

ТРАНСПОРТНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

УДК 629.423.1

DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_79

*Т. В. Волчек***СНИЖЕНИЕ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ТЯГУ ПОЕЗДОВ
ЗА СЧЕТ ПЛАВНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТОКА ВОЗБУЖДЕНИЯ
ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ**

Аннотация. Снижение потребления электроэнергии на тягу поездов было и остается одной из приоритетных задач ОАО «РЖД». Одним из способов снижения потребления электроэнергии является рациональное вождение поездов в режиме тяги, которое зависит как от локомотивной бригады, так и от конструкции электроподвижного состава. Как известно, чем быстрее поезд разгонится, тем быстрее запасет кинетическую энергию, оптимальное использование которой позволит снизить потребление электроэнергии. В настоящее время на современных отечественных электровозах для дополнительного разгона используется система ослабления возбуждения тяговых электродвигателей. Выполнен тяговый расчет, который позволяет сравнить потребление электроэнергии при разгоне поезда в процессе работы электровоза со ступенчатым и плавным регулированием ослабления возбуждения тяговых электродвигателей. С помощью тягового расчета при разгоне поезда доказана энергетическая эффективность системы ослабления возбуждения с плавным регулированием возбуждения электровоза.

Ключевые слова: электроэнергия, электровоз, система ослабления возбуждения тягового электродвигателя, плавное и ступенчатое регулирование.

Для цитирования: Волчек, Т. В. Снижение потребления электроэнергии на тягу поездов за счет плавного регулирования тока возбуждения тяговых электродвигателей / Т. В. Волчек // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2. – С. 79–84. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_79.

Введение

Российские железные дороги (РЖД) играют важнейшую роль в экономическом развитии страны. Они являются основным способом транспортировки товаров и пассажиров между регионами России и соседними странами. Железнодорожный транспорт ежегодно потребляет около 6–7 % электроэнергии России, с каждым годом в связи с ростом грузовых и пассажирских перевозок данный показатель увеличивается. Одним из основных расходов железных дорог является потребление электроэнергии на тягу поездов (около 70 % от общего потребления железнодорожного транспорта) [1]. В связи с этим для устойчивого развития РЖД и поддержания их конкурентоспособности на мировом рынке необходимо внедрять мероприятия, позволяющие снизить потребление электроэнергии, это является одной из важнейших задач, отраженных в отраслевых стратегических документах РЖД [2, 3].

Одним из способов снижения потребления электроэнергии является рациональное вождение поездов в режиме тяги, которое зависит как от локомотивной бригады, так и от конструкции электроподвижного состава. В настоящее время самым современным электровозом переменного тока с коллекторным приводом является электровоз серии «Ермак». Для дополнительного регулирования скорости в режиме тяги на нем используется контакторно-реостатная система ослабления возбуждения (ОВ) тяговых электродвигателей (ТЭД) со ступенчатым регулированием, которая замедляет процесс разгона поезда и не позволяет ему следовать с максимально допустимой скоростью по участку пути, что противодействует запасу кинетической энергии поезда в полной мере [4–6]. Одним из решений существующей проблемы является внедрение системы ОВ ТЭД с плавным регулированием тока возбуждения, которая исключает потери скорости и ускорения [3, 4]. Как известно, чем быстрее поезд может разогнаться, тем быстрее достигнет максимально допустимой скорости на участке и запасет больше кинетической энергии, оптимальное использование которой позволит сократить потребление электроэнергии. Для более точной оценки потребления электроэнергии при работе систем ОВ ТЭД со ступенчатым и плавным регулированием при разгоне поезда проведен тяговый расчет, порядок и методика которого регламентируются Правилами тяговых расчетов для поездной работы [7].

Построение кривых движения поезда при трогании со станции при ступенчатом и плавном регулировании ОВ ТЭД электровоза

Интегрирование уравнения движения поезда выполнено с помощью графического способа, рекомендованного МПС инженером А.И. Липецем [8, 9]. Поезд массой 6300 т рассматривается как материальная точка, в которой сосредоточена вся масса. Построение кривых скоростей выполнено на основании диаграмм удельных ускоряющих и замедляющих сил электровоза и профиля пути (длина участка 3,78 км, при уклоне -0%). При этом построение диаграмм удельных ускоряющих и замедляющих сил, где f_y – удельная ускоряющая сила, $w_{ок}$ – удельное основное сопротивление движению поезда в режиме выбега, выполнено на основе тяговых характеристик электровоза 3ЭС5К с тремя ступенями ОВ ТЭД (рис. 1).

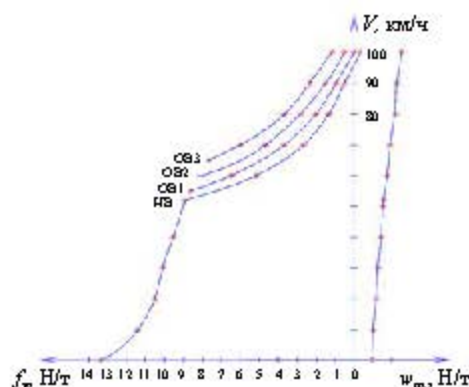


Рис. 1. Диаграмма удельных ускоряющих и замедляющих сил электровоза со ступенчатым регулированием ОВ ТЭД

Для электровоза 3ЭС5К с плавным регулированием ОВ ТЭД на диаграмме удельных ускоряющих и замедляющих сил были удалены промежуточные ступени регулирования (ОВ1 и ОВ2), так как плавное регулирование ОВ позволяет электровозу работать в области ограничения по сцеплению (рис. 2) [10].

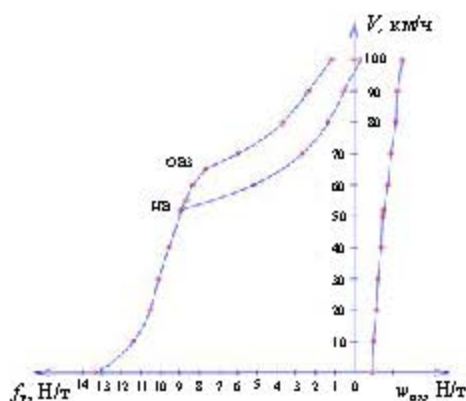


Рис. 2. Диаграмма удельных ускоряющих и замедляющих сил электровоза с плавным регулированием ОВ ТЭД

Построение кривых скоростей $V(S)$ и времени $t(S)$ выполнено в соответствии с изложенными в [8] правилами. Для расчета потребления расхода электроэнергии построена токовая кривая $I_{эл}(S)$ на основании токовой характеристики электровоза 3ЭС5К (активный ток) в зависимости от скорости.

На рис. 3 представлены кривые движения поезда со станции при ступенчатом и плавном регулировании ОВ ТЭД электровоза.

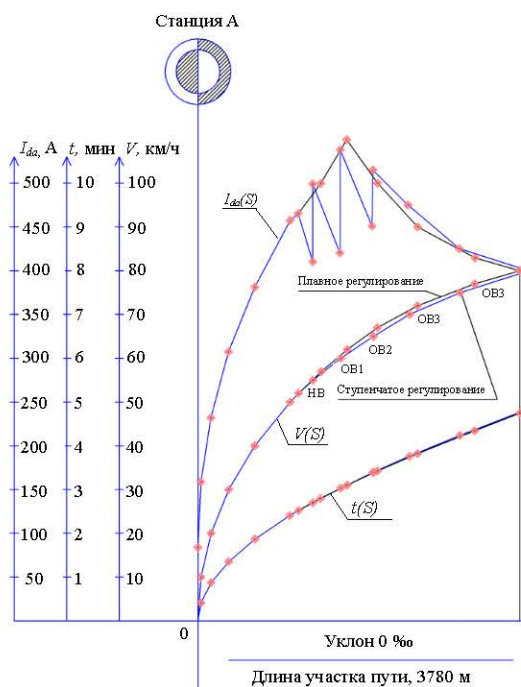


Рис. 3. Кривые движения поезда со станции при ступенчатом и плавном регулировании ОВ ТЭД электровоза

Оценка потребления электроэнергии при разгоне поезда при работе системы ОВ ТЭД со ступенчатым регулированием

Расчет потребления электроэнергии электровозом 3ЭС5К при разгоне со станции при ступенчатом регулировании выполнен согласно рис. 3 на основании построенной кривой активной составляющей тока $I_{da}(S)$, в соответствии с которой в табл. 1 приведены данные расхода электроэнергии электровоза при ступенчатом регулировании ОВ ТЭД.

Таблица 1

Расчет расхода электроэнергии при ступенчатом регулировании ОВ ТЭД электровоза

$I_{da\ н}, А$	$I_{da\ к}, А$	$I_{da\ ср}, А$	$t, \text{ мин}$	$I_{da\ ср} t, А \cdot \text{мин}$
83	158	120,5	0,4	48,2
158	232	195	0,48	93,6
232	307	269,5	0,5	134,8
307	382	344,5	0,5	172,3
382	457	419,5	0,52	218,1
457	465	461	0,13	59,93
465	410	437,5	0,18	78,75
500	420	460	0,33	151,8
538	450	494	0,38	187,7
515	475	495	0,36	178,2
475	425	450	0,47	211,5
425	400	412,5	0,6	247,5
Итого			4,85	1782

Без учета расхода электроэнергии на собственные нужды потребление электроэнергии определяется по выражению

$$A_T = \frac{k_u \cdot U_c \cdot \Sigma I_{cp} \cdot \Delta t}{60 \cdot 1000}, \quad (1)$$

где U_c – напряжение в контактной сети, 25 000 В; I_{cp} – средний ток за время Δt , А; k_u – коэффициент формы кривой напряжения при U_c , 1,16.

Таким образом,

$$A_T = \frac{1,16 \cdot 25000 \cdot 1782}{60 \cdot 1000} = 861,46 \text{ кВт}\cdot\text{ч.}$$

Электроэнергия, затраченная на собственные нужды, определяется по выражению

$$A_{\text{сн}} = t_{\Sigma} \cdot A_{\text{сн ср}}, \quad (2)$$

где t_{Σ} – время работы электровоза, мин; $A_{\text{сн ср}}$ – среднее значение электроэнергии, потребляемой вспомогательными цепями электровоза, 9,63 кВт·ч/мин.

$$A_{\text{сн}} = 4,85 \cdot 9,63 = 46,71 \text{ кВт}\cdot\text{ч.}$$

Полный расход электроэнергии рассчитывается по выражению

$$A = A_T + A_{\text{сн}}. \quad (3)$$

Тогда

$$A = 861,46 + 46,71 = 908,17 \text{ кВт}\cdot\text{ч.}$$

Оценка потребления электроэнергии при разгоне поезда при работе системы ОВ ТЭД с плавным регулированием

В табл. 2 приведены данные расчета расхода электроэнергии при плавном регулировании ОВ ТЭД электровоза согласно рис. 1.

Таблица 2

Расчет расхода электроэнергии при плавном регулировании ОВ ТЭД

$I_{\text{дан}}, \text{ А}$	$I_{\text{ак}}, \text{ А}$	$I_{\text{ср}}, \text{ А}$	$t, \text{ мин}$	$I_{\text{ср}} t, \text{ А}\cdot\text{мин}$
83	158	120,5	0,4	48,2
158	232	195	0,48	93,6
232	307	269,5	0,5	134,8
307	382	344,5	0,5	172,3
382	457	419,5	0,52	218,1
457	465	461	0,12	55,32
465	500	482,5	0,28	135,1
500	550	525	0,3	157,5
550	500	525	0,32	165,4
500	450	475	0,4	190
450	415	432,5	0,5	216,3
415	400	407,5	0,41	167,1
0	0	0	0,08	0
Итого			4,805	1754

Потребление электроэнергии при разгоне поезда со станции при работе системы с плавным регулированием ОВ ТЭД без учета расхода на собственные нужды

$$A_T = \frac{1,16 \cdot 25000 \cdot 1754}{60 \cdot 1000} = 847,55 \text{ кВт}\cdot\text{ч.}$$

Электроэнергия, затраченная на собственные нужды:

$$A_{\text{сн}} = 4,805 \cdot 9,63 = 46,27 \text{ кВт}\cdot\text{ч.}$$

Тогда полный расход электроэнергии составит

$$A = 861,46 + 46,27 = 893,83 \text{ кВт}\cdot\text{ч.}$$

Вывод

В табл. 3 приведены результаты расчета расхода электроэнергии при ступенчатом и плавном регулировании ОВ ТЭД электровоза, анализируя которые можно сделать вывод о том, что плавное регулирование ОВ ТЭД при разгоне поезда со станции позволяет сократить расход электроэнергии не менее чем на 1,5 %.

Расчет расхода электроэнергии при плавном регулировании ОБ ТЭД

Участок	Длина S , км	Движение с системой ОБ со ступенчатым ре- гулированием, кВт·ч	Движение с системой ОБ с плавным регули- рованием, кВт·ч	ΔA , кВт·ч
A–B	3,78	908,17	893,83	14,34

Таким образом, можно утверждать, что плавное регулирование ОБ ТЭД позволяет не только повысить техническую скорость электровоза [10], но и снизить потребление электроэнергии не менее чем на 1,5 %.

Список литературы

1 Повышение энергетической эффективности работы электровозов переменного тока / В. С. Томилов, О. В. Мельниченко, С. Г. Шрамко, С. А. Богинский // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – № 1(65). – С. 172–182. – ISSN 1813-9108.

2 Стратегия научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (Белая книга): [утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 17 апреля 2018 г. № 769/р]. – URL: http://cipi.samgtu.ru/sites/cipi.samgtu.ru/files/belaya_kniga.pdf (дата обращения: 05.05.2023).

3 Долгосрочная программа развития ОАО «РЖД» до 2025 года : [утверждена распоряжением Правительства РФ от 19.03.2019 г. № 466р]. – URL: <https://sudact.ru/law/rasporiazhenie-pravitelstva-rf-ot-19032019-n-466-r/dolgosrochnaia-programma-razvitiia-otkrytogo-aktsionernogo/> (дата обращения: 05.05.2023).

4 Плакс, А. В. Система управления электрическим подвижным составом / А. В. Плакс. – Москва : Маршрут, 2005. – 360 с. – ISBN 5-89035-303-9.

5 Тихменев, Б. Н. Электровозы переменного тока со статическими преобразователями / Б. Н. Тихменев. – Москва : Трансжелдориздат, 1958. – 267 с.

6 Волчек, Т. В. Влияние плавного и ступенчатого регулирования ослабления возбуждения тяговых электродвигателей электровозов на скорость движения электроподвижного состава / Т. В. Волчек // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 2(50). – С. 99–105. – ISSN 2079-0392.

7 Правила тяговых расчетов для поездной работы : [утверждены распоряжением ОАО «РЖД» от 12.05.2016]. – URL: https://e-ecolog.ru/docs/KbXCdAdvLLmM_ABe-sPhn (дата обращения: 05.05.2023).

References

1 Improving the energy efficiency of AC electric locomotives / V. S. Tomilov, O. V. Melnichenko, S. G. Shramko, S. A. Boginsky // Modern technologies. System analysis. Modeling. – 2020. – No. 1(65). – P. 172–182. – ISSN 1813-9108.

2 The strategy of the scientific and technological development of the Russian Railways Holding for the period up to 2025 and for the future up to 2030 (White Paper) : [approved by the Order of JSC «Russian Railways» dated April 17, 2018 No. 769/r]. – URL: http://cipi.samgtu.ru/sites/cipi.samgtu.ru/files/belaya_kniga.pdf (date of access: 05/05/2023).

3 Long-term development program of Russian Railways until 2025 : [approved by Decree of the Government of the Russian Federation No. 466r dated March 19, 2019]. – URL: <https://sudact.ru/law/rasporiazhenie-pravitelstva-rf-ot-19032019-n-466-r/dolgosrochnaia-programma-razvitiia-otkrytogo-aktsionernogo/> (date of access: 05/05/2023).

4 Plaks, A. V. Control system for electric rolling stock / A. V. Plaks. – Moscow : Marshrut, 2005. – 360 p. – ISBN 5-89035-303-9.

5 Tikhmenev, B. N. AC electric locomotives with static converters / B. N. Tikhmenev. – Moscow : Transzheldorizdat, 1958. – 267 p.

6 Volchek, T. V. The influence of smooth and stepwise regulation of the weakening of the excitation of traction electric motors of electric locomotives on the speed of movement of the electric rolling stock / T. V. Volchek // Bulletin of the Ural State University of Communications. – 2021. – No. 2(50). – P. 99–105. – ISSN 2079-0392.

7 Rules for traction calculations for train operation : [approved by the Order of Russian Railways JSC dated 12.05.2016]. – URL: https://e-ecolog.ru/docs/KbXCdAdvLLmM_ABe-sPhn (date of access: 05/05/2023).

8 Осипов, С. И. Теория электрической тяги : учебник для вузов железнодорожного транспорта / С. И. Осипова, С. С. Осипов, В. П. Феокимсиров. – Самара : Маршрут, 2006. – 436 с. – ISBN 5-89035-333-0.

9 Теория электрической тяги / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров, М. И. Озеров. – Москва : Транспорт, 1995. – 294 с. – ISBN 5-277-01462-4.

10 Волчек, Т. В. Повышение эффективности системы ослабления возбуждения тяговых электродвигателей электровазов переменного тока : специальность 2.9.3 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Т. В. Волчек ; Российский университет транспорта. – Москва, 2022. – 146 с.

8 Osipov, S. I. Theory of Electric Traction : a textbook for high school's railway. transport / S. I. Osipova, S. S. Osipov, V. P. Feokimsirov. – Samara : Marshrut, 2006. – 436 p. – ISBN 5-89035-333-0.

9 Theory of electric traction / V. E. Rosenfeld, I. P. Isaev, N. N. Sidorov, M. I. Ozerov. – Moscow : Transport, 1995. – 294 p. – ISBN 5-277-01462-4.

10 Volchek, T. V. Improving the efficiency of the system for attenuating the excitation of traction electric motors of AC electric locomotives : speciality 2.9.3 «Rolling stock of railways, train traction and electrification» : thesis for the degree of candidate of technical sciences / T. V. Volchek ; Russian University of Transport. – Moscow, 2022. – 146 p.

T. V. Volchek

THE REDUCED ELECTRICITY CONSUMPTION FOR TRACTION DRIVING DUE TO SMOOTH CONTROL OF THE CURRENT EXCITATION IN TRACTION ELECTRIC MOTORS

Abstract. The reduced electricity consumption for train traction has been and it is one of the priorities of the Russian Railways. One of the ways to reduce electricity consumption is the rational driving of trains in traction mode which depends on both the locomotive crew and the design of the electric rolling stock. In fact, the faster the train accelerates, the faster it stores kinetic energy, and its optimal use will reduce electricity consumption. At present, for additional acceleration, modern domestic electric locomotives use a system for weakening the excitation of the traction motors. In this paper, a traction calculation is carried out, which makes it possible to compare the consumption of electricity during the acceleration of a train during the operation of an electric locomotive with stepwise and smooth regulation of the weakening of the excitation of traction motors. With the help of traction calculation during the acceleration of the train, the energy efficiency of the excitation attenuation system with smooth control of the excitation of the electric locomotive was proved.

Keywords: electric power, electric locomotive, traction motor excitation weakening system, smooth and step regulation.

For citation: Volchek, T. V. The reduced electricity consumption for traction driving due to smooth control of the current excitation in traction electric motors / T. V. Volchek // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 2. – P. 79–84. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_79.

Сведения об авторах

Волчек Татьяна Витальевна
Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения (КрИЖТ ИрГУПС), кафедра «Эксплуатация железных дорог», кандидат технических наук,
e-mail: tanya.vol4eck@yandex.ru

Information about the authors

Volchek Tatiana Vitalievna
Krasnoyarsk Institute of Railway Transport, Branch of the Irkutsk State Transport University, Chair «Operation of Railways», Candidate of Engineering Sciences,
e-mail: tanya.vol4eck@yandex.ru