

УДК 629.423.24

Разработка цифровой модели электропоезда «Ласточка» для анализа тяговых и энергетических характеристик в программной среде SimInTech

А. Н. Сычугов

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

Для цитирования: *Сычугов А. Н.* Разработка цифровой модели электропоезда «Ласточка» для анализа тяговых и энергетических характеристик в программной среде SimInTech // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 1. С. 62–70. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-62-70

Аннотация

Цель: разработка цифровой модели электропоезда «Ласточка» в универсальной среде общетехнического моделирования SimInTech для комплексного анализа его энергопотребления и динамики. Цифровая модель электропоезда позволяет исследовать влияния различных эксплуатационных факторов на тягово-энергетические характеристики подвижного состава. **Методы:** исследование проводилось методом математического и имитационного моделирования в программной среде SimInTech. **Результаты:** разработана модель, алгоритмы которой позволяют варьировать основные факторы, оказывающие влияние на энергетику движения поезда: параметры тягового подвижного состава, характеристики пути (профиль, план, движение в тоннеле), состояние системы энергоснабжения, массу поезда в зависимости от населенности поезда, а также внешние климатические условия (скорость и направление ветра). **Практическая значимость:** результаты работы имеют значение для инженерной практики в области железнодорожного транспорта. Разработанная модель служит эффективным инструментом для виртуальных испытаний, анализа энергоэффективности и оптимизации режимов ведения поезда с целью снижения эксплуатационных затрат. Модель может быть интегрирована в более сложные имитационные системы и использована для решения нестандартных исследовательских задач, включая разработку систем оптимального управления и прогнозирование энергопотребления на новых маршрутах.

Ключевые слова: цифровая модель электропоезда, тяговые расчеты, энергетические характеристики электропоезда, моделирование тягового подвижного состава в SimInTech

Введение

Железнодорожный транспорт — один из ключевых потребителей энергоресурсов в Российской Федерации. На его долю приходится приблизительно 5% от общего объема производимой в стране электроэнергии и почти 12% дизельного топлива [1]. В связи с этим решение задач, связанных с точным расчетом и прогнозированием потребления энергетических ресурсов, приобретает первостепен-

ное значение для повышения экономической и эксплуатационной эффективности отрасли.

Решение подобных задач, как правило, осуществляется методами численного моделирования с применением специализированного программного обеспечения, например, системы «КОРТЭС» (комплекс расчетов тягового электроснабжения, ВНИИЖТ), «ИСКРА» и ее последующих версий «ЭРА» и «ЭТР» (интегрированная система комплексных расчетов

и анализа движения поездов, ДвГУПС), а также программы DriVe (Siemens) и пр. [2–4].

Несмотря на наличие удобного пользовательского интерфейса для задания характеристик подвижного состава, параметров пути и режимов движения, специализированные программные комплексы обладают существенным недостатком — ограниченной гибкостью. Жестко заданная архитектура не позволяет модифицировать алгоритмы расчета, получать промежуточные данные или интегрировать решение в сторонние программные среды. В связи с этим в последние годы существенно возрос интерес к применению универсальных сред общетехнического моделирования, таких как MatLab, SimInTech и Engee, а также к реализации расчетных алгоритмов непосредственно на языках программирования высокого уровня, например Python. Перечисленные инструменты позволяют осуществить полный контроль над моделью и ее параметрами, благодаря чему становится возможным решать нестандартные задачи.

Рассмотрим процесс разработки цифровой модели электропоезда «Ласточка», предназначенной для анализа его тяговых и энергетических характеристик в среде SimInTech. Выбор данного программного обеспечения был обусловлен рядом ключевых преимуществ. В их числе — статус российского программного продукта; наличие специализированных инструментов, подходящих для решения поставленных задач; широкие возможности интеграции модели со сторонним программным обеспечением и периферийными устройствами.

Математическая и компьютерная модели электропоезда

Уравнение движения поезда как материальной точки описывается выражением:

$$(1 + \gamma)M_{\Pi} \frac{dv}{dt} = F(v) - W(v) - B(v), \quad (1)$$

где γ — коэффициент, учитывающий инерцию вращающихся масс;

M_{Π} — масса поезда;

v — скорость движения;

t — функция времени;

$F(v)$ — сила тяги;

$W(v)$ — сила сопротивления движению;

$B(v)$ — тормозная сила.

Уравнение движения поезда (1) определяет связь в дифференциальной форме между массой поезда, его скоростью, ускорением, временем движения и действующими на поезд силами. Результаты тяговых расчетов удобно представлять не в зависимости от времени, а в зависимости от пройденного пути, так как кривые движения представляют собой функции скорости от пути [5, 6].

Расчет правой части уравнения (1) выполняется с помощью трех блоков «Язык программирования», задающих, соответственно, тяговую $F(v)$ и тормозную $B(v)$ характеристики электропоезда, а также функцию, описывающую основное сопротивление движению $W(v)$ электропоезда (рис. 1).

Тяговая характеристика пятивагонного электропоезда задается с помощью выражения:

$$F_T = \begin{cases} 280 \text{ кН при } v(t) \in [0; 37,7] \text{ км/ч} \\ 280 \cdot \frac{37,7}{v(t)} \text{ кН при } v(t) \in (37,7; 115] \text{ км/ч} \\ 91 \cdot \left(\frac{115}{v(t)}\right)^2 \text{ кН при } v(t) \in (115; 160] \text{ км/ч} \end{cases} \quad (2)$$

Управление реализацией тяговых усилий производится под контролем автоматизированной системы управления в соответствии с командами, поступающими с пульта машиниста или от системы автоведения поезда. Команда на реализацию тягового усилия формируется контроллером тяги/торможения. Машинист может задать реализацию тягового

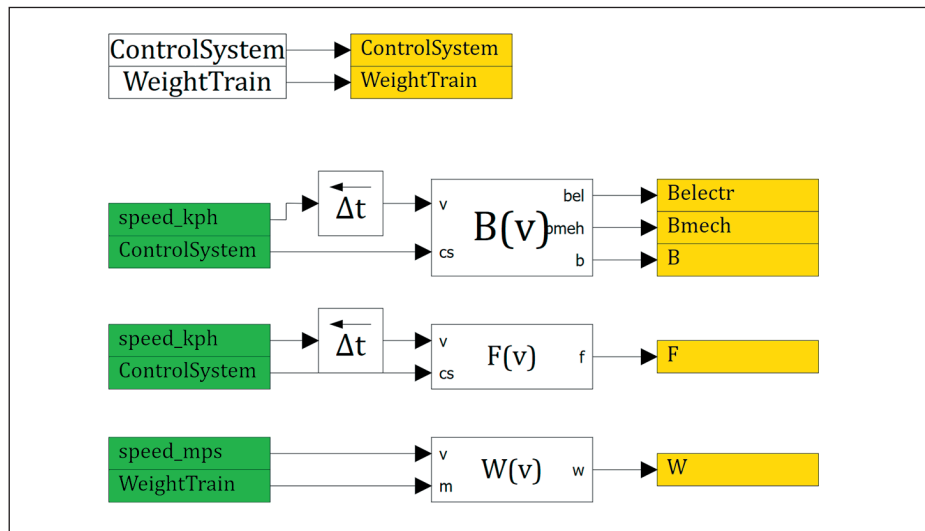


Рис. 1. Компьютерная модель для расчета сил, действующих на поезд

усилия в интервале от 0 до 100%. На рис. 2 приведены тяговые характеристики электропоезда, рассчитанные с помощью выражения (2) для четырех значений положения контроллера машиниста: 25, 50, 75 и 100% [9, 10].

Основным видом торможения на электропоездах «Ласточка» является торможение тяговыми электродвигателями (электродинамическое торможение). В штатном режиме реализуется рекуперативное торможение, но при невозможности тяговой сети принять рекуперированную энергию автоматически включается тормозной регулятор и реализуется рекуперативно-реостатное торможение. Управление штатным режимом торможения осуществляется посредством контроллера тяги/торможения.

Разница между заданной и реализуемой электродинамическим тормозом тормозной силой компенсируется пневматическими тормозами. При моделировании принимается, что максимальная тормозная сила поезда $B_{\text{полн}} = 235$ кН.

Тормозные характеристики для электродинамического торможения $B_{\text{эд}}$ задаются с помощью выражения:

$$B_{\text{эд}} = \begin{cases} -\frac{210}{5} \cdot v(t) \text{ кН при } v(t) \in [0; 5] \text{ км/ч} \\ -210 \text{ кН при } v(t) \in (5; 43,72] \text{ км/ч} \\ -210 \cdot \frac{43,72}{v(t)} \text{ кН при } v(t) \in (43,72; 160] \text{ км/ч} \end{cases} \quad (3)$$

Основное сопротивление движению [7, 8] пятивагонного поезда W_0 определяется по формуле:

$$W_0 = a \cdot v(t) + b \cdot M_{\text{п}} + c \cdot v^2(t), \quad (4)$$

где a , b , c — постоянные коэффициенты для подвижного состава;

$v(t)$ — скорость движения электропоезда, км/ч;

$M_{\text{п}}$ — масса поезда, кг.

Коэффициент инерции вращающихся масс γ в расчетах принят равным 0,06.

Результаты моделирования следующих характеристик: тяговой, торможения электродинамического и основного сопротивления движения для пятивагонного электропоезда «Ласточка», полученные с помощью компьютерной модели (рис. 1), представлены на рис. 2.

Для расчета и построения графиков потребляемого тока при движении в режиме тяги и тока рекуперации в режиме электрического

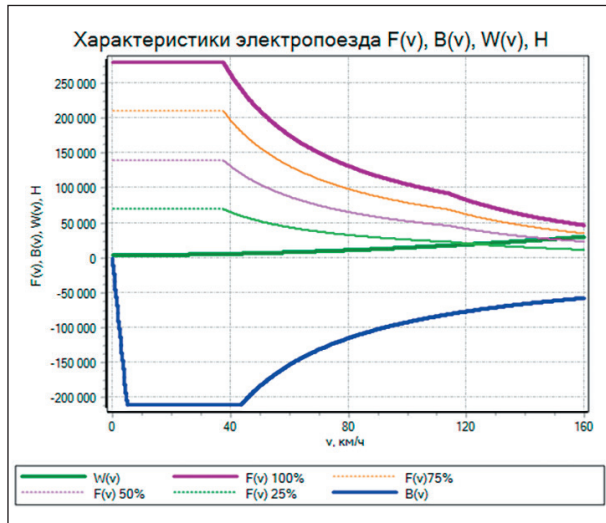


Рис. 2. Результаты моделирования характеристик: тяговой, торможения электродинамического и основного сопротивления движения для пятивагонного электропоезда «Ласточка»

торможения необходимо рассчитать электрическую мощность, потребляемую электропоездом при движении. Для этого необходимо рассчитать механическую мощность $P_{МЭХ}$ в соответствии с выражением (5):

$$P_{МЭХ}(t) = F(t) \cdot v(t), \quad (5)$$

где $F(t)$ — развиваемая сила тяги, Н;
 $v(t)$ — скорость движения, м/с.

Потери, возникающие при передаче энергии при работе тягового электропривода, рассчитываются с помощью блока «Интерполяция одномерной кривой» (результаты расчета приведены на рис. 3), описывающего изменение коэффициента полезного действия тягового электропривода $\eta_{ОБЩ}$ в зависимости от скорости движения электропоезда, что позволяет рассчитать электрическую мощность $P_{ЭЛ}$, потребляемую из контактной сети, по выражению:

$$P_{ЭЛ}(t) = \frac{P_{МЭХ}(t)}{\eta_{ОБЩ}(t)}. \quad (6)$$

Максимальная мощность электропоезда, согласно характеристике (рис. 4), должна достигаться в следующих, представленных ниже диапазонах напряжений (табл. 1). Указанное ограничение реализовано с помощью блока «Язык программирования».

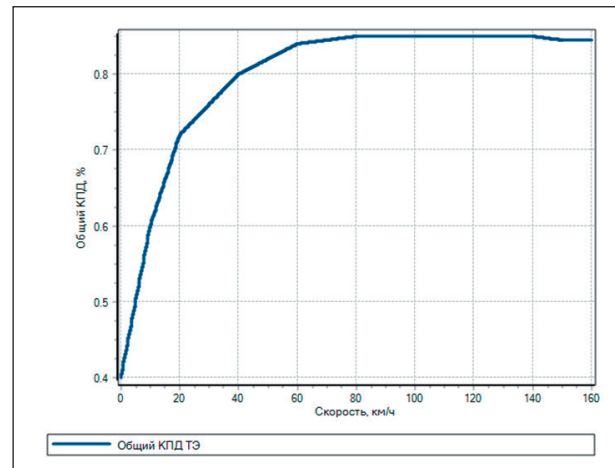


Рис. 3. Результаты моделирования КПД тягового оборудования электропоезда в зависимости от скорости движения (при эксплуатации на участках, электрифицированных постоянным током)

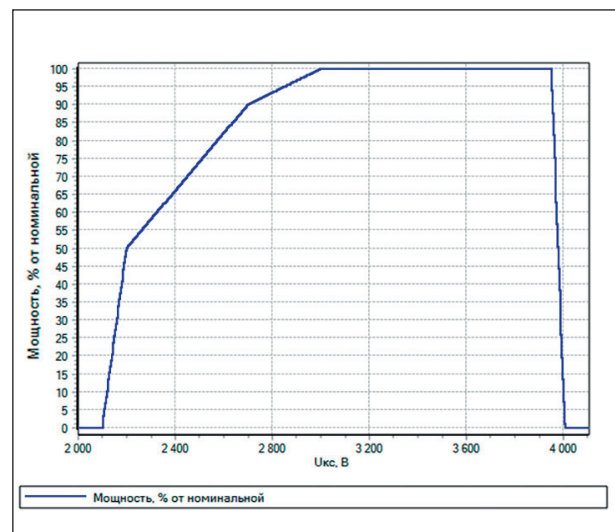


Рис. 4. Результаты моделирования блока, рассчитывающего ограничение допустимой мощности электропоезда

ТАБЛИЦА 1. Ограничение реализуемой мощности электропоезда

Напряжение контактной сети, В	Реализуемое ограничение мощности, % от номинального значения
2100	0
2200	50
2700	90
3000	100
3950	100
4005	0

Для расчета, прогнозирования, моделирования и оптимизации энергозатрат движения поезда необходима комплексная цифровая модель, учитывающая многопараметрический характер системы. Модель должна учитывать не только характеристики подвижного состава, но и основные факторы, оказывающие влияние на энергетику движения поезда: профиль пути, характеристики системы тягового энергоснабжения, массу поезда (населенность), климатические условия и пр. Цифровая модель электропоезда «Ласточка», реализованная в SimInTech (рис. 5), обеспечивает учет ключевых факторов, влияющих на его эксплуатационные показатели [9, 10].

В ее алгоритмы заложена возможность вариации входных параметров, включая профиль пути, движение в тоннеле, параметры системы энергоснабжения, населенность поезда и погодные условия (ветер). Модель позволяет реализовать ручное управление поездом с помощью имитатора контроллера тяги/торможения в режиме реального времени, а также автоматический расчет по заранее заданному алгоритму ведения поезда. Такие режимы позволяют проводить детальный анализ нелинейного

взаимовлияния указанных факторов на энергопотребление и динамику поезда в целом.

Разработанная модель позволяет построить кривые движения поезда (рис. 6) для различных режимов эксплуатации и выполнить расчет полного и удельного расхода электрической энергии, затрачиваемой на тягу. Полученные показатели могут быть визуализированы различными способами: в виде временных графиков, табличных данных, пригодных для последующего анализа, а также с использованием графических примитивов, имитирующих интерфейсы штатных средств отображения информации на реальном электропоезде [11, 12].

На рис. 6 представлены результаты моделирования движения электропоезда на перегоне. График отображает следующие параметры: скорость движения, ток электропоезда в режимах тяги и рекуперативного торможения, реализуемые силы тяги и торможения. В качестве контекстной информации на диаграмму выведена величина текущего уклона пути. Исходные данные о профиле пути и иные параметры интегрируются в модель путем импорта из внешнего файла.

Заключение

Разработанная цифровая модель электропоезда «Ласточка» подтвердила перспективность и эффективность применения универсальной среды моделирования SimInTech для решения многопараметрических задач в области тягово-энергетических расчетов на железнодорожном транспорте. Цифровые модели тягового подвижного состава представляют собой эффективный инструмент для анализа влияния эксплуатационных факторов на тягово-энергетические характеристики и позволяют проводить их комплексную оценку при различных сценариях эксплуатации.

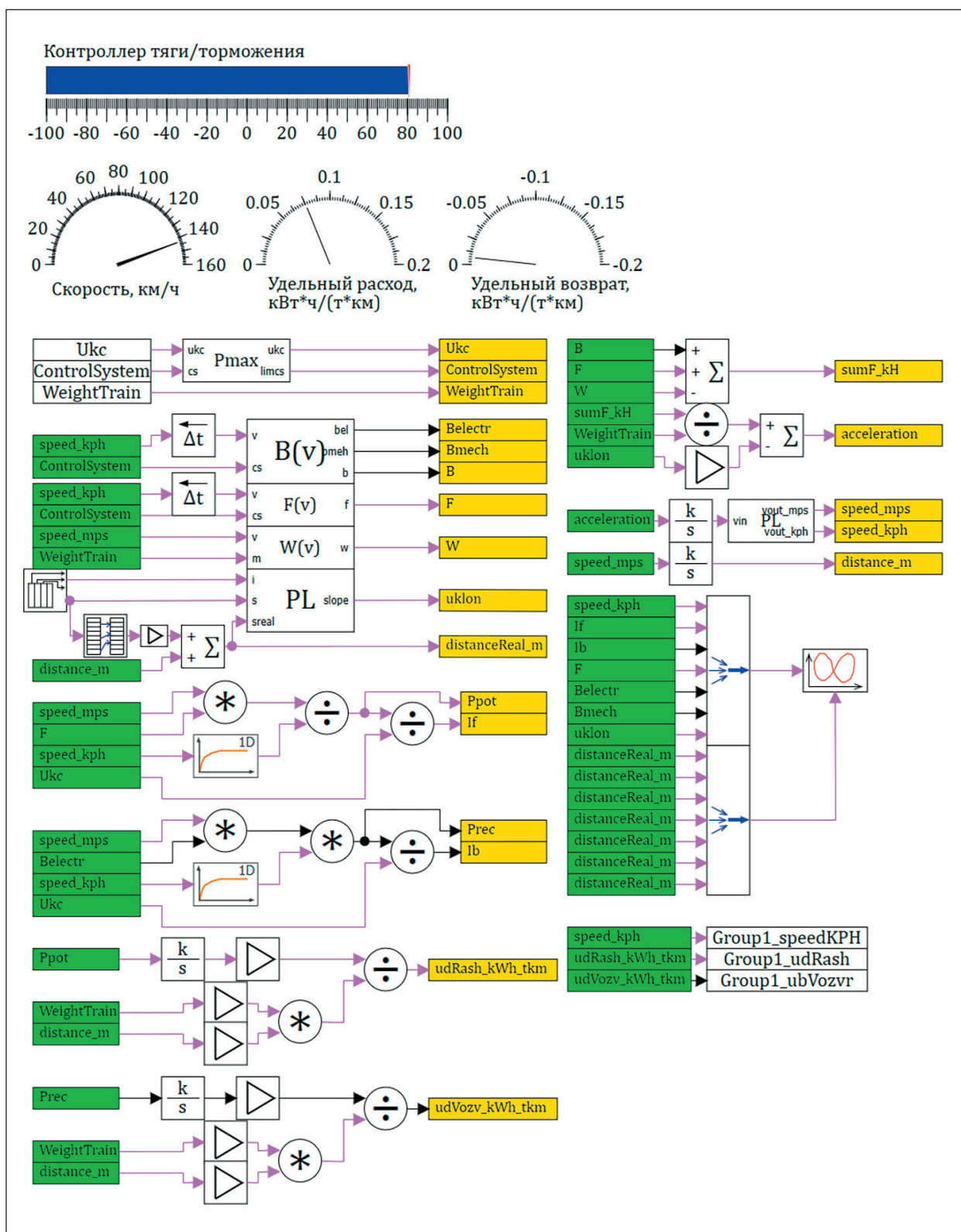


Рис. 5. Цифровая модель электропоезда «Ласточка» для анализа тяговых и энергетических характеристик в программной среде SimInTech

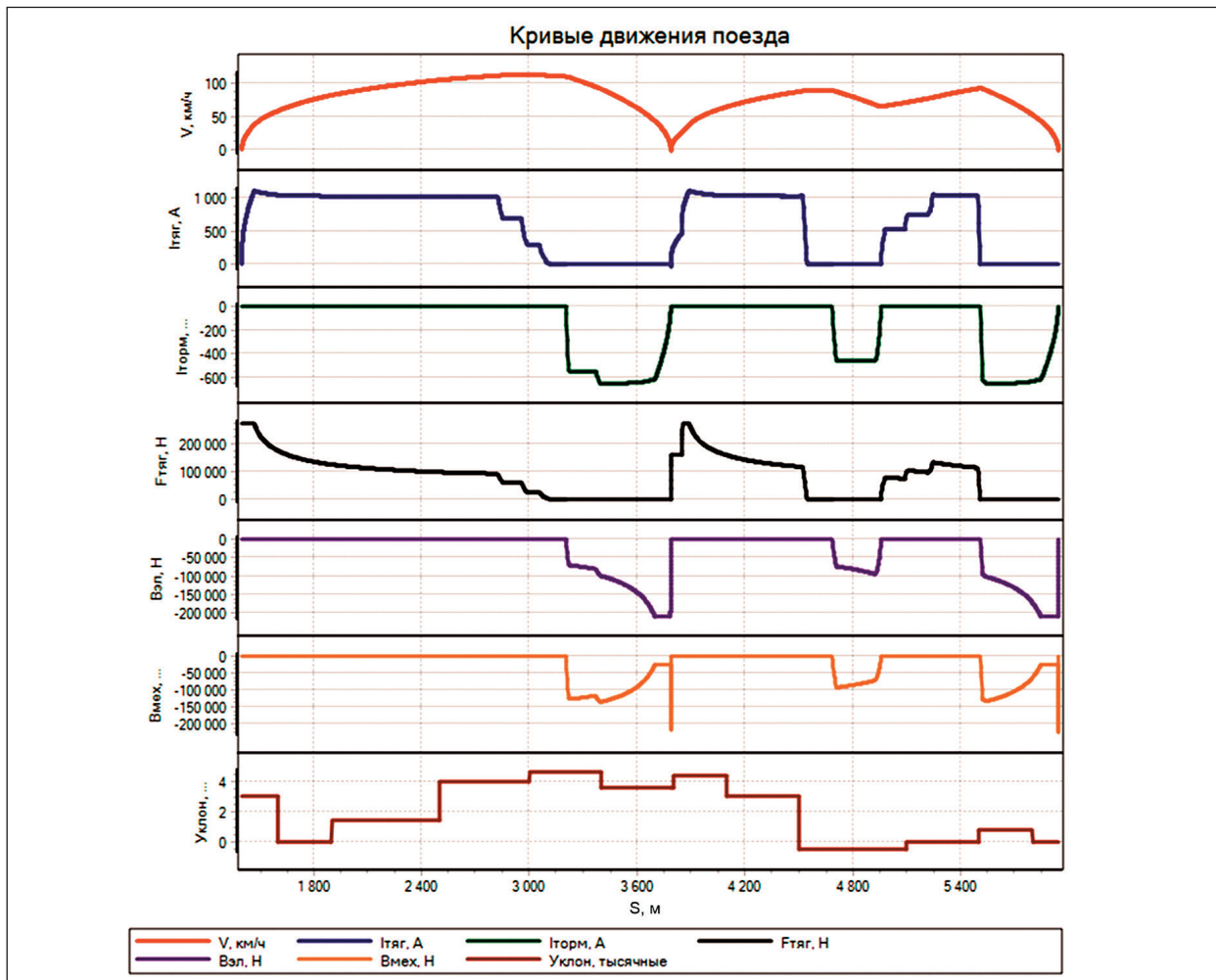


Рис. 6. Кривые движения поезда, полученные с помощью цифровой модели электропоезда «Ласточка» в программной среде SimInTech

Список источников

1. Транспорт в России. 2024: стат. сб. / Росстат. Т. 65. М., 2024. 100 с.

2. Обоснование параметров системы тягового электроснабжения для ВСМ Москва — Казань — Екатеринбург / М. А. Иванов [и др.] // Электрификация и развитие инфраструктуры энергообеспечения тяги поездов скоростного и высокоскоростного железнодорожного транспорта: VII Международный симпозиум (Санкт-Петербург, 8–11 октября 2013 года). СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2015. С. 189–197.

3. Явриянц К.В. Возможности снижения топливно-энергетических затрат на тягу поездов // Железнодорожный транспорт. 2011. № 2. С. 40–44.

4. Валинский О.С., Калинин Н.68П. Исследование тягово-энергетических характеристик высокоскоростных электропоездов // Локомотивы. Электрический транспорт — XXI век: электронный сборник материалов IX Международной научно-технической конференции, посвященной 150-летию со дня рождения профессора Я.М. Гаккеля и 100-летию создания тепловоза Щэл1 (Санкт-Петербург, 15–17 мая 2024 года). СПб.: Петербургский государственный университет

- путей сообщения Императора Александра I, 2024. С. 49–55.
5. Розенфельд В.Е., Исаев И.П., Сидоров Н.Н. Теория электрической тяги. М.: Транспорт, 1983. 328 с.
6. Правила тяговых расчетов для поездной работы: нормативное производственно-практическое издание (утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 12.05.2016 № 867). М.: ОАО «РЖД», 2016. 515 с.
7. Davis Jr. W. J. The tractive resistance of electric locomotives and cars // Gen. Electr. Rev. 1926. No. 29. Pp. 2–24.
8. Simplified estimation of train resistance parameters: full scale experimental tests and analysis / C. Somaschini [et al.] // Proceedings of the Third International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance / ed. J. Pombo // Civil-Comp Press, Stirlingshire, UK. 2016. 58 p.
9. Скоростной электропоезд ЭС1 «Ласточка» / А.Ю. Слизов [и др.]. М.: Автограф, 2015. 236 с.
10. Руководство по эксплуатации электропоезда ЭС1 «Ласточка» Desiro RUS, Desiro RUS «Премиум», версия F. 2015. 402 с.
11. Хабаров С.П., Шилкина М.Л. Основы моделирования технических систем. Среда SimInTech: учебное пособие для вузов. 2-е изд., стереотип. СПб.: Лань, 2024. 120 с.
12. Справочная система SimInTech. URL: <https://help.simintech.ru/> (дата обращения: 11.10.2025).
- Дата поступления: 24.11.2025
Решение о публикации: 13.02.2026
- Контактная информация:**
СЫЧУГОВ Антон Николаевич — канд. техн. наук, доцент; sychugov@pgups.ru

Development of a “Lastochka” electric train digital model to analyze its traction and energy characteristics in the SimInTech environment

A. N. Sychugov

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

For citation Sychugov A. N. Development of a “Lastochka” electric train digital model to analyze its traction and energy characteristics in the SimInTech environment // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 1. Pp. 62–70. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-62-70. (In Russian)

Abstract

Objective: to develop a digital model of the “Lastochka” electric train within the SimInTech universal general-purpose modelling environment for a comprehensive analysis of its energy consumption and dynamic behaviour. The digital model enables examination of the influence of various operational factors on the train traction and energy characteristics. **Methods:** the study employed mathematical and simulation modelling implemented in the SimInTech software environment. **Results:** a model has been developed, with its algorithms allowing variation of the main factors affecting the train’s energy performance. These factors include traction train parameters; track characteristics such as vertical profile, horizontal alignment, and operation in tunnels; the condition of the power supply system; train mass as a function of passenger load; and external climatic conditions, such as wind speed and direction. **Practical significance:** the findings of

this study are relevant to engineering practice in the railway transport sector. The developed model provides an effective tool for virtual testing, energy-efficiency analysis, and optimization of train operational modes aimed at reducing operational costs. The model can be integrated into more comprehensive simulation frameworks. It can be employed to address non-standard research challenges, including the development of optimal control systems and the forecasting of energy consumption on new routes.

Keywords: electric train digital model, traction calculations, electric train energy performance, traction rolling stock modeling in SimInTech

References

1. Transport v Rossii. 2024: stat. sb. / Rosstat. T. 65. M.: 2024. 100 s. (In Russian)
2. Obosnovanie parametrov sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya dlya VSM Moskva — Kazan' — Ekaterinburg / M.A. Ivanov [i dr.] // Elektrifikatsiya i razvitie infrastruktury energoobespecheniya tyagi poezdov skorostnogo i vysokoskorostnogo zheleznodorozhnogo transporta: VII Mezhdunarodnyj simpozium (Sankt-Peterburg, 8–11 oktyabrya 2013 goda). SPb.: Peterburgskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya Imperatora Aleksandra I, 2015. S. 189–197. (In Russian)
3. Yavriyants K. V. Vozmozhnosti snizheniya toplivno-energeticheskikh zatrat na tyagu poezdov // Zheleznodorozhnyj transport. 2011. No. 2. S. 40–44. (In Russian)
4. Valinskij O. S., Kalinin N. P. Issledovanie tyagovo-energeticheskikh kharakteristik vysokoskorostnykh elektropoezdov // Lokomotivy. Elektricheskij transport — XXI vek: elektronnyj sbornik materialov IX Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferentsii, posvyashchennoj 150-letiyu so dnya rozhdeniya professora Ya. M. Gakkelya i 100-letiyu sozdaniya teplovoza Shchel1 (Sankt-Peterburg, 15–17 maya 2024 goda). SPb.: Peterburgskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya Imperatora Aleksandra I, 2024. S. 49–55. (In Russian)
5. Rozenfel'd V. E., Isaev I. P., Sidorov N. N. Teoriya elektricheskoy tyagi. M.: Transport, 1983. 328 s. (In Russian)
6. Pravila tyagovykh raschetov dlya poezdnoj raboty: normativnoe proizvodstvenno-prakticheskoe izdanie (utv. rasporyazheniem OAO "RZhD" ot 12.05.2016 No. 867). M.: OAO "RZhD", 2016. 515 s. (In Russian)
7. Davis Jr. W. J. The tractive resistance of electric locomotives and cars // Gen. Electr. Rev. 1926. No. 29. Pp. 2–24.
8. Simplified Estimation of Train Resistance Parameters: Full Scale Experimental Tests and Analysis / C. Somaschini [et al.] // Proceedings of the Third International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance / ed. J. Pombo // Civil-Comp Press, Stirlingshire, UK. 2016. 58 p.
9. Skorostnoj elektropoezd ES1 "Lastochka" / A. Yu. Slizov [i dr.]. M.: Avtograf, 2015. 236 s. (In Russian)
10. Rukovodstvo po ekspluatatsii elektropoezda ES1 "Lastochka" Desiro RUS, Desiro RUS "Premium", versiya F. 2015. 402 s. (In Russian)
11. Khabarov S. P., Shilkina M. L. Osnovy modelirovaniya tekhnicheskikh sistem. Sreda SimInTech: uchebnoe posobie dlya vuzov. 2-e izd., stereotip. SPb.: Lan', 2024. 120 s. (In Russian)
12. Spravochnaya sistema SimInTech. URL: <https://help.simintech.ru/> (data obrashcheniya: 11.10.2025). (In Russian)

Received: 24.11.2025

Accepted: 13.02.2026

Author's information:

Anton N. SYCHUGOV — PhD in Engineering, Associate Professor; sychugov@pgups.ru