

УДК 621.314.6:004.942(045)

Моделирование режима электрического торможения тепловоза с последовательным возбуждением коллекторных тяговых двигателей при использовании силового полупроводникового преобразователя

В. Ю. Евсеев^{1,2}, А. Н. Савоськин²

¹Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава, Российская Федерация, 140402, Московская область, Коломна, ул. Октябрьской революции, 410

²Российский университет транспорта, Российская Федерация, 127994, Москва, ул. Образцова, 9-9

Для цитирования: Евсеев В. Ю., Савоськин А. Н. Моделирование режима электрического торможения тепловоза с последовательным возбуждением коллекторных тяговых двигателей при использовании силового полупроводникового преобразователя // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 2. — С. 463–470. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-463-470

Аннотация

Цель: Рассмотреть структуру, преимущества и принцип работы нового транзисторного преобразователя на *IGBT*-транзисторах для тепловозов с коллекторными тяговыми двигателями в режиме электрического торможения, а также особенности реализации данного режима на тепловозах. Показать функциональную структуру системы автоматического управления преобразователем для режима электрического торможения. Построить потенциально возможную тормозную характеристику тепловоза с новым преобразователем. **Методы:** Имитационное моделирование режима электрического торможения с помощью компьютерной математической модели тягового привода в среде *Matlab Simulink*. Анализ результатов моделирования работы тягового привода в стационарных и динамических режимах. Сравнение полученной тормозной характеристики с существующей для тепловоза 2ТЭ25КМ. **Результаты:** Установлено, что применение предлагаемого транзисторного тягового преобразователя в силовой электрической схеме тепловоза обеспечивает поосное управление коллекторным тяговым электроприводом в режиме электрического торможения с последовательным возбуждением тяговых двигателей и позволяет существенно повысить эффективность электрического тормоза на низких скоростях движения. Предлагаемое решение реализует заданную тормозную силу локомотива в широком диапазоне скоростей, а также ее ограничения, обусловленные электромеханическими параметрами узлов тепловоза. **Практическая значимость:** Показано, что предлагаемое решение обеспечивает повышение эффективности электрического тормоза и продление ресурса тормозных колодок и колес подвижного состава.

Ключевые слова: Коллекторный тяговый двигатель, тормозная характеристика, тепловоз, тяговый преобразователь, тяговый привод, электрическое торможение, математическая модель, система автоматического управления, моделирование, *Matlab Simulink*.

Применение электрического торможения (ЭТ) на тепловозах с электропередачей обеспечивает как поддержание скорости при спусках, так и подтормаживание на прямых участках пути, повышая срок службы тормозных колодок и колес локомотива и вагонов поезда [1]. Укрупненная структурная схема тягового привода тепловозов с коллекторными двигателями (на примере 2ТЭ116У,

2ТЭ25КМ) для режима ЭТ (рис. 1) [2] показывает, что в этом режиме используется независимое возбуждение тяговых электродвигателей (ТЭД). При этом обмотки возбуждения ОВ1...ОВ6 соединены последовательно и питаются от тягового генератора ТГ через один из каналов управляемого выпрямителя УВ. Якоря ТЭД Я1...Я6 индивидуально подключены к тормозным резисторам $R_{Т1}...R_{Т6}$. Регу-

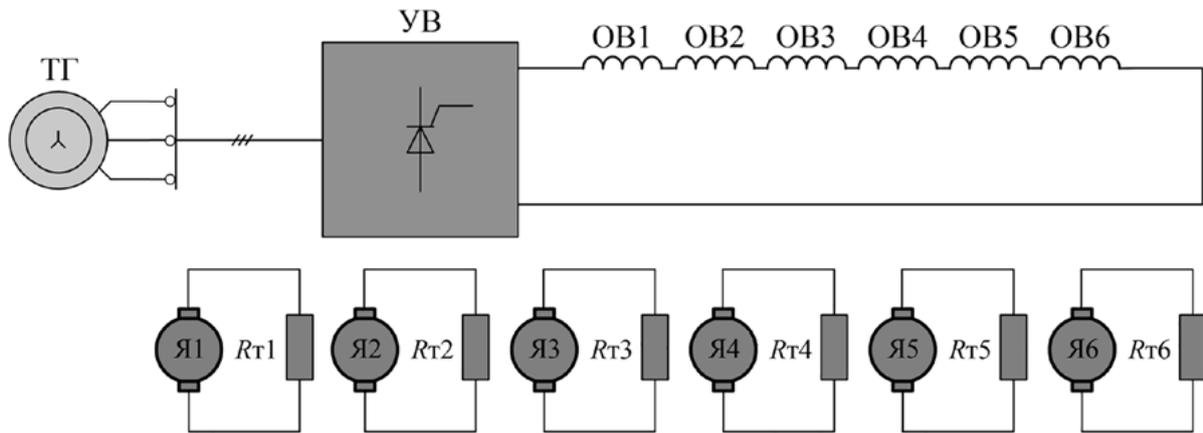


Рис. 1. Увеличенная структурная схема ЭТ тепловозов с коллекторным тяговым приводом: ОВ1...ОВ6 — обмотки возбуждения ТЭД; ТГ — тяговый генератор; УВ — управляемый выпрямитель; Я1...Я6 — якоря ТЭД; $R_{т1}...R_{т6}$ — тормозные резисторы

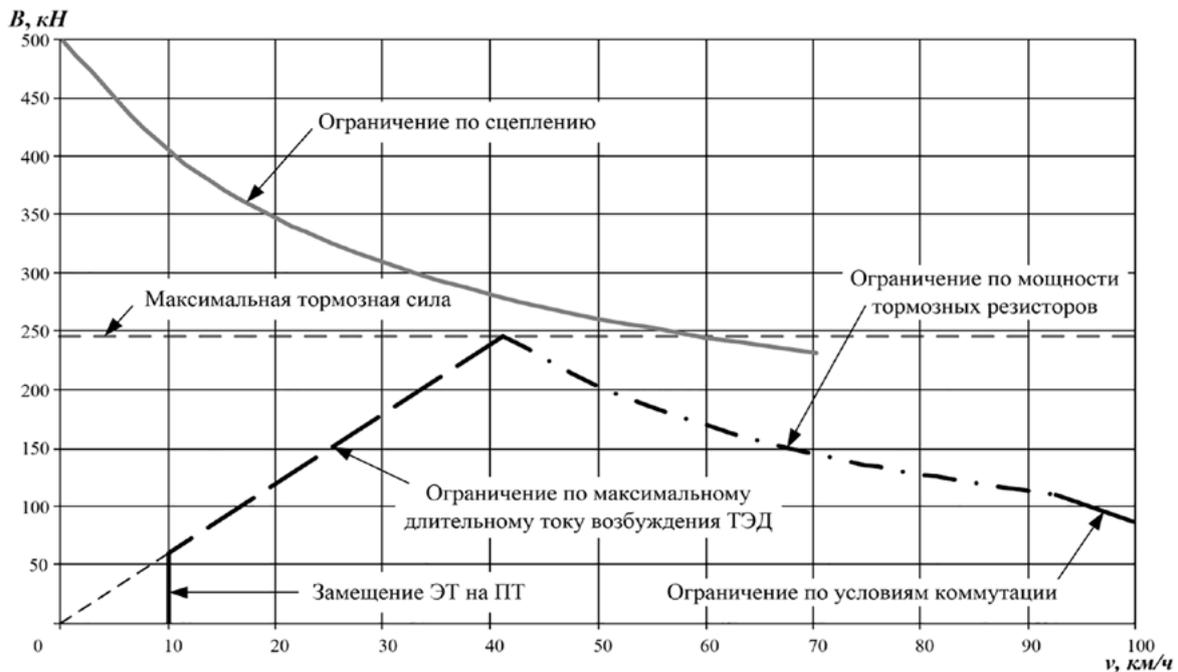


Рис. 2. Предельная тормозная характеристика секции тепловоза 2ТЭ25КМ

лирование тормозной силы происходит за счет изменения тока в обмотках возбуждения тяговых электродвигателей.

Предельная тормозная характеристика тепловоза (на примере секции 2ТЭ25КМ), соответствующая данной схеме (рис. 2), учитывает следующие ограничения, наложенные в данной схеме на тормозную характеристику:

- ограничение по условиям коммутации (по максимальной реактивной ЭДС);
- ограничение по длительному току (мощности) тормозных резисторов;
- ограничение по длительному току возбуждения ТЭД.

Показанная характеристика имеет треугольную форму с максимумом при скорости 40 км/ч,

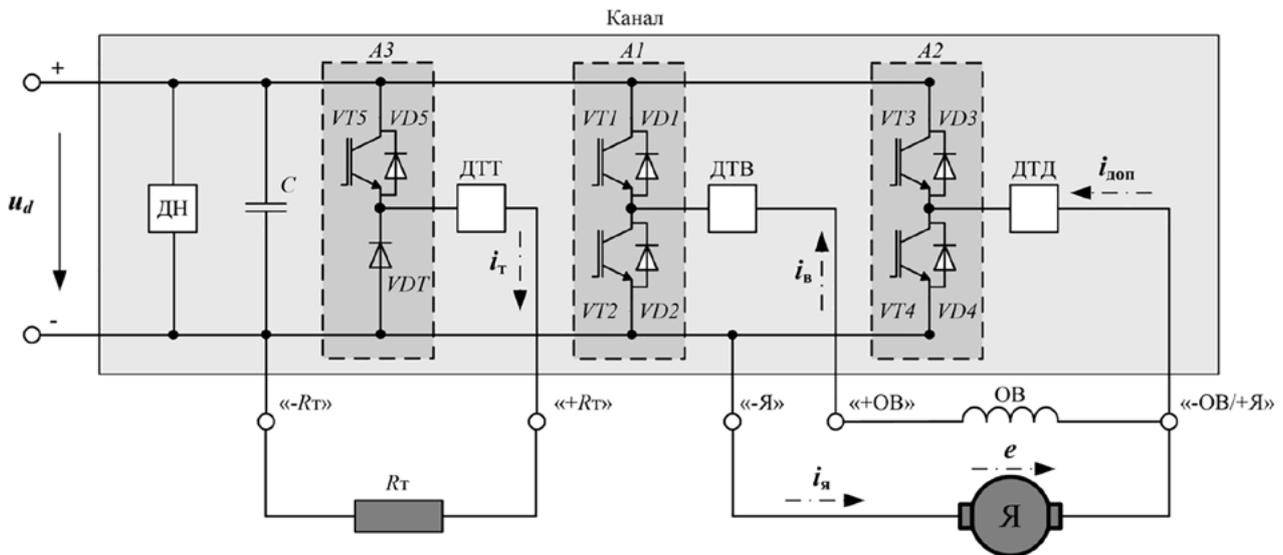


Рис. 3. Структурная схема канала ТПР для режима ЭТ: $A1...A3$ — IGBT-модули; ДН — датчик напряжения; ДТВ, ДТД, ДТТ — датчики тока возбуждения, дополнительного тока и тока через тормозной резистор; ОБ — обмотка возбуждения ТЭД; Я — якорь ТЭД; C — фильтровый конденсатор; R_T — тормозной резистор; $VT1...VT5$ — IGBT-транзисторы; $VD1...VD5$ — обратные диоды, VDT — обратный диод тормозного тока

а на скорости 10 км/ч выполняется замещение пневматическим тормозом [3].

Как видно из рис. 1 и 2, существующее решение не обеспечивает поддержание тормозной силы в зоне низких скоростей движения и поосное управление тормозной силой, а также требует применения дополнительного источника питания ОБ.

Предлагаемое в [4] решение по применению тягового полупроводникового преобразователя (ТПР), напротив, позволяет обеспечить не только режим тяги, но и режим электрического торможения тепловоза.

Структурная схема канала ТПР для режима ЭТ (рис. 3) содержит фильтровой конденсатор C , пять силовых ключей $VT1-VT5$ с обратными диодами $VD1-VD5$, а также обратный диод тормозного тока VDT . На этой схеме дополнительно показаны ток якоря ($i_я$), ток возбуждения ($i_в$), дополнительный ток ($i_доп$), напряжение в звене постоянного тока преобразователя (u_d), а также обмотка возбуждения ОБ, якорь Я и ЭДС (e) тягового электродвигателя. Для контроля параметров используются датчики напряжения и тока

ДН, ДТВ, ДТД и ДТТ. Используется последовательное возбуждение тяговых двигателей, как на электровозах ЧС2Т, ЧС6, ЧС7 [5].

За счет остаточного магнитного потока в обмотке якоря наводится небольшая по величине ЭДС γe_0 . Включение ключа $VT2$ вызывает процесс самовозбуждения ТЭД по цепи: якорь — ОБ — ключ $VT2$. Последующая работа ключей преобразователя зависит от скорости.

В зоне низких скоростей движения преимущественно работает ключ $VT2$, закорачивая якорь и обмотку возбуждения и обеспечивая тем самым заданный ток ТЭД. Похожее решение используется на тепловозах ТЭМ7А и ТЭМ14 [6].

На высокой скорости встает вопрос обеспечения устойчивости электрического торможения [7], которая определяется неравенством:

$$\frac{de}{di_{эТ}} < \frac{d}{di_{эТ}} [i_{эТ} (R_T + R_{дв})], \tag{1}$$

где R_T — сопротивление тормозного резистора, Ом;

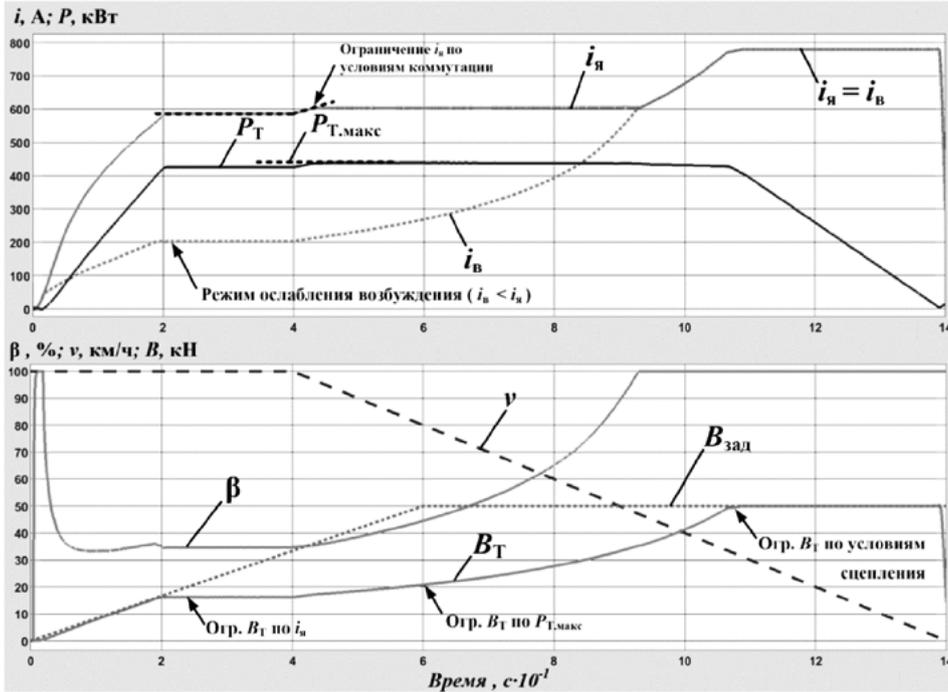


Рис. 4. Результаты моделирования работы ТПР в режиме ЭТ в диапазоне скоростей 0...100 км/ч:

$i_я, i_в$ — токи якоря и возбуждения; P_T — мощность на тормозном реостате;
 B_T — тормозная сила; $B_{зад}$ — заданное значение тормозной силы; v — скорость локомотива;
 β — коэффициент ослабления возбуждения

$R_{дв}$ — сопротивление обмоток двигателя, Ом;
 $i_{эт}$ — ток двигателя в режиме ЭТ, А;
 e — ЭДС двигателя, В.

В предложенной схеме (рис. 3) изменять точку установившегося режима при постоянной скорости движения возможно путем увеличения эквивалентного сопротивления тормозного резистора R_T в большую сторону за счет работы ключа VT5 или путем использования ослабления возбуждения, что возможно за счет работы ключа VT4.

Таким образом, использование предложенного ТПР позволяет обеспечить работу тепловоза в режиме ЭТ с последовательным возбуждением ТЭД0 поосным управлением тормозной силой и не требует применения дополнительного источника питания.

Структурная схема системы автоматического управления тяговым преобразователем (САУ ТП) в режиме ЭТ аналогична структурной схеме САУ для режима тяги [8] (за исключением того, что

входным сигналом для нее является заданная тормозная сила $B_{зад}$, а не мощность) и в настоящей работе не приводится.

Вычисление реализованной тормозной силы $B_{изм}$ колесной пары осуществляется по следующей формуле [7]:

$$B_{изм} = \frac{2M_{дв} \mu}{D_k 1000}, \quad (2)$$

где $M_{дв}$ — крутящий момент на валу двигателя, Нм;

D_k — диаметр бандажа колесной пары, м;

μ — коэффициент полезного действия редуктора;

$B_{изм}$ — тормозная сила, кН.

При этом согласно [7] механическими потерями в двигателе можно пренебречь и считать, что:

$$M_{дв} = M_E = 9,55 C_E \Phi i_я, \quad (3)$$

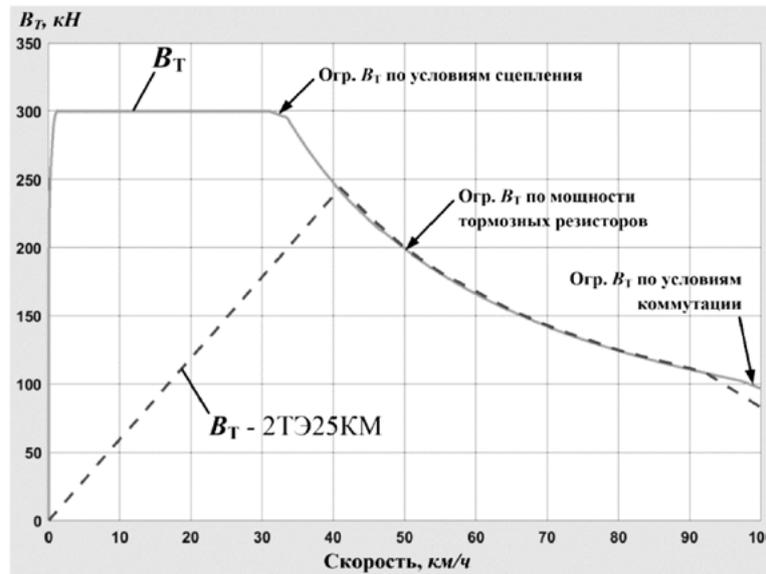


Рис. 5. Тормозная характеристика секции тепловоза

где $i_{я}$ — ток якоря, А;

C_E — конструкционная постоянная двигателя;

Φ — магнитный поток главных полюсов, Вб;

M_E — электромагнитный момент, Нм.

Магнитный поток главных полюсов рассчитывался с использованием математической модели коллекторного двигателя с отдельным учетом вихревых токов от главных и добавочных полюсов [9–11].

Для верификации предлагаемого ТПР использовалась компьютерная имитационная модель тягового привода, приведенная в [8], с использованием параметров тяговой передачи тепловоза 2ТЭ25КМ.

Результаты работы ТПР при реализации максимальной тормозной силы приведены на рис. 4.

При включении преобразователя на скорости 100 км/ч происходит самовозбуждение ТЭД, а привод сразу же переходит в режим ослабления возбуждения ($\beta = 35\%$). На интервале времени от 0 до 20 с тормозная сила B_T начинает линейно нарастать до 18 кН и из-за ограничения тока якоря $i_{я}$ по условиям коммутации остается на этом уровне до момента времени $t = 40$ с.

Далее (интервал времени от 40 до 105 с) скорость движения v линейно снижается. Тормоз-

ная сила B_T увеличивается по гиперболической характеристике. Такая зависимость обуславливается ограничением по максимальной мощности тормозных резисторов $P_{T, \max}$, которое составляет 440 кВт. В момент времени $t = 92$ с привод переходит в режим полного возбуждения.

В момент времени $t = 110$ с при скорости 32 км/ч тормозная сила достигает максимального значения 50 кН, заданного в рамках исследования для 4 позиции контроллера машиниста, и удерживается на этом уровне вплоть до скорости, близкой к нулю.

Как видно по представленным выше результатам, предлагаемый ТПР и его САУ обеспечивают поддержание тормозной силы на заданном уровне во всем диапазоне скоростей движения, а также реализуют все ограничения, обусловленные электромеханическими параметрами узлов тепловоза.

Построенная зависимость тормозной силы секции тепловоза от скорости $B_T(v)$ (рис. 5) в диапазонах скоростей 0...41 км/ч и 92...100 км/ч проходит выше тормозной характеристики секции тепловоза 2ТЭ25КМ, показанной на этом же рисунке пунктирной линией, что обусловлено использованием ТПР. В диапазоне скоростей

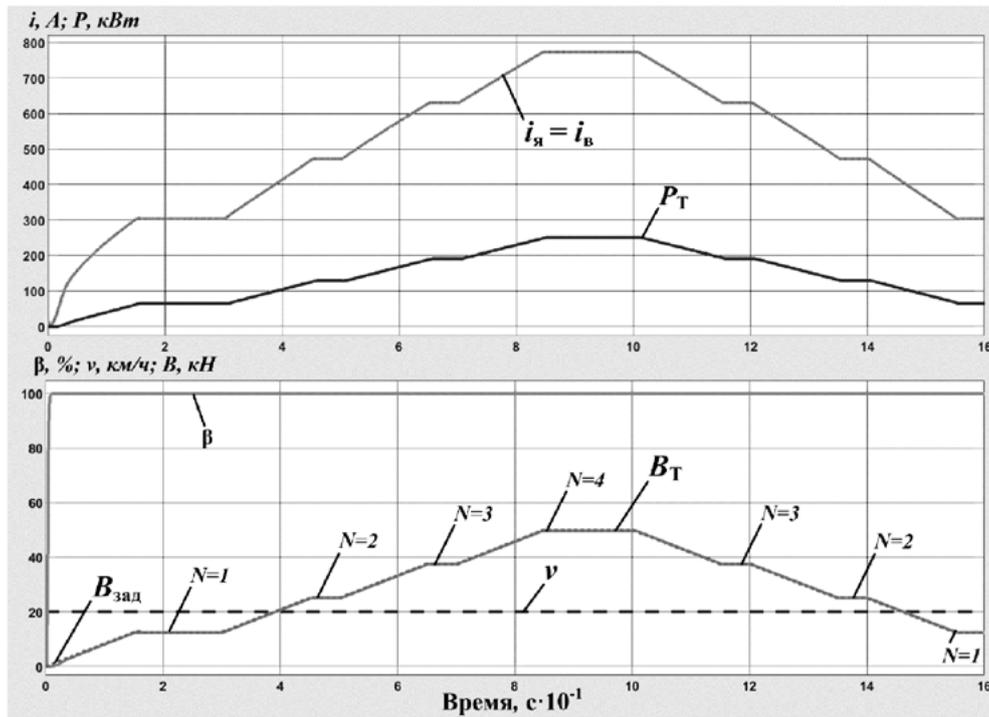


Рис. 6. Результаты моделирования работы ТПР при регулировании тормозной силы на скорости 20 км/ч: N — номер тормозной позиции контроллера машиниста

41...92 км/ч обе тормозные характеристики практически совпадают, что с учетом принятых допущений говорит об адекватности используемой математической модели тягового привода.

Рассмотрим результаты моделирования работы предлагаемого решения в режиме ЭТ при регулировании тормозной силы на скорости движения $v = 20$ км/ч (рис. 6).

На интервале времени от 0 до 30 с происходит плавное включение ТПР на первой тормозной позиции. Затем выполняется постепенный набор позиций с 1 до 4 (интервал времени от 30 до 100 с). Значение B_T увеличивается вслед за заданным значением $B_{зад}$, также происходит увеличение мощности на тормозном реостате P_T , токов якоря и возбуждения ТЭД. На интервале времени от 100 до 160 с происходит сброс позиций КМ с 4 до 1. ТПР также обеспечивает поддержание тормозной силы в соответствии с заданием.

Выводы

1. Применение предлагаемого транзисторного тягового преобразователя в силовой электрической схеме тепловоза обеспечивает поосное управление коллекторным тяговым электроприводом в режиме электрического торможения с последовательным возбуждением тяговых двигателей и позволяет существенно повысить эффективность электрического тормоза на низких скоростях движения.

2. Предлагаемое решение реализует заданную тормозную силу локомотива в широком диапазоне скоростей, а также ее ограничения, обусловленные электромеханическими параметрами узлов тепловоза.

3. Повышение эффективности электрического тормоза обеспечит продление ресурса тормозных колодок и колес как локомотива, так и вагонов поезда.

Библиографический список

1. Колесник И. К. Электропередачи тепловозов на переменном-постоянном токе / И. К. Колесник, Т. Ф. Кузнецов, В. И. Липовка и др. — М.: Транспорт, 1978. — 149 с.

2. Шаркин И. А. Магистральный грузовой тепловоз 2ТЭ25КМ: структура системы управления и электрооборудования / И. А. Шаркин, В. А. Чудаков, В. А. Линьков и др. // Локомотив. — 2016. — № 1. — С. 42–43.

3. Магистральный грузовой двухсекционный тепловоз 2ТЭ25КМ. Руководство по эксплуатации. Часть 1. Техническое описание. 2ТЭ25КМ РЭ. Часть 1 / ЗАО «УК «БМЗ». — 2015. — 153 с.

4. Клименко Ю. И. Совершенствование тягового привода тепловозов с коллекторными двигателями / Ю. И. Клименко, К. С. Перфильев, В. Ю. Евсеев и др. // Локомотивы. Электрический транспорт. XXI век. Т. 2: материалы VI Междунар. научно-техн. конференции (СПб., 13–15 ноября 2018 г.). — СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2018. — С. 24–33.

5. Розенфельд В. Е. Теория электрической тяги: учебник для вузов ж-д трансп. 3-е изд., перераб. и доп. / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров и др. — М.: Транспорт, 1995. — 294 с.

6. Кузнецов Н. А. Регулятор электродинамического тормоза горючего тепловоза / Н. А. Кузнецов, В. Ю. Евсеев // Локомотив. — 2019. — № 6. — С. 39–40.

7. Осипов С. И. Теория электрической тяги: учебник для вузов ж.-д. транспорта / С. И. Осипов, С. С. Осипов,

В. П. Феоктистов; под ред. С. И. Осипова. — М.: Маршрут, 2006. — 436 с.

8. Евсеев В. Ю. Электромагнитные процессы в коллекторном тяговом приводе тепловоза при питании от силового полупроводникового преобразователя / В. Ю. Евсеев, А. Н. Савоськин, К. С. Перфильев // Практическая силовая электроника. — 2021. — № 4. — С. 32–38.

9. Евсеев В. Ю. Математическая модель коллекторного тягового двигателя с отдельным учетом вихревых токов главных и добавочных полюсов / В. Ю. Евсеев, А. Н. Савоськин // Электротехника. — 2020. — № 9. — С. 32–38.

10. Находкин М. Д. Проектирование тяговых электрических машин: учебное пособие для вузов ж.-д. транспорта / М. Д. Находкин, Г. В. Василенко, В. И. Бочаров и др.; под ред. М. Д. Находкина. — М.: Транспорт, 1976. — 624 с.

11. Жиц М. З. Переходные процессы в машинах постоянного тока / М. З. Жиц. — М.: Транспорт, 1974. — 378 с.

Дата поступления: 01.04.2023

Решение о публикации: 19.04.2023

Контактная информация:

ЕВСЕЕВ Вячеслав Юрьевич — аспирант, заведующий сектором; evseev@vnikti.com

САВОСЬКИН Анатолий Николаевич — д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Электропоезда и локомотивы»; elmechtrans@mail.ru

Simulation of Electric Braking Mode of a Diesel Locomotive with Series Excitation of Commutator Traction Motors Using a Power Semiconductor Converter

V. Yu. Evseev^{1,2}, A. N. Savoskin²

¹Research and Design Institute of Rolling Stock, 410, Oktyabrskoy Revolyutsii str., Kolomna, Moscow region, 140402, Russian Federation

²Russian University of Transport, 9-9, Obraztsova str., Moscow, 127994, Russian Federation

For citation: Evseev V. Yu., Savoskin A. N. Simulation of Electric Braking Mode of a Diesel Locomotive with Series Excitation of Commutator Traction Motors Using a Power Semiconductor Converter // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 2, pp. 463–470. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-463-470

Summary

Purpose: To consider the structure, advantages and operating principle of a new transistor converter based on isolated gate bipolar transistors (IGBT) for diesel locomotives with commutator traction motors in the electric braking mode, as well as the implementation features of this mode on diesel locomotives. To show the functional structure of the converter automatic control system for the electric braking mode. To plot

a potential braking characteristic of a diesel locomotive with a new converter. **Methods:** Simulation modeling of the electric braking mode using a computational mathematical model of a traction drive in the *Matlab Simulink* environment. Analysis of the simulation results of the traction drive operation in stationary and dynamic conditions. Comparison of the obtained braking characteristic with the existing one for 2TE25KM diesel locomotive. **Results:** It is established that the use of the proposed transistor traction converter in the power electrical circuit of a diesel locomotive provides axis-by-axis control of a commutator traction electric drive in the electric braking mode with series excitation of traction motors and allows to significantly increase the electric brake efficiency at low speeds. The proposed solution implements the target braking force of the locomotive in a wide range of speeds, as well as its limitations due to the electromechanical parameters of the diesel locomotive assemblies. **Practical significance:** It is shown that the proposed solution provides the increase of the electric brake efficiency, life extension of brake shoes and wheels of the rolling stock.

Keywords: Commutator traction motor, braking characteristic, diesel locomotive, traction converter, traction drive, electric braking, mathematical model, automatic control system, simulation, *Matlab Simulink*. a

References

1. Kolesnik I. K., Kuznetsov T. F., Lipovka V. I. et al. *Elektroperedachi teplovozov na peremennno-postoyannom toke* [AC-DC power transmissions of diesel locomotives]. Moscow: Transport Publ., 1978, 149 p. (In Russian)
2. Sharkin I. A., Chudakov V. A., Linkov V. A. et al. Magistral'nyy gruzovoy teplovoz 2TE25KM: struktura sistemy upravleniya i elektrooborudovaniya [2TE25KM mainline freight diesel locomotive: structure of the control system and of the electrical equipment]. *Locomotiv* [Locomotive]. 2016, Iss. 1, pp. 42–43. (In Russian)
3. *Rukovodstvo po ekspluatatsii 2TE25KM RE. Magistral'nyy gruzovoy dvukhseksionnyy teplovoz 2TE25KM* [2TE25KM RE operating manual. 2TE25KM mainline freight twin-unit diesel locomotive]. Bryansk, ZAO "UK "BMZ" (CJSC "Managing Company "Bryansk Machine-Building Plant"), 2015, 153 p. (In Russian)
4. Klimenko Yu. I., Perfilyev K. S., Evseev V. Yu. et al. Sovershenstvovaniye tyagovogo privoda teplovozov s kollektornymi dvigatelyami [Improving the traction drive of diesel locomotives with commutator engines]. *Lokomotiv. Elektricheskyy transport. XXI vek. T. 2: materialy VI Mezhdunar. nauchno-tekhn. konferentsii (SPb., 13–15 noyabrya 2018 g.)* [Electric transport. XXI Century. Vol. 2: Materials of the VI Intern. scientific and technical conference (St. Petersburg, November 13–15, 2018)]. St. Petersburg: FGBOU VO PGUPS Publ., 2018, pp. 24–33. (In Russian)
5. Rosenfeld V. E., Isaev I. P., Sidorov N. N. et al. *Teoriya elektricheskoy tyagi* [Theory of electric traction]. Moscow: Transport Publ., 1995, 294 p. (In Russian)
6. Kuznetsov N. A., Evseev V. Yu. Regulyator elektrodinamicheskogo tormoza gorochnogo teplovoza [Electrodynamical brake governor of the hump diesel locomotive]. *Locomotiv* [Locomotive]. 2019, Iss. 6, pp. 39–40. (In Russian)
7. Osipov S. I., Osipov S. S., Feoktistov V. P. *Teoriya elektricheskoy tyagi* [Theory of electric traction]. Ed. by S. I. Osipov. Moscow: Marshrut Publishing House Publ., 2006, 436 p. (In Russian)
8. Evseev V. Yu., Savoskin A. N., Perfilyev K. S. Elektromagnitnyye protsessy v kollektornom tyagovom privode teplovoza pri pitanii ot silovogo poluprovodnikovogo preobrazovatelya [Electromagnetic processes in the commutator traction drive of a diesel locomotive powered by a power semiconductor converter]. *Prakticheskaya silovaya elektronika* [Practical power electronics]. 2021, Iss. 4, pp. 32–38. (In Russian)
9. Evseev V. Yu., Savoskin A. N. Matematicheskaya model' kollektornogo tyagovogo dvigatelya s razdel'nym uchedom vikhrevykh tokov glavnykh i dobavochnykh polyusov [Mathematical model of a commutator traction motor with separate consideration of eddy currents of the main and commutating poles]. *Elektrotehnika* [Electrothechnics]. 2020, Iss. 9, pp. 32–38. (In Russian)
10. Nakhodkin M. D., Vasilenko G. V., Bocharov V. I. et al. *Proyektirovaniye tyagovykh elektricheskikh mashin* [Design of traction electric machines]. Ed. by M. D. Nakhodkin. Moscow: Transport Publ., 1976, 624 p. (In Russian)
11. Zhits M. Z. *Perekhodnyye protsessy v mashinakh postoyannogo toka* [Transient processes in DC machines]. Moscow: Transport Publ., 1974, 378 p. (In Russian)

Received: April 01, 2023

Accepted: April 19, 2023

Author's information:

Vyacheslav Yu. EVSEEV — Postgraduate Student, Head of Sector; evseev@vnikti.com

Anatoly N. SAVOSKIN — Dr. Sci. in Engineering, Professor, Professor, Department "Electric Trains and Locomotives"; elmechtrans@mail.ru