

Н. В. Гребенников

МЕТОД СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЯХ АВТОНОМНОГО ЛОКОМОТИВА ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ ДИСКРЕТНО-АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Аннотация. Предложен метод повышения энергоэффективности тяговых двигателей автономных локомотивов за счет применения дискретно-адаптивного управления количеством задействованных двигателей в тяге, что позволяет перейти в область более высоких значений напряжения тягового генератора, в результате чего снижаются потери, зависящие от токовой нагрузки. В результате использования предложенной системы адаптивного регулирования, эксплуатационный коэффициент полезного действия тяговых двигателей, по предварительным оценкам, возрастет на 10 %, что способствует повышению топливной экономичности перевозочного процесса.

Ключевые слова: снижение потерь, тяговые двигатели, локомотив, энергоэффективность, дискретно-адаптивное управление.

Для цитирования: Гребенников, Н. В. Метод снижения потерь электроэнергии в тяговых двигателях автономного локомотива за счет применения дискретно-адаптивного управления / Н. В. Гребенников // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 1. – С. 234–240. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_234.

Введение

Тренд, направленный на увеличение секционной мощности локомотивов [1], позволил увеличить объем перевозок и увеличить пропускную способность железных дорог, но при этом практически отсутствует снижение расхода энергоресурсов на тягу поездов, что обусловлено недоиспользованием доступной мощности локомотивов и сопряжено со спецификой работы железнодорожного транспорта, когда в одну сторону направляется основной грузопоток, а в обратную сторону пустая тара, т.е. порожние поезда [2]. Многие исследователи ожидают улучшения эксплуатационных показателей от внедрения асинхронного привода [3] и различных накопителей энергии на тяговом подвижном составе [4], и это, безусловно, является перспективным направлением повышения энергоэффективности [5] и соответствует общемировым тенденциям, но в первую очередь необходимо уделить внимание и совершенствовать процессы преобразования энергии [6] на локомотиве в реальных эксплуатационных условиях [7], иначе применение накопителей энергии не позволит получить существенный экономический эффект.

В [8] предложен способ повышения энергетической эффективности электровозов за счет приведения тяговой мощности в соответствие с потребностями (отключение неиспользуемых ТЭД). Способ получил название дискретно-адаптивного управления (ДАУ) [8] тяговым электроприводом, запатентован [9], и позволяет повысить энергоэффективность электровозов в условиях эксплуатации. Данный способ управления энергетической эффективностью локомотива при работе с неполной нагрузкой позволяет реализовать принцип масштабируемости распределенной системы путем приведения количества работающих тяговых двигателей к текущим условиям нагрузки на локомотив [6] и должен стать одним из ключевых элементов цифровой системы управления локомотива (в том числе и будущих систем на основе искусственного интеллекта), что позволит существенно сократить удельный расход электроэнергии на тягу поездов.

Для тепловозов с электрической передачей мощности постоянного или переменного тока данная проблема недоиспользования мощности стоит еще острее [11], чем на электровозах, что объясняется гиперболической характеристикой тягового генератора (рис. 1) [12].

Тепловозы последних выпусков предусматривают возможность полного использования эффективной мощности дизеля, т.е. чтобы всё время выдерживалось соотношение:

$$P_e = P_r + P_{всп} \quad (1)$$

В результате мощность тягового генератора (при наличии выпрямительной установки мощность тягового генератора определяется на выходе выпрямительной установки) для выбранной позиции может возрастать или уменьшаться на величину изменения мощности вспомогательных нужд, что вносит дополнительные возмущающие воздействия в процесс управления поездом.

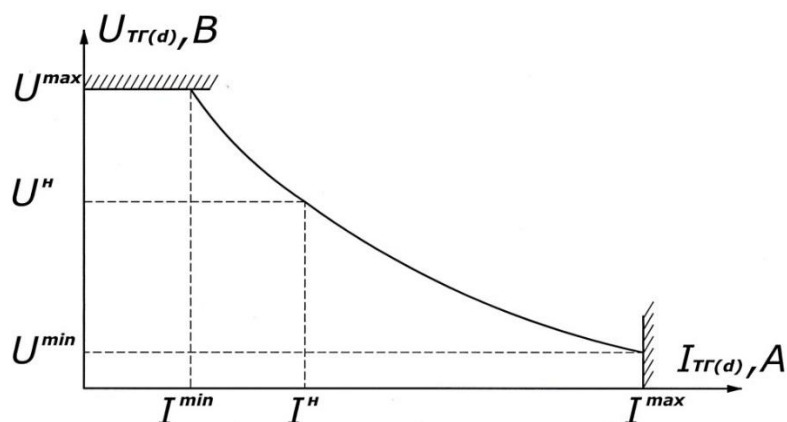


Рис. 1. Внешняя характеристика тягового генератора

Внешняя и частичные характеристики тягового генератора имеют вид гиперболы, т.е. мощность генератора поддерживается постоянной на каждой позиции контроллера машиниста, что позволяет обеспечить полное использование свободной мощности дизеля во всем рабочем диапазоне скоростей движения тепловоза [7].

Материалы и методы

Поле рабочих точек (рис. 2) тягового генератора ГСТ-2800-1000У2 тепловоза 2ТЭ25К^М в реальных условиях получено в результате обработки массива данных, регистрируемых микропроцессорной системой управления (МПСУ-ТП) для тепловоза 2ТЭ25К^М, эксплуатируемого на участке Северо-Кавказской железной дороги. Общее число измерений параметров составило 2 956 680 шт., что составляет порядка 35 суток работы тепловоза.

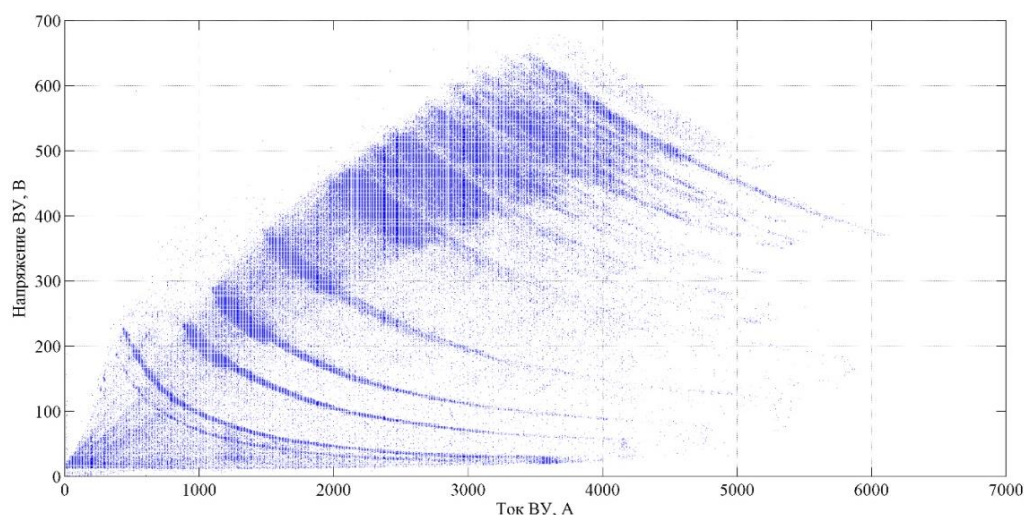


Рис. 2. Поле рабочих точек тягового генератора 2ТЭ25К^М

Из гиперболической характеристики тягового генератора (рис. 1) следует, что ток тягового генератора изменяется в широком диапазоне. Например, из эксплуатационных данных (рис. 2) видно, что на первой позиции ток тягового генератора изменяется в диапазоне от 400 А до 4000 А, т.е. в 10 раз. Известно, что омические потери в электрических машинах пропорциональны квадрату тока, т.е. изменение омических потерь будет в 100 раз:

$$\Delta P_{эл} = I^2 r. \quad (2)$$

Стократное изменение электрических потерь при работе по гиперболической характеристике является первой причиной низкой энергоэффективности тяговых электрических машин в режимах с неполной нагрузкой.

Второй причиной снижения энергоэффективности является управление тяговым приводом по напряжению, что также приводит к увеличению токовой нагрузки тяговых электрических машин, и как следствие – к существенному увеличению доли потерь, зависящих от квадрата тока.

$$\eta_{\text{ТЭД}} = 1 - \frac{I_{\text{ТЭД}}^2 \cdot r + \Delta P_{\text{пост}}}{I_{\text{ТЭД}} U_{\text{DC}}}, \quad (3)$$

где $I_{\text{ТЭД}}$ – ток тягового двигателя; U_{DC} – напряжение на зажимах канала выпрямительной установки; $\Delta P_{\text{пост}}$ – величина условно-постоянных потерь.

Из формулы (3) видно, что, применяя регулирование по напряжению, изменяется подводимая мощность, но при этом потери мощности в электрической машине остаются такими же, что приводит к существенному снижению энергоэффективности тяговых электрических машин (тягового генератора и тягового двигателя).

Применение дискретно-адаптивного управления количеством тяговых двигателей в работе позволит рационально использовать доступную мощность каждого двигателя, что снизит затраты энергии на потери, зависящие от токовой нагрузки. Количество ТЭД, реализуемых силу тяги, определяется в соответствии с мощностью выпрямительной установки по внешней тяговой характеристике генератора для каждой позиции контроллера машиниста по формуле:

$$n_{\text{ТЭД}}^j = \left\lceil \frac{P_{\text{ВУ}}^j \cdot \eta_{\text{ТЭД}}^n}{P_{\text{ТЭД}}^n} \right\rceil, \quad (4)$$

где $P_{\text{ВУ}}^j$ – мощность выпрямительной установки для j -й позиции контроллера машиниста; $\eta_{\text{ТЭД}}^n$ – номинальный КПД ТЭД; $P_{\text{ТЭД}}^n$ – номинальная мощность ТЭД (механическая мощность на валу).

Результаты расчета внешних характеристик при работе с разным количеством тяговых электродвигателей (ТЭД) приведены в таблице 1. По расчётным точкам, а также используя теоретические исследования на ПК, строим внешние характеристики тягового генератора в зависимости от числа реализуемых силу тяги тяговых электродвигателей (рис. 3).

Систему адаптивного регулирования количества задействованных в тяге ТЭД на локомотиве можно реализовать с помощью штатной микропроцессорной системы управления тепловозом 2ТЭ25К^М (МПСУ-ТП), в алгоритм работы которой необходимо внести следующие изменения: количество включаемых ТЭД должно соответствовать определенной позиции контроллера машиниста согласно табл. 2.

Таблица 1

Расчет внешней характеристики тягового генератора

$U_d, \text{В}$	$I_d, \text{А}$					
	Количество ТЭД в тяге, шт					
	1	2	3	4	5	6
750	549	1099	1648	2198	2747	3296
652	632	1264	1895	2527	3159	3791
577	714	1428	2143	2857	3571	4285
517	797	1593	2390	3187	3983	4780
469	879	1758	2637	3516	4395	5274
452	912	1824	2736	3648	4560	5472
436	945	1890	2835	3780	4725	5670
421	978	1956	2934	3912	4890	5868
408	1011	2022	3033	4044	5054	6065
395	1044	2088	3132	4175	5219	6263

U, В

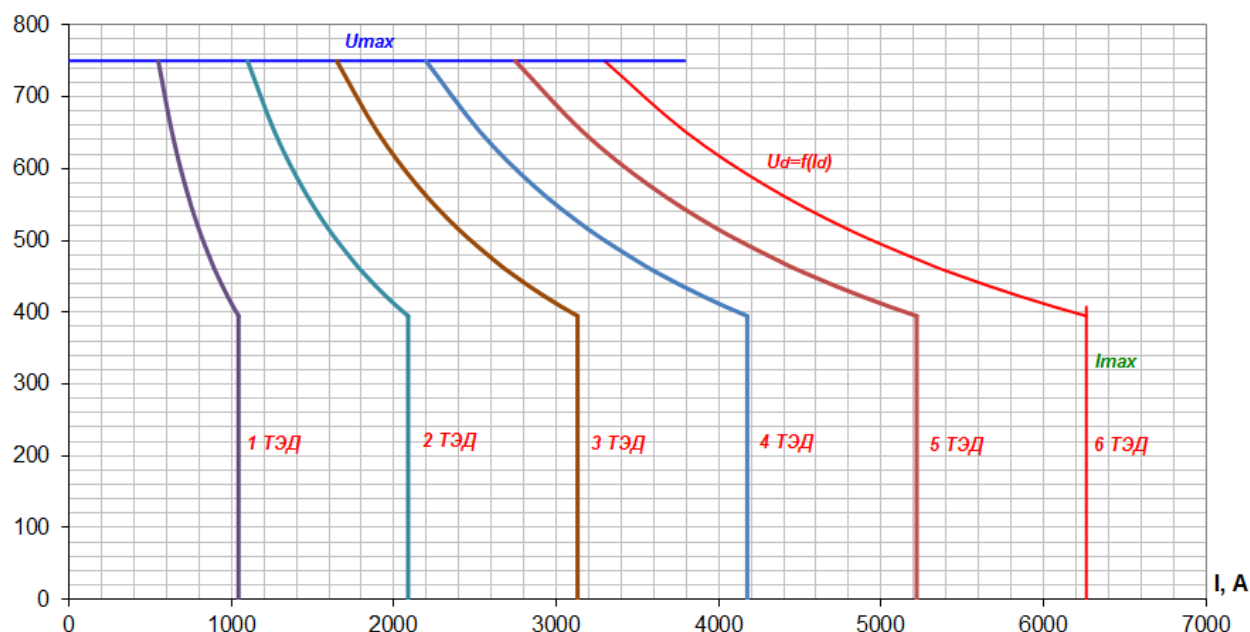


Рис. 3. Внешние характеристики тягового генератора в зависимости от количества ТЭД, реализуемых силу тяги

При скоростях меньше 20 км/ч, для позиций контроллера машиниста от 1 до 5 включаются удвоенное количество ТЭД от расчетного значения, приведенного в таблице 2, а начиная с 6 позиции подключаются все шесть тяговых двигателей секции тепловоза с целью предотвращения боксования в зоне низких скоростей. После достижения скорости более 20 км/ч ТЭД плавно выводятся из тяги для приведения в соответствие количества работающих в тяге ТЭД (табл. 2).

Таблица 2

Соответствие работающих ТЭД позиции контроллера машиниста

Позиция контроллера машиниста	Количество работающих ТЭД	Суммарная мощность на зажимах выпрямительной установки, кВт	Мощность одного работающего канала выпрямительной установки, кВт
0	0	0	0
1	1	120	120
2	1	220	220
3	1	330	330
4	2	550	275
5	2	735	368
6	3	882	294
7	3	1029	343
8	3	1104	368
9	4	1323	331
10	4	1470	368
11	5	1617	323
12	5	1764	353
13	5	1840	368
14	6	2058	343
15	6	2210	368

Управление включением/отключением ТЭД осуществляется при помощи устройства U_6 системы МПСУ-ТП путем уменьшения напряжения на соответствующих тяговых электродвигателях (ТЭД) с помощью шестиканального управляемого выпрямителя U_1 до нуля.

Заключение

Установленное на тепловозе 2ТЭ25К^М оборудование позволяет реализовать энергоэффективное управление тяговой электрической передачей мощности тепловоза путем выведения из тяги (отключения) части электродвигателей. Реализовать систему отключения ТЭД можно путем доработки программного обеспечения МПСУ-ТП. В разрабатываемом алгоритме необходимо предусмотреть учет работы каждого ТЭД и отключать первыми те, у которых время работы будет наибольшим, следовательно, будет реализовываться алгоритм выравнивания ресурса ТЭД. Кроме того, необходимо предусмотреть смену работающих ТЭД при превышении допустимого времени, выведенного из тяги ТЭД с целью снижения износа коллекторно-щеточного аппарата.

В результате использования предложенной системы адаптивного регулирования числа работающих тяговых двигателей в тяге эксплуатационный коэффициент полезного действия ТЭД по предварительным оценкам возрастет на 10 %, а, следовательно, и уменьшится расход дизельного топлива на 10 %, только за счет оптимизации работы режимов тягового электрического оборудования тепловозов.

Список литературы

1 Стратегия научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (Белая книга). – Москва : ОАО «РЖД». – 2015. – 128 с.

2 **Зарифьян, А. А.** Показатели энергетической эффективности грузовых магистральных электровозов в различных условиях эксплуатации / А. А. Зарифьян // Вестник Института проблем естественных монополий : Техника железных дорог. – 2019. – № 2(46). – С. 28–35. – ISSN 1998-9318.

3 Повышение энергоэффективности тяговых электроприводов с асинхронными двигателями и системой векторного управления / Ю. М. Иньков, А. С. Космодамианский, А. А. Пугачев, С. В. Морозов // Электротехника. – 2021. – № 9. – С. 10–15. – ISSN 0013-5860.

4 Моделирование бортовых систем хранения энергии для гибридного тягового привода / О. С. Валинский, Т. С. Титова, В. В. Никитин, А. М. Евстафьев // Электротехника. – 2020. – № 10. – С. 14–18. – ISSN 0013-5860.

5 **Петрушин, А. Д.** Повышение энергетической эффективности подвижного состава железных дорог с учетом требований экологии / А. Д. Петрушин, И. В. Волков, С. С. Черняев // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 1(81). – С. 40–46. – DOI 10.46973/0201-727X_2021_1_40.

6 Совершенствование тягового подвижного состава на основе современных технологий энергосбережения / А. М. Евстафьев, Д. Е. Кирышин, В. В. Никитин, О. Е. Пудовиков // Электротехника. – 2021. – № 2. – С. 2–6. – ISSN 0013-5860.

7 **Зарифьян, А. А.** Концепция повышения энергетической эффективности тепловозной тяги / А. А. Зарифьян, Н. В. Гребенников, Т. З. Талахадзе // Интернет-журнал «Науковедение». – 2017. – Т. 9, № 6. – С. 107. – ISSN 2223-5167.

References

1 Strategy for scientific and technological development of the Russian Railways holding for the period up to 2025 and for the future up to 2030 (White Book). – Moscow : Russian Railways. – 2015. – 128 p.

2 **Zarifyan, A. A.** Indicators of energy efficiency of freight mainline electric locomotives in various operating conditions / A. A. Zarifyan // Bulletin of the Institute of Natural Monopoly Problems : Railway Engineering. – 2019. – No. 2 (46). – P. 28–35. – ISSN 1998-9318.

3 Increasing the energy efficiency of traction electric drives with asynchronous motors and a vector control system / Yu. M. Inkov, A. S. Kosmodamiansky, A. A. Pugachev, S. V. Morozov // Electrical engineering. – 2021. – No. 9. – P. 10–15. – ISSN 0013-5860.

4 Modeling of onboard energy storage systems for a hybrid traction drive / O. S. Valinsky, T. S. Titova, V. V. Nikitin, A. M. Evstafiev // Elektrotekhnik. – 2020. – No. 10. – P. 14–18. – ISSN 0013-5860.

5 **Petrushin, A. D.** Improving the energy efficiency of railway rolling stock, taking into account the requirements of ecology / A. D. Petrushin, I. V. Volkov, S. S. Chernyaev // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2021. – No. 1 (81). – P. 40–46. – DOI 10.46973/0201-727X_2021_1_40.

6 Improvement of traction rolling stock based on modern energy saving technologies / A. M. Evstafiev, D. E. Kiryushin, V. V. Nikitin, O. E. Pudovikov // Electrical engineering. – 2021. – No. 2. – P. 2–6. – ISSN 0013-5860.

7 **Zarifyan, A. A.** The concept of increasing the energy efficiency of diesel traction / A. A. Zarifyan, N. V. Grebennikov, T. Z. Talakhadze // Electronic scientific publication of "Naukovedenie". – 2017. – Vol. 9, No. 6. – P. 107. – ISSN 2223-5167.

8 **Зарифьян, А. А. (мл.)** Дискретно-адаптивное управление тяговым приводом грузового электровагона при работе с неполной нагрузкой / А. А. Зарифьян (мл.) // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2018. – № 1. – С. 49–59. – ISSN 0201-727X.

9 **Патент № 2617857 С** Российская Федерация, МПК В60L 15/20, В61С 15/00, В60К 31/00. Способ управления энергетической эффективностью локомотива при работе с неполной нагрузкой : № 2015139252 : заявл. 15.09.2015 : опубл. 28.04.2017 / А. А. Андриященко, А. А. Зарифьян, Ю. А. Орлов, К. П. Солтус; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «ТРТранс» (ООО «ТРТранс»). – 2 с.

10 Определение полезной работы, совершаемой локомотивом при тяге поезда / А. А. Зарифьян, Н. В. Гребенников, Т. З. Талахадзе, В. В. Сироткин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2018. – № 1(69). – С. 40–49. – ISSN 0201-727X.

11 **Гребенников, Н. В.** Анализ энергетической эффективности эксплуатации пассажирского тепловоза ТЭП70БС / Н. В. Гребенников // Вестник транспорта Поволжья. – 2022. – № 5(95). – С. 17–22. – ISSN 1997-0722.

12 Электрические передачи локомотивов : в 2 частях / А. А. Андриященко, Н. В. Гребенников, А. А. Зарифьян, П. Г. Колпахчян. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2015. – 98 с.

8 **Zarifyan, A. A. (Jr.)** Discrete-adaptive control of the traction drive of a freight electric locomotive during operation with partial load / A. A. Zarifyan (Jr.) // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2018. – No. 1. – P. 49–59. – ISSN 0201-727X.

9 **Patent No. 2617857 C** Russian Federation, IPC B60L 15/20, B61C 15/00, B60K 31/00. Method for controlling the energy efficiency of a locomotive when operating at partial load : No. 2015139252 : Appl. 09/15/2015 : published on 04/28/2017 / A. A. Andryushchenko, A. A. Zarifyan, Yu. A. Orlov, K. P. Soltus; applicant Limited Liability Company «TRTrans» (LLC «TRTrans»). – 2 p.

10 Determination of useful work performed by a locomotive during train traction / A. A. Zarifyan, N. V. Grebennikov, T. Z. Talakhadze, V. V. Sirotkin // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2018. – No. 1 (69). – P. 40–49. – ISSN 0201-727X.

11 **Grebennikov, N. V.** Analysis of the energy efficiency of operation of the passenger diesel locomotive ТЕР70BS / N. V. Grebennikov // Bulletin of Transport of the Volga Region. – 2022. – No. 5 (95). – P. 17–22. – ISSN 1997-0722.

12 Electrical transmission of locomotives: In 2 parts / A. A. Andryushchenko, N. V. Grebennikov, A. A. Zarifyan, P. G. Kolpakhchyan. – Rostov-on-Don : Rostov State University of Communications, 2015. – 98 p.

N. V. Grebennikov

METHOD FOR REDUCING POWER LOSSES IN TRACTION MOTORS OF AN AUTONOMOUS LOCOMOTIVE THROUGH THE USE DISCRETE ADAPTIVE CONTROL

Abstract. It is proposed a method for improving the energy efficiency in traction motors of the autonomous locomotives through the use of discrete-adaptive control of the operating motors` number in traction, which makes it possible to account the higher voltage values of the traction generator, as its result of losses depends on the reduction the current load. As a result of using the proposed adaptive control system, the operational efficiency of traction motors, according to preliminary estimates, will increase by 10%, which contributes to an increase in the fuel efficiency of the transportation process.

Keywords: loss reduction, traction motors, locomotive, energy efficiency, discrete-adaptive control.

For citation: Grebennikov, N. V. Method for reducing power losses in traction motors of an autonomous locomotive through the use discrete adaptive control / N. V. Grebennikov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 1. – P. 234–240. – DOI10.46973/0201-727X_2023_1_234.

Сведения об авторах

Information about the authors

Гребенников Николай Вячеславович

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Тяговый подвижной состав»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: grebennikovnv@mail.ru

Grebennikov Nikolay Vyachaslavovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Traction Rolling Stock»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: grebennikovnv@mail.ru