

УДК 621.31

Несовершенства расчетных моделей электроэнергии и мощности на тягу поездов в программном пакете КОРТЭС

А. Ю. Сулимин, М. А. Иванов

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

Для цитирования: Сулимин А. Ю., Иванов М. А. Несовершенства расчетных моделей электроэнергии и мощности на тягу поездов в программном пакете КОРТЭС // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 4. — С. 958–966. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-958-966

Аннотация

Цель: В настоящее время существует целый ряд программных пакетов для реализации множества задач в области электроснабжения железных дорог. Правильный и точный учет электроэнергии и мощности значительно влияет на дальнейшее проектирование новых участков железной дороги или реконструкцию старых. В работе предлагается осветить проблемы расчетов расхода электроэнергии и мощности на тягу поездов в программном пакете КОРТЭС для дальнейших исследований и поиска решения. **Методы:** Исследование проводится на основе моделирования движения поездов и работы системы тягового электроснабжения в программном пакете КОРТЭС, анализа полученных результатов и сравнения их с расчетами, выполненными на более совершенной математической модели, которая построена на базе пакета MATLAB-Simulink. **Результаты:** Выявлены основные проблемы расчетов расхода электроэнергии и мощности на тягу поездов. Выявлен существенный недостаток — отсутствие учета величины напряжения на токоприемнике. При помощи моделирования в программном пакете КОРТЭС электрических и тяговых расчетов при различных исходных данных были выявлены несоответствия в математических моделях исследуемого программного пакета. В работе также представлены пути решения указанной проблемы. **Практическая значимость:** Работа имеет важное значение для дальнейших исследований в области расчетов системы тягового электроснабжения, усовершенствования математических моделей для повышения энергоэффективности, безопасности и экономичности разрабатываемых решений, а также для новых перспективных направлений исследования благодаря более точному аппарату расчетов и моделирования.

Ключевые слова: Программный пакет, расчет электроэнергии, проблемы расчетов, несовершенство математической модели, совершенствование программного пакета, модернизация методов расчета.

Введение

В период освоения новых технологий в области железнодорожного транспорта, изобретения нового электроподвижного состава, новых более мощных агрегатов тягового электроснабжения и более эффективных схем внешнего питания, приоритет на развитие и строительство высокоскоростных железнодорожных магистралей с возможностью перехода в новую эпоху высоких скоростей движения на железных дорогах

страны, остро стоит вопрос о правильности расчетных моделей и программных пакетов для комплексного моделирования системы тягового электроснабжения.

В настоящее время существует большое количество программных пакетов, однако в большинстве своем они корректно справляются с поставленными задачами только в определенных частных условиях, что ограничивает запросы при проектировании.

Существующий наиболее полный программный пакет «Комплекс расчетов тягового электроснабжения» (КОРТЭС), разработанный ВНИИЖТ как преемник программного пакета NORD и его подпрограмм, вобрал в себя различные функции: тяговые расчеты, электрические расчеты, учет графика движения поездов, режима рекуперации, возможность выбора параметров тяговой сети и подвижного состава, расчет режимов плавки гололеда и многое другое.

Однако в связи с рядом проблем в ходе модернизации КОРТЭС до сих пор работает в некоторых функциях по упрощенным моделям с рядом допущений.

Подобные несовершенства КОРТЭС в прошлом не влияли в значительной степени на последующее проектирование, однако в настоящее время точность и корректность расчетов стоят в начале списка задач современного проектировщика-инженера.

В настоящей работе предлагается осветить проблему некорректного расчета расхода электрической энергии и мощности, подробно углубиться в процесс моделирования, а также разработать новые методы расчета мгновенных схем.

Общая часть

Для демонстрации описанных ранее проблем было проведено моделирование при различных исходных параметрах напряжения холостого хода при одинаковых прочих параметрах.

Идея демонстрации заключается в соотношении выходных параметров потерь электрической энергии, полученных при электрических расчетах для сформированного графика движения поездов, и параметров расхода электрической энергии на тягу одного состава по результатам тяговых расчетов.

В качестве исходных данных для моделирования в программном пакете КОРТЭС были использованы:

- участок Санкт-Петербург-Балтийский вокзал — Ораниенбаум;
- электроподвижной состав (ЭПС) — ЭС2Г «Ласточка» (8 вагонов, из них 3 моторных);
- график движения поездов (ГДП), созданный на 30 пар поездов с интервалом следования 10 минут в обе стороны;
- тяговые подстанции (ТП) — Броневая, Лигово, Ст. Петергоф и Лебяжье.

Для корректной демонстрации было проведено трехкратное моделирование при изменении напряжения холостого хода на тяговых подстанциях от 3400 до 3700 В с шагом в 100 В. Результаты моделирования электрических расчетов представлены в табл. 1.

Результаты тяговых нагрузок для одного поезда в ходе моделирования представлены на рис. 1.

По результатам моделирования в программном пакете КОРТЭС потери в тяговой сети не изменились, при этом итоговый расход на ТП отличается при разных значениях напряжения холостого хода на ТП. Расход электроэнергии рассчитывается по формуле ниже:

$$W_{\text{ээ}} = (1232,2 + 1186,3)30 + 5063 = \\ = 72\,555 + 5063 = 77\,618 \text{ (кВт·ч)},$$

где 1232,2 и 1186,3 — расход электроэнергии одного поезда, нечетного и четного направления соответственно, кВт·ч (по рис. 1);
30 — количество пар поездов, шт.;
5063 — потери в тяговой сети, полученные на основе электрических расчетов в программном пакете КОРТЭС, кВт·ч.

Результаты по итогам моделирования 1–3 отличаются от значений, полученных по результатам тяговых расчетов, и потерь электрической энергии соответственно на 0,06 %, 3,06, 6,18 и 9,29 %.

Такое положение вызвано тем, что в пакете КОРТЭС тяговая нагрузка задается током, полученным из тяговых расчетов при номинальном напряже-

Таблица 1. Результаты моделирования КОРТЭС

№ моделирования	1	2	3	4
Напряжение х.х. на ТП, В	3400	3500	3600	3700
Расход на тягу поездов, кВт·ч	72 511	74 930	77 349	79 768
Потери в ТС, кВт·ч	5063	5063	5063	5063
Расход на ТП, кВт·ч	77 574	79 993	82 412	84 831



Рис. 1. Удельный расход электроэнергии на тягу поездов по результатам электрических расчетов

нии 3000 В. При этом фактическое напряжение на токоприемнике не учитывается. В результате изменение напряжения холостого хода тяговых подстанций на величину ΔU приводит к тому, что напряжение на токоприемниках электроподвижного состава меняется на ту же самую величину ΔU . При этом будет меняться и расход энергии. Вместе с тем из [1] известно, что расход энергии на тягу зависит в основном от массы поезда, профиля и плана пути, а также от количества остановок и разгонов. Напряжение на токоприемнике крайне незначительно влияет на этот расход. Более того, в работах [2] и [3] как теоретически, так и по результатам экспериментов установлено, что при повышении напряжения расход энергии с шин тяговых подстанций, наоборот, будет снижаться. Указанную особенность в пакете КОРТЭС можно попытаться преодолеть, если откорректировать расчетный расход энергии, оттолкнувшись от расхода энергии одного поезда, количества поездов, проследовавших по расчетному участку, и потерю энергии в тяговой сети.

Однако этот способ не учитывает возможного изменения распределения нагрузок между тяговыми подстанциями из-за разности их внутренних сопротивлений.

Потери энергии в тяговой сети также не остаются постоянными, так как при повышении среднего напряжения на ЭПС токи в тяговой сети будут снижаться, а вместе с ними уменьшатся и потери.

Теоретически изменение напряжения на токоприемнике можно учесть в ходе тяговых расчетов методом последовательных приближений.

Но этот метод трудоемкий, к тому же сам пакет КОРТЭС выдает только минимальное значение напряжения на межподстанционной зоне, при этом информация о напряжениях в других точках межподстанционной зоны отсутствует.

Для преодоления выявленной проблемы была создана математическая модель в программном пакете MATLAB Simulink на основе новых методов расчета мгновенных схем.

В данной модели тяговая нагрузка задается не током, а мощностью, при этом учитывается ограничение по максимальному току подвижной единицы. Модель также предусматривает корректировку потребляемого поездом тока таким образом, чтобы обеспечить расчетное (полученное из тягового расчета) потребление электроэнергии на тягу.

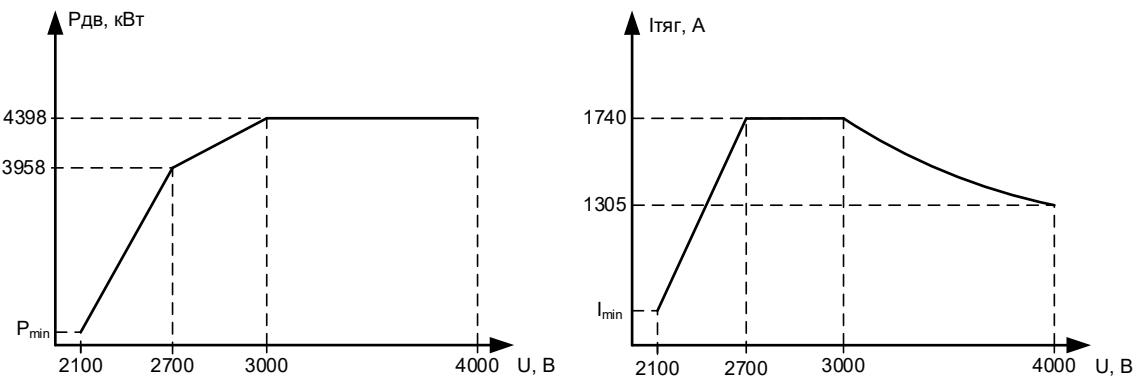


Рис. 2. Зависимость мощности и потребляемого тока электропоезда ЭС2Г от напряжения

Такая модель тяговой нагрузки наилучшим образом учитывает особенности современного электроподвижного состава [4–6]. Для восьмивагонного электропоезда ЭС2Г зависимость потребляемого на тягу тока от напряжения [4] представлена на рис. 2.

В результате ток поезда в режиме тяги:

$$I_{ii} = \begin{cases} \frac{P_{ii}}{U_i} \text{ при } U_i \geq 3000 \text{ В} \\ \min \left\{ \frac{P_{ii}}{U_i}; I_{\max} \right\} \text{ при } 2700 \leq U_i < 3000 \text{ В} \\ \min \left\{ \frac{P_{ii}}{U_i}; \frac{I_{\max} - I_{\min}}{2700 - 2100} (U_i - 2100) + I_{\min} \right\} \text{ при } 2100 \leq U_i < 2700 \text{ В} \end{cases},$$

где P_{ii} — мощность поезда на i -м шаге расчета, Вт;

U_i — напряжение на токоприемнике поезда на i -м шаге расчета, В;

I_{\max} — ограничение по максимальному току поезда, А;

I_{\min} — максимально возможный ток поезда при напряжении 2100 В, А.

В режиме рекуперации ($P_{ii} < 0$) при напряжении выше 3850 В производится линейное ограничение тока рекуперации таким образом, что при напряжении 4000 В он становится равным нулю:

$$I_{ii} = \begin{cases} \frac{P_{ii}}{U_i} \text{ при } U_i \leq 3850 \text{ В} \\ \frac{P_{ii}}{3850} \cdot \frac{4000 - U_i}{4000 - 3850} \text{ при } 3850 < U_i \leq 4000 \text{ В} \end{cases}.$$

Очевидно, что представленные уравнения являются нелинейными. Дополнительно в модели присутствует нелинейный элемент в виде диода, который препятствует затеканию тока рекуперации обратно в тяговую подстанцию. Диод представлен кусочно-линейной моделью. А для обеспечения устойчивой сходимости решения в режимах рекуперации сопряжение между отрезками, соответствующими режиму прямой и обратной проводимости, выполнено с помощью кубического сплайна. Метод расчета

таких мгновенных схем должен строиться на базе решения нелинейных узловых уравнений тяговой сети с помощью метода Ньютона — Рафсона [7].

В настоящее время модель имеет гибридную структуру. Расстановка поездов по участкам между узлами сети (тяговыми подстанциями, линейными устройствами электроснабжения) и расчет их потребляемой мощности осуществляется программой, написанной на языке MATLAB.

Расчет мгновенных схем на каждом шаге производится с помощью программы Simulink Simscape, входящей в состав пакета MATLAB. На рис. 3 представлен вид отдельных элементов блока расчета мгновенных схем из программы Simscape.

Основным допущением, принятым в модели, является неучет снижения скорости ЭПС при работе с пониженным напряжением. Такое же допущение имеет место и в пакете КОРТЭС.

Как показывает практика, при средних напряжениях на токоприемнике не ниже 2700 В такое снижение будет незначительным. Потеря времени хода может быть компенсирована на последующих участках.

С использованием предложенной модели были смоделированы те же самые условия движения поездов, что и в пакете КОРТЭС.

В соответствии с требованиями п. 4.2.2 ГОСТ Р 57670—2017 расчеты были выполнены без учета рекуперации. Сравнению результатов расчетов с учетом рекуперации следует посвятить отдельную статью, так как предлагаемая модель позволяет определить оптимальные значения напряжений холостого хода, при которых обеспе-

чивается баланс пропускной способности и наиболее полного использования энергии рекуперации.

Результаты моделирования представлены в табл. 2. Дополнительно оценивался расход энергии каждым поездом, который определялся как сумма произведений токов и напряжений каждого поезда, а также времени шага сечения графика движения поездов, равного 0,25 минуты.

Для всех нечетных поездов он равен 1232,2 кВт·ч, для четных поездов — 1186,3 кВт·ч. Эти результаты во всех вариантах моделирования полностью совпадают с расходом энергии по результатам тяговых расчетов, представленных на рис. 1.

Таким образом, можно утверждать, что модель обеспечивает адекватный учет фактического электропотребления поезда.

Некорректный учет расхода электрической энергии связан с неправильным учетом среднего напряжения на токоприемнике электроподвижного состава.

Когда в ходе моделирования изменялись значения напряжения холостого хода на тяговых подстанциях, среднее напряжение на токоприемнике также увеличивалось, что отразилось на итоговых значениях при электрических расчетах. Однако потери электрической энергии не изменялись, так как учет потерь производится по потребляемому току, который оставался неизменным.

Использование различных поправочных коэффициентов и других методов для приведе-

Таблица 2. Результаты моделирования MATLAB

№ моделирования	1	2	3	4
Напряжение х.х. на ТП, В	3400	3500	3600	3700
Расход на тягу поездов, кВт·ч	72 556	72 556	72 556	72 556
Потери в ТС, кВт·ч	5898	5461	5046	4678
Расход на ТП, кВт·ч	78 454	78 017	77 602	77 234

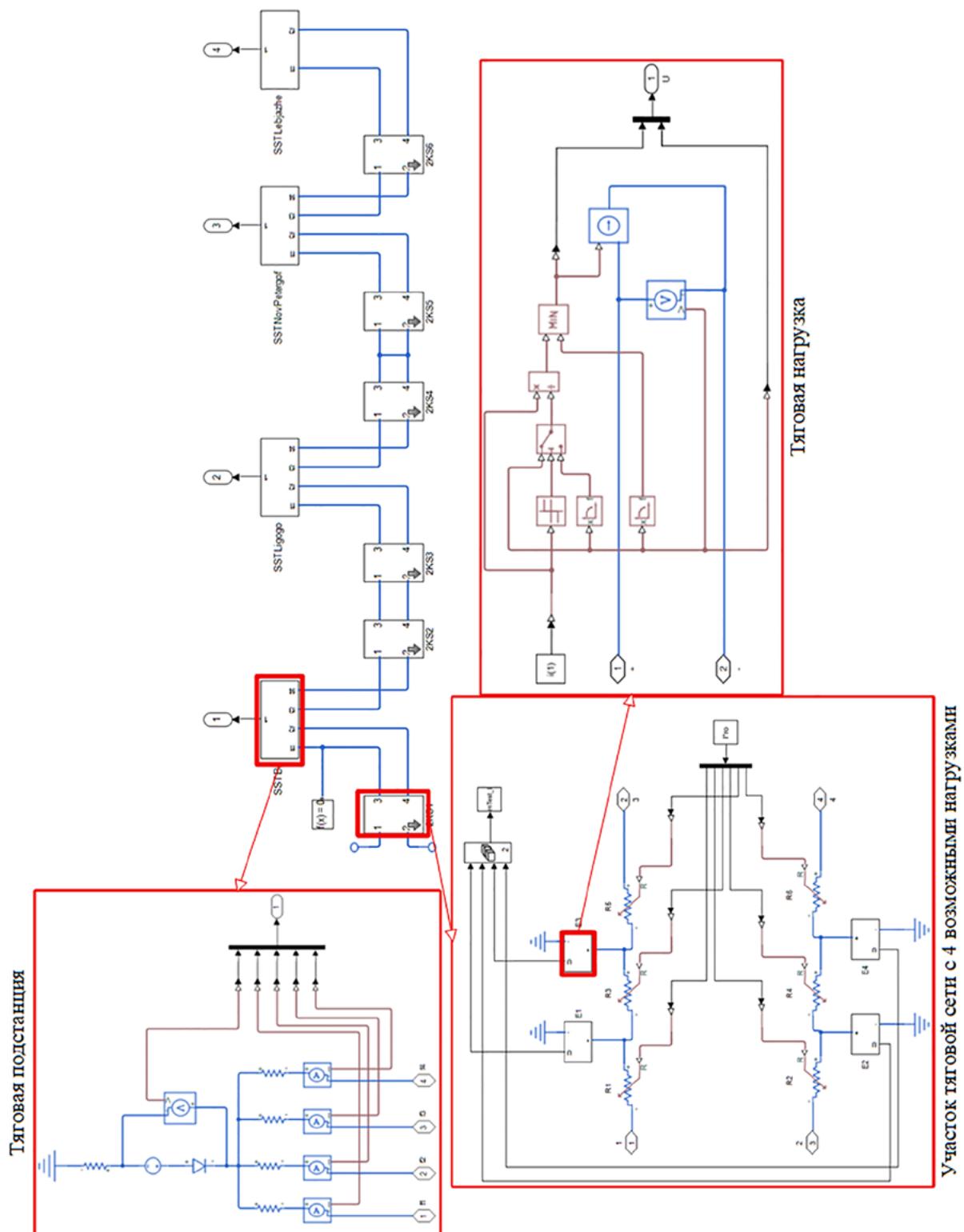


Рис. 3. Математическая модель в программном пакете MATLAB

Участок тяговой сети с 4 возможными нагрузками

ния результатов к реальным значениям приводит к усложнению разработки новых участков дороги, а также моделирования и тестирования принципиально новых систем.

Подобные несовершенства в расчетах связаны, как было указано ранее, с большим количеством упрощений и допущений. Среди них:

- представление всех нелинейных элементов как линейных с определенными ограничениями;
- учет рекуперации с существенным недостатком при приближении напряжения к пороговому значению;
- другие упрощения.

Подобные несовершенства существенно тормозят дальнейшее развитие высокоскоростного сообщения и увеличивают время на доработку каждого проектного решения.

В качестве решения проблемы корректного учета расхода электроэнергии и мощности подвижного состава предлагается разработать новый комплекс методов расчета мгновенных схем тягового электроснабжения.

В основу новых методов предлагается заложить ряд нововведений:

- корректное математическое представление нелинейных элементов с правильными внешними характеристиками;
- использование сплайн-интерполяции на участках сверхмалых перегибов кривых различных элементов для построения характеристик;
- нахождение решения мгновенных схем с помощью метода Ньютона — Рафсона (итерационное приближение до допустимого условия сходения расчетных параметров);
- реализация расчета мгновенных схем через матричный метод узловых потенциалов.

Заключение

В настоящей работе была продемонстрирована проблема учета расхода электрической энергии в программном пакете КОРТЭС.

В ходе исследования колебания результатов электрических расчетов средствами КОРТЭС составили около 5,9 %, а расхождения при изменении исходных параметров напряжения холостого хода превысили 6 %.

Также было проведено моделирование в программном пакете MATLAB для определения оптимальной математической модели. Полученные результаты показали полное соответствие с тяговыми расчетами, в том числе при изменении напряжения холостого хода.

В заключение была предложена разработка новых методов расчета мгновенных схем на основе:

- представления элементов моделью мощности;
- метода Ньютона — Рафсона для нахождения параметров схемы;
- сплайн-интерполяции для учета нелинейных элементов;
- матричного метода узловых потенциалов.

Разработка и подробное описание данных методов будут представлены в дальнейших работах авторов.

Список источников

1. Розенфельд В. Е. Теория электрической тяги: учебник для вузов железнодорожного транспорта / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Транспорт, 1983. — 328 с.
2. Мирошниченко Р. И. Режимы работы электрифицированных участков / Р. И. Мирошниченко. — М.: Транспорт, 1982. — 207 с.
3. Аржанников Б. А. Система управляемого электроснабжения электрифицированных железных дорог постоянного тока / Б. А. Аржанников. — Екатеринбург, 2005. — 211 с.
4. ЭС2Г. 0.00.000.000-01 РЭ7. Электропоезд с асинхронным тяговым приводом типа ЭГЭ серии ЭС2Г исполнения «Стандарт». Руководство по эксплуатации. Часть восьмая: использование по назначению.

5. Осинцев И. А. Устройство и эксплуатация электровоза 2ЭС10: учебное пособие / И. А. Осинцев, А. А. Логинов. — М.: ОАО «Российские железные дороги», 2015. — 333 с.

6. Результаты тягово-энергетических испытаний электровоза 3ЭС8 / АО ВНИИЖТ. — М.: АО ВНИИЖТ, 2023. — 14 с.

7. Нерретер В. Расчет электрических цепей на персональной ЭВМ: пер. с нем. / В. Нерретер. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 220 с.

Дата поступления: 16.08.2025

Решение о публикации: 22.09.2025

Контактная информация:

СУЛИМИН Артем Юрьевич — аспирант кафедры «Электроснабжение железных дорог»;
sulimin.artem@gmail.com

ИВАНОВ Михаил Александрович — ст. преподаватель кафедры «Электроснабжение железных дорог»;
m-a-ivanov@yandex.ru

Limitations of Calculation Models for Electricity Consumption and Traction Power for Trains Within the KORTES Software Package

A. Yu. Sulimin, M. A. Ivanov

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

For citation: Sulimin A. Yu., Ivanov M. A. Limitations of Calculation Models for Electricity and Train Traction Power Within the KORTES Software Package // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 4, pp. 958–966. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-958-966

Summary

Purpose: At present, there is a plethora of software packages available for the execution of a variety of tasks in the domain of railway power supply. The accurate and precise accounting of electricity and power is of paramount importance when planning the design of new roads or the reconstruction of old ones. This paper aims to identify the challenges associated with calculating electricity consumption and traction power for trains within the KORTES software package, with a view to facilitating further research and solution findings.

Methods: This study employs a modelling approach to simulate train movement and the functionality of the traction power system using the KORTES software package. This involves analyzing the data obtained and comparing the results with calculations derived from a more sophisticated mathematical model built in the MATLAB-Simulink package. **Results:** This study has identified the principal challenges associated with calculating the power supply consumption and traction power in trains. A notable deficiency has been identified, namely the oversight of consideration of the voltage at the current collector. Through simulation conducted using the KORTES software package for electricity and traction calculations with varying initial parameters, inconsistencies in the mathematical models of the software package under investigation have been uncovered. The paper also introduces potential solutions for addressing the issues stated above. **Practical significance:** The findings of this study are of significance for future research in the domain of traction power supply system calculations, enhancing mathematical models to boost the efficiency, safety, and cost-effectiveness of designed solutions, as well as paving the way for new research ideas facilitated by accurate calculation and simulation tools.

Keywords: Software package, electricity consumption calculation, calculation issues, mathematical model limitations, software package enhancement, calculation method development.

References

1. Rozenfel'd V. E., Isaev I. P., Sidorov N. N. *Teoriya elektricheskoy tyagi: uchebnik dlya vuzov zheleznych dorozhnoy transporta* [Theory of electric traction: textbook for railway transport universities]. Moscow: Transport Publ., 1983, 328 p. (In Russian)
2. Miroshnichenko R. I. *Rezhimy raboty elektrifitsirovannykh uchastkov* [Operating modes of electrified sections]. Moscow: Transport Publ., 1982, 207 p. (In Russian)
3. Arzhannikov B. A. *Sistema upravlyayemogo elektrotsnabzheniya elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog postoyannogo toka* [System of controlled power supply for electrified DC railways]. Ekaterinburg, 2005, 211 p. (In Russian)
4. ES2G. 0.00.000.000-01 RE7. *Elektropoezd s asinkhronnym tyagovym privodom tipa EGE serii ES2G ispolneniya "Standart". Rukovodstvo po ekspluatatsii. Chast' vos'maya: ispol'zovanie po naznacheniyu* [ES2G electric train with asynchronous traction drive of the EGE series ES2G "Standard" version. Operating manual. Part eight: intended use]. (In Russian)
5. Osintsev I. A., Loginov A. A. *Ustroystvo i ekspluatatsiya elektrovozova 2ES10: uchebnoe posobie* [Design and operation of electric locomotive 2ES10: textbook]. Moscow: OAO "Rossiyskie zheleznye dorogi" Publ., 2015, 333 p. (In Russian)
6. *Rezul'taty tyagovo-energeticheskikh ispytaniy elektrovozova 3ES8* [Results of traction and energy tests of electric locomotive 3ES8]. Moscow: AO VNIIZhT Publ., 2023, 14 p. (In Russian)
7. Nerreter V. *Raschet elektricheskikh tsepey na personal'noy EVM: per. s nem.* [Calculation of electrical circuits on a personal computer: transl. from German]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1991, 220 p. (In Russian)

Received: August 16, 2025

Accepted: September 22, 2025

Author's information:

Artyom Yu. SULIMIN — Postgraduate Student of the Department "Electrical Power Supply of Railways";
sulimin.artem@gmail.com

Mikhail A. IVANOV — Senior Lecturer of the Department "Electrical Power Supply of Railways";
m-a-ivanov@yandex.ru