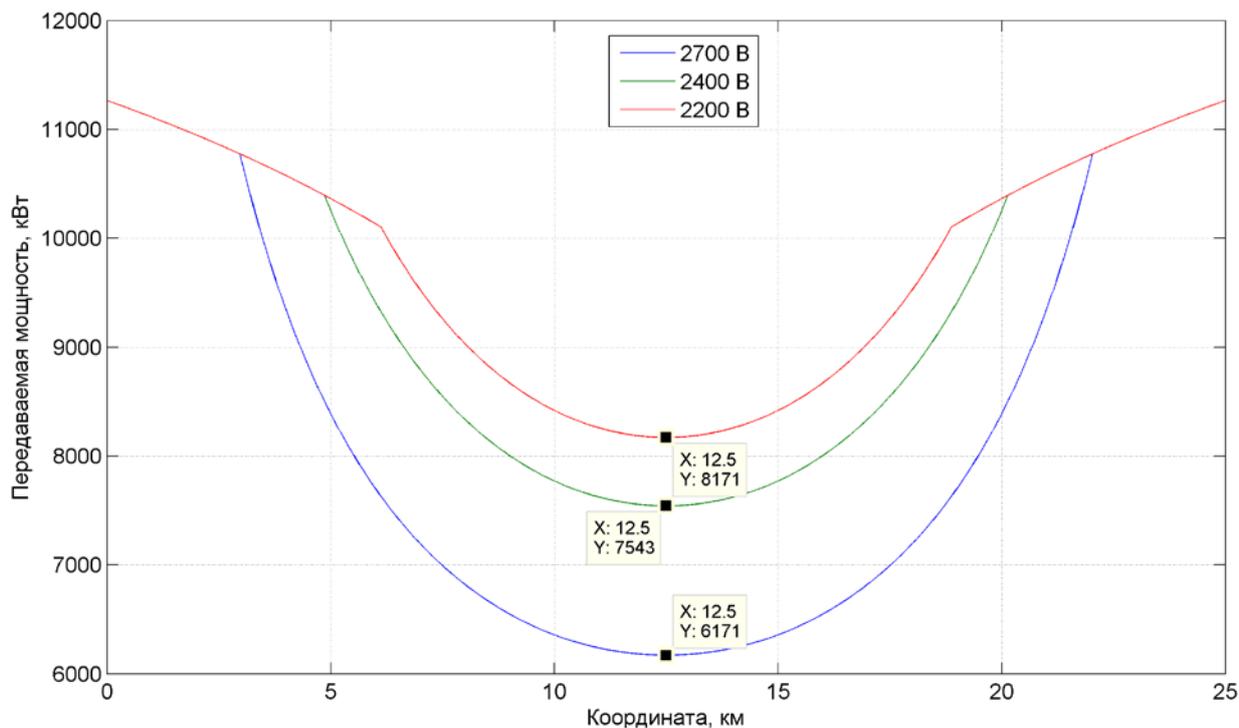


Рис. 2. Предел передаваемой мощности по тяговой сети постоянного тока при различных значениях минимального напряжения

Очевидно, что чем ниже допускаемое минимальное напряжение на токоприемнике, тем бóльшую мощность можно передать на подвижной состав. До тех пор пока потеря напряжения в тяговой сети не превысит 50 % [9] от значения напряжения холостого хода подстанции, напряжение на токоприемнике будет снижаться медленнее, чем увеличивается ток ЭПС. Поэтому передаваемая мощность возрастает.

Вместе с тем при пониженном напряжении на токоприемнике снижается и мощность P_3 , которую может реализовать ЭПС. Можно сказать, что принятые в ПТЭ значения минимально допустимого напряжения являются своего рода компромиссом между суммарной мощностью, передаваемой на межподстанционную зону, и мощностью, которую может реализовать отдельный ЭПС.

На рис. 3 представлены результаты расчетов для той же самой схемы, но при стабилизации выпрямленного напряжения на тяговых подстанциях. Этот режим смоделирован путем уменьшения внутреннего сопротивления тяговых

подстанций ρ с 0,1 до 0,01 Ом. Организация стабилизации выпрямленного напряжения позволяет поднять предельную передаваемую мощность, а значит, и провозную способность на 14–15%.

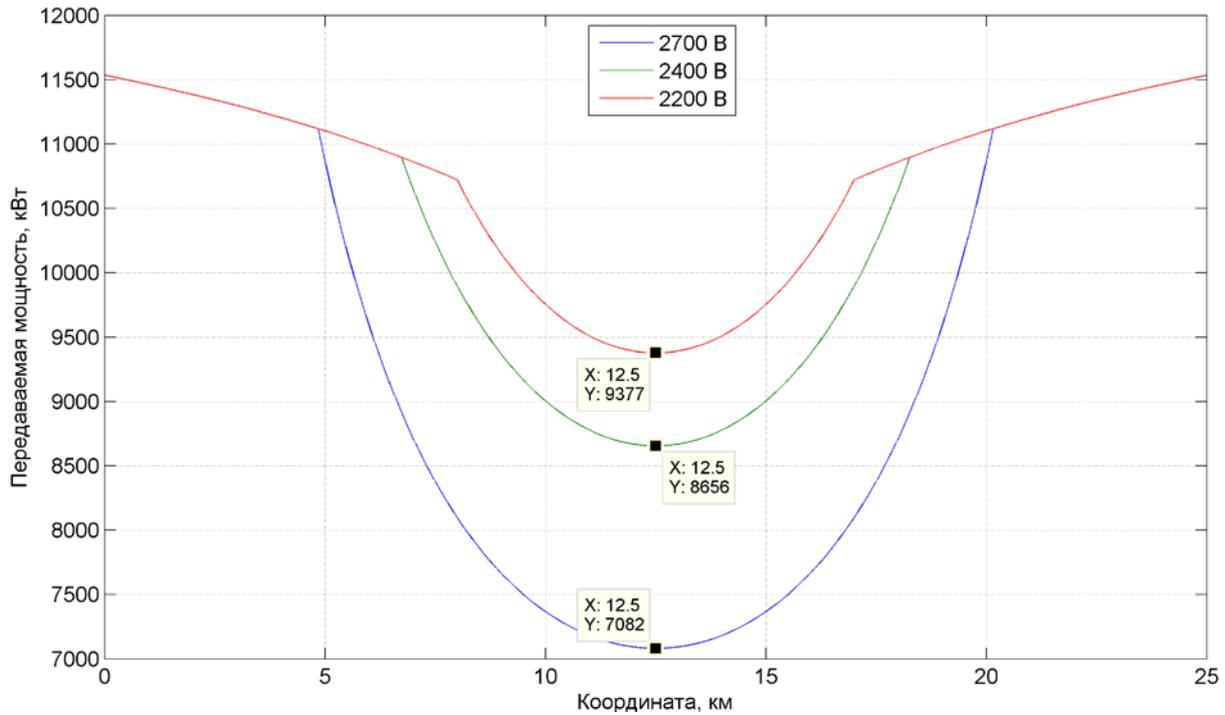


Рис. 3. Предел передаваемой мощности по тяговой сети постоянного тока при различных значениях минимального напряжения и стабилизации напряжения на тяговой подстанции

Аналогичные соотношения можно получить и для системы тягового электропитания переменного тока. Но при переменном токе в расчетах необходимо учитывать не только уровень напряжения, но и угол между напряжением и током. В самом простом случае для расчета можно использовать выражение для падения напряжения в тяговой сети:

$$U_{xx} \cdot e^{j \cdot \alpha} - U_3 = I_3 \cdot e^{-j \cdot \varphi_3} \cdot \underline{Z}_{\Sigma}, \quad (8)$$

где α — угол между напряжением на шинах тяговой подстанции и напряжением на ЭПС, эл. град;

I_3 — ток ЭПС, А;

φ_3 — угол между напряжением и током ЭПС, эл. град;

\underline{Z}_{Σ} — суммарный комплекс полного сопротивления тяговой сети, Ом.

Суммарный комплекс полного сопротивления можно определить по выражению, аналогичному (4), куда подставляются комплексы полных сопротивлений системы внешнего электропитания, понижающих трансформаторов и тяговой

сети. Остальные составляющие уравнения (8) — действительные числа. В этом уравнении два неизвестных: α и I_3 , но так как Z_Σ — величина комплексная, то эти величины могут быть однозначно определены. Искомая активная мощность, передаваемая ЭПС, при этом может быть определена как действительная часть произведения $U_3 \cdot I_3 \cdot e^{j\varphi_3}$. Уравнение (8) может быть записано иным образом, исключительно в действительных числах:

$$\begin{cases} U_{xx} \cdot \cos(\alpha) - I_3 \cdot Z_\Sigma \cdot \cos(\text{Arg}Z - \varphi_3) = U_3 \\ U_{xx} \cdot \sin(\alpha) - I_3 \cdot Z_\Sigma \cdot \sin(\text{Arg}Z - \varphi_3) = 0 \end{cases}, \quad (9)$$

где Z_Σ — модуль полного сопротивления тяговой сети, Ом;

$\text{Arg}\Sigma$ — аргумент полного сопротивления тяговой сети, эл. град.

Уравнение (9) является нелинейным и наиболее эффективно решается численными методами на ЭВМ. С использованием этого уравнения была проанализирована передаваемая мощность на межподстанционной зоне однопутного участка системы тягового электроснабжения переменного тока 25 кВ с известными параметрами, схема которого представлена на рис. 4.

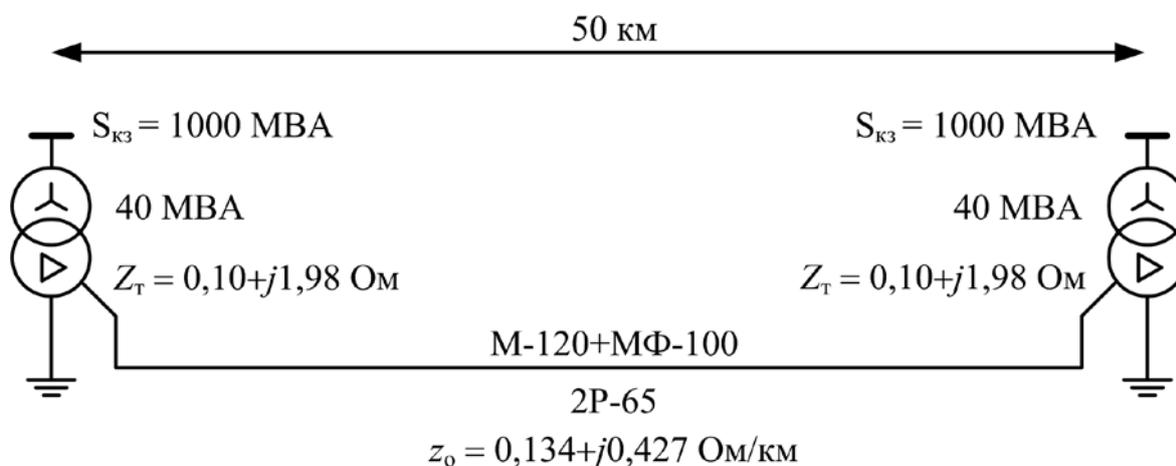


Рис. 4. Основные параметры участка переменного тока

На рис. 5 показаны результаты расчета предельной передаваемой мощности для участка, изображенного на рис. 4, при минимальном напряжении у токоприемника 21 и 19 кВ. Коэффициент мощности ЭПС (K_m) в обоих случаях принят равным 0,84 (что соответствует $\varphi_3 = 32,9$ эл. град). Ограничение по току питающей линии (по условиям защиты) принято равным 1200 А. Очевидно, что система переменного тока позволяет передавать значительно бóльшую мощность, чем система постоянного тока. Это делает ее незаменимой для участков с расчетными уклонами 14–16‰ и более.

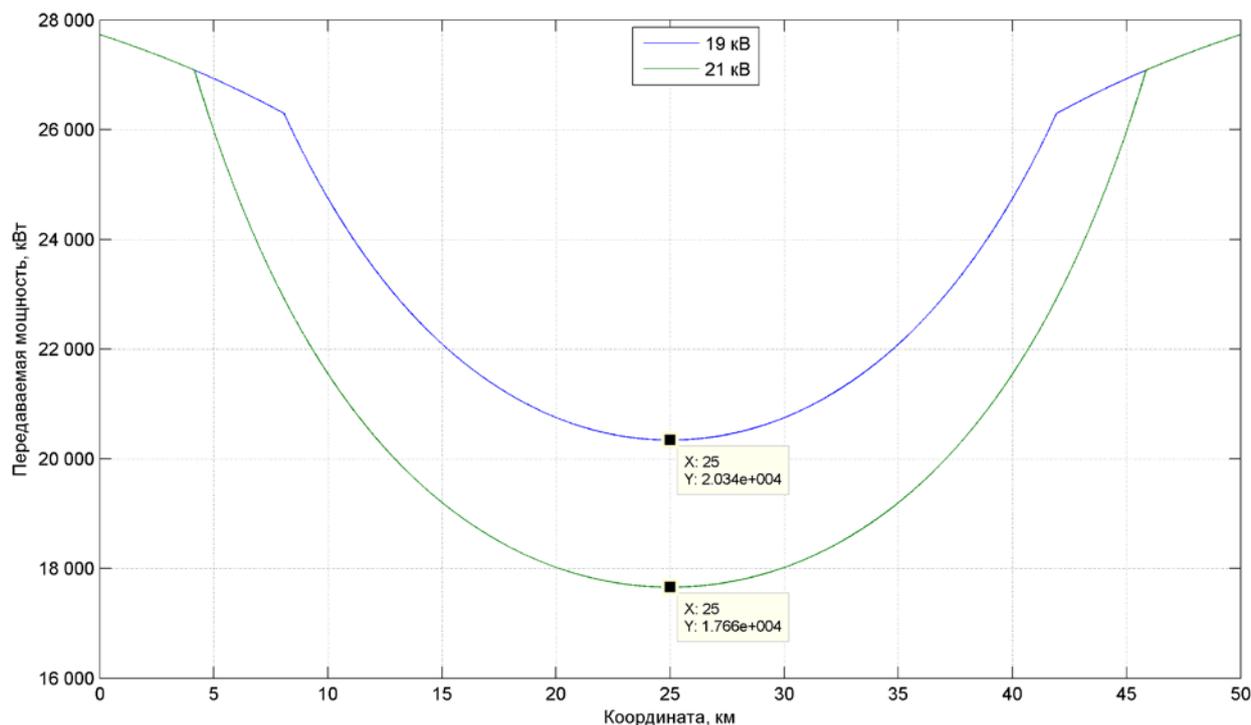


Рис. 5. Предел передаваемой мощности по тяговой сети переменного тока при различных значениях минимального напряжения и неизменном коэффициенте мощности ЭПС, равном 0,84 о. е.

На переменном токе предел передаваемой мощности зависит не только от напряжения на токоприемнике, но и от коэффициента мощности нагрузки. На рис. 6 представлены результаты расчета предельной передаваемой мощности при минимальном напряжении на токоприемнике 21 кВ и значениях коэффициента мощности 0,84, 0,91 и 0,98. Ограничение по току питающей линии составляет все те же 1200 А.

Из рис. 6 видно, что увеличение коэффициента мощности нагрузки на 17% (с 0,84 до 0,98) позволяет увеличить передаваемую мощность более чем в полтора раза. В настоящее время коэффициент мощности большинства ЭПС переменного тока колеблется в диапазоне 0,8–0,85 [10]. Таким образом, повышение коэффициента мощности ЭПС позволит значительно увеличить пропускную способность по устройствам электроснабжения. Коэффициент мощности, близкий к единице, имеет ЭПС с асинхронным тяговым приводом и четырехквadrантным преобразователем, например, электровозы 2ЭС5, 2ЭС7, 2ЭС5С и т. п. Использование такого ЭПС, помимо его высоких тяговых свойств, открывает путь и к повышению пропускной способности участков по устройствам тягового электроснабжения.

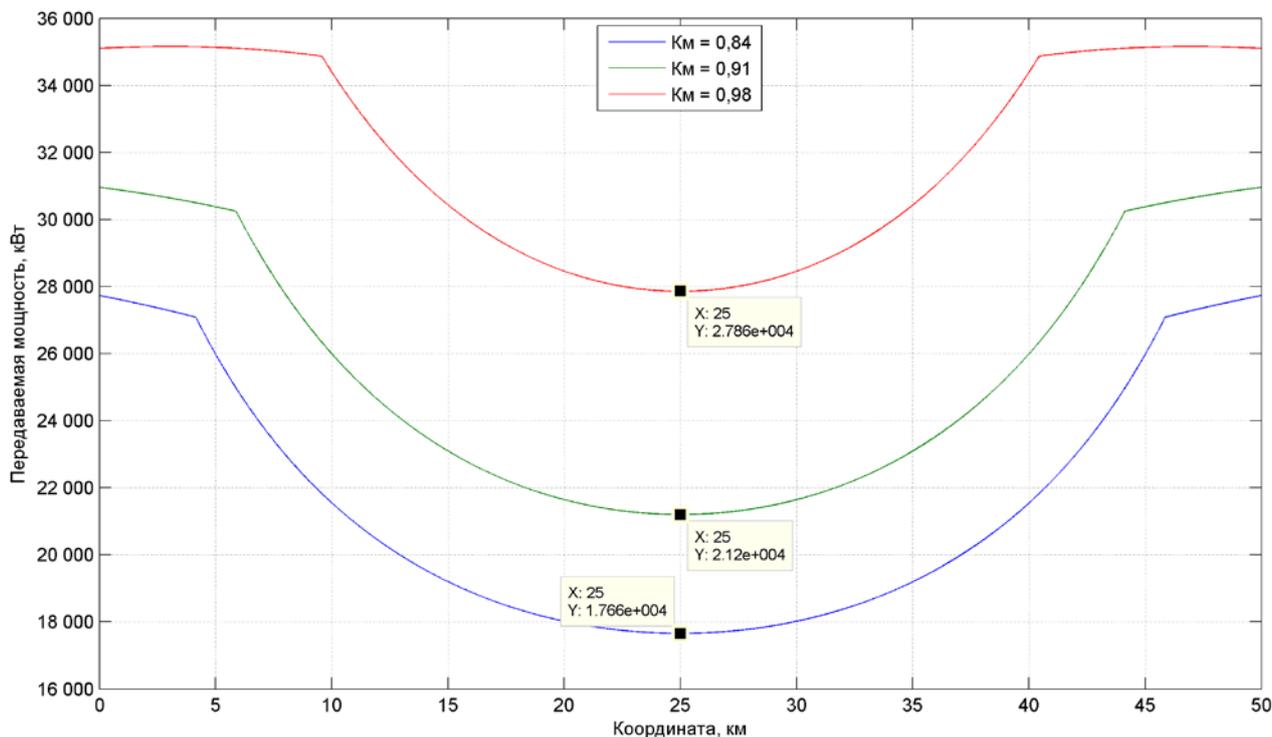


Рис. 6. Предел передаваемой мощности по тяговой сети переменного тока при различных значениях коэффициента мощности и при неизменном минимальном напряжении на токоприемнике 21 кВ

Библиографический список

1. Электроснабжение электрифицированных железных дорог: учебник для вузов ж/д трансп / К.Г. Марквардт. М.: Транспорт, 1982. 528 с.
2. Электроснабжение железных дорог: учеб. пособие / Ю.А. Чернов. М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2016. 406 с.
3. Сложнонесимметричные режимы электрических систем / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков. Иркутск: Изд-во Иркутского ун-та, 2005. 273 с.
4. Митрофанов А.Н. Моделирование процессов прогнозирования и управления электропотреблением тяги поездов // Самарская гос. акад. путей сообщения. Самара: СамГАПС, 2005. 174 с.
5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2021615190 Российская Федерация. Программа расчета систем тягового электроснабжения переменного тока с учетом изменяющегося напряжения на тяговой нагрузке / М.А. Иванов, А.Т. Бурков, А.В. Агунов, Д.А. Соколов; заявитель и правообладатель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I». № 2021614252; заявл. 29.03.2021; опубл. 05.04.2021. 1 с.

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2021615063 Российской Федерация. Программа расчета систем тягового электроснабжения постоянного тока с учетом изменяющегося напряжения на токоприемнике ЭПС / В.Г. Жемчугов, В.В. Сероносов, М.А. Иванов, И.И. Таразанов; заявитель и правообладатель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I». № 2021614099; заявл. 26.03.2021; опубл. 02.04.2021. 1 с.

7. ГОСТ 6962-75. Транспорт электрифицированный с питанием от контактной сети. Ряд напряжений. М.: ИПК «Издательство стандартов», 1996. 7 с. Текст непосредственный.

8. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации. Утверждены Приказом Минтранса России № 250 от 23.06.2022.

9. Основы теории цепей: учебник для вузов (5-е изд., перераб.) / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил и др. М.: Энергоатомиздат, 1989. 528 с.

10. Кривной А. М., Литовченко В. В., Шаров В. А. Компенсация реактивной мощности — эффективный способ снижения расхода электроэнергии на тягу поездов // Электрификация и научно-технический прогресс на железнодорожном транспорте: материалы III международного симпозиума «Элтранс-2005». СПб.: ПГУПС, 2007. С. 600–607.

Дата поступления: 15.04.2024

Решение о публикации: 27.05.2024

Контактная информация:

ИВАНОВ Михаил Александрович — старший преподаватель; m-a-ivanov@yandex.ru

СЕРОНОСОВ Владимир Владимирович — канд. техн. наук, доцент;

seronosov.vladimir@yandex.ru

The limit of power flow in the traction power supply system

M. A. Ivanov, V. V. Seronosov

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: *Ivanov M. A., Seronosov V. V. The limit of power flow in the traction power supply system // Bulletin of scientific research results. 2024. Iss. 2. P. 64–74. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-02-64-74 (In Russian)*

Abstract

Objective: the concept of the limit of power flow is widely used in general industrial power engineering to compare different ways of amplifying an electric network. In this paper, it is proposed to use it to evaluate the operation of traction networks of railways. Setting the traction power load is used in several simulation

programs for traction power supply systems. But working with them requires a lot of time. As a result, the development of an express methodology for comparing various ways to enhance traction power supply is an urgent task. **Methods:** the paper uses mathematical modeling methods based on the theory of electrical circuits. The MATLAB software package was used as a modeling tool. **Results:** expressions are obtained for calculating the maximum transmitted power depending on the length of the substation zone. The dependence of the transmitted power on the minimum voltage on the current collector, the equivalent resistance of traction substations for DC sections, is analyzed. For alternating current sections, the dependence of the transmitted power on the power factor of the traction load is analyzed. The conclusion is made about the relevance of increasing the power factor of an alternating current electric rolling stock. **Practical importance:** the proposed technique will allow you to quickly assess the effect of using various methods of strengthening the traction power supply system.

Keywords: capacity of traction power supply devices, reinforcement of traction power supply system, electric locomotive power, electric locomotive voltage, electric locomotive power factor.

References

1. Elektrosnabzhenie elektrificirovannyh zheleznih dorog: uchebnik dlya vuzov zh/d transp / K. G. Markvardt. M.: Transport, 1982. 528 s. (In Russian)
2. Elektrosnabzhenie zheleznih dorog: ucheb. posobie / Yu. A. Chernov. M.: FGBOU "Uchebno-metodicheskij centr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte", 2016. 406 s. (In Russian)
3. Slozhnonnesimmetrichnye rezhimy elektricheskikh sistem / V. P. Zakaryukin, A. V. Kryukov. Irkutsk: Izd-vo Irkutskogo un-ta, 2005. 273 s. (In Russian)
4. Mitrofanov A. N. Modelirovanie processov prognozirovaniya i upravleniya elektropotrebleniem tyagi poezdov // Samarskaya gos. akad. putej soobshcheniya. Samara: SamGAPS, 2005. 174 s. (In Russian)
5. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM 2021615190 Rossijskaya Federaciya. Programma rascheta sistem tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka s uchedom izmenyayushchegosya napryazheniya na tyagovoj nagruzke / M. A. Ivanov, A. T. Burkov, A. V. Agunov, D. A. Sokolov; zayavitel' i pravoobladatel': federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya "Peterburgskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya Imperatora Aleksandra I". № 2021614252; zayavl. 29.03.2021; opubl. 05.04.2021. 1 s. (In Russian)
6. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM 2021615063 Rossijskaya Federaciya. Programma rascheta sistem tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka s uchedom izmenyayushchegosya napryazheniya na tokopriemnike EPS / V. G. Zhemchugov, V. V. Seronov, M. A. Ivanov, I. I. Tarazanov; zayavitel' i pravoobladatel': federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya "Peterburgskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya Imperatora Aleksandra I". № 2021614099; zayavl. 26.03.2021; opubl. 02.04.2021. 1 s. (In Russian)
7. GOST 6962-75. Transport elektrificirovannyj s pitaniem ot kontaktnoj seti. Ryad napryazhenij. M.: IPK "Izdatel'stvo standartov", 1996. 7 s. Tekst neposredstvennyj. (In Russian)
8. Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii zheleznih dorog Rossijskoj Federacii. Utverzhdeny Prikazom Mintransa Rossii № 250 ot 23.06.2022. (In Russian)

9. Osnovy teorii cepej: uchebnik dlya vuzov / (5-e izd., pererab.) / G. V. Zeveke, P. A. Ionkin, A. V. Netushil i dr. M.: Energoatomizdat, 1989. 528 s. (In Russian)

10. Krivnoj A. M., Litovchenko V. V., Sharov V. A. Kompensaciya reaktivnoj moshchnosti — effektivnyj sposob snizheniya raskhoda elektroenergii na tyagu poezdov // Elektrifikaciya i nauchno-tekhnicheskij progress na zheleznodorozhnom transporte: materialy III mezhdunarodnogo simpoziuma “Eltrans-2005”. SPb.: PGUPS, 2007. S. 600–607. (In Russian)

Received: 15.04.2024

Accepted: 27.05.2024

Author’s information:

Mikhail A. IVANOV — Senior Lecturer; m-a-ivanov@yandex.ru

Vladimir V. SERONOSOV — PhD in Engineering, Associate Professor; seronosov.vladimir@yandex.ru