

Электротехнические комплексы и системы

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 629.4.027.4:656.2

doi: 10.30987/2658-6436-2026-1-87-93

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЕРЕДАЧИ ПЕРЕМЕННО-ПОСТОЯННОГО ТОКА МАГИСТРАЛЬНОГО ТЕПЛОВОЗА

Егор Сергеевич Гаврилов^{1✉}, Александр Анатольевич Пугачев²

^{1,2} Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Россия

¹ egor.gavrilovgavriloff@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0005-9271-0169>

² alexander-pugachev@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1836-0923>

Аннотация. Показана актуальность модернизации систем управления тягой магистральных локомотивов с применением программных комплексов 1-D моделирования для разработки современных алгоритмов управления. Приведена функциональная схема тяговой электрической передачи тягового подвижного состава с дизель-генераторной установкой и тяговыми двигателями постоянного тока с последовательным возбуждением, описан алгоритм ее работы. Описана разработанная компьютерная модель электрической передачи с шестью тяговыми двигателями в программном комплексе *SimInTech*, приведены и проанализированы результаты ее моделирования при управлении тягой посредством регулирования напряжения тягового генератора. Результаты моделирования показали адекватность разработанных моделей и отработку заданных значений с минимальными значениями динамических и статических ошибок.

Ключевые слова: двигатель постоянного тока, последовательное возбуждение, *SimInTech*, дизельный двигатель, синхронный генератор, неуправляемый выпрямитель

Для цитирования: Гаврилов Е.С., Пугачев А.А. Компьютерное моделирование электрической передачи переменного-постоянного тока магистрального тепловоза // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2026. №1 (31). С. 87-93. doi: 10.30987/2658-6436-2026-1-87-93.

Original article

Open Access Article

COMPUTER SIMULATION OF ALTERNATING-CONSTANT CURRENT ELECTRIC DRIVE FOR MAINLINE LOCOMOTIVES

Egor S. Gavrilov^{1✉}, Alexander A. Pugachev²

^{1,2} Bryansk State Technical University, Bryansk, Bryansk Region, Russia

¹ egor.gavrilovgavriloff@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0005-9271-0169>

² alexander-pugachev@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1836-0923>

Abstract. The work demonstrates the relevance of modernizing traction control systems for mainline locomotives using 1-D modelling software packages for developing modern control algorithms; presents a functional diagram of the traction electric drive of traction rolling stock with a diesel-generator set and direct current traction motors with series excitation, and describes its operating algorithm. A computer model of the electric drive with six traction motors is developed in the *SimInTech* software package, and the results of its simulation under traction control by regulating the generator voltage are presented and analysed. The simulation results show the adequacy of the developed models and the achievement of the desired values with minimal dynamic and static errors.

Keywords: direct current traction motor, series excitation, *SimInTech*, diesel engine, synchronous generator, uncontrolled rectifier

For citation: Gavrilov E.S., Pugachev A.A. Computer Simulation of Alternating-Constant Current Electric Drive for Mainline Locomotives. Automation and modeling in design and management, 2026, no. 1 (31). pp. 87-93. doi: 10.30987/2658-6436-2026-1-87-93.

Введение

Большинство магистральных локомотивов оборудованы коллекторными двигателями постоянного тока последовательного возбуждения, что связано с высокой степенью проработки вопросов управления тягой локомотивов такого типа, налаженными процессам производства коллекторных двигателей, высоким запасом ресурса их эксплуатации [1, 2]. Несмотря на широкое применение, тяговая электрическая передача переменного-постоянного тока обладает рядом ограничений, вызывающих необходимость модернизации традиционных систем управления тягой. Основными недостатками существующих тяговых электроприводов с коллекторными двигателями по отношению к электроприводам с асинхронными двигателями связаны со ступенчатым характером изменения тока обмотки возбуждения, переменной жесткостью механической характеристики и др. [3, 4]. Особенности источника электроэнергии тягового электропривода (на автономных локомотивах таким источником электроэнергии является дизель-генераторная установка) требуют совместного исследования динамических и статических процессов тягового электропривода и режимов работы источника электроэнергии, что и обуславливает актуальность проводимых авторами работ.

В работе [5] приведена разработка системы автоматического управления скоростью маневрового тепловоза с электропередачей переменного-постоянного тока в режиме горочной работы, целевым показателем качества выбрана точность регулирования линейной скорости локомотива. В работе [6] синтезирована система автоматического управления, решающая аналогичную задачу для грузового поезда с распределенной тягой. В работе [7] разработана математическая и компьютерная модель тяговой электропередачи переменного-переменного тока с синхронным генератором с электромагнитным возбуждением и синхронными тяговыми двигателями с возбуждением от постоянных магнитов. Результаты работы направлены на возможность исследования энергетических показателей качества элементов электропередачи при применении различных систем и алгоритмов управления тяговыми двигателями.

В последние годы в производстве и научных работах становится актуальным переход на отечественные технологии и программные продукты, в том числе при проектировании и исследовании электроприводов. Одним из наиболее перспективных программных комплексов является *SimInTech*, который уже апробирован многими учеными при решения своих задач [8, 9].

В данной статье приведены результаты разработки компьютерной модели электрической передачи переменного-постоянного тока, включающей в себя дизельный двигатель как источник механической мощности на валу генератора, в программном комплексе *SimInTech* и некоторые результаты моделирования переходных процессов в этой электропередаче.

Функциональное описание электрической передачи

Типовая функциональная схема электропередачи локомотива представлена на рис. 1. На рис. 1 и далее приняты обозначения: ДД – дизельный двигатель, РЧВ – регулятор частоты вращения дизельного двигателя, РСМ – регулятор свободной мощности дизельного двигателя, РВ – регулятор тока обмотки возбуждения синхронного генератора, ТГ – тяговый генератор, ТП – тяговый преобразователь, ТЭД – тяговый двигатель, ИУСН – измерительные устройства цепей собственных нужд, ИУТЦ – измерительные устройства тяговых цепей, МСУ – микропроцессорная система управления.

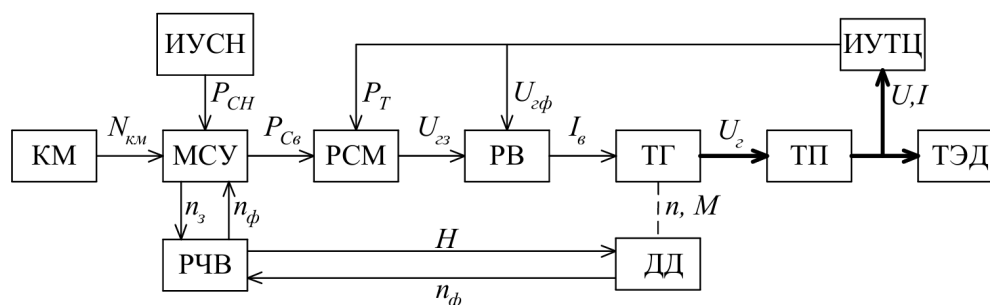


Рис. 1. Типовая функциональная схема тяговой электропередачи автономного подвижного состава
 Fig. 1. Typical functional diagram of a traction electric transmission of stand-alone rolling stock

Для магистральных тепловозов с передачей переменного-постоянного тока первичным источником электроэнергии является дизель-генераторная установка, состоящая из дизельного двигателя ДД и синхронного генератора ТГ с электромагнитным возбуждением, валы которых соединены механически и вращаются с одинаковой частотой вращения n , движущим является момент ДД M . Основной задачей РЧВ является поддержание постоянной для каждой заданной позиции контроллера машиниста $N_{км}$ частоты вращения вала дизельного двигателя n_z путем изменения подачи топлива H . Микропроцессорная система управления, по полученному от РЧВ значению фактической частоты вращения вала ДД n_f и значению мощности, потребляемой собственными нуждами локомотива $P_{сн}$, рассчитывает текущее значение свободной мощности $P_{св}$, которую необходимо реализовать на тягу. Регулятор свободной мощности дизельного двигателя, по полученному заданию на свободную мощность и сигналу обратной связи по электрической мощности P_T , потребляемой на тягу, приведенную к валу дизельного двигателя через соответствующие коэффициенты полезного действия, формирует задание на напряжение тягового генератора $U_{гз}$. Регулятор тока обмотки возбуждения синхронного генератора управляет током обмотки возбуждения ТГ таким образом, чтобы поддерживать заданное значение $U_{гз}$, обратная связь по напряжению $U_{гф}$ формируется ИУТЦ. Тяговый преобразователь выполняет преобразование переменного напряжения тягового генератора U_T в постоянное напряжение питания коллекторных ТЭД или переменное напряжение питания асинхронных ТЭД с параметрами, определяемыми системой управления ТЭД. Для электропередачи переменного-постоянного тока ТП в простейшем случае является неуправляемым выпрямителем и коллекторные ТЭД подключаются параллельно к его выходу, для электропередачи переменного-переменного тока в качестве ТП применяют преобразователи частоты со звеном постоянного тока или напряжения. Измерительное устройство тяговых цепей обеспечивает измерение токов и напряжений питания ТЭД U, I и осуществляет вычисление электрической мощности P_T , потребляемой на тягу и ее приведение к валу дизельного двигателя через соответствующие коэффициенты полезного действия.

Функциональная схема тяговой электропередачи переменного-постоянного тока представлена на рис. 2.

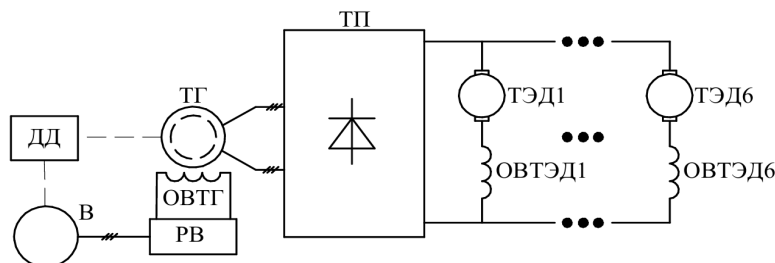


Рис. 2. Функциональная схема тяговой электропередачи переменного-постоянного тока тепловоза
 Fig. 2. Functional diagram of AC/DC traction electrical transmission

Источником механической мощности на валу ТГ и возбудителя В является дизельный двигатель ДД. Источником переменного напряжения на РВ является возбудитель В. В качестве тягового преобразователя выступает неуправляемый выпрямитель. Тяговые двигатели постоянного тока последовательного возбуждения ТЭД1-ТЭД6 соединены параллельно, при этом тяговые двигатели разбиты на две группы по три двигателя (в соответствии с распределением ТЭД по тележкам локомотива), питание каждой группы осуществляется выпрямленным напряжением соответствующей статорной обмотки тягового генератора. Мощность, потребляемая на возбуждение тягового генератора, учитывается при расчете мощности собственных нужд тепловоза.

Компьютерная модель электрической передачи

Моделирование было проведено в программном комплексе *SimInTech*, метод моделирования – метод Рунге-Кутты 4-го порядка, шаг моделирования – 0,1 мкс.

Для построения модели системы управления и модели механической части, построенной по эмпирическим уравнениям для расчета силы сопротивления, использовались стандартные блоки математических операторов.

Модель силовой части электрической передачи представлена на рис. 3.

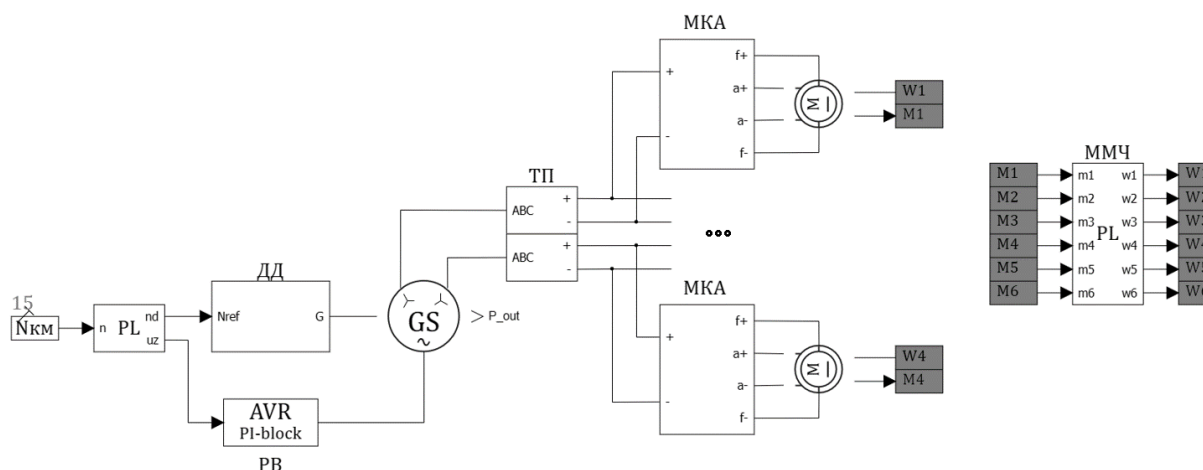


Рис. 3. Модель силовой части тяговой передачи
Fig. 3. Model of the traction transmission power side

Для построения модели силовой части электрической передачи использовались специализированные блоки библиотеки ЭЦ-Динамика:

1) модель многофазного синхронного генератора с электромагнитным возбуждением [10, 11] *GS* со следующими параметрами: номинальная активная мощность $P_{nom} = 2,8$ МВт, номинальная частота вращения $N_{nom} = 1000$ об/мин, номинальная частота $f = 100$ Гц, номинальное напряжение $U_{nom} = 600$ В, номинальный коэффициент мощности $\cos\phi = 0,9$ о.е., активное сопротивление ротора $R_f = 0,0008$ о.е., активное сопротивление ротора по продольной оси $R_{ld} = 0,018$ о.е., активное сопротивление ротора по поперечной оси $R_{lq} = 0,025$ о.е., сопротивление взаимной индукции по поперечной оси $X_{aq} = 2$ о.е., индуктивное сопротивление рассеяния по поперечной оси $X_{\sigma lq} = 0,1$ о.е., сопротивление взаимной индукции по продольной оси $X_{ad} = 0,2$ о.е., индуктивное сопротивление рассеяния по продольной оси $X_{\sigma ld} = 0,1$ о.е., индуктивное сопротивление рассеяния ротора по продольной оси $X_{\sigma fd} = 0,15$, индуктивное сопротивление рассеяния статора $X_{\sigma l} = 0,01$ о.е., сопротивление взаимной индукции статорных обмоток $X_{l2} = 0,14$ о.е., активное сопротивление статора $R_s = 0,002$ о.е.;

2) модели электрических двигателей постоянного тока *M* со следующими параметрами: номинальная мощность $P_{nom} = 420$ кВт, номинальное напряжение $U_{noma} = 500$ В, номинальный ток $I_{noma} = 700$ А, номинальная частота вращения $N_{nom} = 600$ об/мин, момент инерции $J = 50$ кг·м², индуктивность обмотки якоря $L_{\gamma} = 0,002$ Гн, активное сопротивление обмотки якоря $R_{\gamma} = 0,03$ Ом, индуктивность обмотки возбуждения $L_{\nu} = 0,003$ Гн, активное сопротивление обмотки возбуждения $R_{\nu} = 0,007$ Ом;

3) модель упрощенной системы возбуждения синхронного генератора *PB* «Система возбуждения (*type simple model using PI-block*)»;

4) модель первичного двигателя генератора *ДД* «Двигатель дизельный (*type simple model*)»;

5) идеализированные модели полупроводниковых элементов, типа «Диод» для построения модели тягового выпрямителя;

6) идеализированные модели коммутационной аппаратуры «Ключ постоянного тока»;

7) субмодели контакторной аппаратуры *МКА*, внутренняя структура которых идентична для цепей питания каждого из шести тяговых двигателей и представлена на рис. 4;

8) субмодель тягового преобразователя *ТП*, представляющая собой двухканальный неуправляемый выпрямитель;

9) субмодель упрощенной механической части *ММЧ*, построенная по типовым уравнениям тяговых расчетов для получения значения частоты вращения валов тяговых двигателей.

10) блоки «В память», «Из памяти» (блоки на рис. 3 закрашены серым цветом) для осуществления обмена входными и выходными параметрами между блоками модели;

11) блок «Язык программирования» *PL* для моделирования алгоритмов системы управления тягой.

Моделирование производилось в режиме имитации ручного управления тягой локомотива, путем ступенчатого изменения задания на позицию контроллера машиниста в определенные моменты времени в блоке *Мкм*. Управление тягой в зависимости от выбранной позиции осуществляется по алгоритму, описанному в предыдущем разделе, путем изменения напряжения тягового генератора.

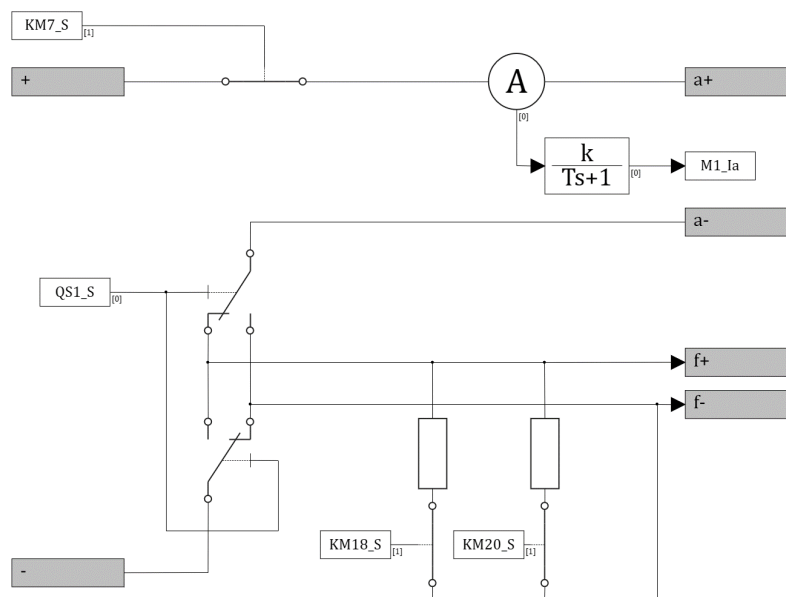


Рис. 4. Внутренняя структура блока МКА
Fig. 4. The internal structure of the MKA unit

Для регулирования свободной мощности, напряжения тягового генератора и тока возбуждения использовалась типовая структура подчиненного регулирования с ПИ-регуляторами в каждом контуре и функциональными задатчиками для учета ограничений работы дизельного двигателя.

Блоки МКА используются для обеспечения реверса тяговых двигателей (изменения направления движения локомотива) и двухступенчатого ослабления возбуждения тяговых двигателей. Логика включения каждой ступени ослабления поля жестко связана с линейной скоростью движения локомотива. Блоки *КМ7_S*, *КМ18_S*, *КМ20_S*, *QS1_S* используются для управления моделями соответствующих коммутационных аппаратов.

Результаты моделирования и их обсуждение

Результаты моделирования (рис. 5) показали адекватность разработанных моделей и отработку заданных значений с минимальными значениями динамических и статических ошибок. Графики мощности дизельного двигателя на тягу (см. рис. 5, б), момента на валу дизельного двигателя (см. рис. 5, в) и частота вращения его вала (см. рис. 5, г) соответствуют его заданной характеристике полной мощности в установившемся режиме работы. Динамические броски мощности момента на 45 и 53 с (см. рис. 5, б, в) обусловлены изменением сопротивления цепей питания тяговых двигателей из-за шунтирования их обмоток возбуждения, вызванного достижением пороговых значений линейной скорости локомотива; величина этих бросков находится в допустимых диапазонах. Динамическая ошибка регулирования частоты вращения вала дизельного двигателя в переходных процессах (см. рис. 5, г) обусловлена настройками системы управления. В установившемся режиме работы статическая ошибка отсутствует. Зависимости выпрямленного напряжения тягового генератора (см. рис. 5, д) и токов тяговых двигателей (см. рис. 5, е) соответствуют внешним характеристикам тягового генератора и электромеханическим характеристикам тяговых двигателей соответственно, броски тока и напряжения обусловлены коммутацией цепей шунтирования обмоток возбуждения тяговых двигателей, величина пульсаций не превышает допустимых значений.

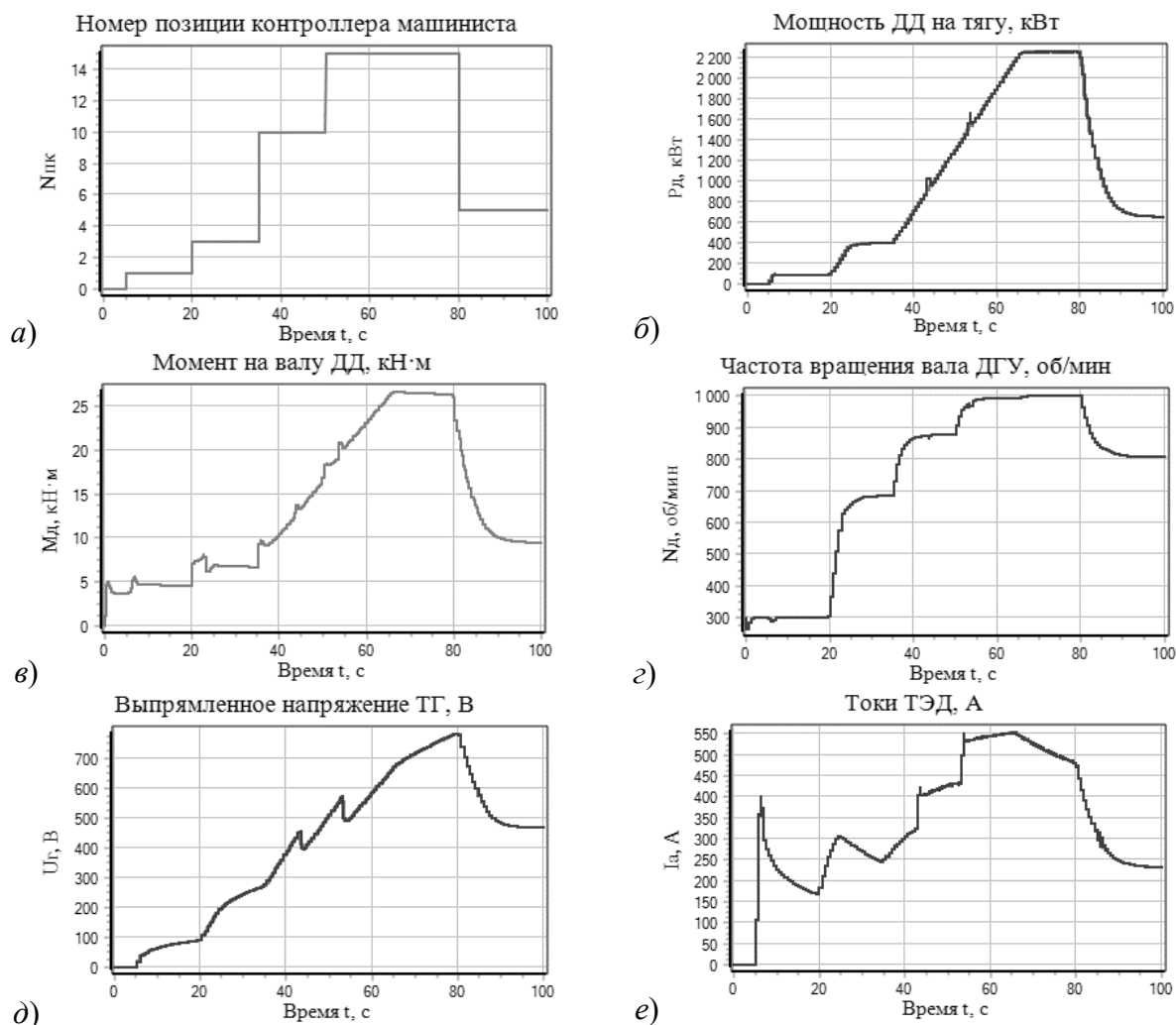


Рис. 5. Зависимости номера позиции контроллера машиниста (а), мощности на тягу (б), момента на валу дизельного двигателя (в), частоты вращения вала дизельного двигателя (г), выпрямленного напряжения первой обмотки тягового генератора (д), токов тяговых двигателей (е) от времени

Fig. 5. Time dependences of driver's controller position number (a), traction power (b), diesel engine torque (c), rotation speed of the diesel engine (d), rectified voltage of the traction generator (e), currents of traction electric engine (f) on time

Заключение

Разработана компьютерная модель тяговой электрической передачи переменного тока магистрального тепловоза, пригодная для апробации существующих и новых алгоритмов управления элементами электрической передачи. Для регулирования тяги использовалась система, организованная по принципу подчиненного регулирования с внутренними контурами напряжения и тока возбуждения тягового генератора. Результаты моделирования показали работоспособность разработанных моделей генератора и двигателя как в установившихся, так и в переходных режимах работы. Анализ результатов моделирования позволяет оценить влияние ограничений, вызванных необходимостью реализации всей свободной мощности на тягу и особенностей работы дизельного двигателя, на показатели качества разработанных алгоритмов и систем управления тягой и определить перспективные направления их дальнейшей модернизации.

Список источников:

1. Системы управления тяговым приводом современных локомотивов / А.Т. Бурков, О.С. Валинский, А.М. Евстафьев [и др.] // Электротехника. – 2019. – № 10. – С. 33-36.
2. Hill R. J. Traction drives and inverters // Railway Electrification Infrastructure and Systems. – 2007. – PP. 185-196.

References:

1. Burkov AT, Valinskiy OS, Evstafyev AM, et al. Modern Locomotive Traction Drive Control Systems. Russian Electrical Engineering. 2019;(10):33-36.
2. Hill R.J. Traction Drives and Inverters. Railway Electrification Infrastructure and Systems. 2007: 185-196.

3. Бабков Ю.В., Клименко Ю.И., Чудаков П.Л., Линьков В.А. Электрическая силовая схема тепловоза 2ТЭ25А // Всероссийский научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава (Коломна). Труды Института. – 2009. – № 91. – С. 22-27.

4. Космодамианский А.С., Воробьев В.И., Пугачев А.А. Системы скалярного управления тяговым асинхронным двигателем // Электротехника. – 2016. – № 9. – С. 44-50.

5. Журавлев С.Н. Система управления силовой установкой маневрового тепловоза с алгоритмом автоматического регулирования скорости // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. – 2021. – № 3-4. – С. 31-38.

6. Пудовиков О.Е., Сидоренко В.Г., Сидорова Н.Н., Киселев М.Д. Система автоматического управления скоростью грузового поезда с распределенной тягой // Электротехника. – 2019. – № 9. – С. 47-55.

7. Чуприна Н.В., Пугачев А.А. Моделирование системы «синхронный генератор – преобразователь частоты – синхронный двигатель» // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. – 2023. – № 3. – С. 89-96.

8. Калачёв Ю.Н., Окулов Е.В. Проектирование электроприводов. – М.: ДМК Пресс, 2025. – 69 с.

9. Еремочкин С.Ю., Дорохов Д.В., Жуков А.А. Разработка имитационной модели однофазного асинхронного электропривода в среде динамического моделирования SimInTech // Вестник НГИЭИ. – 2024. – № 1(152). – С. 59-71.

10. Гришин Н.В. Уравнения режимных задач шестифазных турбогенераторов предельной мощности // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2016. – № 2. – С. 16-23.

11. Singh G.K. Modeling and analysis of six-phase synchronous generator for stand-alone renewable energy generation // Energy. – 2011. – № 36. – С. 5621-5631.

3. Babkov YuV, Klimenko YuI, Chudakov PL, et al. Electric Power Circuit of the 2TE25A Locomotive. All-Russian Research Institute and Design-Technological Institute of Rolling Stock (Kolomna). Proceedings of the Institute. 2009;(91):22-27.

4. Kosmodamianskiy A.S., Vorobyev V.I, Pugachev A.A. Scalar Control Systems for a Traction Induction Motor. Russian Electrical Engineering. 2016;(9):44-50.

5. Zhuravlev S.N. Power Equipment Control System of a Shunting Locomotive with Automatic Speed Control Algorithm. Automation and Modelling in Design and Management. 2021;(3-4):31-38.

6. Pudovikov OE, Sidorenko VG, Sidorova NN, et al. Systems for Automatic Control of Locomotive Speed of a Freight Train with Distributed Traction. Russian Electrical Engineering. 2019;(9):47-55.

7. Chuprina N.V., Pugachev A.A. Simulation of «Synchronous Generator-Frequency Converter-Synchronous Motor» system. Automation and Modelling in Design and Management. 2023;(3):89-96.

8. Kalachev Y.N., Okulov E.V. Electric Drive Design. Moscow: DMK Press; 2025.

9. Eremochkin SYu, Dorokhov DV, Zhukov AA. Development of a Simulation Model of a Single-Phase Asynchronous Electric Drive in the SimInTech Dynamic Simulation Environment. Bulletin NGIEI. 2024;1(152):59-71.

10. Grishin N.V. Equations for Operation Conditions Problems of Six Phase Turbine Generators of Maximum Capacity. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. 2016;(2):16-23.

11. Singh G.K. Modeling and Analysis of Six-Phase Synchronous Generator for Stand-Alone Renewable Energy Generation. Energy. 2011;(36):5621-5631.

Информация об авторах:

Гаврилов Егор Сергеевич

аспирант Брянского государственного технического университета, ORCID 0009-0005-9271-0169.

Пугачев Александр Анатольевич

доктор технических наук, профессор кафедры «Высокотехнологичное транспортное машиностроение» Брянского государственного технического университета, ORCID 0000-0002-1836-0923.

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.**

Статья поступила в редакцию 01.02.2026; одобрена после рецензирования 14.02.2026; принята к публикации 17.02.2026.

The article was submitted 01.02.2026; approved after reviewing 14.02.2026; accepted for publication 17.02.2026.

Рецензент – Малаханов А.А., кандидат технических наук, доцент, Брянский государственный технический университет.

Reviewer – Malakhanov A.A., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Bryansk State Technical University.