

А.А. Галков¹

¹ Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ГРАФИКОВ НАГРУЗКИ ТЯГОВОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА НА УЧАСТКЕ ЗИМА – ИРКУТСК СОРТИРОВОЧНЫЙ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ SIMINTECH

Аннотация. В данной работе предложен способ статистического анализа нагрузки системы тягового электроснабжения путем обработки файлов токовой нагрузки формата .txt, получаемых в результате тяговых расчётов проводимых в программном комплексе КОРТЭС.

Статистический анализ графиков производится в среде динамического моделирования SimInTech. Модель производит преобразование токовой нагрузки (полной и реактивной составляющей) в мощность. Анализ проводится по полученным значениям мощности, а также программа позволяет выводить на график полученный расчёт мощности нагрузки в различном виде, удобном для визуальной аналитики. Все вычисления программа производит по общеизвестным формулам.

В ходе проеденной серии расчётов поездов различных типов, масс и моделей, были получены выводы, что современные модели помимо лучшей энергоэффективности позволяют получать более равномерный график нагрузки. Стоит также отметить, что никакой равномерностью графиков обладают поезда пригородного сообщения

Модель позволит в дальнейшем проводить аналитику и сравнение различных профилей путей, масс поездов, и новых моделей локомотивов. Это позволит работать в направлении улучшения взаимодействия тягового подвижного состава и системы тягового электроснабжения.

Ключевые слова: статистический анализ, система тягового электроснабжения, тяговые расчёты, тяговый подвижной состав, компьютерное моделирование, SimInTech, КОРТЭС.

А.А. Galkov¹

¹ Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russian Federation

STATISTICAL ANALYSIS OF LOAD GRAPHS OF TRACTION ROLLING STOCK ON THE ZIMA – IRKUTSK SORTING SECTION IN THE SIMINTECH SOFTWARE PACKAGE

Abstract. This paper proposes a method for statistically analyzing traction power supply system loads by processing .txt files of current load data obtained from traction calculations performed in the KORTES software package.

Statistical analysis of the graphs is performed in the SimInTech dynamic modeling environment. The model converts the current load (both apparent and reactive components) into power. The analysis is performed based on the obtained power values, and the program also allows for the graphing of the resulting power load calculations in various formats convenient for visual analysis. All calculations are performed using well-known formulas.

A series of calculations for trains of various types, weights, and models revealed that modern models, in addition to improved energy efficiency, produce more uniform load graphs. It is also worth noting that commuter trains exhibit poorly uniform graphs.

The model will allow for future analysis and comparison of various track profiles, train weights, and new locomotive models. This will make it possible to work towards improving the interaction between traction rolling stock and the traction power supply system. **Keywords:** statistical analysis, traction power supply system, traction calculations, traction rolling stock, computer modeling, SimInTech, KORTES

Keywords: statistical analysis, traction power supply system, traction calculations, traction rolling stock, computer modeling, SimInTech, KORTES

Введение

Статистический анализ – это метод сбора и обработки информации с целью выявления определенных закономерностей, зависимостей и дальнейшего использования полученных данных в исследованиях и разработках. Одной из главных целей статистического анализа это прогнозирование.

Тяговый подвижной состав (ТПС) напрямую влияет на систему тягового электроснабжения как один из её основных потребителей, поэтому анализ тяговых расчётов может быть очень важен при моделировании электроснабжения. Проанализировать тяговые расчёты можно разными способами, один из возможных — это анализ графика нагрузки. Графиком нагрузки в системе тягового электроснабжения называется зависимость потребляемой мощности локомотива или токопотребления от времени.

Было принято решение проанализировать графики нагрузки ТПС при различных режимах работы, типах поездов, массы и моделях локомотивов. Для статистического анализа использовались два программных комплекса – КОРТЭС и SimInTech. В КОРТЭС проводился тяговый расчёт, а в SimInTech проводился статистический анализ полученного расчёта [1-5].

Исходные данные и тяговый расчёт

В качестве исходных данных участка на котором проводилась серия тяговых расчётов был взят участок ЗИМА – ИРКУТСК СОРТИРОВОЧНЫЙ [6-8]. Профиль пути участка показан на рисунке 1.

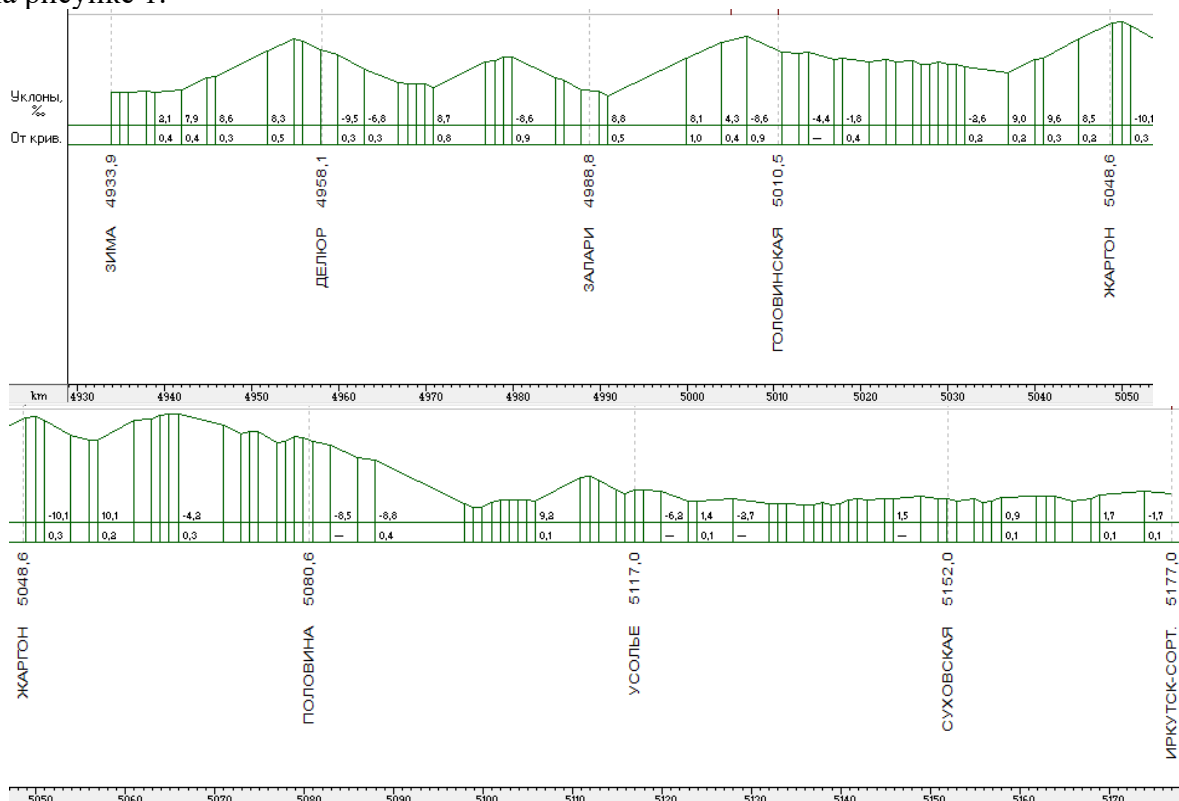


Рис.1 – Профиль пути участка ЗИМА - ИРКУТСК СОРТИРОВОЧНЫЙ (Вверху – ЗИМА-ЖАРГОН, снизу ЖАРГОН-ИРКУТСК СОРТИРОВОЧНЫЙ)

В таблице 1 показан перечень ТПС для которых проводили тяговый расчёт.

Таблица 1

Наименование	Категория	Локомотив	Кол-во секций, ед.	Масса поезда, т.	Масса состава, т.
ВЛ80-2000	Грузовой	ВЛ80р	2	2192	2000
ВЛ80-3000	Грузовой	ВЛ80р	2	3192	3000
ВЛ80-4500	Грузовой	ВЛ80р	2	4692	4500
ВЛ85-2000	Грузовой	ВЛ85	2	2288	2000
ВЛ85-3000	Грузовой	ВЛ85	2	3288	3000
ВЛ85-4500	Грузовой	ВЛ85	2	4788	4500
ЭС5К-2000	Грузовой	2ЭС5К	2	2192	2000
ЭС5К-3000	Грузовой	2ЭС5К	2	3192	3000
ЭС5К-4500	Грузовой	2ЭС5К	2	4692	4500
ЭС5К-7100	Грузовой	3ЭС5К	3	7388	7100
ЭД9Т-5	Пригород	ЭД9Т	5	624	-
ЭД9Т-10	Пригород	ЭД9Т	10	1248	-

В ходе проведения тяговых расчётов были получены графики токопотребления, которые были выгружены в файлы формата .txt. Файл включает в себя построчные значения полного значения тока (I_n) и реактивного (I_p). Значения записаны с интервалом в 1 мин. Единицы измерения в Амперах. Значения из данного файла будут в дальнейшем использоваться для статистического анализа в программе SimInTech.

Считывание данных и их анализ

В программном комплексе SimInTech была создана модель, которая способна считывать данные из текстовых файлов токовой нагрузки, упомянутых в предыдущей главе, и проводить их анализ по основным числовым показателям, используемым для аналитики графиков нагрузки [9,10]. Модель также рассчитывает активное значение токопотребления, мощность и выводит полученные данные в графики. Общий вид модели показан на рисунке 2.

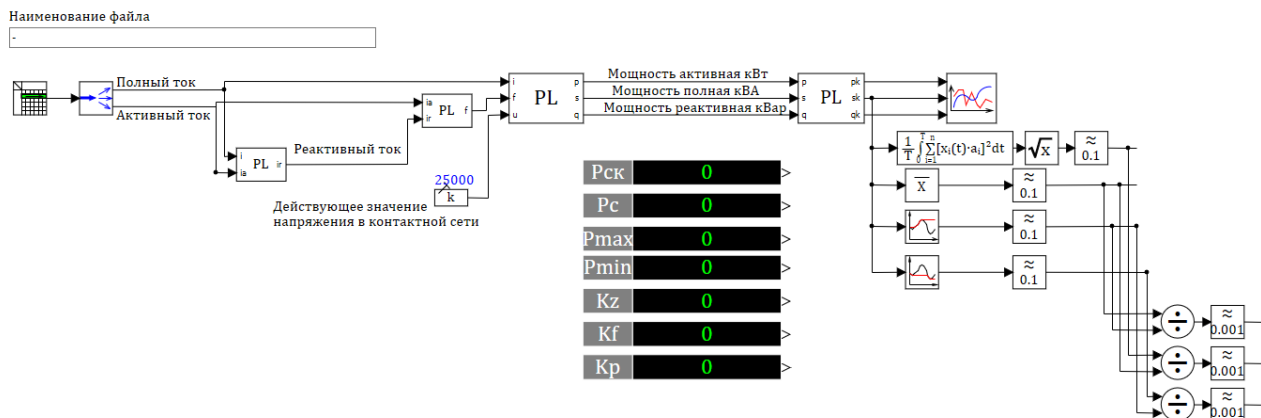


Рис.2 – Общий вид компьютерной модели

Модель анализирует следующие числовые показатели:

- максимальную мощность P_{\max} ;
- минимальную мощность P_{\min} ;
- среднюю мощность, которая вычисляется по формуле:

$$P_{cp} = \frac{\Delta t}{n} \sum_{i=1}^n P_i, \quad (1)$$

где Δt - интервал усреднения нагрузки;
 n – число интервалов;

- среднеквадратичная мощность, которая вычисляется по формуле:

$$P_{ск} = \sqrt{\frac{\Delta t}{n} \sum_{i=1}^n P_i^2}, \quad (2)$$

или

$$P_{ск} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T P^2(t) dt}, \quad (3)$$

В SimInTech данную формулу получили путем совмещения двух блоков – «квадратичного функционала» и «корня квадратного».

Коэффициенты, характеризующие график электрической нагрузки:

- коэффициент заполнения k_z ;
- коэффициент формы k_f ;
- коэффициент равномерности k_p .

Данные коэффициенты вычисляются по следующим формулам:

$$k_z = \frac{P_c}{P_{max}}; \quad (4)$$

$$k_f = \frac{P_{ск}}{P_c}; \quad (5)$$

$$k_p = \frac{P_{min}}{P_{max}}. \quad (6)$$

Для начала анализа данных, необходимо в поле «наименование файла» указать имя файла, из которого будут считываться данные и нажать кнопку запуска расчёта «ПУСК». После проведения расчёта, в соответствующих полях будут показаны характеристики графика нагрузки.

Расчёт мощностей и реактивного тока производится с помощью специализированных программируемых блоков, в которых прописаны классические формулы.

1) Расчёт реактивного тока:

$$I_{полн} = \sqrt{I_{актив}^2 + I_{реакт}^2}, \quad (7)$$

отсюда

$$I_{реакт} = \sqrt{I_{полн}^2 - I_{актив}^2}. \quad (8)$$

2) Расчёт угла φ :

$$\varphi = \arctg \frac{I_{реакт}}{I_{актив}}. \quad (9)$$

3) Вычисляется мощность - полная (S), активная (P) и реактивная (Q)

$$S = I_{полн} * U, \quad (7)$$

$$Q = S * \sin(\varphi), \quad (8)$$

$$P = S * \cos(\varphi). \quad (9)$$

Программа позволяет визуально отобразить мощность нагрузки и с целью упрощения отображения на графиках, единицы измерения мощности преобразуются в значения с разрядностью «кило-» [11-15]. На рисунке 3 представлен пример временного графика мощности нагрузки для поезда массой 4692 т.

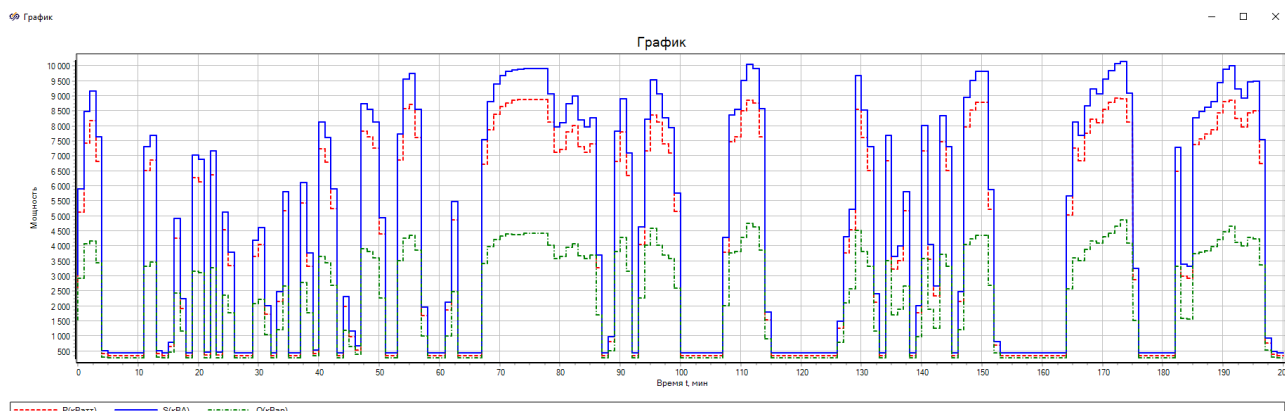


Рис.3 – Временной график мощности нагрузки

Результаты расчётов и выводы

В результате серии расчётов, был сделан статистический анализ, как для полного значения мощности нагрузки (S), так и отдельно реактивного (Q) значения. Полученные значения свели в таблицы 2 и 3.

Таблица 2 – Статистический анализ полной мощности нагрузки

Наименование	S_{\max} , кВА	S_{\min} , кВА	S_c , кВА	$S_{ск}$, кВА	k_z	k_F	k_P
ВЛ80-2000	9275	450	2644,7	3632,8	0,285	1,37	0,049
ВЛ80-3000	10150	450	3970,8	5339,7	0,391	1,35	0,044
ВЛ80-4500	10950	450	5361,6	6783,4	0,49	1,27	0,041
ВЛ85-2000	11925	500	3360,6	4504,3	0,282	1,34	0,042
ВЛ85-3000	14525	675	4150	5631	0,286	1,36	0,046
ВЛ85-4500	15175	675	5446,4	7421,6	0,359	1,36	0,044
ЭС5К-3000	9225	450	3377,8	4604,1	0,366	1,36	0,049
ЭС5К-4500	10150	450	4648,4	6010,5	0,458	1,29	0,044
ЭС5К-7100	15175	675	7091,5	9140,7	0,467	1,29	0,044
ЭД9Т-5	5400	75	1053,7	1441,3	0,195	1,37	0,014
ЭД9Т-10	10775	200	2210,3	3167	0,205	1,43	0,019

Таблица 2 – Статистический анализ реактивной составляющей мощности нагрузки

Наименование	Q_{\max} , кВар	Q_{\min} , кВар	Q_c , кВар	$Q_{ск}$, кВар	k_z	k_F	k_P
ВЛ80-2000	5624,5	282,8	1569,5	2151,3	0,279	1,37	0,05
ВЛ80-3000	6182,2	282,8	2346,8	3174,9	0,38	1,35	0,046
ВЛ80-4500	6769,4	282,8	3240,9	4110,7	0,479	1,27	0,042
ВЛ85-2000	6794,5	300	1951,8	2590,6	0,287	1,33	0,044
ВЛ85-3000	8220,4	424,3	2398,3	3225,9	0,292	1,35	0,052
ВЛ85-4500	8604,1	424,3	3129	4235,2	0,364	1,35	0,049
ЭС5К-3000	4368,6	282,8	1587,3	2106,9	0,363	1,33	0,065
ЭС5К-4500	4879,9	282,8	2151	2736,6	0,441	1,27	0,058
ЭС5К-7100	7248,4	424	3320,2	4225,1	0,458	1,27	0,059
ЭД9Т-5	3266,5	55,9	553	751,9	0,169	1,36	0,017
ЭД9Т-10	6491,6	132,3	1175,2	1691,8	0,181	1,44	0,02

Учитывая, что у идеально равномерного графика нагрузки коэффициенты k_z , k_F , k_P стремятся к единице, то можно сделать вывод исходя из полученных расчётов, что наиболее равномерным графиком нагрузки обладает подвижной состав с локомотивом ВЛ80р и поездом массой 4500 т.

Хорошие результаты по равномерности графиков и энергоэффективности демонстрирует локомотив ЭС5К с различной массой поездов. Не смотря на одинаковую массу поездов, данный локомотив потребляет меньше энергии.

Наиболее низкая равномерность графика наблюдается у пригородного поезда ЭД9Т. Локомотив демонстрирует наибольший разброс коэффициентов от единицы.

Данный способ статистического анализа может помочь в дальнейшем при изучении динамических моделей систем тягового электроснабжения, анализировать профили пути участков и изучать энергоэффективность новых локомотивов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Воронина, Е. В. Повышение качества электрической энергии в системах электроснабжения железных дорог / Е. В. Воронина, А. П. Куцый // Молодая наука Сибири. – 2021. – № 2(12). – С. 118-125. – EDN NOTDWB.

2. Бородай, И. Ю. Использование среды динамического моделирования SimInTech при моделировании / И. Ю. Бородай // Гагаринские чтения - 2018 : Сборник тезисов докладов XLIV Международной молодёжной научной конференции, Москва-Ахтубинск-Байконур, 17–20 апреля 2018 года. Том 1. – Москва-Ахтубинск-Байконур: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2018. – С. 306. – EDN ORNEVF.

3. Герман, Л. А. Сравнение методов расчета системы тягового электроснабжения при разных способах учета параметров внешней сети / Л. А. Герман, К. В. Кишкурно // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2013. – № 1. – С. 16-21. – EDN PVWAVF.

4. Герман Л. А., Сухов М. Ю. Комплекс программ для расчета и оптимизации режима работы тяговых подстанций на микроЭВМ / Горьковский ЦНТИ // Информ. листок. 1987. № 441 - 87. 4 с.

5. Cherepanov, A. V. Modeling of Tractive Power Supply Systems for Heavy-Tonnage Trains Operation / A. V. Cherepanov, A. P. Kutsyi // 2018 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2018, Sochi, 09–16 сентября 2018 года. – Sochi, 2018. – P. 8501734. – EDN XCZYLH.

6. Куцый, А. П. Повышение пропускной способности участка Якурим - Киренга для обеспечения графика движения поездов с максимальной массой 7100 тонн / А. П. Куцый, И. С. Овечкин, А. А. Галков // Молодая наука Сибири. – 2022. – № 2(16). – С. 166-174. – EDN TQXZTJ.

7. Куцый, А. П. Анализ эффективности применения организационных и технических способов повышения пропускной способности тяговой сети двухпутного горно-перевального участка / А. П. Куцый, И. С. Овечкин, А. А. Галков // Молодая наука Сибири. – 2022. – № 3(17). – С. 56-63. – EDN LIOLBC.

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022618070 Российская Федерация. Программа для моделирования графиков электрических нагрузок: № 2022616503 : заявл. 11.04.2022 : опубл. 28.04.2022 / А. В. Крюков, А. П. Куцый ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения». – EDN IHIII.

9. Комяков, А. А. Имитационное моделирование динамических процессов в системе тягового электроснабжения / А. А. Комяков, А. И. Шкулов, Л. А. Бартель // Известия Транссиба. – 2023. – № 2(54). – С. 16-29. – EDN CDVXNI.

10. Осипов, Н. И. Имитационное моделирование движения поезда по перегону с применением тяговых расчётов / Н. И. Осипов // Вестник Уральского государственного универ-

ситета путей сообщения. – 2023. – № 1(57). – С. 99-107. – DOI 10.20291/2079-0392-2023-1-99-107. – EDN MVZJGU.

11. Иванов, М. А. Современные методы расчёта систем тягового электроснабжения городского транспорта / М. А. Иванов, О. А. Степанская // Eltrans – 2023 : сборник трудов XI Международного симпозиума, Санкт-Петербург, 31 мая – 02 2023 года / Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I. – Санкт-Петербург: ООО «ИПК «НП-Принт», 2023. – С. 190-198. – EDN ARMHNO.

12. Пышкин, А. А. Электроснабжение железных дорог / А. А. Пышкин, Д. В. Лесников. – Екатеринбург: Уральский гос. ун-т путей сообщения, 2023. – 507 с.

13. Авдиенко, Е. Г. Сравнительный анализ программных комплексов автоматизированных тяговых расчётов для повышения эффективности эксплуатации электроподвижного состава / Е. Г. Авдиенко, Е. А. Третьяков // Молодежь и системная модернизация страны : Сборник научных статей 7-й Международной научной конференции студентов и молодых ученых. В 5-ти томах, Курск, 19–20 мая 2022 года / Отв. редактор М.С. Разумов. Том 5. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2022. – С. 11-16. – EDN FIDGAK.

14. Притулкин, А. А. Динамическая математическая модель системы электроснабжения переменного тока для проектирования и сертификации системы в программном комплексе SimInTech / А. А. Притулкин // Гагаринские чтения - 2019 : Сборник тезисов докладов XLV Международной молодежной научной конференции, Москва, Барнаул, Ахтубинск, 16–19 апреля 2019 года / Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). – Москва, Барнаул, Ахтубинск: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2019. – С. 72-73. – EDN FHJYCR.

15. Пиляев, В. С. Моделирование систем электроснабжения с помощью программы SimInTech / В. С. Пиляев, П. О. Гуков // Молодежный вектор развития аграрной науки : материалы 72-й национальной научно-практической конференции студентов и магистрантов, Воронеж, 01 апреля – 31 2021 года / Воронежский государственный аграрный университет. Том Часть I. – Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, 2021. – С. 223-226. – EDN YYIFJG.

REFERENCES

1. Voronina, E. V., Improving the Quality of Electrical Energy in Railway Power Supply Systems / E. V. Voronina, A. P. Kutsy // Young Science of Siberia. - 2021. - No. 2 (12). - P. 118-125. - EDN NOTDWB.

2. Borodai, I. Yu. Using the SimInTech dynamic modeling environment in modeling / I. Yu. Borodai // Gagarin Readings - 2018: Collection of abstracts of reports from the XLIV International Youth Scientific Conference, Moscow-Akhtubinsk-Baikonur, April 17-20, 2018. Volume 1. - Moscow-Akhtubinsk-Baikonur: Moscow Aviation Institute (National Research University), 2018. - P. 306. - EDN ORNEVF.

3. German, L. A. Comparison of methods for calculating the traction power supply system with different methods of accounting for external network parameters / L. A. German, K. V. Kishkurno // Bulletin of the Research Institute of Railway Transport. - 2013. - No. 1. - Pp. 16-21. - EDN PVWAVF.

4. German, L. A., Sukhov, M. Yu. A software package for calculating and optimizing the operating mode of traction substations on a microcomputer / Gorky Center for Scientific and Technical Information // Information leaflet. 1987. No. 441-87. 4 p.

5. Cherepanov, A. V. Modeling of Tractive Power Supply Systems for Heavy-Tonnage Trains Operation / A. V. Cherepanov, A. P. Kutsyi // 2018 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2018, Sochi, September 9–16, 2018. – Sochi, 2018. – P. 8501734. – EDN XCZYLH.

6. Kutsyi, A. P. Increasing the throughput capacity of the Yakurim - Kirenga section to ensure the schedule of trains with a maximum mass of 7,100 tons / A. P. Kutsyi, I. S. Ovechkin, A. A. Galkov // Young Science of Siberia. – 2022. – No. 2(16). – P. 166-174. – EDN TQXZTJ.

7. Kutsyy, A. P. Analysis of the efficiency of applying organizational and technical methods to increase the capacity of the traction network of a double-track mountain pass section / A. P. Kutsyy, I. S. Ovechkin, A. A. Galkov // *Young Science of Siberia*. - 2022. - No. 3 (17). - Pp. 56-63. - EDN LIOLBC.

8. Certificate of state registration of the computer program No. 2022618070 Russian Federation. Program for modeling electrical load graphs: No. 2022616503: declared. 11.04.2022: published. 28.04.2022 / A. V. Kryukov, A. P. Kutsyy; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Irkutsk State Transport University". - EDN IHILI.

9. Komyakov, A. A. Simulation modeling of dynamic processes in the traction power supply system / A. A. Komyakov, A. I. Shkulov, L. A. Bartel // *Trans-Siberian Railway News*. - 2023. - No. 2(54). - Pp. 16-29. - EDN CDVXNI.

10. Osipov, N. I. Simulation modeling of train movement along a section using traction calculations / N. I. Osipov // *Bulletin of the Ural State Transport University*. - 2023. - No. 1(57). - Pp. 99-107. - DOI 10.20291/2079-0392-2023-1-99-107. - EDN MVZJGU.

11. Ivanov, M. A. Modern methods for calculating traction power supply systems for urban transport / M. A. Ivanov, O. A. Stepanskaya // *Eltrans* - 2023: proceedings of the XI International Symposium, St. Petersburg, May 31 - February 2, 2023 / Emperor Alexander I Petersburg State University of Railway Engineering. - St. Petersburg: OOO IPK NP-Print, 2023. - Pp. 190-198. - EDN ARMHNO.

12. Pyshkin, A. A. Power supply of railways / A. A. Pyshkin, D. V. Lesnikov. - Ekaterinburg: Ural State University of Railway Engineering, 2023. - 507 p.

13. Avdienko, E. G. Comparative analysis of software packages for automated traction calculations to improve the operating efficiency of electric rolling stock / E. G. Avdienko, E. A. Tretyakov // *Youth and systemic modernization of the country: Collection of scientific articles of the 7th International Scientific Conference of Students and Young Scientists*. In 5 volumes, Kursk, May 19–20, 2022 / Editor-in-chief M. S. Razumov. Volume 5. - Kursk: Southwestern State University, 2022. - Pp. 11–16. - EDN FIDGAK.

14. Pritulkin, A. A. Dynamic mathematical model of an alternating current power supply system for design and certification of the system in the SimInTech software package / A. A. Pritulkin // *Gagarin Readings* - 2019: Collection of abstracts of reports of the XLV International Youth Scientific Conference, Moscow, Barnaul, Akhtubinsk, April 16-19, 2019 / Moscow Aviation Institute (National Research University). - Moscow, Barnaul, Akhtubinsk: Moscow Aviation Institute (National Research University), 2019. - P. 72-73. - EDN FHJYCR.

15. Pilyaev, V. S. Modeling of power supply systems using the SimInTech program / V. S. Pilyaev, P. O. Gukov // *Youth vector of development of agricultural science: materials of the 72nd national scientific and practical conference of students and master's students, Voronezh, April 01 - 31, 2021 / Voronezh State Agrarian University*. Volume Part I. - Voronezh: Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I, 2021. - P. 223-226. - EDN YYIFJG

Информация об авторах

Галков Александр Андреевич – аспирант кафедры «Электроэнергетика транспорта», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: galkov16@gmail.com

Information about the authors

Galkov Alexander Andreevich – postgraduate student of the Department of Electric Power Engineering of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: galkov16@gmail.com