

УДК 621.3.051.024

Инженерная методика определения ЭДС холостого хода тяговых подстанций постоянного тока

В. В. Варичева, Т. З. Сиукаев, Б. А. Дудин

Российский университет транспорта, Российская Федерация, Москва, 127994, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, ГСП-4

Для цитирования: Варичева В. В., Сиукаев Т. З., Дудин Б. А. Инженерная методика определения ЭДС холостого хода тяговых подстанций постоянного тока // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 2. — С. 69–76. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-2-69-76

Аннотация

Цель: Предложение методики выбора регулируемых значений ЭДС холостого хода тяговых подстанций по заданной мощности и обоснование применения данного алгоритма на железных дорогах, электрифицированных постоянным током 3,0 кВ. **Методы:** Использовался графический метод для определения значений тока через напряжение, позволяющий вычислить соответствующие значения ЭДС холостого хода подстанций. С помощью расчетно-аналитического метода были установлены значения токов ЭПС, позволяющие вычислить мощности тяговых подстанций. **Результаты:** Расчет, проводимый графическим методом, демонстрирует зависимость напряжения на токоприемнике от тока ЭПС при условии постоянства мощности. Результаты расчетов, выполненных с помощью системы MathCAD, позволяют установить характер зависимости токов и мощностей тяговых подстанций от расстояний от ЭПС до подстанций. **Практическая значимость:** Результаты работы показывают, что выбор оптимальных значений ЭДС холостого хода тяговых подстанций позволяет уменьшить потери электроэнергии в тяговой сети, что особенно важно в условиях пропуска тяжеловесных и скоростных поездов.

Ключевые слова: Тяговые подстанции, система постоянного тока, тяжеловесное грузовое движение, ЭДС холостого хода, потери электрической энергии.

Одними из важнейших устройств системы тягового электроснабжения являются тяговые подстанции, получающие электрическую энергию от системы внешнего электроснабжения и преобразующие ее в конкретный род тока и уровень напряжения, необходимые для питания электроподвижного состава. Помимо электроподвижного состава, питание от тяговых подстанций получают городской электрический транспорт, электропоезда метрополитена, нетяговые потребители железнодорожного транспорта, районные и сельскохозяйственные потребители электроэнергии [1].

Тяговые подстанции классифицируются по ряду признаков:

по схеме присоединения к системе внешнего электроснабжения:

- опорные;
- промежуточные (транзитные и отпаечные);
- тупиковые;

по системе электрической тяги:

постоянного тока 3,3 кВ: подразделяются, в свою очередь, по типу преобразователей (выпрямительные и выпрямительно-инверторные) и по способу трансформации (одно- и двухступенчатые, классифицируемые по величине первичного напряжения);

переменного тока 25 кВ;

переменного тока 2×25 кВ;

стыковые (переменно-постоянного тока);

по способу управления:

– телеуправляемые;

– нетелеуправляемые;

по способу обслуживания:

– с постоянным дежурным персоналом;

– с дежурством на дому;

– без дежурного персонала;

по возможности перемещения:

– стационарные;

– передвижные [2].

Система постоянного тока положила начало электрификации российских железных дорог и впоследствии получила широкое применение в городском и промышленном электротранспорте благодаря хорошим тяговым и скоростным характеристикам, присущим двигателям постоянного тока с последовательным возбуждением [3].

Участки, электрифицированные на постоянном токе 3,0 кВ, имеют определенные ограничения пропускной способности при вождении скоростных и тяжеловесных поездов: при нагреве проводов контактной сети снижается их механическая прочность, а в случае понижения напряжения на токоприемнике электровоза ниже эксплуатируемого значения 2700 В происходит снижение скорости движения поездов, но если потребляемая мощность сохраняется — возрастает ток, потребляемый электровозом, равно как и увеличиваются потери электрической энергии в тяговой сети [4].

Согласно [5], тяжеловесное грузовое движение заключается в пропуске грузовых поездов с массой состава не менее 6300 т и вагонами с осевыми нагрузками не менее 25 тс. Отмечено, что повышение среднего веса поезда является важнейшим показателем эксплуатационной работы железнодорожного транспорта и определяет уровень эффективности перевозочного процесса [6].

Таким образом, при росте объема перевозок задача повышения пропускной способности железных дорог, электрифицированных постоянным током 3,0 кВ, является особенно актуальной, поскольку увеличение количества тяжеловесных поездов на таких участках неизменно сопряжено с возрастанием токовой нагрузки

в системе, снижением уровня напряжения в контактной сети, увеличением потерь электроэнергии и сокращением ресурса тяговой подстанции. Кроме того, из-за разности выходных напряжений тяговых подстанций, обусловленной различными значениями их внутреннего сопротивления и отклонениями напряжения питающей сети, при наличии тяговой нагрузки на фидерной зоне происходит появление «уравнительных токов» между подстанциями, приводящее к дополнительным потерям электрической энергии. К примеру, разница мгновенных значений выпрямленного напряжения смежных тяговых подстанций величиной 300–500 В обуславливает возникновение «уравнительных токов», достигающих 20–40 % тяговой нагрузки [7, 8].

Выбор оптимальных значений ЭДС холостого хода тяговых подстанций (ТП) постоянного тока является задачей технико-экономической, так как неправильный выбор этих значений приводит к удлинению плеч питания подстанций с большим E_{xx} и, как следствие, к увеличению потерь электроэнергии в тяговой сети. Особенно это проявляется на межподстанционных зонах, питаемых подстанциями, у которых внутренние сопротивления различаются в 2 и более раз [9].

Известно, что потери в тяговой сети будут минимальны, если токи между ТП распределяются обратно пропорционально расстояниям от электроподвижного состава (ЭПС) до подстанции [10].

Авторами предлагается инженерная методика определения E_{xx} подстанций, при которых нагрузка ТП будет оптимальной. Это особенно важно в современных условиях при пропуске тяжеловесных и высокоскоростных поездов.

Методика основана на том, что схема замещения источников питания для ЭПС представляет собой последовательное соединение E_{xx} ТП и внутреннего сопротивления, включающего в себя внутреннее сопротивление ТП r_0 и сопротивление участка тяговой сети r_i до ЭПС.

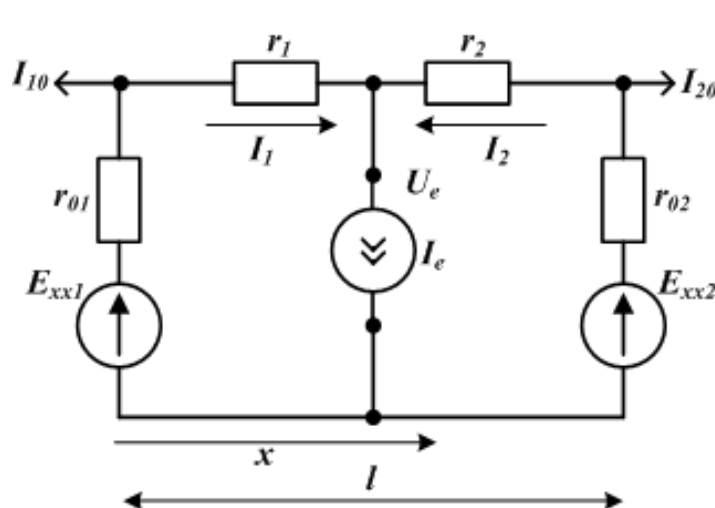


Рис. 1. Схема замещения источников питания для ЭПС

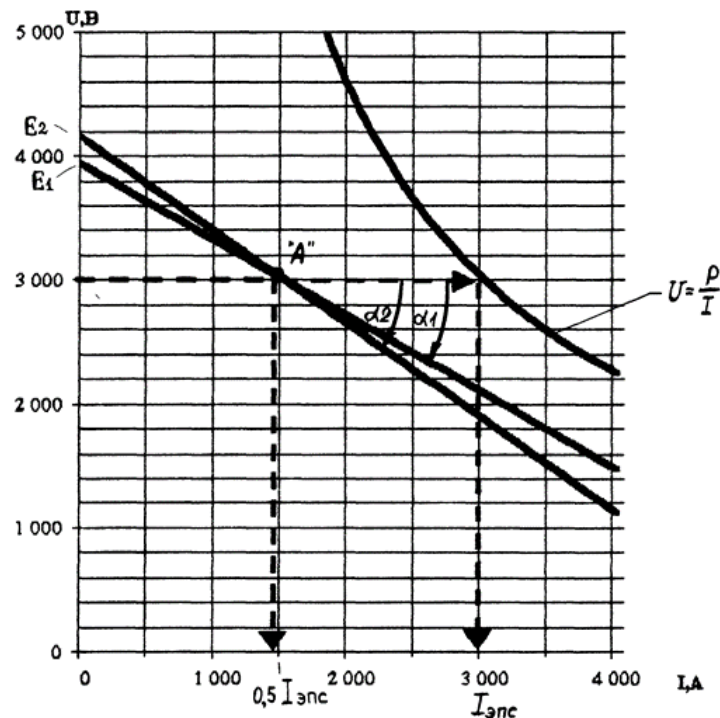


Рис. 2. Результаты расчета, проводимого графическим методом

Рассмотрим конкретный пример (рис. 1): тяговые подстанции $ТП_1$ и $ТП_2$ имеют внутренние сопротивления $r_{01} = 0,11$ [Ом] и $r_{02} = 0,25$ [Ом] соответственно. Сопротивление тяговой сети между $ТП_1$ и $ТП_2$ длиной l равно $R_{TC} = r_1 + r_2 = 1$ [Ом]. Мощность нагрузки постоянна и равна $P_e = 9$ МВт (два двухсекционных ВЛ-11, при силе тяги 583,2 кН, скорости 50 км/ч и КПД 0,9). В середине зоны внутренние сопротивления эквивалентных источников составят $r_{1(0,5)} = r_{01} + 0,5R_{TC} = 0,11 + 0,5 = 0,61$ [Ом], $r_{2(0,5)} = r_{02} + 0,5R_{TC} = 0,25 + 0,5 = 0,75$ [Ом]. Углы наклона внешних характеристик соответственно равны $\alpha_1 = \arctg 0,61 = 31,4^\circ$ и $\alpha_2 = \arctg 0,75 = 36,9^\circ$. Расчет можно произвести графическим методом.

На рис. 2. показана зависимость напряжения на токоприемнике от тока ЭПС при условии постоянства мощности (кривая $U = P/I$). Задаемся необходимым напряжением в середине зоны ($U_{ЭПС} = U_e = 3000$ В) и по кривой находим ток ($I_{ЭПС} = I_e = 3000$ А). На плоскости фиксируем рабочую точку «А» с координатами $U_A = 3000$ В, $I_A = 0,5 I_{ЭПС} = 1500$ А и проводим через нее прямые под углами α_1 и α_2 к оси абсцисс (как показано на рис. 2) до пересечения с осью ординат и находим значения соответствующих E_{xx} $ТП_1$ и $ТП_2$ ($E_{xx1} = 3915$ В, $E_{xx2} = 4125$ В).

Если $ТП_1$ и $ТП_2$ имеют нагрузки на смежных зонах I_{10} , I_{20} , то E_{xx} необходимо увеличить на величину произведения тока этой нагрузки на внутреннее сопротивление подстанции.

Также расчет можно произвести аналитически с помощью, например, системы компьютерной математики MathCAD. Так, ЭДС холостого хода для $ТП_1$ определится по формуле:

$$E_{xx1} = U_e + 0,5 I_e (r_1 + r_{01}) + I_{10} r_{01}, \quad (1)$$

а для ТП₂ — по формуле:

$$E_{xx2} = U_e + 0,5 I_e (r_2 + r_{02}) + I_{20} r_{02}. \quad (2)$$

Для определения токов подстанций, тока ЭПС, а также мощностей подстанций и ЭПС при нахождении его в других точках межподстанционной зоны в зависимости от координаты ЭПС x_e необходимо:

– выразить сопротивления участков тяговой сети $r_1(x)$ и $r_2(x)$:

$$r_1(x) = x R_{TC1km},$$

$$r_2(x) = (l - x) R_{TC1km},$$

где R_{TC1km} — активное сопротивление 1-го км тяговой сети;

– выразить токи плеч тяговой сети между подстанциями и ЭПС:

$$I_1(x) = \frac{I_e [r_2(x) + r_{02}] + E_{xx1} - E_{xx2}}{r_1(x) + r_{01} + r_2(x) + r_{02}}, \quad (3)$$

$$I_2(x) = \frac{I_e [r_1(x) + r_{01}] + E_{xx2} - E_{xx1}}{r_1(x) + r_{01} + r_2(x) + r_{02}}. \quad (4)$$

При этом ток ЭПС равен:

$$I_e(x) = I_1(x) + I_2(x). \quad (5)$$

– выразить мощности тяговых подстанций ТП₁ и ТП₂:

$$P_{1S}(x) = U_e I_1(x). \quad (6)$$

$$P_{2S}(x) = U_e I_2(x). \quad (7)$$

При этом мощность ЭПС равна:

$$P_e(x) = P_{1S}(x) + P_{2S}(x). \quad (8)$$

На рис. 3. приведены результаты расчетов по формулам (3)–(8), выполненные с помощью системы компьютерной математики MathCAD.

Из рис. 3. видно, что при выбранных ЭДС холостого хода токи и мощности ТП₁ и ТП₂ распределяются обратно пропорционально расстояниям от ЭПС до подстанций, а также соблюдается постоянство тока и потребляемой мощности ЭПС.

Такая упрощенная методика позволяет по заданной мощности нагрузки выбрать регулируемые значения E_{xx} смежных ТП, при которых потери электроэнергии в тяговой сети будут минимальными.

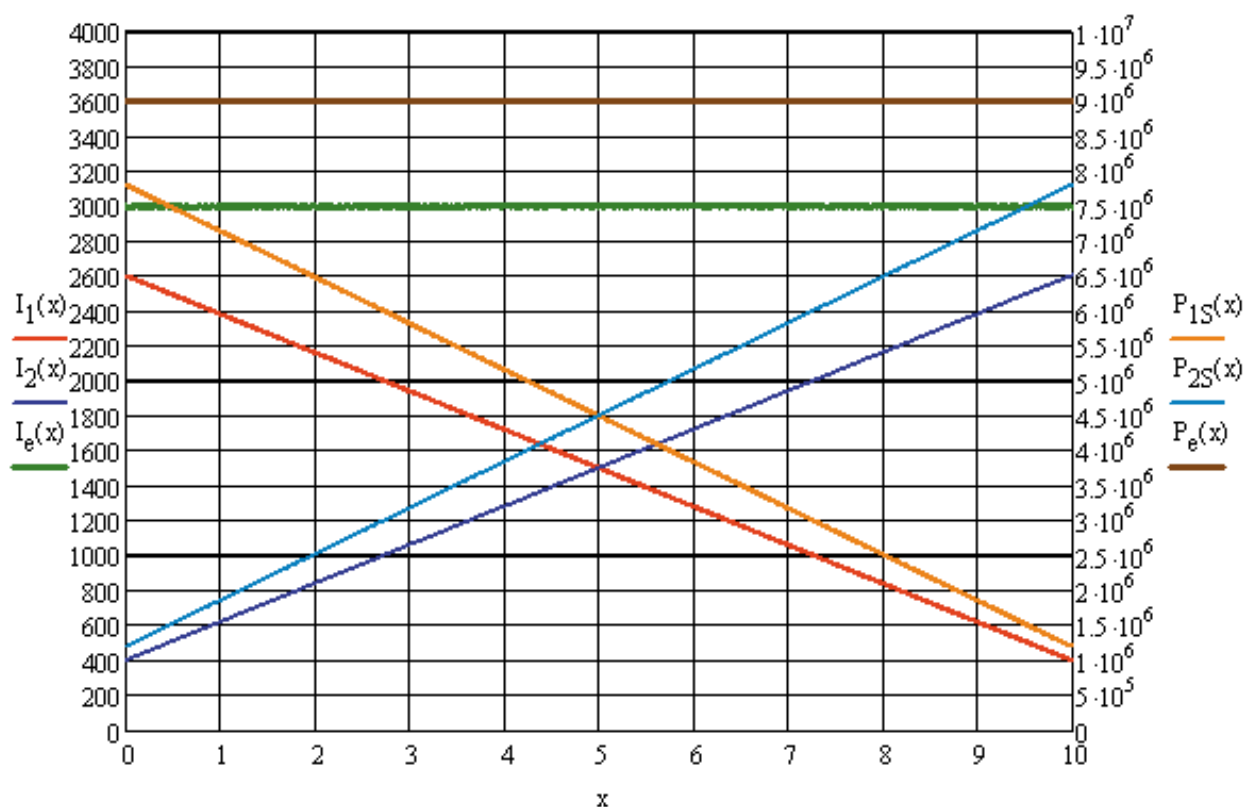


Рис. 3. Результаты расчетно-аналитического метода, выполненного в MathCAD

Список источников

1. Бей Ю. М. Тяговые подстанции: учебник для вузов ж.-д. транспорта / Ю. М. Бей, Р. Р. Мамошин, В. Н. Пупынин, М. Г. Шалимов. — М.: Транспорт, 1983. — 319 с.
2. Почаевец В. С. Электрические подстанции: учебник / В. С. Почаевец. — М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2012. — 491 с.
3. Мирошниченко Р. И. Режимы работы электрифицированных участков / Р. И. Мирошниченко. — М.: Транспорт, 1982. — 207 с.
4. Аржанников Б. А. Система управляемого электроснабжения электрифицированных железных дорог постоянного тока / Б. А. Аржанников. — 2005. — 176 с.
5. Бондаренко О. А. Вопросы развития тяжеловесного движения грузовых поездов / О. А. Бондаренко // Наука и образование транспорту. — 2016. — № 1. — С. 91–93.
6. Широкова В. В. Исследование влияния пропуска тяжеловесных поездов на пропускную и провозную способности железнодорожных участков / В. В. Широкова, Н. А. Кузьмина, Г. В. Санькова // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2021. — № 4.
7. Ковалев А. А. Анализ показателей качества электроэнергии в сетях нетяговых потребителей железнодорожного транспорта / А. А. Ковалев, Т. Т. Шаюхов, С. А. Чебаков, Т. Т. Шарапов // Транспорт Урала. — 2020. — № 4(67). — С. 86–90.

8. Климова Е. В. Исследование сфер эффективности применения технологии пропуска соединенных и тяжеловесных поездов / Е. В. Климова // Вестник Сиб. гос. ун-та путей сообщения. — 2017. — № 4(43). — С. 66–73.

9. Проектирование систем энергоснабжения электрических железных дорог: учебное пособие для высших учебных заведений ж.-д. транспорта / Под общей ред. Л. М. Перцовского. — М.: Трансжелдориздат, 1963. — 471 с.

10. Караев Р. И. Электрические сети и энергосистемы: учебник для вузов / Р. И. Караев, С. Д. Волобровский. — Изд. 2-е, перераб. и доп. — М.: Транспорт, 1978. — 312 с.

Дата поступления: 04.04.2025

Решение о публикации: 15.05.2025

Контактная информация:

ВАРИЧЕВА Вероника Владимировна — аспирант; veronicka.varicheva@yandex.com

СИУКАЕВ Тамерлан Заурович — аспирант; stz777@mail.ru

ДУДИН Борис Алексеевич — канд. техн. наук, доц.; dubodin@mail.ru

Engineering Methodology for Determining EMF in Idling DC Traction Substations

V. V. Varicheva, T. Z. Siukaev, B. A. Dudin

Russian University of Transport, 9, bld. 9, Obraztsova str., OCP-4, Moscow, 127994, Russian Federation

For citation: Varicheva V. V., Siukaev T. Z., Dudin B. A. Engineering Methodology for Determining EMF of Idling at DC Traction Substations. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 2, pp. 69–76. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-2-69-76

Summary

Purpose: To propose a method for selecting adjustable EMF values in idling traction substations for a given power, and the justification of this algorithm application on railways electrified with 3.0 kV direct current. **Methods:** The graphical method was used to ascertain the values of current through voltage, thereby facilitating the calculation of the corresponding EMF values in idling substations. Utilising the calculation and analytical method, the electric current values at the traction substations were established, thus enabling the calculation of the traction substation power. **Results:** The calculation conducted utilising the graphical method, has elucidated the dependence of the current collector voltage on the electric rolling stock current in the case of constant power. The calculation performed in the MathCAD system facilitates the determination of the nature of the dependence of the traction substation current and power on the distance between the electric train and the substations. **Practical significance:** The findings of the research demonstrate that the selection of optimal EMF values in idling traction substations enables the reduction of losses of electric power in the traction network. This is of particular significance in the context of heavy and high-speed trains.

Keywords: Traction substations, direct current system, heavy-duty freight traffic, EMF in idling, electric energy losses.

References

1. Bey Yu. M., Mamoshin R. R., Pupynin V. N., Shalimov M. G. *Tyagovye podstantsii: uchebnik dlya vuzov zh.-d. transporta* [Traction substations: a textbook for higher education institutions of railway transport]. Moscow: Transport Publ., 1983, 319 p. (In Russian)
2. Pochaevets V. S. *Elektricheskie podstantsii: uchebnik* [Electrical substations: a textbook]. Moscow: FGBOU "Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte" Publ., 2012, 491 p. (In Russian)
3. Miroshnichenko R. I. *Rezhimy raboty elektrifitsirovannykh uchastkov* [Operating modes of electrified sections]. Moscow: Transport Publ., 1982, 207 p. (In Russian)
4. Arzhannikov B. A. *Sistema upravlyaemogo elektrosnabzheniya elektrifitsirovannykh zheleznikh dorog postoyannogo toka* [Controlled power supply system of electrified DC railways]. 2005, 176 p. (In Russian)
5. Bondarenko O. A. Voprosy razvitiya tyazhelovesnogo dvizheniya gruzovykh poezdov [Issues of development of heavy-haul traffic of freight trains]. *Nauka i obrazovanie transport* [Science and education in transport]. 2016, Iss. 1, pp. 91–93. (In Russian)
6. Shirokova V. V., Kuz'mina N. A., San'kova G. V. Issledovanie vliyaniya propuska tyazhelovesnykh poezdov na propusknuyu i provoznuyu sposobnosti zheleznodorozhnykh uchastkov [Study of the influence of heavy-haul trains on the throughput and carrying capacity of railway sections]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2021, Iss. 4. (In Russian)
7. Kovalev A. A., Shayukhov T. T., Chebakov S. A., Sharapov T. T. Analiz pokazateley kachestva elektroenergii v setyakh netyagovykh potrebiteley zheleznodorozhnogo transporta [Analysis of power quality indicators in the networks of non-traction consumers of railway transport]. *Transport Urala* [Transport of the Urals]. 2020, Iss. 4(67), pp. 86–90. (In Russian)
8. Klimova E. V. Issledovanie sfer effektivnosti primeneniya tekhnologii propuska soedinennykh i tyazhelovesnykh poezdov [Study of the spheres of efficiency of application of the technology of passing connected and heavy trains]. *Vestnik Sib. gos. un-ta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Siberian State University of Railway Engineering]. 2017, Iss. 4(43), pp. 66–73. (In Russian)
9. *Proektirovanie sistem energosnabzheniya elektricheskikh zheleznikh dorog: uchebnoe posobie dlya vysshikh uchebnykh zavedeniy zh.-d. transporta. Pod obshchey red. L. M. Pertsovskogo* [Design of power supply systems of electric railways: a textbook for higher educational institutions of railway transport. Under the general editorship of L. M. Pertsovsky]. Moscow: Transzheldorizdat Publ., 1963, 471 p. (In Russian)
10. Karaev R. I., Volobriniski S. D. *Elektricheskie seti i energosistemy: uchebnik dlya vuzov. Izd. 2-e, pererab. i dop.* [Electrical networks and power systems: a textbook for universities]. Moscow: Transport Publ., 1978, 312 p. (In Russian)

Received: April 04, 2025

Accepted: May 15, 2025

Author's information:

Veronika V. VARICHEVA — Postgraduate Student; veronicka.varicheva@yandex.com

Tamerlan Z. SIUKAEV — Postgraduate Student; stz777@mail.ru

Boris A. DUDIN — PhD in Engineering, Associate Professor; dubodin@mail.ru