

УДК 629.4.016.2

Определение сопротивления в цепи тяговых электродвигателей по данным микропроцессорных систем управления

Д. Н. Курилкин¹, В. В. Грачев¹, В. Ф. Танаев²

¹Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

²Московская железная дорога — филиал ОАО «РЖД», Российская Федерация, 107996, Москва, ул. Краснопрудная, 20

Для цитирования: Курилкин Д. Н., Грачев В. В., Танаев В. Ф. Определение сопротивления в цепи тяговых электродвигателей по данным микропроцессорных систем управления // Бюллетень результатов научных исследований. — 2022. — Вып. 4. — С. 74–89. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-4-74-89

Аннотация

Цель: Разработка методики определения фактического сопротивления цепей тяговых электродвигателей (ТЭД) локомотива с электрической передачей мощности и уточненного расчета потерь напряжения в коллекторно-щеточном аппарате по данным микропроцессорных систем управления. Эти данные необходимы для расчета актуальных тяговых характеристик локомотива, а также его тормозных характеристик в режимах электрического торможения. **Методы:** Использовались методы теории электрических машин, статистической обработки и регрессионного анализа экспериментальных данных. **Результаты:** На основании статистического анализа данных регистрации подсистемы бортовой диагностики 20 секций тепловозов 2ТЭ116У и ТЭП70БС предложена и обоснована методика определения фактического значения сопротивления цепи тяговых электродвигателей, а также методика уточненного расчета потерь напряжения в коллекторно-щеточном аппарате. Подтверждена гипотеза о нормальном законе распределения величины сопротивления и возможности использования его математического ожидания в качестве расчетного значения. Установлены пределы возможного изменения сопротивлений цепей ТЭД тепловозов 2ТЭ116У и ТЭП70БС. **Практическая значимость:** Полученные результаты позволяют уточнить величину потерь энергии в тяговом приводе локомотивов при расчете его тяговых и тормозных характеристик. Данные о допустимых в эксплуатации пределах изменения активного сопротивления цепей исправных ТЭД могут использоваться для оперативной диагностики силовой цепи локомотива.

Ключевые слова: Сопротивление цепи тяговых двигателей, электрические потери в тяговых двигателях, коэффициент полезного действия тягового электродвигателя, тяговый привод.

Постановка задачи

Обязательным этапом решения задачи оптимизации режимов управления локомотивом является выполнение предварительных вариантных тяговых расчетов, точность которых во многом определяется достоверностью исходных данных, в том числе о реальных тяговых и энергетических характеристиках локомотивов.

Известно, что уровень энергоэффективности тепловоза в эксплуатации во многом определяется техническим и теплотехническим состоянием его дизеля [1–4]. Вместе с тем потери энергии в тяговом приводе образуют существенную составляющую энергетического баланса силовой установки автономного локомотива, в связи с чем оказывают заметное влияние на него как тяговые, так и тормозные характеристики в режимах электрического торможения. Уровень потерь является информативным диагностическим параметром, поскольку ухудшение технического состояния агрегатов силовой цепи локомотива практически всегда сопровождается его повышением.

В настоящее время при расчете режимных карт, а также управляющих программ систем автоведения поездов используются паспортные характеристики локомотивов, приведенные в заводской документации или Правилах тяговых расчетов [5], не учитывающие реального технического состояния локомотива в целом и его основного оборудования. Это снижает эффективность систем автоведения и уровень доверия локомотивных бригад к рекомендациям по выбору эффективных режимов управления локомотивом при вождении поездов.

Перечень контролируемых параметров и объем измерительной информации, регистрируемой микропроцессорными системами управления и подсистемами бортовой диагностики современных тепловозов, позволяют решать широкий круг задач, связанных с контролем текущего состояния оборудования силовой цепи локомотивов и потерь энергии в ней.

Таким образом, актуальной проблемой является разработка методов оперативного определения реальных характеристик локомотива на основе обработки информации, регистрируемой подсистемой бортовой диагностики.

В статье решается задача определения сопротивления цепей тяговых электродвигателей тепловозов серий 2ТЭ116У и ТЭП70БС по данным непрерывного мониторинга параметров силовой цепи. Величина этого сопротивления определяет уровень электрических потерь в тяговом приводе тепловоза и оказывает заметное влияние на его тяговые и экономические характеристики.

Разработка метода решения задачи

В соответствии с [6–8] мощность потерь в тяговом электродвигателе постоянного тока (далее — ТЭД) может быть представлена следующей суммой:

$$\Delta P_{\text{тэд}} = \Delta P_{\text{эл}} + \Delta P_{\text{щэл}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{магн}} + \Delta P_{\text{доб}}, \quad (1)$$

где $\Delta P_{\text{эл}}$ — мощность электрических потерь без учета потерь в переходных контактах щеток;

$\Delta P_{\text{щэл}}$ — мощность электрических потерь в переходных контактах щеток;

$\Delta P_{\text{мех}}$ — мощность механических потерь на трение в подшипниках, на трение якоря электрической машины о воздух, на трение щеток о коллектор;

$\Delta P_{\text{магн}}$ — мощность магнитных потерь при холостом ходе;

$\Delta P_{\text{доб}}$ — мощность добавочных потерь при нагрузке.

Мощность электрических потерь составляет значительную долю в общем объеме потерь в ТЭД. Без учета потерь в переходных контактах щеток она вычисляется с использованием закона Джоуля — Ленца:

$$\Delta P_{\text{эл}} = I^2 \cdot r_{\text{тэд}} = I^2 \cdot (r_{\text{я}} + r_{\text{дп}} + \alpha_{\text{ов}} \cdot r_{\text{ов}}), \text{ Вт}, \quad (2)$$

где I — ток, протекающий через якорную обмотку ТЭД;

$r_{\text{тэд}}$ — сопротивление цепи последовательно соединенных обмоток тягового двигателя;

$r_{\text{я}}$ — сопротивление обмотки якоря тягового двигателя;

$r_{\text{дп}}$ — сопротивление обмотки дополнительных полюсов;

$r_{\text{ов}}$ — сопротивление обмотки возбуждения;

$\alpha_{\text{ов}}$ — степень ослабления возбуждения.

Паспортные значения сопротивлений обмоток тяговых двигателей постоянного тока, применяемых на современных отечественных тепловозах, приведены в табл. 1 [6, 9].

Реальные значения сопротивлений как обмоток, так и всей цепи ТЭД могут существенно отличаться от паспортных. Это связано как с допусками на значения параметров обмоток, так и с условиями их эксплуатации, прежде всего с нагревом. Кроме того, существенное влияние могут оказывать переходные сопротивления подвижных и неподвижных соединений, входящих в цепь ТЭД. В связи с этим для получения объективной информации о величине электрических потерь в выражении (2) необходимо использовать величину фактического сопротивления цепи ТЭД $r_{\text{тэд}}$.

ТАБЛИЦА 1. Сопротивления обмоток тяговых двигателей

Тип тягового двигателя	Сопротивление обмоток тяговых двигателей при +20 °С, Ом		
	Якорь	Главные полюса	Добавочные полюса
ЭД118А, ЭД-118Б	0,0135	0,0105	0,00821
ЭД-120А	0,0107	0,0088	0,00776
ЭД-121А	0,0107	0,0088	0,00776
ЭДУ-133	0,0116	0,00675	0,00641

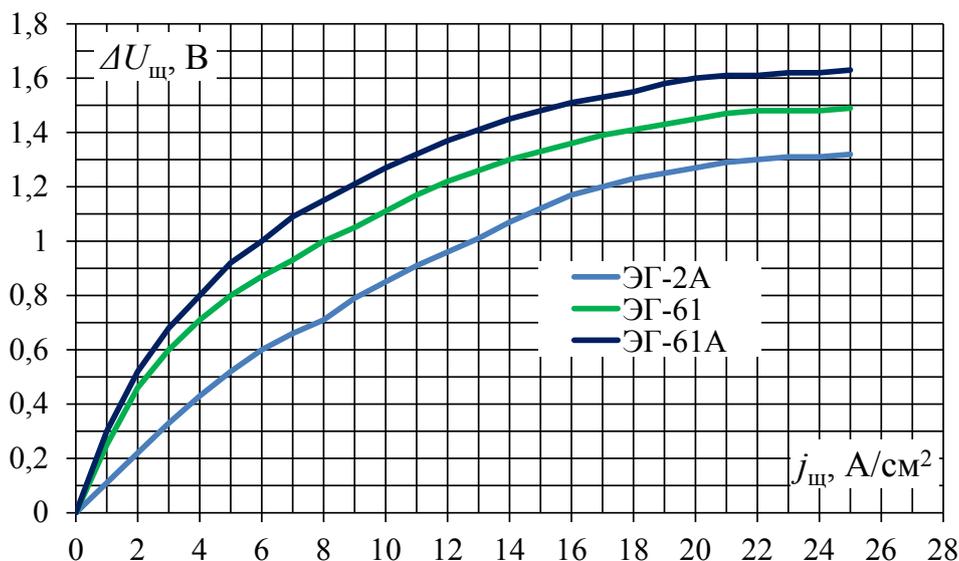


Рис. 1. Падение напряжения в контакте щетки коллектора в зависимости от плотности тока и марки щетки

Сопротивление цепи тягового электродвигателя $r_{тэд}$, включающее в себя сопротивления обмоток возбуждения, якоря и дополнительных полюсов, а также сопротивления входящих в цепь проводов и переходные сопротивления их соединений, может быть определено косвенным способом при неподвижном якоре с использованием зависимости:

$$r_{тэд} = \frac{U - 2 \cdot \Delta U_{щ}}{I}, \quad (3)$$

где U — напряжение, приложенное к ТЭД;

$\Delta U_{щ}$ — падение напряжения в контакте щеток одного знака и коллектора тягового двигателя.

В большинстве источников [6–7, 9] рекомендуется принимать величину $2 \cdot \Delta U_{щ}$ постоянной и равной 2–3 В.

Однако, как показали результаты исследования, представленные в работе [10], величина падения напряжения в коллекторно-щеточном аппарате $\Delta U_{щ}$ существенным образом зависит от плотности тока под щеткой $j_{щ}$ (А/см²) (рис. 1).

Плотность тока в контакте коллектора и щетки определяется по формуле

$$j_{щ} = \frac{I}{\frac{n_{щ}}{2} \cdot S_{щ}}, \quad (4)$$

где $n_{щ}$ — общее число щеток ТЭД;

$S_{щ}$ — контактная площадь одной щетки.

Зависимости, приведенные на рис. 1, с учетом (4) могут быть аппроксимированы полиномом вида:

$$\Delta U_{\text{щ}} = a_I \cdot I^5 + b_I \cdot I^4 + c_I \cdot I^3 + d_I \cdot I^2 + e_I \cdot I + f_I, \quad (5)$$

где $a_I, b_I, c_I, d_I, e_I, f_I$ — постоянные коэффициенты.

Для ТЭД серий ЭД118Б, ЭД133, ЭД121А, на которых применяются щетки марки ЭГ-61А, в количестве 12 штук, с контактной площадью одной пары разрезных щеток $10,0 \text{ см}^2$, получим следующие значения коэффициентов: $a_I = 1,406 \cdot 10^{-15}$; $b_I = -6,329 \cdot 10^{-12}$; $d_I = -9,558 \cdot 10^{-6}$; $e_I = 0,00507$; $f_I = -0,015051$.

Для определения сопротивления в цепи ТЭД анализировались данные подсистем бортовой диагностики 20 секций тепловозов серии 2ТЭ116У и ТЭП70БС за 72 часа их работы, при этом из рассмотрения были исключены локомотивы с неработающими датчиками угловой скорости вращения всех колесных пар. В зависимости от интенсивности работы объем первичной выборки по каждой секции составил от 70 тыс. до 350 тыс. записей, из которых удалось отобрать от 30 до 300 записей, удовлетворяющих следующим условиям:

- угловая скорость всех колесных пар в текущей и последующей записи не более $0,1 \text{ км/ч}$;
- ток цепи ТЭД не менее 300 А ;
- с момента перевода контроллера машиниста в тяговую позицию прошло не менее 7 секунд ;
- напряжение, приложенное к цепи ТЭД, не менее 12 В .

Ток и напряжение цепи ТЭД вычисляются как средняя величина по двум соседним записям.

На рис. 2 и 3 приведены результаты расчета сопротивления цепи первого ТЭД тепловозов 2ТЭ116У № 135 (секция А) и ТЭП70БС № 176, а на рис. 4 и 5 представлены соответствующие им группированные статистические ряды расчетных значений сопротивлений.

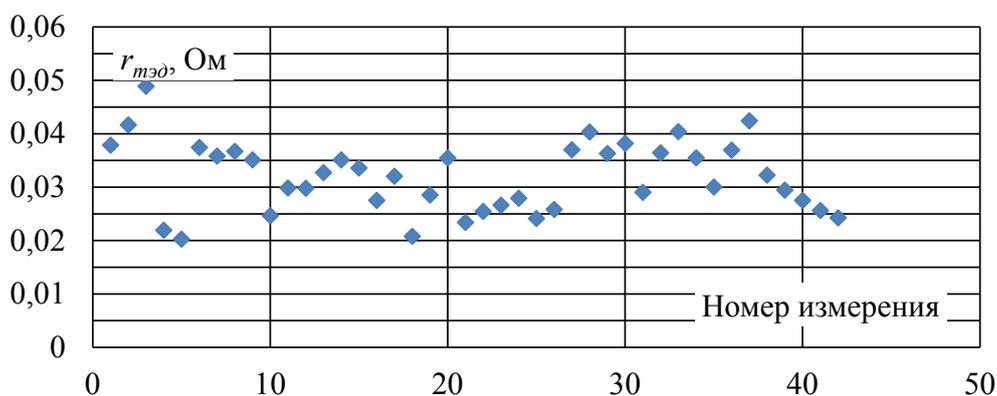


Рис. 2. Результаты расчета сопротивления первого ТЭД тепловоза 2ТЭ116У № 135 (секция А)

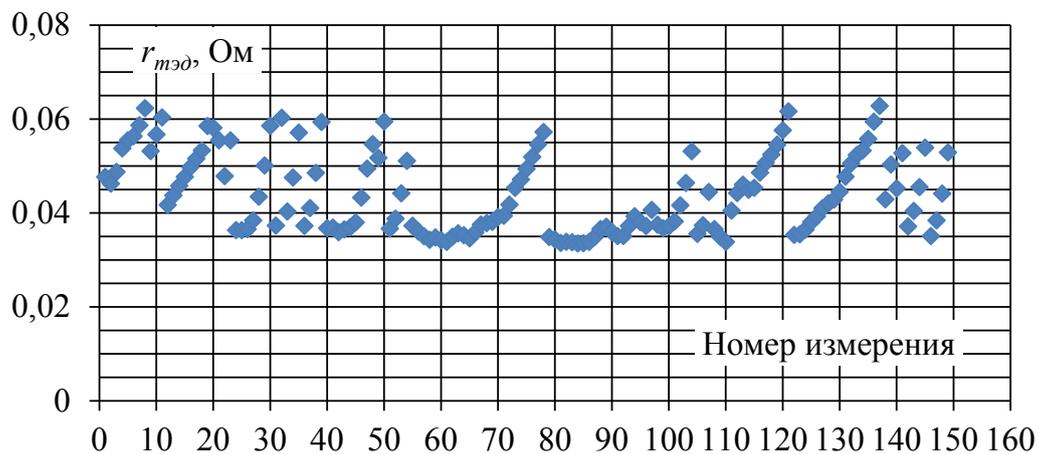


Рис. 3. Результаты расчета сопротивления первого ТЭД тепловоза ТЭП70БС № 176

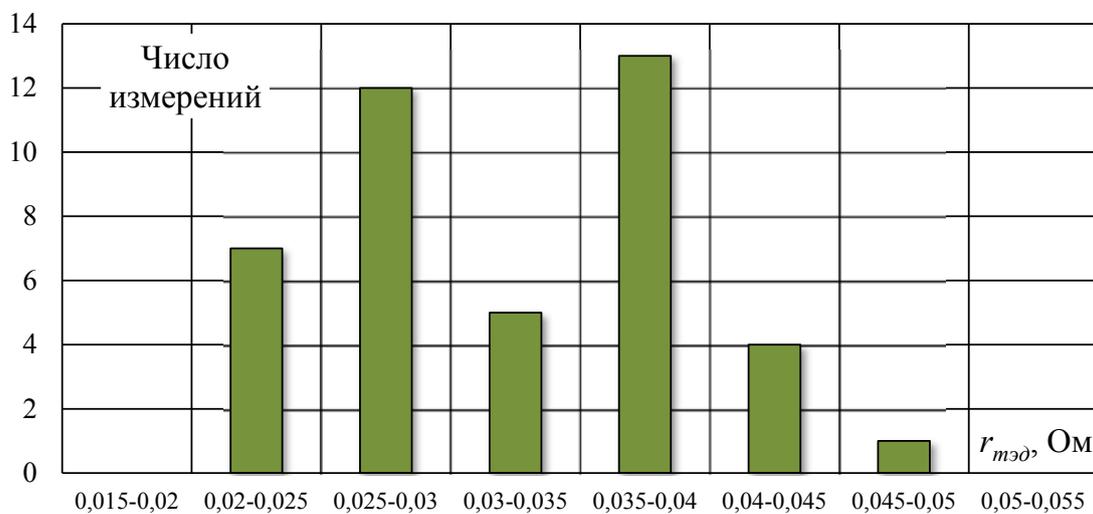


Рис. 4. Группированный статистический ряд значений сопротивления цепи первого ТЭД тепловоза 2ТЭ116У № 135 (секция А)

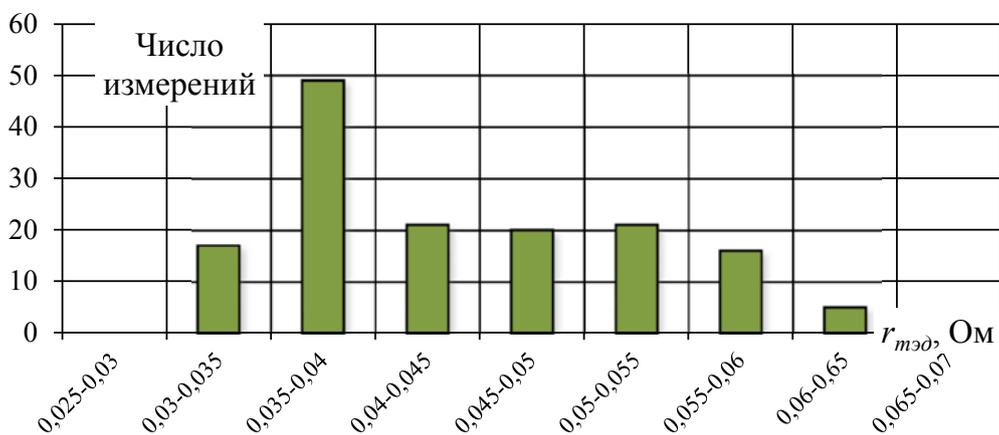


Рис. 5. Группированный статистический ряд значений сопротивления цепи первого ТЭД тепловоза ТЭП70БС № 176

Обсуждение результатов

Как следует из рис. 2–5, вычисленное значение сопротивления цепи ТЭД представляет собой случайную величину с большим разбросом возможных значений. Случайный характер $r_{\text{тэд}}$ обусловлен действием целого ряда причин, основными из которых являются погрешность измерения значений тока и напряжения, входящих в выражение (2), разброс переходных сопротивлений контактов поездных контакторов и реверсивного переключателя, изменение температуры обмоток двигателя, а также переходные процессы в электрической передаче тепловоза.

Проверка гипотезы о нормальности распределения значений сопротивлений цепи ТЭД была выполнена с использованием метода Е. И. Пустыльника [11], согласно которому условием соответствия выборки нормальному закону распределения является выполнение следующих условий:

$$|A_{r_{\text{тэд}}}| \leq 3 \cdot \sqrt{D(A_{r_{\text{тэд}}})}; \quad (6)$$

$$|E_{r_{\text{тэд}}}| \leq 5 \cdot \sqrt{D(E_{r_{\text{тэд}}})}, \quad (7)$$

где $A_{r_{\text{тэд}}}$ и $E_{r_{\text{тэд}}}$ — асимметрия и эксцесс выборки;

$D(A_{r_{\text{тэд}}})$ и $D(E_{r_{\text{тэд}}})$ — дисперсия асимметрии и эксцесса выборки.

Значения асимметрии и эксцесса выборки определяются из известных соотношений [11, 12]:

$$A_{r_{\text{тэд}}} = \frac{1}{n \cdot S_{r_{\text{тэд}}}^3} \cdot \sum_{i=1}^n (r_{\text{тэд}i} - \overline{r_{\text{тэд}}})^3; \quad (8)$$

$$E_{r_{\text{тэд}}} = \frac{1}{n \cdot S_{r_{\text{тэд}}}^4} \cdot \sum_{i=1}^n (r_{\text{тэд}i} - \overline{r_{\text{тэд}}})^4 - 3, \quad (9)$$

где n — число замеров и вычислений, выполненное для данной секции локомотива;

i — номер замера;

$r_{\text{тэд}i}$ — сопротивление в цепи тягового двигателя, полученное по результатам i -го замера (Ом);

$S_{r_{\text{тэд}}} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (r_{\text{тэд}i} - \overline{r_{\text{тэд}}})^2}$ — среднеквадратичное отклонение выборки, Ом;

$\overline{r_{\text{тэд}}} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n r_{\text{тэд}i}$ — математическое ожидание сопротивления цепи ТЭД, Ом.

Величина дисперсии асимметрии и эксцесса выборки определяются по зависимостям вида [12]:

$$D(A_{r_{\text{ТЭД}}}) = \frac{6 \cdot (n-1)}{(n+1) \cdot (n+3)}; \quad (10)$$

$$D(E_{r_{\text{ТЭД}}}) = \frac{24 \cdot n \cdot (n-2) \cdot (n-3)}{(n+1)^2 \cdot (n+3) \cdot (n+5)}. \quad (11)$$

Результаты расчета сопротивления цепей тяговых двигателей и проверки нормальности закона распределения законов для 14 секций тепловозов 2ТЭ116У и шести тепловозов ТЭП70БС приведены в табл. 2 и 3.

ТАБЛИЦА 2. Результаты статистической обработки определения сопротивления цепи ТЭД тепловозов 2ТЭ116У

Номер тягового двигателя	$\overline{r_{\text{ТЭД}}}$, Ом	$S_{r_{\text{ТЭД}}}^2 \cdot 10^{-5}$	$S_{r_{\text{ТЭД}}}$	$A_{r_{\text{ТЭД}}}$	$E_{r_{\text{ТЭД}}}$	$3 \cdot \sqrt{D(A_{r_{\text{ТЭД}}})}$	$5 \cdot \sqrt{D(E_{r_{\text{ТЭД}}})}$
1. Тепловоз 2ТЭ116У № 078 секция А — 126 замеров							
1	0,0319	4,94	0,0070	0,691	-0,643	0,942	2,057
2	0,0349	5,65	0,0075	0,824	-0,165		
3	0,0329	5,29	0,0073	0,755	-0,489		
4	0,0349	4,97	0,0071	0,671	-0,683		
5	0,0384	5,59	0,0075	0,704	-0,683		
6	0,0357	5,28	0,0073	0,744	-0,539		
2. Тепловоз 2ТЭ116У № 078 секция Б — 79 замеров							
1	0,0349	3,58	0,0060	-0,035	-0,442	0,801	2,508
2	0,0352	4,35	0,0066	0,270	-0,692		
3	0,0364	3,88	0,0062	0,227	-0,739		
4	0,0364	4,26	0,0065	0,075	-0,773		
5	0,0364	4,27	0,0065	0,104	-0,660		
6	0,0374	4,01	0,0063	0,211	0,660		
3. Тепловоз 2ТЭ116У № 079 секция А — 63 замера							
1	0,0412	3,94	0,0063	0,738	0,980	0,890	2,74
2	0,0396	3,98	0,0063	0,716	1,187		
3	0,0353	4,35	0,0066	0,642	-0,099		
4	0,0460	4,83	0,0070	0,608	0,823		
5	0,0398	4,3	0,0066	0,685	1,357		
6	0,0419	4,07	0,0064	0,745	1,755		

Номер тягового двигателя	$\overline{r_{гэд}}$, Ом	$S_{гэд}^2 \cdot 10^{-5}$	$S_{гэд}$	$A_{гэд}$	$E_{гэд}$	$3 \cdot \sqrt{D(A_{гэд})}$	$5 \cdot \sqrt{D(E_{гэд})}$
4. Тепловоз 2ТЭ116У № 080 секция А — 50 замеров							
1	0,0332	8,19	0,0091	0,739	-0,550	0,989	2,987
2	0,0315	7,24	0,0085	0,652	-0,698		
3	0,0339	7,34	0,0086	0,753	-0,658		
4	0,0310	5,42	0,0074	0,612	-0,873		
5	0,0344	5,88	0,0077	0,739	-0,673		
6	0,0427	7,43	0,0086	0,706	-0,855		
5. Тепловоз 2ТЭ116У № 082 секция Б — 86 замеров							
1	0,0305	4,13	0,0064	0,523	0,105	0,770	2,422
2	0,0336	4,52	0,0067	0,698	0,448		
3	0,0306	4,37	0,0066	0,560	0,275		
4	0,0358	5,38	0,0073	0,640	0,705		
5	0,0422	6,59	0,0081	0,450	0,310		
6	0,0357	5,17	0,0072	0,608	0,607		
6. Тепловоз 2ТЭ116У № 107 секция А — 103 замера							
1	0,0274	1,45	0,0038	0,630	0,915	0,707	2,245
2	0,0290	1,52	0,0039	0,218	-0,732		
3	0,0315	2,33	0,0048	-0,180	-0,946		
4	0,0339	1,80	0,0042	0,503	-0,321		
5	0,0308	1,56	0,0039	0,677	0,624		
6	0,0338	1,92	0,0044	0,554	0,396		
7. Тепловоз 2ТЭ116У № 109 секция Б — 116 замеров							
1	0,0318	6,26	0,0079	0,448	-0,815	0,668	2,132
2	0,0360	7,85	0,0089	0,442	-0,619		
3	0,0414	7,10	0,0084	0,485	-0,624		
4	0,0367	7,33	0,0086	0,383	-0,845		
5	0,0380	7,81	0,0088	0,453	-0,649		
6	0,0424	7,88	0,0089	0,424	-0,821		
8. Тепловоз 2ТЭ116У № 110 секция А — 34 замера							
1	0,0337	2,66	0,0052	0,213	-0,973	1,173	3,383
2	0,0368	3,39	0,0058	0,115	-0,899		
3	0,0348	3,15	0,0056	0,204	-0,887		
4	0,0337	2,70	0,0052	-0,014	-1,355		
5	0,0335	2,63	0,0051	0,014	-1,265		
6	0,0373	3,24	0,0057	0,108	-1,228		

Номер тягового двигателя	$\overline{r_{гэд}}$, Ом	$S_{гэд}^2 \cdot 10^{-5}$	$S_{гэд}$	$A_{гэд}$	$E_{гэд}$	$3 \cdot \sqrt{D(A_{гэд})}$	$5 \cdot \sqrt{D(E_{гэд})}$
9. Тепловоз 2ТЭ116У № 124 секция Б — 40 замеров							
1	0,0337	4,35	0,0066	0,807	-0,144	1,093	3,221
2	0,0329	4,04	0,0064	0,715	-0,164		
3	0,0311	2,78	0,0053	0,625	-0,369		
4	0,0353	3,34	0,0058	0,417	-0,338		
5	0,0329	3,11	0,0056	0,307	-0,205		
6	0,0353	3,47	0,0059	0,455	-0,189		
10. Тепловоз 2ТЭ116У № 135 секция А — 42 замера							
1	0,0319	4,3	0,0066	0,206	-0,587	1,070	3,171
2	0,0365	5,36	0,0073	0,382	-0,634		
3	0,0401	5,41	0,0074	0,275	-0,609		
4	0,0446	5,88	0,0077	0,381	-0,223		
5	0,0450	5,97	0,0077	0,250	-0,408		
6	0,0350	4,92	0,0070	0,372	-0,351		
11. Тепловоз 2ТЭ116У № 143 секция А — 125 замеров							
1	0,0296	4,83	0,0069	0,578	1,286	0,644	2,064
2	0,0307	4,57	0,0068	0,601	1,680		
3	0,0303	4,66	0,0068	0,510	1,205		
4	0,0320	5,04	0,0071	0,557	1,189		
5	0,0302	4,92	0,0070	0,448	0,944		
6	0,0328	5,95	0,0077	0,500	1,039		
12. Тепловоз 2ТЭ116У № 143 секция Б — 66 замеров							
1	0,0325	2,77	0,0053	0,742	0,458	0,871	2,695
2	0,0265	2,03	0,0045	0,583	-0,519		
3	0,0323	3,15	0,0056	0,807	0,786		
4	0,0329	3,11	0,0056	0,809	0,017		
5	0,0387	4,04	0,0064	0,729	0,953		
6	0,0346	3,42	0,0058	0,602	1,277		
13. Тепловоз 2ТЭ116У № 154 секция А — 155 замеров							
1	0,0313	6,06	0,0078	0,561	0,358	0,581	1,875
2	0,0339	6,02	0,0078	0,505	0,444		
3	0,0303	6,13	0,0078	0,421	0,460		
4	0,0349	5,84	0,0076	0,494	0,285		
5	0,0318	5,56	0,0075	0,558	0,145		
6	0,0341	5,54	0,0074	0,428	0,470		

Номер тягового двигателя	$\overline{r_{\text{ТЭД}}}$, Ом	$S_{r_{\text{ТЭД}}}^2 \cdot 10^{-5}$	$S_{r_{\text{ТЭД}}}$	$A_{r_{\text{ТЭД}}}$	$E_{r_{\text{ТЭД}}}$	$3 \cdot \sqrt{D(A_{r_{\text{ТЭД}}})}$	$5 \cdot \sqrt{D(E_{r_{\text{ТЭД}}})}$
14. Тепловоз 2ТЭ116У № 154 секция Б — 113 замеров							
1	0,0376	5,55	0,0074	0,533	0,087	0,676	2,157
2	0,0316	5,15	0,0072	0,562	0,193		
3	0,0321	5,33	0,0073	0,499	-0,028		
4	0,0315	4,73	0,0069	0,668	0,107		
5	0,0320	4,83	0,0069	0,533	0,615		
6	0,0346	4,89	0,0070	0,403	0,139		

ТАБЛИЦА 3. Результаты статистической обработки определения сопротивления цепи ТЭД тепловозов ТЭП70БС

Номер тягового двигателя	$\overline{r_{\text{ТЭД}}}$, Ом	$S_{r_{\text{ТЭД}}}^2 \cdot 10^{-5}$	$S_{r_{\text{ТЭД}}}$	$A_{r_{\text{ТЭД}}}$	$E_{r_{\text{ТЭД}}}$	$3 \cdot \sqrt{D(A_{r_{\text{ТЭД}}})}$	$5 \cdot \sqrt{D(E_{r_{\text{ТЭД}}})}$
1. Тепловоз ТЭП70БС № 176 — 149 замеров							
1	0,0441	7,09	0,0084	0,519	-1,053	0,592	1,909
2	0,0442	7,51	0,0087	0,494	-1,071		
3	0,0429	7,03	0,0084	0,515	-1,026		
4	0,0461	7,92	0,0089	0,484	-0,957		
5	0,0488	7,98	0,0089	0,478	-1,061		
6	0,0444	6,31	0,0079	0,553	-1,032		
2. Тепловоз ТЭП70БС № 182 — 160 замеров							
1	0,0461	7,83	0,0088	-0,205	-1,133	0,572	1,848
2	0,0453	7,11	0,0084	-0,176	-1,164		
3	0,0455	7,42	0,0086	-0,218	-1,136		
4	0,0487	7,5	0,0087	-0,238	-1,119		
5	0,0478	6,96	0,0083	-0,172	-1,118		
6	0,0498	7,86	0,0089	-0,217	-1,122		
3. Тепловоз ТЭП70БС № 183 — 113 замеров							
1	0,0413	6,56	0,0081	-0,091	-1,283	0,676	2,157
2	0,0397	6,28	0,0079	-0,070	-1,311		
3	0,0401	6,27	0,0079	-0,075	-1,300		
4	0,0424	6,29	0,0079	-0,079	-1,305		
5	0,0432	6,71	0,0082	-0,074	-1,305		
6	0,0450	6,56	0,0081	-0,092	-1,266		

Номер тягового двигателя	$\overline{r_{\text{ТЭД}}}$, Ом	$S_{r_{\text{ТЭД}}}^2 \cdot 10^{-5}$	$S_{r_{\text{ТЭД}}}$	$A_{r_{\text{ТЭД}}}$	$E_{r_{\text{ТЭД}}}$	$3 \cdot \sqrt{D(A_{r_{\text{ТЭД}}})}$	$5 \cdot \sqrt{D(E_{r_{\text{ТЭД}}})}$
4. Тепловоз ТЭП70БС № 234 — 306 замеров							
1	0,0383	8,45	0,0092	0,708	-0,854	0,417	6,016
2	0,0385	7,94	0,0089	0,661	-0,931		
3	0,0372	7,69	0,0088	0,671	-0,932		
4	0,0405	7,50	0,0087	0,695	-0,843		
5	0,0408	8,50	0,0092	0,671	-0,906		
6	0,0431	8,40	0,0092	0,691	-0,838		
5. Тепловоз ТЭП70БС № 325 — 40 замеров							
1	0,0411	6,42	0,0080	0,065	-1,326	1,093	3,221
2	0,0414	6,71	0,0082	0,121	-1,265		
3	0,0415	6,61	0,0081	0,093	-1,276		
4	0,0464	7,82	0,0088	0,051	-1,247		
5	0,0459	7,05	0,0084	0,081	-1,291		
6	0,0459	6,84	0,0083	0,041	-1,258		
6. Тепловоз ТЭП70БС № 327 — 156 замеров							
1	0,0390	10,10	0,0100	0,312	-1,407	0,579	1,870
2	0,0381	9,82	0,0099	0,300	-1,411		
3	0,0391	10,10	0,0101	0,296	-1,389		
4	0,0406	9,84	0,0099	0,317	-1,357		
5	0,0409	10,70	0,0104	0,274	-1,371		
6	0,0423	10,80	0,0104	0,304	-1,391		

Как следует из приведенных в табл. 2 показателей, в большинстве случаев результаты косвенного определения сопротивления цепи ТЭД для тепловозов 2ТЭ116У имеют нормальное распределение с математическим ожиданием $r_{\text{ТЭД}}$ от 0,0274 до 0,0460 Ом. Представленные для тепловозов ТЭП70БС в табл. 3 результаты косвенного определения сопротивления цепи ТЭД также подтверждают нормальное распределение с математическим ожиданием $r_{\text{ТЭД}}$ от 0,0372 до 0,0488 Ом.

Математическое ожидание и дисперсия сопротивления цепи для всей выборки ТЭД по сериям тепловозов составят [12]:

$$\overline{r_{\text{ТЭД}i}} = \frac{\sum_{i=1}^m (n_i \cdot \overline{r_{\text{ТЭД}i}})}{\sum_{i=1}^m n_i}; \quad (12)$$

$$S_{r_{\text{ТЭД}}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^m ((n_i - 1) \cdot S_{r_{\text{ТЭД}i}}^2)}{\sum_{i=1}^m n_i - m}, \quad (13)$$

где m — число подконтрольных тяговых двигателей (84 для 2ТЭ116У и 36 для ТЭП70БС).

Для тепловозов 2ТЭ116У (табл. 2) эти значения равны, соответственно 0,0343 Ом и $4,88 \cdot 10^{-5}$ Ом², для тепловозов ТЭП70БС (табл. 3) — 0,0423 Ом и $7,96 \cdot 10^{-5}$ Ом².

Статистические характеристики полной выборки параметров ТЭД могут использоваться в качестве эталонных значений при контроле работоспособности силовой цепи тепловоза. Согласно известному правилу «двух сигм», значение сопротивления цепи ТЭД с вероятностью не менее 95 % должно находиться в пределах $r_{\text{ТЭД}i} \pm 2 \cdot S_{r_{\text{ТЭД}i}}$, что для тепловозов 2ТЭ116У составляет от 0,0203 до 0,0483 Ом, для тепловозов ТЭП70БС — от 0,0240 до 0,0602 Ом. Попадание сопротивления в эти пределы свидетельствует о работоспособном состоянии цепи.

Выводы

1. В работе предложена методика определения сопротивления цепи ТЭД тепловоза на основе статистического анализа данных микропроцессорных систем управления.

2. Сопротивление цепи ТЭД тепловоза является случайной величиной с нормальным законом распределения.

3. С вероятностью не менее 95 % значение сопротивления цепи ТЭД тепловозов 2ТЭ116У должно находиться в пределах от 0,0203 до 0,0483 Ом, тепловозов ТЭП70БС — от 0,0240 до 0,0602 Ом.

Работа выполнена в рамках гранта ОАО «РЖД» на развитие научно-педагогических школ в области железнодорожного транспорта.

Библиографический список

1. Перминов В. А. Влияние технического состояния вспомогательного оборудования тепловозов на их энергоэффективность в эксплуатации / В. А. Перминов, В. В. Грачев, Д. Н. Курилкин и др. // Вестник научно-исследовательского и конструкторско-технологического института подвижного состава. — 2015. — № 97. — С. 45–58.

2. Клименко Ю. И. Влияние параметрических отказов оборудования тепловозов на его энергоэффективность в эксплуатации / Ю. И. Клименко, В. А. Перминов, В. В. Грачев и др. // Локомотив. — 2017. — № 4. — С. 40–45.
3. Перминов В. А. Оперативный контроль уровня энергоэффективности магистрального тепловоза рабочего парка / В. А. Перминов, М. В. Федотов, В. В. Грачев и др. // Вестник научно-исследовательского и конструкторско-технологического института подвижного состава. — 2015. — № 97. — С. 45–58.
4. Разработка показателей энергоэффективности тепловозов и методик их определения. Экспериментальные исследования по определению показателя энергоэффективности локомотивов (ПЭЛ) для оценки качества ремонта тепловозов (на примере тепловозов 2ТЭ116У, ТЭП70БС, ТЭМ18ДМ): техн. отчет № 27-2014-19, ОАО «ВНИКТИ»; рук. работы В. А. Перминов. — Коломна, 2014. — 175 с.
5. Правила тяговых расчетов для поездной работы. Утверждены распоряжением ОАО «РЖД» от 12 мая 2016 г. № 867р.
6. Гаккель Е. Я. Электрические машины и электрооборудование тепловозов: учебник для вузов ж. д. транспорта / Е. Я. Гаккель, К. И. Рудая, И. Ф. Пушкарев и др.; под. ред. Е. Я. Гаккель. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Транспорт, 1981. — 256 с.
7. Кацман М. М. Электрические машины: учеб. для средних проф. заведений. — 3-е изд., испр. — М.: Высш. шк.; Издательский центр «Академия», 2001. — 463 с.
8. ГОСТ 2582—2013. Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия.
9. Грищенко А. В. Новые электрические машины локомотивов: учебное пособие для вузов железнодорожного транспорта / А. В. Грищенко, Е. В. Казаченко. — М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2008. — 271 с.
10. Абусеридзе З. В. Исследование физических процессов проводимости щеточного контакта машин постоянного тока / З. В. Абусеридзе // Электричество. — 2010. — № 2. — С. 41–46.
11. Пустыльник Е. И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений / Е. И. Пустыльник. — М.: Наука, 1968 — 288 с.
12. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учебное пособие для вузов / В. Е. Гмурман. — М.: Высш. шк., 2003 — 479 с.

Дата поступления: 18.10.2022

Решение о публикации: 31.10.2022

Контактная информация:

КУРИЛКИН Дмитрий Николаевич — канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой;
kurilkin@pgups.ru

ГРАЧЕВ Владимир Васильевич — д-р техн. наук, доц., проф.; lt@pgups.ru

ТАНАЕВ Валерий Фаритович — начальник Московской железной дороги — филиала
ОАО «РЖД»; lt@pgups.ru

Defining Resistance in Traction Motor Circuit According to Microprocessor Control System Data

D. N. Kurilkin¹, V. V. Grachev¹, V. F. Tanaev²

¹Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

²Moscow Railway — branch of JSC “Russian Railways”, Russian Federation, 107996, Moscow, Krasnoprudnaya str., 20

For citation: Kurilkin D. N., Grachev V. V., Tanaev V. F. Defining Resistance in Traction Motor Circuit According to Microprocessor Control System Data. *Bulletin of scientific research results*, 2022, iss. 4, pp. 74–89. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2022-4-74-89

Summary

Purpose: To develop methodology for determining the actual resistance of traction electric drive (TED) circuits of a locomotive with electric power transmission and with refined calculation of voltage losses of a collector-brush apparatus according to microprocessor control system data. These data are necessary for calculating actual traction characteristics of a locomotive as well as its braking characteristics in electric braking modes. **Methods:** Methods of electric machine theory, statistical processing and regression analysis of experimental data were used. **Results:** Based on the statistical analysis of registration data of on-board diagnostics subsystem of 20 sections of 2TE116U and TEP70BS diesel locomotives, methods for determining resistance factual value for traction electric drive circuit as well as methods of refined calculation for voltage losses in a collector-brush apparatus are proposed and justified. The hypothesis on distribution normal law for the value of resistance and the possibility to use its mathematical expectation as an estimated value is confirmed. The limits of resistance possible changes for TED circuits of diesel locomotives 2TE116U and TEP70BS have been established. **Practical importance:** The results obtained allow us to clarify energy loss amounts in a locomotive traction drive when calculating its traction and braking characteristics. Data on the limits, allowed in exploitation, of active resistance change for TED serviceable chains may be used for operative diagnostics of locomotive power circuit.

Keywords: Traction drive circuit chain, electric losses in traction drives, traction drive efficiency, traction drive.

References

1. Perminov V. A., Grachev V. V., Kurilkin D. N. Vliyanie tekhnicheskogo sostoyaniya vspomogatel'nogo oborudovaniya teplovozov na ikh energoeffektivnost' v ekspluatatsii [The influence of the technical condition of auxiliary equipment of locomotives on their energy efficiency in operation]. *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo i konstruktorsko-tehnologicheskogo instituta podvizhnogo sostava* [Bulletin of the Research and Design-Technological Institute of Rolling Stock]. 2015, I. 97, pp. 45–58. (In Russian)
2. Klimenko Yu. I., Perminov V. A., Grachev V. V. Vliyanie parametricheskikh otkazov oborudovaniya teplovozov na ego energoeffektivnost' v ekspluatatsii [Influence of parametric failures of diesel locomotive equipment on its energy efficiency in operation]. *Lokomotiv* [Locomotive]. — 2017, I. 4, pp. 40–45. (In Russian)
3. Perminov V. A., Fedotov M. V., Grachev V. V. Operativnyy kontrol' urovnya energoeffektivnosti magistral'nogo teplovoza rabocheho parka [Operational control of the energy efficiency level of the

main diesel locomotive of the working park]. *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo i konstruktorsko-tekhnologicheskogo instituta podvizhnogo sostava* [Bulletin of the Research and Design-Technological Institute of Rolling Stock]. 2015, I. 97, pp. 45–58. (In Russian)

4. *Razrabotka pokazateley energoeffektivnosti teplovozov i metodik ikh opredeleniya. Eksperimental'nye issledovaniya po opredeleniyu pokazatelya energoeffektivnosti lokomotivov (PEL) dlya otsenki kachestva remonta teplovozov (na primere teplovozov 2TE116U, TEP70BS, TEM18DM): tekhn. otchet № 27-2014-19, OAO "VNIKTI"; ruk. raboty V. A. Perminov* [Development of indicators of diesel locomotives' energy efficiency and methods of their determination. Experimental studies to determine the energy efficiency index of locomotives (PEL) to assess the quality of repair of locomotives (using the example of diesel locomotives 2TE116U, TEP70BS, TEM18DM): tech. Report № 27-2014-19, JSC "VNIKTI"; work manager V. A. Perminov]. Kolomna, 2014, 175 p. (In Russian)

5. *Pravila tyagovykh raschetov dlya poezdnoy raboty. Utverzhdeny rasporyazheniem OAO "RZhD" ot 12 maya 2016 g. № 867r.* [Rules for traction calculations for train operation. Approved by order of Russian Railways OJSC dated May 12, 2016 № 867r]. (In Russian)

6. Gakkel E. Ya., Rudaya K. I., Pushkarev I. F. *Elektricheskie mashiny i elektrooborudovanie teplovozov: uchebnik dlya vuzov zh. d. transporta* [Electric machines and electric equipment of locomotives. Textbook for universities railway transport]. Moscow: Transport Publ., 1981, 256 p. (In Russian)

7. Katsman M. M. *Elektricheskie mashiny: ucheb. dlya srednikh prof. zavedeniy* [Electric machines: Studies for secondary Prof. institutions]. Moscow: Vyssh. shk.; Izdatel'skiy tsentr "Akademiya", 2001, 463 p. (In Russian)

8. *GOST 2582—2013. Mashiny elektricheskie vrashchayushchiesya tyagovye. Obshchie tekhnicheskie usloviya* [GOST 2582—2013. Electric rotating traction machines. General technical conditions]. (In Russian)

9. Grishchenko A. V., Kazachenko E. V. *Novye elektricheskie mashiny lokomotivov: uchebnoe posobie dlya vuzov zheleznodorozhnogo transporta* [New electric machines of locomotives: A textbook for railway transport universities]. Moscow: GOU "Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte" Publ., 2008, 271 p.

10. Abuseridze Z. V. *Issledovanie fizicheskikh protsessov provodimosti shchetohnogo kontakta mashin postoyannogo toka* [Investigation of physical processes of brush contact conductivity of DC machines]. *Elektrichestvo* [Electricity]. 2010, I. 2, pp. 41–46. (In Russian)

11. Pustynnik E. I. *Statisticheskie metody analiza i obrabotki nablyudeniy* [Statistical methods of analysis and processing of observations]. Moscow: Nauka Publ., 1968, 288 p. (In Russian)

12. Gmurman V. E. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika: uchebnoe posobie dlya vuzov* [Probability theory and mathematical statistics: A textbook for universities]. Moscow: Vyssh. shk. Publ., 2003, 479 p. (In Russian)

Received: October 18, 2022

Accepted: October 31, 2022

Author's information:

Dmitry N. KURILKIN — PhD in Engineering, Associate Professor, Department Head; kurilkin@pgups.ru

Vladimir V. GRACHEV — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor, Professor; lt@pgups.ru

Valery F. TANAEV — Head of Moscow Railway — Branch of JSC "Russian Railways"; lt@pgups.ru