

Математическая модель расчета потерь в тяговых электродвигателях пульсирующего тока

Ю.А. Давыдов, В.В. Заболотный, О.О. Мухин ✉

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, Российская Федерация

✉muhinoo@mail.ru

Резюме

Распоряжением Правительства Российской Федерации от 28 апреля 2021 г. № 1100-р утвержден паспорт инвестиционного проекта, целевым показателем которого является увеличение провозной способности Байкало-Амурской и Транссибирской железнодорожных магистралей в 1,5 раза, до 180 млн т в год, в том числе в 2021 г. – 144 млн т, в 2022 г. – 158 млн т, в 2023 г. – 173 млн т, в 2024 – 180 млн т. Достижение целевых показателей также обусловлено вождением грузовых поездов массой 7 100 т на всем полигоне обращения, что, несомненно, приведет к увеличению случаев эксплуатации тяговых электродвигателей электровозов серии 3,4 ЭС5К в диапазоне тока часового режима и, как следствие, к их существенному нагреву. Одним из основных факторов, влияющих на нагрев узлов электродвигателей, являются потери (электрические, магнитные, механические и др.). На долю тяговых электродвигателей приходится более одной пятой всех отказов. Использование электровозов с вышедшим из строя хотя бы одним тяговым электродвигателем может привести к привлечению вспомогательных локомотивов, нарушению графика движения поездов и, соответственно, к неисполнению целевых показателей. В статье выполнен анализ потерь, возникающих в тяговом электродвигателе НБ-514Е при эксплуатации, разработана гибкая математическая модель, позволяющая выполнять расчет потерь для различных тяговых электродвигателей пульсирующего тока. С ее помощью выполнен расчет потерь для электродвигателя НБ-514Е на участке от ст. Смольяниново до ст. Находка (четное направление) с лимитирующим уклоном 28 ‰.

Ключевые слова

тяговый электродвигатель НБ-514Е, электрические машины, локомотив, математическая модель, Восточный полигон, потери в тяговых электродвигателях, нагрев узлов электродвигателя, сплайновая интерполяция

Для цитирования

Давыдов Ю.А. Математическая модель расчета потерь в тяговых электродвигателях пульсирующего тока / Ю.А. Давыдов, В.В. Заболотный, О.О. Мухин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 3 (75). – С. 91–101. – DOI 10.26731/1813-9108.2022.3(75).91-101.

Информация о статье

поступила в редакцию: 7.08.2022 г.; поступила после рецензирования: 7.09.2022 г.; принята к публикации: 8.09.2022 г.

Mathematical model for calculating losses in pulsed current traction motors

Yu.A. Davydov, V.V. Zabolotnyi, O.O. Mukhin ✉

Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, the Russian Federation

✉muhinoo@mail.ru

Abstract

By decree of the Government of the Russian Federation dated April 28, 2021 No. 1100-r, an investment project passport was approved, the target indicator being increasing the carrying capacity of the Baikal-Amur and Trans-Siberian railways by one and a half times, up to 180 million tons per year, including in 2021 year - 144 million tons, in 2022 – 158 million tons, in 2023 – 173 million tons, in 2024 – 180 million tons. Achieving the target values is also due to the driving of freight trains weighing 7100 tons throughout the entire circulation area, which undoubtedly results in an increase in the cases of traction electric motors operation in the 3.4 ES5K series locomotives in the hourly mode current range and, as a result, to its significant heating. One of the main factors affecting the heating of electric motor units are losses (electrical, magnetic, mechanical, and others). Traction motors account for more than one-fifth of all failures. The use of electric locomotives with at least one traction motor out of order can lead to the involvement of auxiliary locomotives, disruption of the train schedule and, as a result, failure to meet targets. The article analyzes the losses that occur in the NB-514E traction electric motors during operation developing a flexible mathematical model that allows to calculate losses for various pulsating current traction electric motors. Using the model developed, the calculation was performed of losses for the NB-514E electric motor in the section from the railway station Smolyaninovo to the Naходка railway station (even direction) with a limiting slope of 28‰.

Keywords

traction electric motor NB-514E, electric machines, locomotive, mathematical model, Eastern polygon, losses in traction electric motors, heating of electric motor units, spline interpolation

For citation

Davydov Yu.A., Zabolotnyi V.V., Mukhin O.O. Matematicheskaya model' rascheta poter' v tyagovykh elektrodvigatelyakh pul'siruyushchego toka [Mathematical model for calculating losses in pulsed current traction motors]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 3 (75), pp. 91–101. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.3(75).91-101.

Article Info

Received: August 7, 2022; Revised: September 7, 2022; Accepted: September 8, 2022.

Введение

Одна из приоритетных задач в сфере железнодорожного транспорта – повышение надежности и безопасности перевозочного процесса [1–4]. Особое внимание уделяется техническому состоянию важных узлов подвижного состава, один из которых – тяговый электродвигатель (ТЭД) [5].

Увеличение массы и длины грузовых поездов ведет к увеличению нагрузки на ТЭД и его существенному нагреву, который, по своей сути, возникает в результате потерь на его узлах. Наиболее типичной приводимой в литературных источниках температурно-временной зависимостью, используемой в практических расчетах температуры перегрева обмоток электрических машин, является экспонента, формально соответствующая классической теории нагрева однородного тела [6, 7]. Такой подход

не учитывает влияние потерь в узлах двигателя и не позволяет оценить его нагрев поэлементно.

Простота и доступность расчета потерь, а также создание гибкой математической модели позволят оценить уровень влияния таких потерь на нагрев каждого из узлов электрической машины.

Потери в тяговом электродвигателе НБ-514Е

Потери в тяговых двигателях складываются из электрических $\Delta P_{\text{э}}$ (в меди), $\Delta P_{\text{тщ}}$ (под щетками), магнитных $\Delta P_{\text{маг}}$ (в стали), добавочных $\Delta P_{\text{доб}}$ (при нагрузке), механических: при трении щеток о коллектор $\Delta P_{\text{пщ}}$, при трении в подшипниках $\Delta P_{\text{подш}}$. Суммарные потери рассчитываются как [6, 7]:

$$\begin{aligned} \Sigma \Delta P = & \Delta P_{\text{э}} + \Delta P_{\text{маг}} + \Delta P_{\text{доб}} + \\ & + \Delta P_{\text{тщ}} + \Delta P_{\text{пщ}} + \Delta P_{\text{подш}} \end{aligned} \quad (1)$$

Таблица 1. Суммарные потери в тяговом электродвигателе электровоза серии ЗЭС5К
Table 1. Total losses in the traction electric motor of the ZES5K series electric locomotive

Позиция	Значение	Ток, А									
		300	400	500	600	700	800	900	1 000	1 100	1 200
1	V, км/ч	23,6	19,1	16	14,7	13,5	12,3	11,1	10	9,8	2,6
	n, об/мин	419	339	284	261	240	219	197	178	174	46
	P сумм, Вт	11 850	12 927	15 132	18 522	22 599	27 322	32 695	38 778	45 695	51 417
2	V, км/ч	48,6	39,5	34,2	30	29,1	27,2	25,2	24,6	–	–
	n, об/мин	863	702	608	533	517	483	448	437	–	–
	P сумм, Вт	21 094	19 933	21 102	23 392	27 537	31 979	37 048	43 343	–	–
3	V, км/ч	72	59,1	50,1	45,5	42,5	40	37,1	33,8	–	–
	n, об/мин	1 279	1 050	890	808	755	711	659	600	–	–
	P сумм, Вт	32 032	28 253	27 421	29 304	32 582	36 719	41 374	46 694	–	–
4	V, км/ч	95,6	77,6	67,1	61,1	57,4	54,6	52	49,4	–	–
	n, об/мин	1 698	1 379	1 192	1 085	1 020	970	924	878	–	–
	P сумм, Вт	45 303	37 534	35 318	36 248	39 063	42 961	47 634	53 217	–	–
ОП 1	V, км/ч	–	96,7	78,9	69	63,5	59,6	56,3	53,3	–	–
	n, об/мин	–	1 718	1 402	1 226	1 128	1 059	1 000	947	–	–
	P сумм, Вт	–	48 570	41 491	40 145	41 981	45 303	49 614	55 012	–	–
ОП 2	V, км/ч	–	–	97,7	81,5	72,4	66,9	62,9	59,6	–	–
	n, об/мин	–	–	1 736	1 448	1 286	1 189	1 117	1 059	–	–
	P сумм, Вт	–	–	52 499	46 833	46 515	48 910	52 806	58 052	–	–
ОП 3	V, км/ч	–	–	–	99,6	84,6	75,6	69,4	64,7	–	–
	n, об/мин	–	–	–	1 769	1 503	1 343	1 233	1 149	–	–
	P сумм, Вт	–	–	–	57653	53262	53499	56129	60640	–	–

По формуле (1) выполнен расчет для электровоза ЗЭС5К на каждой позиции регулирования, результаты которого приведены в табл. 1.

На рис. 1 показаны зависимости суммарных потерь от тока для всех позиций регулирования.

Всем известен факт, что на величину электрических потерь влияет температура проводника, В ТЭД это обмотки главных и доба-

вочных полюсов, компенсационная, а также обмотка якоря. На рис. 2 представлена зависимость сопротивления обмоток от температуры.

На рис. 2 $\sum r$ – суммарное сопротивление, Ом; $r_{я}$ – сопротивление в обмотке якоря, Ом; $r_{ко}$ – сопротивление в компенсационной обмотке, Ом; $r_{ов}$ – сопротивление в обмотке главных полюсов, Ом; $r_{од}$ – сопротивление в обмотке добавочных полюсов, Ом. На основании расчета суммарных сопротивлений для ТЭД в диапа-

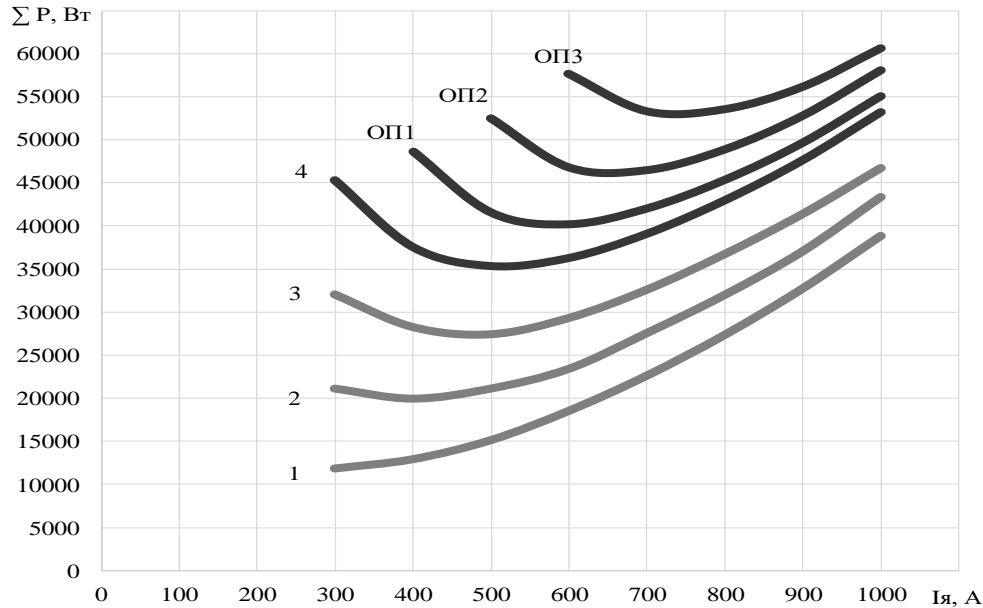


Рис. 1. Характеристика зависимости суммарных потерь от тока двигателя при неизменной температуре 20 °С

Fig. 1. Characteristic of the dependence of the total losses on the motor current at a constant temperature of 20 °С

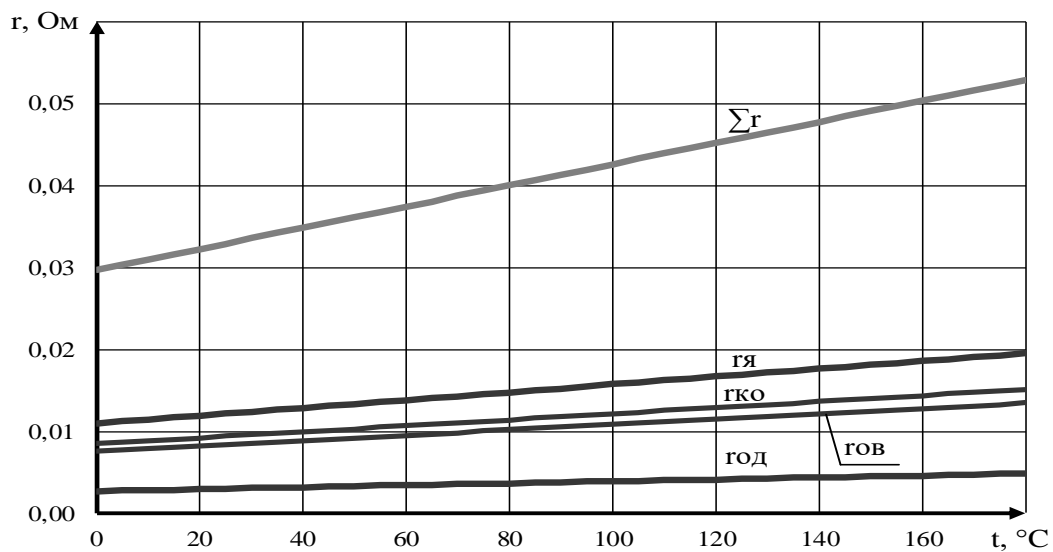


Рис. 2. Зависимость сопротивления обмоток от температуры

Fig. 2. Winding resistance dependence temperature

зоне температур от 0 до 180 °С (с шагом 5 °С) построены трехмерные графики, отражающие зависимость сопротивления от двух параметров, тока и температуры.

Не требует дополнительных подтверждений тот факт, что максимальные потери возникают на четвертой позиции регулирования. Это обусловлено более высокими скоростями вра-

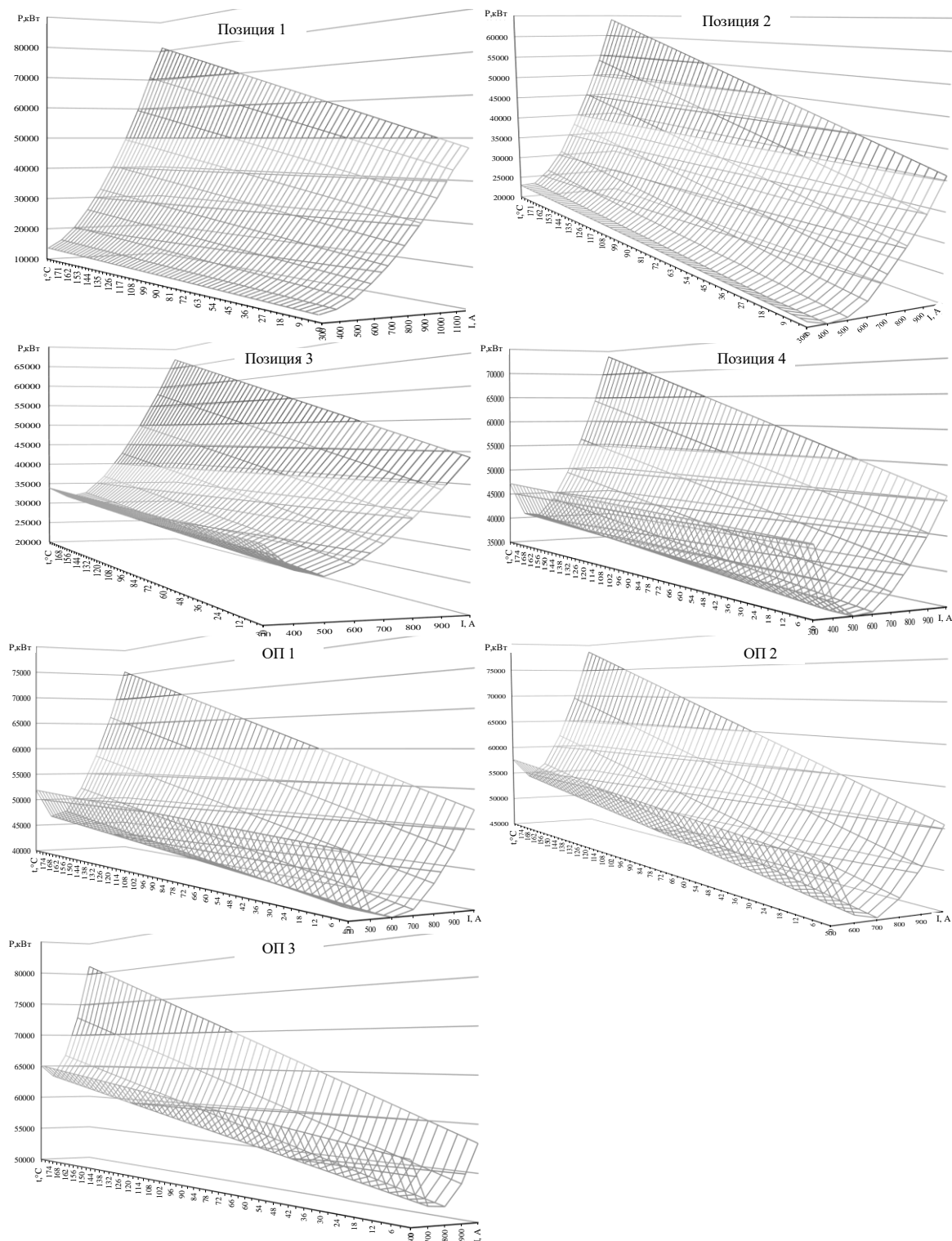


Рис. 3. Графики зависимости суммарных потерь от тока и температуры
 Fig. 3. Graphs of dependence of total losses on current and temperature

нения вала якоря и, следовательно, существенными магнитными потерями, которые в среднем составляют 40–45 % от всех потерь в ТЭД [8–11].

Представленные графики демонстрируют, что с ростом температуры увеличиваются и суммарные потери, это обусловлено повышением сопротивления меди и, как следствие, возрастанием электрических потерь токоведущих элементов ТЭД.

Разработка математической модели расчета потерь в тяговых электродвигателях пульсирующего тока

Утверждение, что электрические потери напрямую зависят от сопротивления проводника, а оно, в свою очередь, зависит от температуры, не требует дополнительных доказательств [1–4, 12]. Тогда, для создания математической модели, позволяющей рассчитать электрические потери, необходимо и достаточно составить уравнение, описывающее тепловую характеристику исследуемых элементов, а именно: обмоток якоря, главных и дополнительных полюсов, компенсационной обмотки. Способы и примеры описания подобных характеристик представлены в ряде источников [13–23]. Наиболее точно описать i -ое значение тока на графике позволяет такой математический инструмент, как сплайно-

вая интерполяция [18]:

$$f(I) = \sum_{k=0}^n a_{ik} I_i^k, \quad (2)$$

где $I_{i-1} < I_i < I_{i+1}$ a_{ik} – числовой коэффициент, n – степень полинома; i – порядковый номер в интерполируемом ряду; I – ток, А.

При помощи указанного математического инструмента описаны реальные тепловые характеристики элементов ТЭД НБ-514Е, которые были получены экспериментальным путем на стенде в рамках исследований, проводимых НЭВЗ-Электротех [21].

Изменение коэффициента добавочных потерь в зависимости от тока, который также необходим для разработки математической модели, предоставлено на рис. 4.

Фрагмент готового программного кода на базе пакета программы компьютерной алгебры Maple (2020) имеет следующий вид:

```
>
1. restart; with(stats); with(plots);
with(linalg); with(LinearAlgebra); with(Statistics);
Digits := 6;
>
2. «Input data»;
3. li := [];
4. V := [];
5. T := [];
```

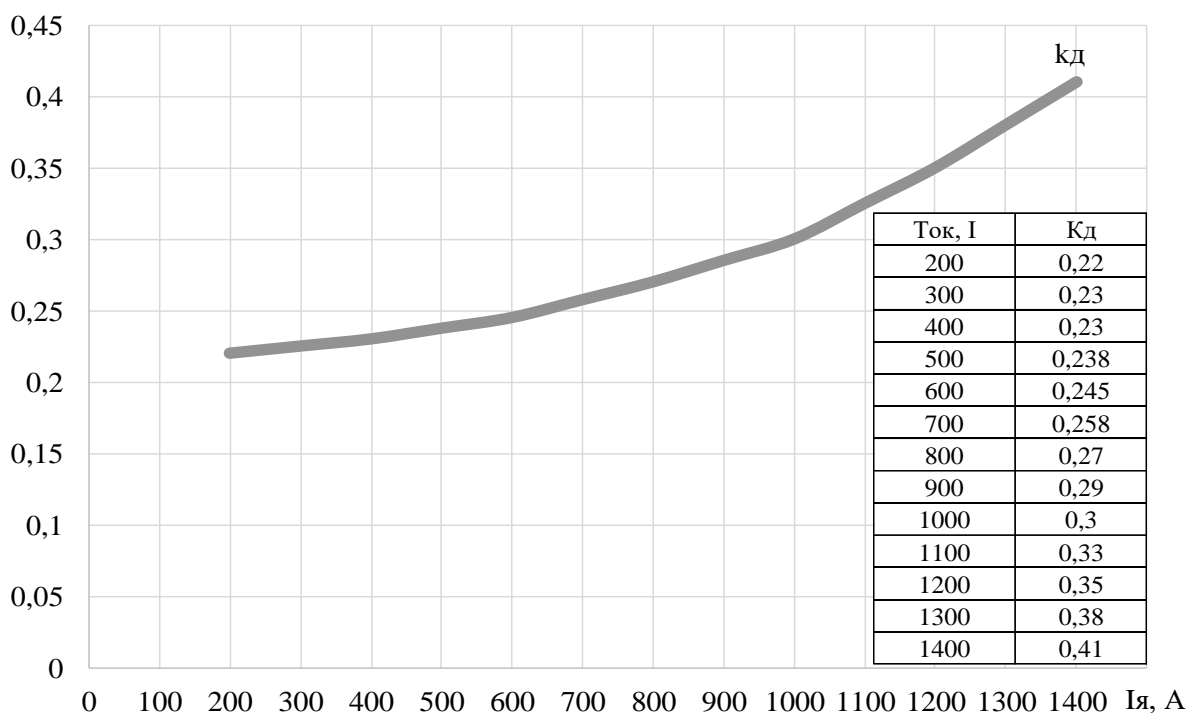


Рис. 4. Зависимость коэффициента добавочных потерь от тока двигателя
Fig. 4. Dependence of the coefficient of additional losses on the motor current

- >
- 6. «Motor parameters»:
 - 7. $R := []$; $ma := []$; $mz := []$; $Ba := []$; $Bz := []$; $po := []$;
 - $ph := []$; $Sh := []$; $Dk := []$; $Up := []$; $In := []$;
 - 8. $Tn := []$; $To := []$; $t[1][0] := []$; $t[2][0] := []$;
 - $t[3][0] := []$; $t[4][0] := []$;
 - >
 - 9. «Thermal characteristics»:
 - 10. $X := [0, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550, 600, 650, 700, 750, 800, 850, 900, 950, 1000, 1050, 1100, 1150, 1200, 1250]$;
 - 11. $Y[1] := [0, 6.7, 13.53, 20.3, 27, 33.8, 40.6, 46.6, 52, 58.5, 65, 71, 77, 91.5, 106, 119.2, 132.3, 145.6, 154, 159, 188, 217, 233.5, 250, 265, 280]$;
 - 12. $Y[2] := [0, 3.53, 7.07, 10.6, 14.15, 17.7, 21.2, 25.3, 30, 38.5, 47, 55.5, 64, 79.5, 95, 109.5, 124.1, 142.3, 160, 164, 202, 240, 308.2, 376.5, 444.7, 513]$;
 - 13. $Y[3] := [0, 3.53, 7.07, 10.6, 14.15, 17.7, 21.2, 25.3, 30, 38.5, 47, 55.5, 64, 79.5, 95, 109.5, 124.1, 142.3, 160, 164, 202, 240, 308.2, 376.5, 444.7, 513]$;
 - 14. $Y[4] := [0, 2.9, 5.85, 8.77, 11.7, 14.6, 17.54, 20.67, 24, 33, 42, 51, 60, 75, 90, 105.9,$

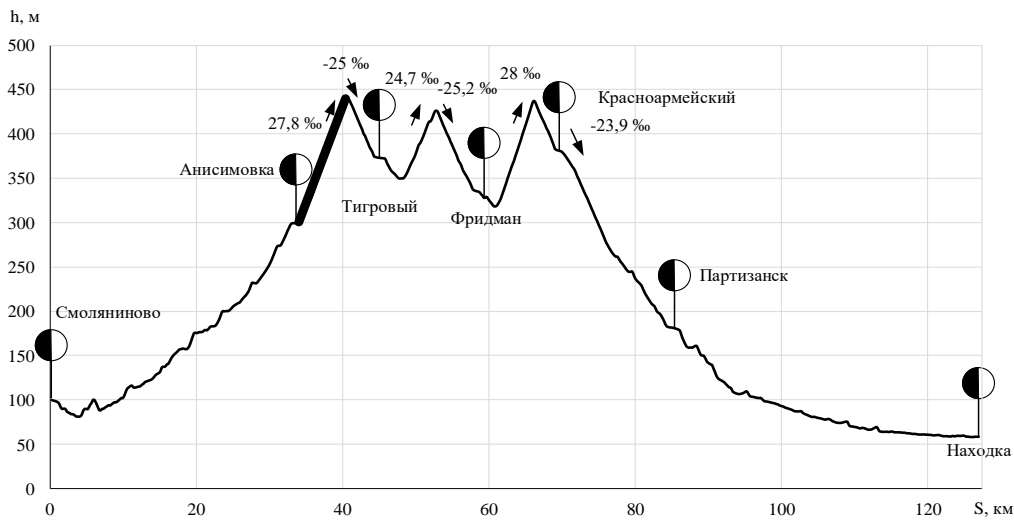


Рис. 5. Профиль участка пути Транссибирской магистрали от ст. Смоляниново до ст. Находка
 Fig. 5. Profile of the track section of the Trans-Siberian Railway from Smolyaninovo station to Nakhodka station

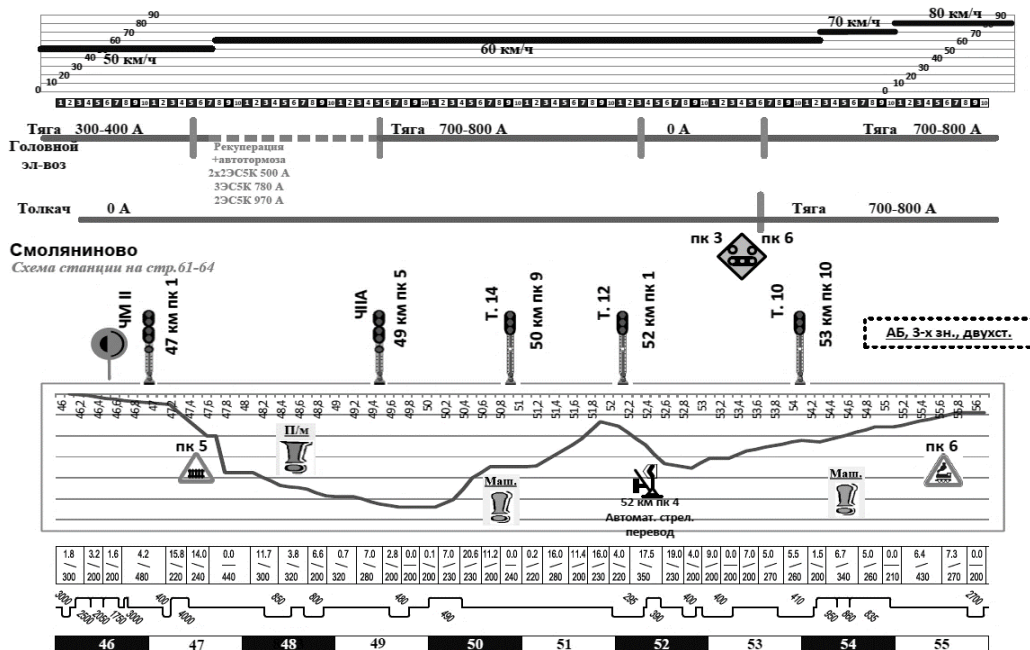


Рис. 6. Режимная карта машинисту на участке Смоляниново – Находка
 Fig. 6. Regime card for the driver on the section Smolyaninovo – Nakhodka

121.8, 139, 154, 159, 230.8, 287.2, 320.2, 352.6, 384.2, 415.8];

15. r[1] := proc (x) options operator, arrow, function_assign; spline(X, Y[1], x, linear) end proc; r[2] := proc (x) options operator, arrow, function_assign; spline(X, Y[2], x, linear) end proc; r[3] := proc (x) options operator, arrow, function_assign;

Из представленного выше фрагмента программного кода видно, что математическая модель является «гибкой», так как в строке 6–8 «Motor parameters» имеется возможность внесения различных геометрических параметров электрических машин коллекторного типа. Также в строках 9–14 имеется возможность внесения и корректировки тепловых характеристик. В конкретной приведенной математической модели представлены тепловые характе-

ристики тягового электродвигателя НБ-514Е электровозов новых серии ЗЭС5К.

Применение разработанной математической модели

В качестве объекта для использования разработанной математической модели расчета потерь электродвигателя выбран электровоз серии 4ЭС5К с ТЭД НБ-514Е, следующий по участку Транссибирской магистрали от ст. Смоляниново до ст. Находка (рис. 5). Данный участок выбран по причине его сложности и разнообразия режимов ведения локомотива и, следовательно, возможности проверки модели для различных режимов работы ТЭД.

Участок от Смоляниново до Находки имеет три лимитирующих по подъему перевала от ст. Анисимовка до ст. Тигровый – 27,8 %, от

Таблица 2. Суммарные потери в тяговом электродвигателе электровоза серии ЗЭС5К
Table 2. Total losses in the traction electric motor of the ZES5K series electric locomotive

Режим Mode	Ток Current, А	Скорость, км/ч; Speed, km/h	Обороты, об/мин; Revolutions rh	Расстояние, км; Distance, km	Расстояние от начала движения, км; Distance from start, km	Время, мин; Time, min	Время от начала движения, мин; Time from start, min	$P_{\text{эл}}$ кВт	$P_{\text{мех}}$ кВт	$P_{\text{аэро}}$ кВт	$P_{\text{тр}}$ кВт	$P_{\text{стат}}$ кВт	$P_{\text{аэо}}$ кВт	$P_{\text{мех}}$ кВт	$P_{\text{аэо}}$ кВт	$P_{\text{стат}}$ кВт	
T	400	50	888	0	0,00	0,00	0,00	2,056	1,417	0,510	1,590	0,00	2,43	2,28	0,80	1,94	13,0
T	400	50	888	1,5	1,50	1,80	1,80	2,068	1,415	0,510	1,590	0,00	2,43	2,28	0,80	1,94	13,0
P	750	60	1066	2	3,50	2,00	3,80	7,451	5,054	1,834	5,721	0,00	3,58	2,73	1,50	1,94	29,8
T	800	60	1066	2,8	6,30	2,80	6,60	8,786	5,894	2,161	6,740	0,00	3,66	2,73	1,60	1,94	33,5
B	0	60	1066	1,3	7,60	1,30	7,90	0,000	0,000	0,000	0,000	14,92	0,00	2,73	0,00	1,94	19,6
T	800	60	1066	0,7	8,30	0,70	8,60	8,768	5,855	2,151	6,708	0,00	3,66	2,73	1,60	1,94	33,4
T	800	70	1244	0,8	9,10	0,69	9,29	8,836	5,889	2,167	6,759	0,00	4,56	3,19	1,60	1,94	34,9
T	800	80	1421	0,9	10,00	0,68	9,96	8,90	5,92	2,18	6,81	0,00	5,54	3,64	1,60	1,94	36,5
T	800	80	1421	1	11,00	0,75	10,71	8,97	5,96	2,20	6,86	0,00	5,54	3,64	1,60	1,94	36,7
B	0	80	1421	1	12,00	0,75	11,46	0,00	0,00	0,00	0,00	22,58	0,00	3,64	0,00	1,94	28,2
T	800	80	1421	0,4	12,40	0,30	11,76	8,94	5,92	2,19	6,83	0,00	5,54	3,64	1,60	1,94	36,6
T	800	60	1066	1,8	14,20	1,80	13,56	9,11	6,01	2,23	6,95	0,00	3,66	2,73	1,60	1,94	34,2
T	800	70	1244	3,1	17,30	2,66	16,22	9,34	6,13	2,29	7,13	0,00	4,56	3,19	1,60	1,94	36,2
T	800	60	1066	2,7	20,00	2,70	18,92	9,55	6,24	2,34	7,28	0,00	3,66	2,73	1,60	1,94	35,3
T	800	60	1066	1	21,00	1,00	19,92	9,61	6,27	2,35	7,33	0,00	3,66	2,73	1,60	1,94	35,5
T	800	70	1244	2	23,00	1,71	21,63	9,73	6,34	2,38	7,42	0,00	4,56	3,19	1,60	1,94	37,1
T	800	80	1421	2,6	25,60	1,95	23,58	9,85	6,40	2,41	7,51	0,00	5,54	3,64	1,60	1,94	38,9
B	0	80	1421	0,7	26,30	0,53	24,11	0,00	0,00	0,00	0,00	22,58	0,00	3,64	0,00	1,94	28,2
T	800	80	1421	0,6	26,90	0,45	24,56	9,82	6,38	2,40	7,48	0,00	5,54	3,64	1,60	1,94	38,8
T	800	60	1066	3,1	30,00	3,10	27,66	10,00	6,48	2,44	7,61	0,00	3,66	2,73	1,60	1,94	36,5
T	800	60	1066	2,9	32,90	2,90	30,56	10,15	6,57	2,48	7,72	0,00	3,66	2,73	1,60	1,94	36,9
T	500	60	1066	0,4	33,30	0,40	30,96	3,96	2,56	0,97	3,01	0,00	3,22	2,73	1,00	1,94	19,4
T	500	70	1244	0,8	34,10	0,69	31,64	3,95	2,56	0,96	3,00	0,00	4,01	3,19	1,00	1,94	20,6
T	850	70	1244	0,7	34,80	0,60	32,24	11,46	7,42	2,79	8,71	0,00	4,69	3,19	1,70	1,94	41,9
T	850	60	1066	0,7	35,50	0,70	32,94	11,51	7,45	2,81	8,75	0,00	3,76	2,73	1,70	1,94	40,6
T	850	65	1155	1,2	36,70	1,11	34,05	11,58	7,50	2,83	8,81	0,00	4,22	2,96	1,70	1,94	41,5
T	850	55	977	0,4	37,10	0,44	34,49	11,61	7,52	2,83	8,84	0,00	3,33	2,51	1,70	1,94	40,3
T	950	55	977	2,9	40,00	3,16	37,65	14,83	9,60	3,64	11,34	0,00	3,67	2,51	1,90	1,94	49,4
T	950	50	888	1,6	41,60	1,92	39,57	15,00	9,72	3,69	11,50	0,00	3,22	2,28	1,90	1,94	49,2
B	0	50	888	0,4	42,00	0,48	40,05	0,00	0,00	0,00	0,00	11,60	0,00	2,28	0,00	1,94	15,8
P	750	50	888	3,2	45,20	3,84	43,89	9,34	6,05	2,29	7,13	0,00	2,78	2,28	1,50	1,94	33,3
P	750	55	977	1,8	47,00	1,96	45,85	9,36	6,07	2,29	7,14	0,00	3,17	2,51	1,50	1,94	34,0
...
P	750	70	1244	4,6	127,00	3,94	120,47	8,26	5,25	1,95	6,08	0,00	4,46	3,19	1,50	1,94	32,6

ст. Тигровый до ст. Фридман – 24,7 % и от ст. Фридман до ст. Красноармейский – 28 %. С учетом преодоления сложных перевальных участков, максимальный вес поезда принят 6 300 т, при использовании локомотива серии 4ЭС5К в голове поезда и в хвосте (толкач).

На рис. 6 представлена режимная карта машинисту на участке Смоляниново – Находка.

Входные данные для расчета – числовые массивы с информацией о поездке локомотива из микропроцессорной системы управления либо нормативные значения из утвержденной режимной карты для рассматриваемого участка работы.

Приведен расчет на основании данных из режимной карты движения локомотива на участке Смоляниново – Находка.

Данные, полученные по этим значениям, сведены в табл. 2. Режимы движения поезда: Т

– тяга, В – выбег, Р – рекуперация.

Результатом расчета, выполненного при помощи программы, являются графики зависимости тока, скорости и потерь от времени для ТЭД локомотива 4ЭС5К с поездом весом 6 300 т и толкачем в хвосте на участке Смоляниново – Находка (рис. 7).

Из графика видно, что наибольших, пиковых значений достигают магнитные потери в стали якоря; на втором месте электрические потери; на третьем – потери в компенсационной обмотке.

Заключение

Результатом исследования, описанного в статье, является математическая модель и программа, позволяющие на основании данных микропроцессорной системы управления локомотивом или режимных карт машиниста выполнить расчет потерь для различных элементов ТЭД

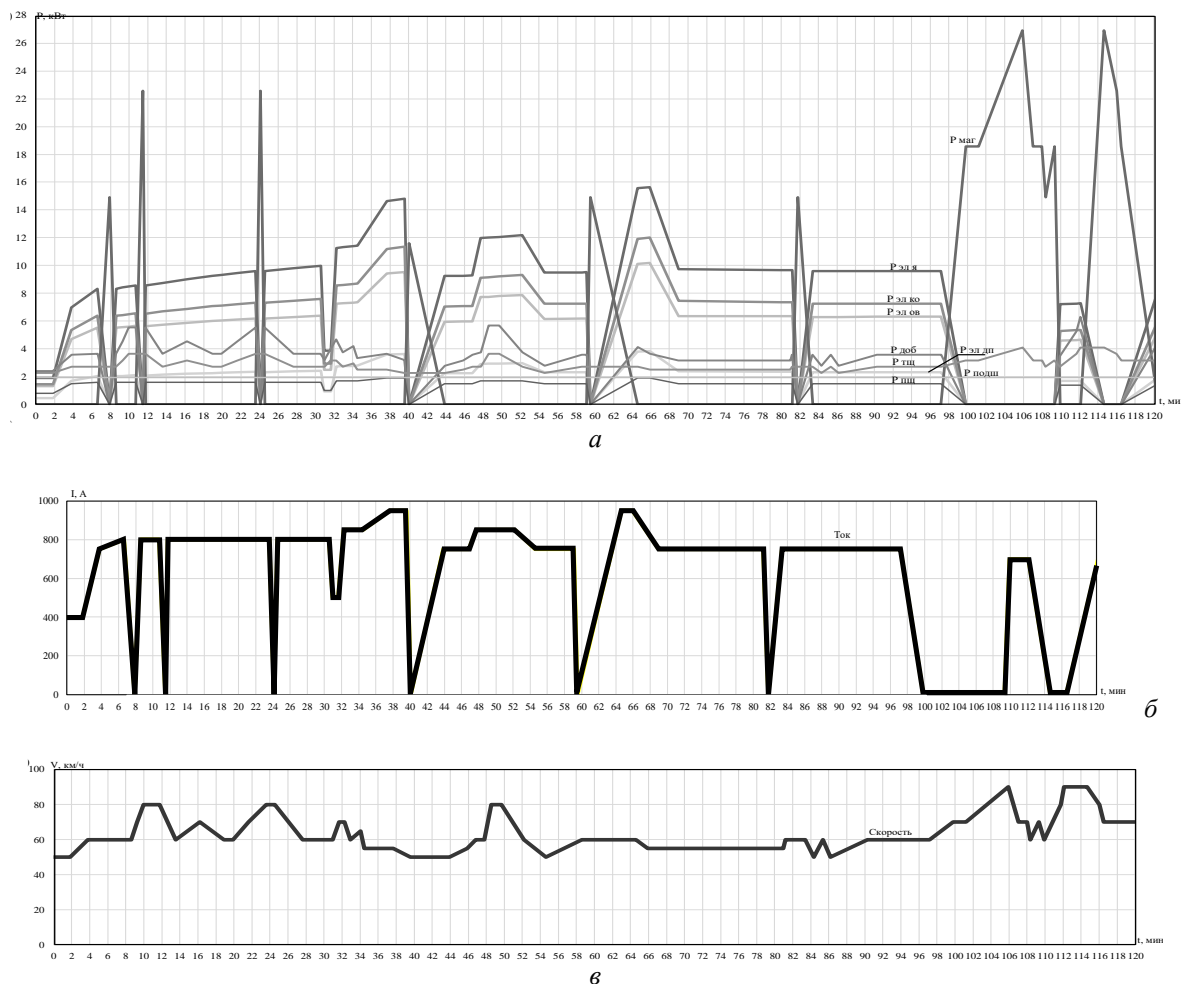


Рис. 7. График зависимости тока, скорости и потерь от времени:

a – графики потерь; *б* – график тока; *в* – график скорости

Fig. 7. Graph of current, speed and losses from time:

a – loss graphs; *b* – current graph; *c* – speed graph

пульсирующего тока с учетом температуры окружающей среды. Выполнен расчет потерь для одного из самых напряженных участков Дальневосточной железной дороги – филиала ОАО «РЖД». Модель и программа могут быть испол-

зованы при составлении или корректировке режимных карт; уточнении весовых норм; совершенствовании программного кода микропроцессорной системы управления локомотивом.

Список литературы

1. Шрайбер М.А. Моделирование теплового состояния тягового электродвигателя постоянного тока // Бюл. результатов науч. исследований. 2014. № 4 (13). С. 36 – 38.
2. Дурандин М.Г., Кузьминых И.А. Расчет электрических полей в якорной изоляции тяговых электродвигателей локомотивов с учетом теплового фактора // Вестник УрГУПС. 2010. № 4 (8). С. 30 – 37.
3. Дворкин П.В., Курилкин Д.Н. Анализ теплового состояния тяговых электродвигателей по данным микропроцессорной системы управления // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2019. Т. 16. № 3. С. 401 – 409.
4. Прибылова Н.В., Филонов С.А., Аксенов И.И. Потери на вихревые токи в обмотках электрических машин, вынесенных в воздушный зазор // Наука вчера, сегодня, завтра : материалы научно-практической конференции. Воронеж, 2016. С. 236 – 239.
5. Пономарчук Ю.В., Пляскин А.К., Кейно М.Ю. Методика обработки и анализа данных бортовых устройств регистрации параметров работы локомотивов // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». 2018. № 2. С. 58 – 68.
6. Давыдов Ю.А., Пляскин А.К. Тяговые электрические машины. Хабаровск : ДВГУПС, 2012. 126 с.
7. Давыдов Ю.А. Тяговые электрические машины. Хабаровск : ДВГУПС, 2006. 116 с.
8. Гребенников Н.В., Харченко П.А. Определение энергетических параметров при ведении поезда // Транспорт: наука, образование, производство: сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. Ростов-на-Дону, 2021. С. 193 – 197.
9. Зарифьян А.А., Мустафин А.Ш. Изучение электромеханических процессов в коллекторном тяговом двигателе с учетом потерь // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2021. № 3(83). С. 81 – 89.
10. Фошкина Н.В., Кудинов И.А. Повышение энергоэффективности электровозов 2(3,4)ЭС5К // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. 2016. №4 (74). С. 10 – 18.
11. ГОСТ 2582-81 Машины электрические вращающиеся тяговые. Утвержден постановлением N 2598 от 26 мая 1981 г. Гос. комитета СССР по стандартам. Введен в действие: 01.01.1983. М. : Издательство стандартов, 1981. 34 с.
12. Проектирование тяговых электрических машин / М.Д. Находкин, Г.В. Василенко, В.И. Бочаров [и др.]. М. : Транспорт, 1976. 624 с.
13. Юдина О.И. Математическое моделирование добавочных потерь в двигателях постоянного тока при пульсирующем питании : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Ставрополь, 2008. 146 с.
14. Валентейчик А.Г. Методология расчета потерь электроэнергии в шестичко-коллекторном узле тяговых двигателей постоянного тока // Вестник транспорта Поволжья. 2009. №1 (17). С. 63 – 65.
15. Седова И.Ю., Юдина О.И. Моделирование добавочных потерь в системе «двигатель постоянного тока - силовой полупроводниковый преобразователь» // Вестник Северо-Кавказского государственного технического университета. 2011. № 1. С. 57-62.
16. Афанасов А.М. Выбор методов определения механических потерь в тяговых электродвигателях постоянного и пульсирующего тока // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. 2010. № 32. С. 151 – 154.
17. Гермидер О.В., Попов В.Н. Математическое моделирование процесса переноса тепла в прямоугольном канале в зависимости от числа Кнудсена // Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ : материалы VII Всероссийской научной молодежной школы-семинара имени Е.В. Воскресенского с международным участием. Саранск, 2016. С. 34–36.
18. Дьяконов В.П. Энциклопедия компьютерной алгебры : [Mathcad, Maple, MATLAB, Mathematica, Derive, MuPAD; аналитические и численные вычисления и их визуализация; сотни примеров математических расчетов]. М. : ДМК Пресс, 2012. 1263 с.
19. Афанасов А.М. Энергетические показатели механического способа компенсации электрических потерь в тяговых электродвигателях при их взаимной нагрузке // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. 2010. № 35. С. 69 – 73.
20. Афанасов А.М. Универсальные характеристики магнитных потерь в тяговых электрических машинах // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. 2010. № 31. С. 77 – 80.
21. Паспорт НБ-514Е 6ТС.155.040 ПС двигателя пульсирующего тока. Новочеркасск: Новочеркасский электровозостроительный завод, 2012. 17 с.
22. Блинов П.Н., Сковородников Е.И. Тяговые расчеты. Омск : ОмГУПС, 2015. 34 с.
23. Кузьмич В.Д., Руднев В.С., Френкель С.Я. Теория локомотивной тяги. М. : Маршрут, 2005. 448 с.

References

1. Shraiber M.A. Modelirovanie teplovogo sostoyaniya tyagovogo elektrodvigatelya postoyannogo toka [Modeling of the thermal state of a direct current traction motor]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of results of scientific research], 2014, no. 4 (13), pp. 36–38.

2. Durandin M.G., Kuzminykh I.A. Raschet elektricheskikh polei v yakonoi izolyatsii tyagovykh elektrodvigatelyi lokomotivov s uchetom teplovogo faktora [Calculation of electric fields in the anchor insulation of traction electric motors of locomotives taking into account the thermal factor]. *Vestnik UrGUPS* [Bulletin of Ural State Transport University], 2010, no. 4 (8), pp. 30–37.
3. Dvorkin P.V., Kurilkin D.N. Analiz teplovogo sostoyaniya tyagovykh elektrodvigatelyi po dannym mikroprotsessornoi sistemy upravleniya [Analysis of the thermal state of traction motors according to the microprocessor control system]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletins of Saint Petersburg State Transport University], 2019, vol. 16, no. 3, pp. 401–409.
4. Pribylova N.V., Filonov S.A., Aksenov I.I. Poteri na vikhrevye toki v obmotkakh elektricheskikh mashin, vynesennykh v vozdushnyi zazor [Eddy current losses in the windings of electrical machines placed in the air gap]. *Materialy nauchno-prakticheskoi konferentsii Nauka vchera, segodnya, zavtra* [Proceedings of scientific-practical conference «Science yesterday, today, tomorrow»]. Voronezh, 2016, pp. 236–239.
5. Ponomarchuk Yu.V., Plyaskin A.K., Keino M.Yu. Metodika obrabotki i analiza dannykh bortovykh ustroystv registratsii parametrov raboty lokomotivov [Methodology for Processing and Analyzing Data of Onboard Devices for Recording Locomotive Operation Parameters]. *Byulleten' Ob'edinennogo uchenogo soveta OAO «RZhD»* [Bulletin of the Joint Scientific Council of JSC Russian Railways], 2018, no. 2, pp. 58–68.
6. Davydov Yu.A., Plyaskin A.K. Tyagovye elektricheskie mashiny [Traction electric machines]. Khabarovsk: DVGUPS Publ., 2012. 126 p.
7. Davydov Yu.A. Tyagovye elektricheskie mashiny [Traction electric machines]. Khabarovsk: DVGUPS Publ., 2006. 116 p.
8. Grebennikov N.V., Kharchenko P.A. Opredelenie energeticheskikh parametrov pri vedenii poezda [Determination of energy parameters when driving a train]. *Sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo»* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Transport: science, education, production»]. Rostov-on-Don, 2021, pp. 193–197.
9. Zarif'yan A.A., Mustafin A.Sh. Izuchenie elektromekhanicheskikh protsessov v kollektornom tyagovom dvigatele s uchetom poter' [Study of electromechanical processes in a commutator traction motor taking into account losses]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State Transport University], 2021, no. 3(83), pp. 81–89.
10. Foshkina N.V., Kudinov I.A. Povyshenie energoeffektivnosti elektrovozov 2(3,4)ES5K [Increasing the energy efficiency of electric locomotives 2 (3,4) ES5K]. *Vestnik Vserossiiskogo nauchno-issledovatel'skogo i proektno-konstruktorskogo instituta elektrovozostroeniya* [Bulletin of the All-Russian Scientific Research and Design Institute of Electric Locomotive Building], 2016, no. 4(74), pp. 10–18.
11. Mashiny elektricheskie vrashchayushchiesya tyagovye GOST 2582-81 (Electrical rotating traction machines. State Standard of the USSR 2582-81). Moscow: Izdatel'stvo standartov Publ., 1981. 34 p.
12. Nakhodkin M.D., Vasilenko G.V., Bocharov V.I., Kozorezov M.A. Proektirovanie tyagovykh elektricheskikh mashin [Design of traction electric machines]. Moscow: Transport Publ., 1976. 624 p.
13. Yudina O.I. Matematicheskoe modelirovanie dobavochnykh poter' v dvigatelyakh postoyannogo toka pri pul'siruyushchem pitanii [Mathematical modeling of additional losses in DC motors with pulsating power]. Ph.D's thesis. Stavropol, 2008. 146 p.
14. Valenteichik A.G. Metodologiya rascheta poter' elektroenergii v shchetochno-kollektornom uzle tyagovykh dvigatelyi postoyannogo toka [Methodology for calculating power losses in the brush-collector unit of DC traction motors]. *Vestnik transporta Povolzh'ya* [Bulletin of Transport of the Volga Region], 2009, no. 1 (17), pp. 63–65.
15. Sedova I.Yu., Yudina O.I. Modelirovanie dobavochnykh poter' v sisteme «dvigatel' postoyannogo toka - silovoi popul'novodnikovyy preobrazovatel'» [Modeling of additional losses in the system «DC motor-power semiconductor converter»]. *Vestnik Severo-Kavkazskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the North Caucasian State Technical University], 2011, no. 1, pp. 57–62.
16. Afanasov A.M. Vybor metodov opredeleniya mekhanicheskikh poter' v tyagovykh elektrodvigatelyakh postoyannogo i pul'siruyushchego toka [The choice of methods for determining mechanical losses in traction motors of direct and pulsating current]. *Vestnik Dnepropetrovskogo natsional'nogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta im. akademika V. Lazaryana* [Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport after named Academic V. Lazaryan], 2010, no. 32, pp. 151–154.
17. Germider O.V., Popov V.N. Matematicheskoe modelirovanie protsessa perenosa tepla v pryamougol'nom kanale v zavisimosti ot chisla Knudsena [Mathematical modeling of the heat transfer process in a rectangular channel depending on the Knudsen number]. *Materialy VII Vserossiiskoi nauchnoi molodezhnoi shkoly-seminara imeni E.V. Voskresenskogo s mezhdunarodnym uchastiem «Matematicheskoe modelirovanie, chislennyye metody i kompleksy program»* [Proceedings of the VII All-Russian Scientific Youth School-Seminar named after E.V. Voskresenskii with international participation «Mathematical modeling, numerical methods and software packages»]. Saransk, 2016, pp. 34–36.
18. D'yakonov V.P. Entsiklopediya komp'yuternoï algebry. Mathcad, Maple, Mathematica, Drive, MuPAD. Analiticheskie i chislennyye vychisleniya i ikh vizualizatsiya; sotni primerov matematicheskikh raschetov [Encyclopedia of Computer Algebra. Mathcad, Maple, Mathematica, Drive, MuPAD. Analytical and numerical calculations and their visualization; hundreds of examples of mathematical calculations]. Moscow: DMK Press Publ., 2012. 1263 p.
19. Afanasov A.M. Energeticheskie pokazateli mekhanicheskogo sposoba kompensatsii elektricheskikh poter' v tyagovykh elektrodvigatelyakh pri ikh vzaimnoi nagruzke [Energy indicators of the mechanical method of compensating for electrical losses in traction motors with their mutual load]. *Vestnik Dnepropetrovskogo natsional'nogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta im. akademika V. Lazaryana* [Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport after named Academic V. Lazaryan], 2010, no. 35, pp. 69–73.

20. Afanasov A.M. Universal'nye kharakteristiki magnitnykh poter' v tyagovykh elektricheskikh mashinakh [Universal characteristics of magnetic losses in traction electric machines]. *Vestnik Dnepropetrovskogo natsional'nogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta im. akademika V. Lazaryana* [Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport after named Academic V. Lazaryan], 2010, no. 31, pp. 77–80.

21. Paspport NB-514E 6TS.155.040 PS dvigatelya pul'siruyushchego toka [Passport NB-514E 6TS.155.040 PS of a pulsating current motor]. Novocherkassk: Novocherkasskii elektrozostroitel'nyi zavod, 2012. 17 p.

22. Blinov P.N., Skovorodnikov E.I. Tyagovye raschety [Traction calculations]. Omsk: OmGUPS Publ., 2015. 34 p.

24. 23. Kuzmich V.D., Rudnev V.S., Frenkel' S.Ya. Teoriya lokomotivnoi tyagi [Theory of locomotive traction]. Moscow: Marshrut Publ., 2005. 448 p.

Информация об авторах

Давыдов Юрий Анатольевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры транспорта железных дорог, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск; e-mail: puch@festu.khv.ru.

Заболотный Владимир Владимирович, аспирант кафедры транспорта железных дорог, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск; e-mail: zabolotnyu_vv@mail.ru.

Мухин Олег Олегович, аспирант кафедры транспорта железных дорог, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск; e-mail: muhino@mail.ru.

Information about the authors

Yurii A. Davydov, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Professor of the Department of Railway Transport, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk; e-mail: puch@festu.khv.ru.

Vladimir V. Zabolotnyi, Ph.D. student of the Department of Railway Transport, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk; e-mail: zabolotny_vv@mail.ru.

Oleg O. Mukhin, Ph.D. student of the Department of Railway Transport, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk; e-mail: muhino@mail.ru.