

Д. Н. Курилкин, В. В. Грачев, В. Ф. Танаев

РАСЧЕТ НАГРУЗОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПО ДАННЫМ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И ДИАГНОСТИКИ*

Аннотация. Фактические нагрузочные характеристики тяговых электродвигателей локомотива с электрической передачей мощности по данным микропроцессорных систем управления необходимы для уточнения реальных тяговых характеристик локомотивов при выполнении оперативных тяговых расчетов. В работе использовались методы теории электрических машин, статистической обработки и регрессионного анализа экспериментальных данных. На основании статистического анализа данных регистрации подсистемы бортовой диагностики 20 секций тепловозов 2ТЭ116У и ТЭП70БС предложена и обоснована методика определения фактических нагрузочных характеристик тяговых электродвигателей. Полученные результаты позволяют уточнить параметры тяговой характеристики локомотива и могут использоваться при выполнении оперативных тяговых расчетов.

Ключевые слова: нагрузочные характеристики тяговых двигателей, тяговые электродвигатели, тяговый привод.

Для цитирования: Курилкин, Д. Н. Расчет нагрузочных характеристик тяговых электродвигателей постоянного тока по данным микропроцессорных систем управления и диагностики / Д. Н. Курилкин, В. В. Грачев, В. Ф. Танаев // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2. – С. 124–131. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_124.

Введение

Одной из причин, снижающих достоверность тяговых расчетов, является отсутствие информации о реальных тяговых свойствах локомотивов, которые во многом определяются нагрузочными характеристиками тяговых электродвигателей (ТЭД). Их различия, обусловленные как разбросом параметров магнитных и электрических цепей электродвигателей, так и разницей диаметров колесных пар, являются одним из факторов, влияющих на равномерность распределения токов якорных обмоток и вращающих моментов, параллельно работающих ТЭД.

В настоящее время при выполнении тяговых расчетов, в том числе при поиске энергооптимальных режимов ведения поезда, используются паспортные характеристики тяговых электродвигателей, приведенные в заводской документации или Правилах тяговых расчетов [1], не учитывающие их реального технического состояния. В то же время 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, в том числе ТЭД [2, 3].

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

В статье предлагается методика определения фактических нагрузочных характеристик ТЭД по данным микропроцессорных систем управления, приведены результаты ее апробации применительно к тепловозам серии 2ТЭ116У и ТЭП70БС.

Методика расчета

Нагрузочная характеристика электрической машины постоянного тока (рис. 1) представляет собой зависимость [4, 5]:

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

$$\left(\frac{E}{\omega}\right) = f(I_{об}, I),$$

где E – ЭДС тягового двигателя; ω – угловая скорость вращения якоря ТЭД; I и $I_{об}$ – токи в обмотках якоря и возбуждения ТЭД.

Ток обмотки возбуждения $I_{об}$ связан с током якоря I соотношением

$$I_{об} = \alpha \cdot I,$$

где α – степень ослабления возбуждения, которая при двухступенчатом ослаблении возбуждения может принимать три возможных значения:

- отсутствие ослабления возбуждения ($\alpha = 1$);
- ослабление возбуждения первой ступени ($\alpha = \alpha_{об1}$);
- ослабление возбуждения второй ступени ($\alpha = \alpha_{об2}$).

В этом случае для каждой ступени ослабления возбуждения нагрузочная характеристика ТЭД последовательного возбуждения (см. рис. 1, линии красного, синего и зеленого цвета) может быть представлена функцией тока якоря, что существенно упрощает ее расчет по данным систем непрерывного мониторинга параметров силовой цепи локомотива.

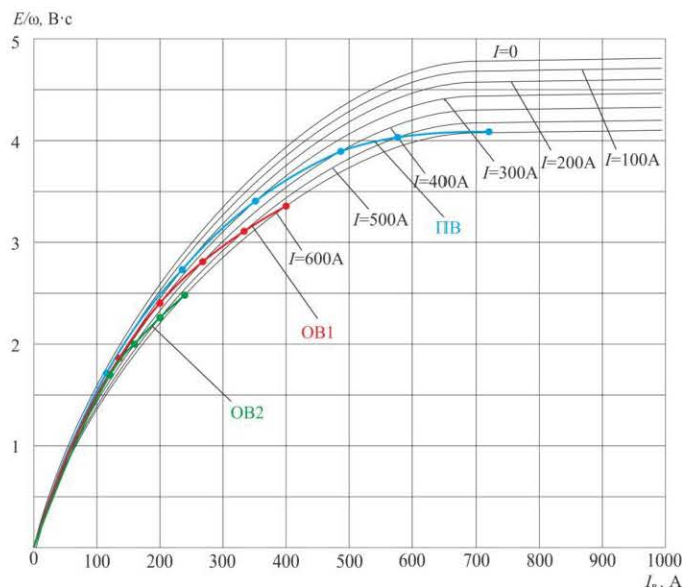


Рис. 1. Нагрузочная характеристика тягового двигателя с нанесенными линиями нагружения:

ПВ – линия нагружения при полном возбуждении; ОБ1 – линия нагружения при ослабленном возбуждении первой ступени; ОБ2 – линия нагружения при ослабленном возбуждении второй ступени

Из объема данных, регистрируемых микропроцессорными системами управления локомотива, для расчета характеристики выбираются записи, соответствующие движению локомотива в режиме тяги со скоростью не ниже 10 км/ч, при токе якоря ТЭД – не менее 200 А на каждой из ступеней ослабления возбуждения. При этом для каждого ТЭД фиксируется ток якоря I , мгновенное значение напряжения U , угловая скорость вращения колесной пары $\omega_{кп}$.

При известном мгновенном значении напряжения U , приложенного к цепи ТЭД, и тока I в якорной обмотке мгновенное значение его ЭДС определяется по формуле

$$E = U - I \cdot \overline{r_{ТЭД}} - 2 \cdot \Delta U_{щ}, \quad (1)$$

где $\overline{r_{ТЭД}}$ – математическое ожидание сопротивления цепи якоря тягового двигателя, Ом; $\Delta U_{щ}$ – падение напряжения в месте контакта щетки с коллектором, В.

Порядок определения значений $\overline{r_{ТЭД}}$ и $\Delta U_{щ}$ был рассмотрен в работе [6].

Мгновенное значение угловой скорости вращения якоря ТЭД ω связано с $\omega_{\text{кп}}$ передаточным отношением тягового редуктора μ : $\omega = \omega_{\text{кп}} \cdot \mu$.

Результаты расчета $\left(\frac{E}{\omega}\right) = f(I)$ для первого ТЭД тепловоза 2ТЭ116У № 078 секция А и разных ступеней ослабления возбуждения приведены на рис. 2, а для тепловоза ТЭП70БС № 176 – на рис. 3 точками разного цвета для каждой из ступеней.

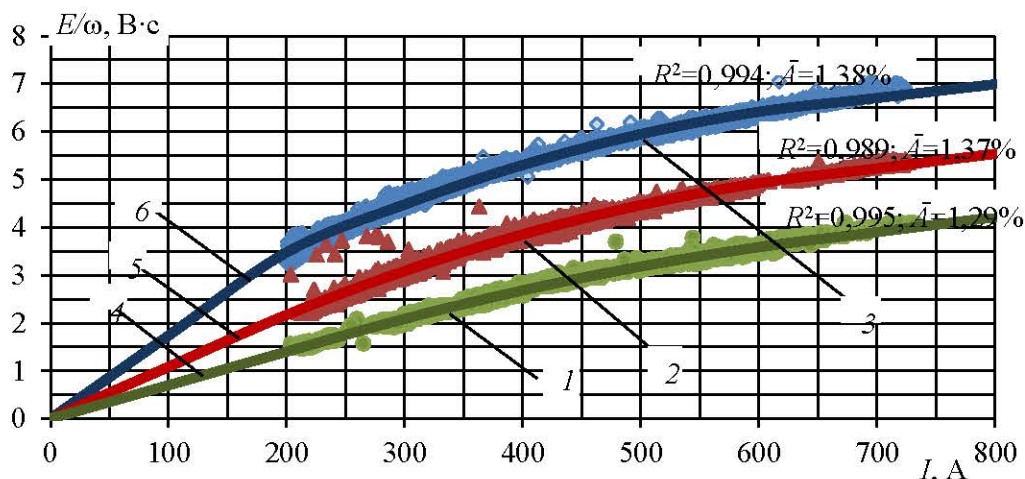


Рис. 2. Нагрузочная характеристика первого ТЭД тепловоза 2ТЭ116У № 078 секция А: 1–3 – измеренные нагрузочные характеристики при ослабленном возбуждении второй ступени, ослабленном возбуждении первой ступени и полном возбуждении соответственно; 4–6 – расчетные (аппроксимированные) нагрузочные характеристики для ослабленного возбуждения второй ступени, первой ступени и полного возбуждения соответственно; R^2 – коэффициент детерминации расчетной нагрузочной характеристики; \bar{A} – средняя ошибка аппроксимации расчетной нагрузочной характеристики (%)

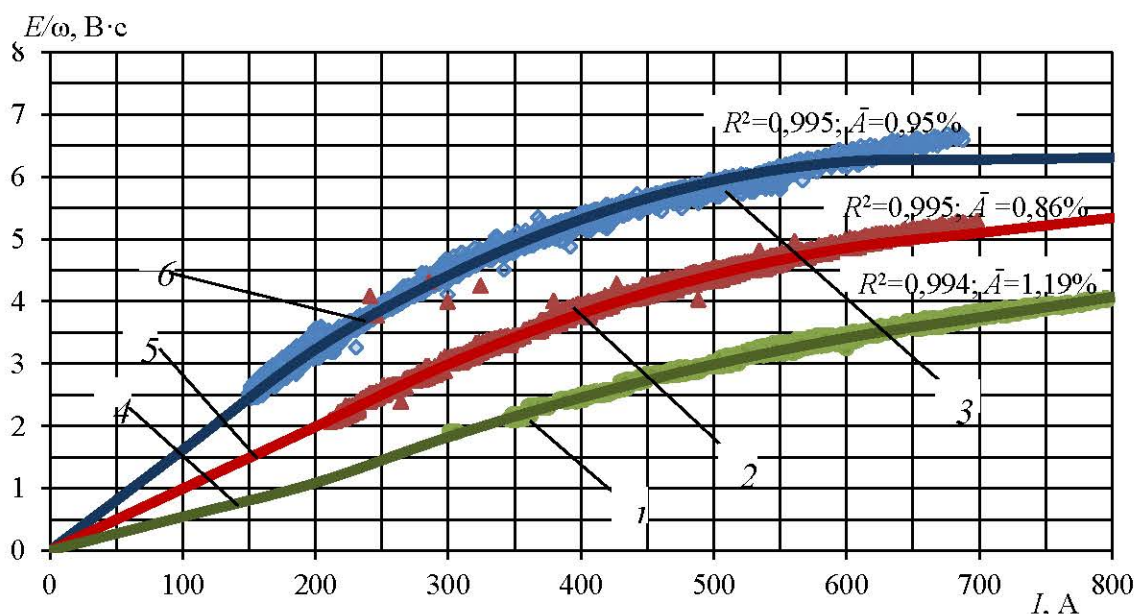


Рис. 3. Нагрузочная характеристика первого ТЭД тепловоза ТЭП70БС № 176: 1–3 – измеренные нагрузочные характеристики при ослабленном возбуждении второй ступени, ослабленном возбуждении первой ступени и полном возбуждении соответственно; 4–6 – расчетные (аппроксимированные) нагрузочные характеристики для ослабленного возбуждения второй ступени, первой ступени и полного возбуждения соответственно; R^2 – коэффициент детерминации расчетной нагрузочной характеристики; \bar{A} – средняя ошибка аппроксимации расчетной нагрузочной характеристики (%)

Для упрощения и повышения точности аппроксимации нагрузочной характеристики $\left(\frac{E}{\omega}\right) = f(I)$ (рис. 2 и 3) в ней могут быть выделены три участка:

– участок, соответствующий значениям тока якоря от $I_{\min} = 200$ А до $I_{\max} = 700$ А, который может быть аппроксимирован полиномом второго порядка вида

$$\left(\frac{E}{\omega}\right) = A \cdot I^2 + B \cdot I + C, \quad (2)$$

где A, B, C – постоянные коэффициенты;

– участок характеристики с токами якоря менее минимального I_{\min} , редко используемый в эксплуатации, для аппроксимации которого можно принять линейную зависимость вида

$$\left(\frac{E}{\omega}\right) = \left(\frac{E}{\omega}\right)_{\min} \cdot \frac{I}{I_{\min}}, \quad (3)$$

где $\left(\frac{E}{\omega}\right)_{\min}$ – значение отношения $\left(\frac{E}{\omega}\right)$, полученное по зависимости (2) при минимальном токе якоря;

– участок характеристики с токами якоря более максимального I_{\max} , также редко используемый в режимах нормальной эксплуатации локомотивов вследствие насыщения магнитной системы тягового двигателя и обусловленного им увеличения потерь, может быть экстраполировано зависимостью вида:

$$\left(\frac{E}{\omega}\right) = \left(\frac{E}{\omega}\right)_{\max} + \frac{(I - I_{\max})}{I_{\max} - I_*} \cdot \left[\left(\frac{E}{\omega}\right)_{\max} - \left(\frac{E}{\omega}\right)_* \right], \quad (4)$$

где I_* – ток якоря, на 100 А меньше максимального; $\left(\frac{E}{\omega}\right)_{\max}$ и $\left(\frac{E}{\omega}\right)_*$ – отношение $\left(\frac{E}{\omega}\right)$, полученные по зависимости (2) при токах якоря I_{\max} и I_* соответственно.

Коэффициенты аппроксимации для выражения (2) определяются с использованием метода наименьших квадратов [7], для оценки качества аппроксимации используется коэффициент детерминации R^2 и средняя ошибка аппроксимации \bar{A} (%) [7].

Результаты расчета

Была выполнена аппроксимация нагрузочных характеристик ТЭД 14 секций тепловозов 2ТЭ116У и шести тепловозов ТЭП70БС, часть результатов которой приведена в табл. 1 и 2.

При расчете использовались значения сопротивлений цепи тяговых двигателей, полученные в работе [6].

На рис. 2 приведены результаты аппроксимации характеристики первого ТЭД тепловоза при разных степенях ослабления возбуждения (сплошные линии).

Аналогичные результаты для первого ТЭД тепловоза ТЭП70БС № 176 приведены на рис. 3.

Как следует из данных табл. 1 и 2, а также рис. 3 и 4, величина коэффициента детерминации R^2 составляет не менее 0,93, а ошибка аппроксимации не превышает 3 % на всех степенях ослабления возбуждения.

На рис. 4 представлены нагрузочные характеристики шести ТЭД тепловоза 2ТЭ116У № 078 секция А, на рис. 5 – нагрузочные характеристики шести ТЭД тепловоза ТЭП70БС № 176 при полном возбуждении и двух степенях ослабления возбуждения ТЭД.

Как следует из рис. 4 и 5, при одном и том же значении магнитного потока (отношении E/ω) разброс токов ТЭД одной секции даже при полном возбуждении может достигать 15 % и более, что необходимо учитывать при расчете тяговой характеристики тепловоза.

Таблица 1

Параметры нагрузочных характеристик ТЭД тепловозов 2ТЭ116У

№ ТЭД	Полное возбуждение					Ослабленное возбуждение первой ступени					Ослабленное возбуждение второй ступени				
	$A \cdot 10^{-6}$	B	C	R^2	\bar{A} (%)	$A \cdot 10^{-6}$	B	C	R^2	\bar{A} (%)	$A \cdot 10^{-6}$	B	C	R^2	\bar{A} (%)
1 Тепловоз 2ТЭ116У № 078 секция А															
-	Число записей 16650					Число записей 12086					Число записей 12144				
1	-8,94	0,0145	0,933	0,994	1,07	-7,64	0,0130	-0,125	0,989	1,37	-4,67	0,0092	-0,251	0,995	1,29
2	-7,99	0,0133	1,187	0,993	1,26	-6,33	0,0113	0,361	0,973	2,35	-6,98	0,0108	-0,411	0,977	2,76
3	-8,76	0,0144	0,911	0,995	1,06	-6,84	0,0123	-0,070	0,990	1,41	-4,30	0,0088	-0,272	0,995	1,28
4	-7,65	0,0131	1,056	0,994	1,19	-6,92	0,0120	0,083	0,987	1,65	-5,20	0,0095	-0,267	0,994	1,42
5	-8,44	0,0140	0,965	0,993	1,33	-7,62	0,0129	-0,063	0,990	1,34	-4,53	0,0090	-0,135	0,994	1,24
6	-7,81	0,0135	1,001	0,992	1,38	-7,49	0,0129	-0,163	0,987	1,59	-3,99	0,0085	-0,128	0,992	1,51
2 Тепловоз 2ТЭ116У № 078 секция Б															
-	Число записей 13721					Число записей 8742					Число записей 19359				
1	-8,01	0,0138	0,928	0,993	1,19	-6,72	0,0123	-0,040	0,990	1,58	-3,75	0,0084	-0,140	0,988	1,77
2	-7,66	0,0137	0,961	0,983	1,90	-6,57	0,0123	-0,019	0,982	2,23	-3,86	0,0087	-0,180	0,971	3,00
3	-7,61	0,0133	0,965	0,991	1,43	-6,09	0,0116	0,040	0,990	1,62	-3,65	0,0081	-0,098	0,990	1,56
4	-8,12	0,0135	1,076	0,994	1,14	-7,34	0,0125	0,108	0,988	1,96	-5,41	0,0098	-0,222	0,989	1,68
5	-8,26	0,0138	0,984	0,993	1,21	-6,96	0,0123	0,027	0,992	1,50	-4,53	0,0091	-0,237	0,991	1,52
6	-8,35	0,0140	0,962	0,993	1,19	-7,09	0,0126	-0,030	0,992	1,53	-4,55	0,0092	-0,296	0,990	1,58

Таблица 2

Параметры нагрузочных характеристик ТЭД тепловозов ТЭП7БС

№ ТЭД	Полное возбуждение					Ослабленное возбуждение первой ступени					Ослабленное возбуждение второй ступени				
	$A \cdot 10^{-6}$	B	C	R^2	\bar{A} (%)	$A \cdot 10^{-6}$	B	C	R^2	\bar{A} (%)	$A \cdot 10^{-6}$	B	C	R^2	\bar{A} (%)
1 Тепловоз ТЭП7БС № 176															
-	Число записей 10860					Число записей 9506					Число записей 4862				
1	-14,45	0,0191	-0,013	0,995	0,95	-9,53	0,0148	-0,591	0,995	0,86	-5,10	0,0099	-0,688	0,994	1,19
2	-14,90	0,0196	-0,100	0,994	1,07	-9,70	0,0151	-0,564	0,993	1,40	-5,98	0,0109	-0,799	0,971	1,33
3	-14,52	0,0192	0,007	0,994	1,18	-9,56	0,0150	-0,526	0,993	1,15	-5,77	0,0107	-0,746	0,973	1,26
4	-14,70	0,0194	-0,076	0,995	0,97	-9,70	0,0151	-0,629	0,996	0,82	-5,57	0,0106	-0,878	0,989	1,44
5	-14,29	0,0189	0,027	0,995	1,13	-9,00	0,0144	-0,513	0,997	1,09	-5,00	0,0099	-0,703	0,993	1,63
6	-13,43	0,0184	0,057	0,995	1,54	-8,06	0,0136	-0,457	0,996	1,15	-4,25	0,0090	-0,577	0,992	1,47
2 Тепловоз ТЭП7БС № 182															
-	Число записей 20678					Число записей 26045					Число записей 8082				
1	-1,72	0,0206	-0,164	0,996	1,72	-9,63	0,0147	-0,509	0,984	1,59	-5,57	0,0102	-0,645	0,961	1,66
2	-1,77	0,0209	-0,278	0,994	1,16	-8,47	0,0137	-0,280	0,965	1,35	-11,01	0,0153	-1,789	0,893	2,73
3	-1,77	0,0211	-0,342	0,992	1,20	-10,43	0,0153	-0,578	0,951	1,41	-13,98	0,0177	-2,146	0,883	2,62
4	-1,78	0,0212	-0,375	0,996	1,73	-9,61	0,0148	-0,594	0,990	1,59	-6,09	0,0109	-0,982	0,962	2,44
5	-1,80	0,0213	-0,327	0,993	1,47	-12,28	0,0168	-0,861	0,965	1,37	-6,42	0,0102	-0,474	0,849	2,79
6	-1,72	0,0209	-0,287	0,994	1,51	-12,92	0,0174	-1,012	0,967	1,49	-6,78	0,0106	-0,606	0,857	1,82

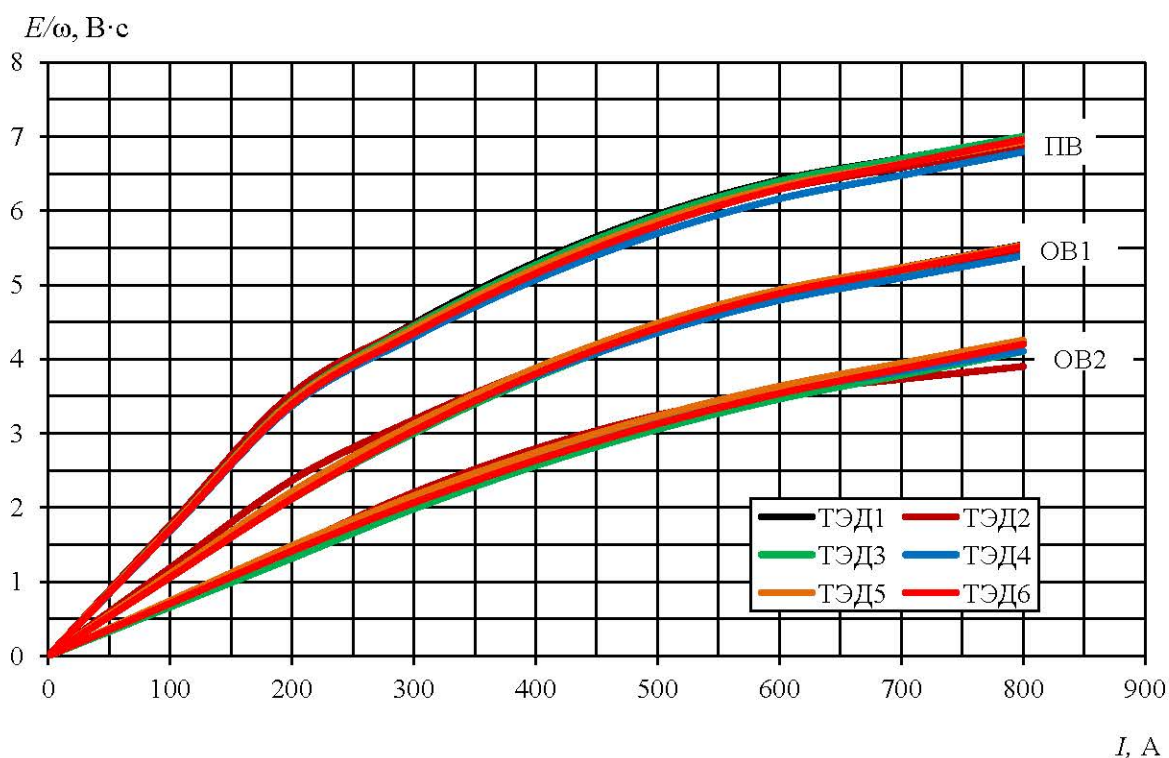


Рис. 4. Нагрузочные характеристики ТЭД тепловоза 2ТЭ116У № 078 секция А:
ТЭД1-ТЭД6 – нагрузочные характеристики 1–6 тяговых двигателей при полном возбуждении (ПВ),
ослабленном возбуждении первой (ОВ1) и второй ступени (ОВ2)

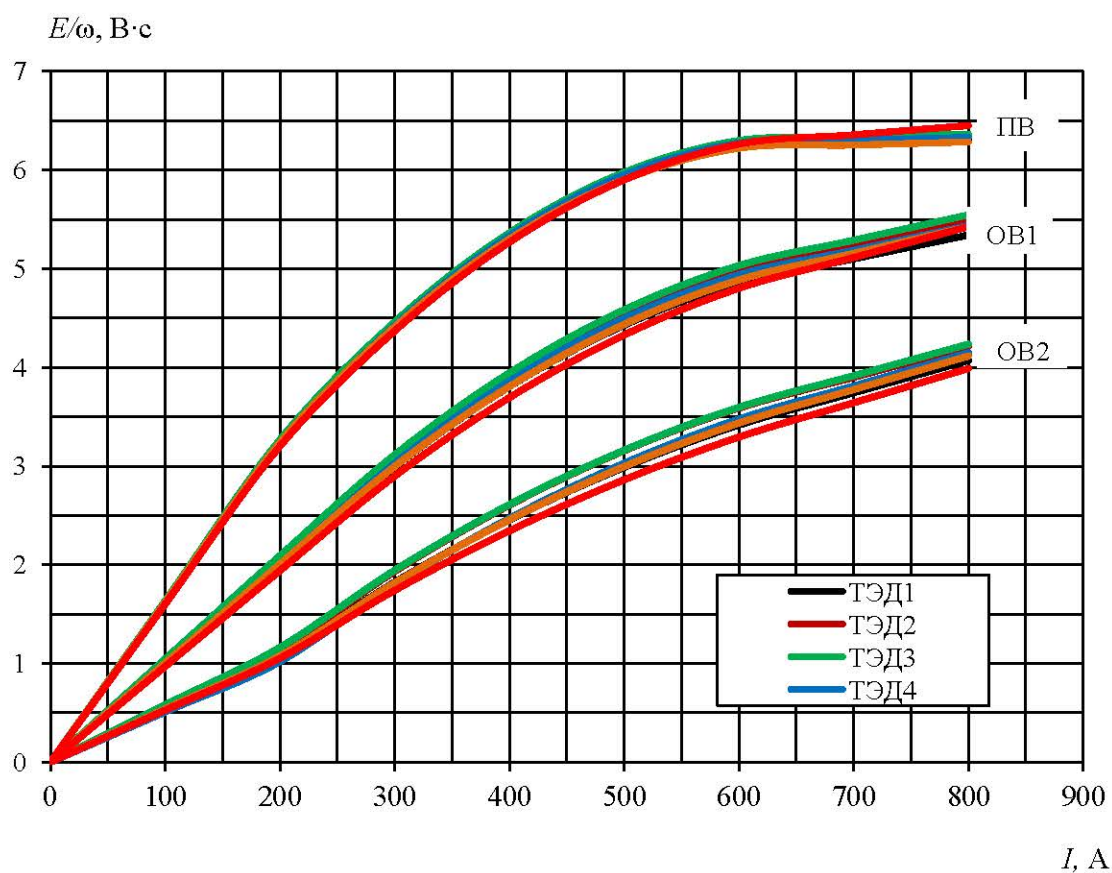


Рис. 5. Нагрузочные характеристики ТЭД тепловоза ТЭП70БС № 0176:

ТЭД1-ТЭД6 – нагрузочные характеристики 1–6 тяговых двигателей при полном возбуждении (ПВ), ослабленном возбуждении первой (ОВ1) и второй ступени (ОВ2)

Выводы

1 Результаты расчета показали возможность определения нагрузочной характеристики тягового двигателя по данным микропроцессорных систем управления и диагностики.

2 Ошибка аппроксимации нагрузочной характеристики не превышает 3 % при коэффициенте детерминации не менее 0,93.

3 При одном и том же значении магнитного потока разброс токов (а соответственно и вращающих моментов) ТЭД одной секции, обусловленный разностью их нагрузочных характеристик, может достигать 15 % и более, что необходимо учитывать при выполнении тяговых расчетов, в том числе при проверке тяговых двигателей на нагревание.

Список литературы

1 Правила тяговых расчетов для поездной работы : утверждены распоряжением ОАО «РЖД» 12.05.2016 № 867р. – Москва : ОАО «РЖД», 2016. – 513 с.

2 Оперативный контроль уровня энергоэффективности магистрального тепловоза рабочего парка / В. А. Перминов, М. В. Федотов, В. В. Грачев, И. Э. Нестеров // Вестник научно-исследовательского и конструкторско-технологического института подвижного состава. – 2015. – № 97. – С. 45–58. – ISSN 0452-358X.

3 Грачев, В. В. Прескриптивный контроль энергоэффективности силовой установки тепловоза с использованием интеллектуальных методов обработки измерительной информации встроенных средств диагностики : монография / В. В. Грачев. – Санкт-Петербург : ФГБОУ ВО РГУПС, 2019. – 106 с. – ISBN 978-5-7641-1400-2.

4 Стрекопытов, В. В. Электрические передачи локомотивов : учебник для вузов железнодорожного транспорта / В. В. Стрекопытов, А. В. Грищенко, В. А. Кручек; под редакцией В. В. Стрекопытова. – Москва : Маршрут, 2003. – 310 с. – ISBN 5-89035-081-1.

5 Грищенко, А. В. Новые электрические машины локомотивов : учебное пособие для вузов железнодорожного транспорта / А. В. Грищенко, Е. В. Казаченко. – Москва : ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте» – 2008. – 271 с. – ISBN 978-5-89035-520-1.

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

7 Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика : учебное пособие для вузов

References

1 Rules of traction calculations for train work : approved by the Order of JSC «Russian Railways» 12.05.2016 No. 867r. – Moscow : JSC «Russian Railways», 2016. – 513 p.

2 Operational control of the energy efficiency level of the main diesel locomotive of the working park / V. A. Perminov, M. V. Fedotov, V. V. Grachev, I. E. Nesterov // Bulletin of the Research and Design-Technological Institute of Rolling Stock. – 2015. – No. 97. – P. 45–58. – ISSN 0452-358X.

3 Grachev, V. V. Prescriptive control of the energy efficiency of a diesel locomotive power plant using intelligent methods of processing measurement information of built-in diagnostic tools: monograph / V. V. Grachev. – Saint Petersburg : FSUE VO PSTU, 2019. – 106 p. – ISBN 978-5-7641-1400-2.

4 Strekopytov, V. V. Electric transmission of locomotives: textbook for universities of railway transport / V. V. Strekopytov, A. V. Grishchenko, V. A. Kruchek; edited by V. V. Strekopytov. – Moscow : Marshrut, 2003. – 310 p. – ISBN 5-89035-081-1.

5 Grishchenko, A. V. New electric machines of locomotives : textbook for railway transport universities / A. V. Grishchenko, E. V. Kazachenko. – Moscow : SEI «Educational Methodological Center for Education in Railway Transport», 2008. – 271 p. – ISBN 978-5-89035-520-1.

6 Kurilkin, D. N. Determination of resistance in the chain of traction electric motors according to microprocessor control systems / D. N. Kurilkin, V. V. Grachev, V. F. Tanaev // Bulletin of the results of scientific research. – 2022. – Issue 4. – P. 74–89. – DOI 10.20295/2223-9987-2022-4-74-89.

7 Gmurman, V. E. Probability theory and mathematical statistics: a textbook for universities /

/ В. Е. Гмурман. – Москва : Высшая школа. – V. E. Gmurman. – Moscow : Higher School, 2003. – 2003. – 479 с. – ISBN 5-06-04214-6. 479 p. – ISBN 5-06-04214-6.

D. N. Kurilkin, V. V. Grachev, V. F. Tanaev

CALCULATION OF LOAD CHARACTERISTICS OF DC TRACTION MOTORS ACCORDING TO MICROPROCESSOR CONTROL AND DIAGNOSTIC SYSTEMS

Abstract. The actual load characteristics of the traction electric motors of a locomotive with electric power transmission according to microprocessor control systems are necessary to clarify the real traction characteristics of locomotives when performing operational traction calculations. The methods of the theory of electrical machines, statistical processing and regression analysis of experimental data were used in the work. Based on the statistical analysis of the registration data of the on-board diagnostics subsystem of 20 sections of diesel locomotives 2TE116U and TEP70BS, a method for determining the actual load characteristics of traction motors is proposed and justified. The results obtained allow us to refine the parameters of the traction characteristics of the locomotive and can be used when performing operational traction calculations.

Keywords: load characteristics of traction motors, traction motors, traction drive.

For citation: Kurilkin, D. N. Calculation of load characteristics of DC Traction motors according to microprocessor control and Diagnostic systems / D. N. Kurilkin, V. V. Grachev, V. F. Tanaev // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 2. – P. 124–131. – DOI 10.46973/0201–727X_2023_2_124.

Сведения об авторах

Курилкин Дмитрий Николаевич

ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»,

кафедра «Локомотивы и локомотивное хозяйство»,

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой,

e-mai: kurilkin@pgups.ru

Грачев Владимир Васильевич

ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»,

кафедра «Локомотивы и локомотивное хозяйство»,

доктор технических наук, доцент,

e-mai: lt@pgups.ru

Танаев Валерий Фаритович

Московская железная дорога –

филиал ОАО «РЖД»,

начальник Московской железной дороги –

филиала ОАО «РЖД»,

e-mai: lt@pgups.ru

Information about the authors

Kurilkin Dmitry Nikolayevich

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,

Chair «Locomotives and Locomotive Facility»,

Candidate of Engineering Sciences,

Associate Professor, Head of the Chair

e-mai: kurilkin@pgups.ru

Grachev Vladimir Vasilievich

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,

Chair «Locomotives and Locomotive Facility»,

Doctor of Engineering Sciences,

Associate Professor,

e-mai: lt@pgups.ru

Tanaev Valery Faritovich

Moscow Railway – Branch of

JSC «Russian Railways»,

Head of the Moscow Railway – Branch of

JSC «Russian Railways»,

e-mai: lt@pgups.ru