

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ (05.09.03)

УДК 621.313.2

DOI: 10.24160/1993-6982-2020-3-60-64

## Об оценке коммутационной способности тяговых двигателей грузовых электровозов

Р.М. Девликамов, М.А. Слепцов

Важным направлением развития ОАО «РЖД» является увеличение объёма грузовых перевозок по сети железных дорог. Для достижения прогнозируемых стратегических показателей в локомотивном комплексе проводится ряд мероприятий. К наиболее масштабным можно отнести исследования и опытные работы по повышению тяговых свойств электровозов на одном из самых грузонапряжённых участков железнодорожной сети России — Восточном полигоне. Это важное связующее соединение между Юго-Восточной Азией и Европой. Условия, в которых работает железнодорожный транспорт, требуют в числе первоочередных задач эффективного использования локомотивного парка с высокой эксплуатационной надёжностью для обеспечения безопасного движения поездов.

На Восточном полигоне использована система электрической тяги на переменном токе 25 кВ, 50 Гц. Вождение грузовых поездов выполняют электровозы 2ЭС5К и 3ЭС5К с коллекторными тяговыми машинами пульсирующего тока. Их тяговый электропривод при реализации требуемых сил тяги имеет ряд ограничений, одним из которых является качество коммутации на коллекторе тягового электродвигателя. Увеличение показателей надёжности тяговых электродвигателей, которые считаются слабым звеном электровозов, — актуальная задача. Количество отказов из-за неисправностей тяговых двигателей постоянного и пульсирующего тока находится на уровне 20...22%. Наибольшую трудность представляет повышение коммутационной надёжности.

Предложен критерий качества коммутации для тяговых электродвигателей электровозов, учитывающий степень компенсации магнитодвижущей силы реакции якоря в зоне коммутации. Ширина области безыскровой работы не в полной мере может характеризовать коммутационную способность ТЭД. При её расчёте учтены напряжение искрообразования под щёткой, влияние на коммутацию электромагнитных факторов, конструкция дополнительных полюсов и род тока нагрузки. Выполненные расчёты показали, что предложенный критерий качества коммутационной надёжности объективно характеризует качество коммутации в лимитирующем режиме и согласуется с многолетней практикой их эксплуатации на электровозах переменного тока.

*Ключевые слова:* тяговый электродвигатель, коллектор, область безыскровой работы, качество коммутации.

*Для цитирования:* Девликамов Р.М., Слепцов М.А. Об оценке коммутационной способности тяговых двигателей грузовых электровозов // Вестник МЭИ. 2020. № 3. С. 60—64. DOI: 10.24160/1993-6982-2020-3-60-64.

## On Estimating the Switching Capacity of the Traction Engines of Freight Electric Locomotives

R.M. Devlikamov, M.A. Sleptsov

An important direction in the development of JSC "Russian Railways" is increasing the volume of freight traffic over the railway network. A number of measures are being taken to achieve the predicted strategic indicators in the locomotive complex. The most large-scale activities include research and experimental works aimed at improving the traction properties of electric locomotives in the Eastern polygon, which is one of the most heavily loaded sections of the Russian railway network. This is an important link connecting Southeast Asia and Europe. The conditions under which the railway transport operates require, among the priority tasks, efficient use of the locomotive fleet with high operational reliability to ensure safe train traffic.

The Eastern polygon uses a system of electric traction powered by the 25 kV, 50 Hz AC voltage. Freight trains are driven by 2ES5K and 3ES5K electric locomotives equipped with pulsating current commutator traction machines. In implementing the required traction forces, the traction electric drive of such locomotives has a number of limitations. One of them is the quality of switching on the traction motor commutator. Achieving better reliability of traction motors, which are regarded as the weak link of electric locomotives, is a topical

problem. The number of their failures due to faults of direct and pulsating current traction motors is at the level of 20--22%. The greatest difficulty is to increase the switching reliability.

A switching quality criterion for traction electric motors of electric locomotives is proposed, which takes into account the degree to which the armature reaction magnetomotive force is compensated in the switching zone. The width of the sparkless operation region cannot fully characterize the traction electric motor switching capacity. Its calculation takes into account the spark voltage under the brush, the effect of electromagnetic factors on the switching, the design of additional poles, and the kind of load current. The accomplished calculations have shown that the proposed switching reliability quality criterion objectively characterizes the switching quality in the limiting mode and is consistent with the long-term experience of their operation in AC electric locomotives.

*Key words:* traction electric motor, commutator, sparkless operation region, switching quality.

*For citation:* Devlikamov R.M., Sleptsov M.A. On Estimating the Switching Capacity of the Traction Engines of Freight Electric Locomotives. Bulletin of MPEI. 2020;3:60—64. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2020-3-60-64.

### Введение

Основное направление развития ОАО «РЖД» — увеличение объёма грузовых перевозок по развитой сети железных дорог.

Проводятся исследования и опытные работы по повышению тяговых свойств электровозов на одном из участков железнодорожной сети России — Восточном полигоне, главном связующем соединении между Юго-Восточной Азией и Европой. Для обеспечения безопасного движения поездов необходимо эффективное использование локомотивного парка. На Восточном полигоне используется система электрической тяги на переменном токе 25 кВ, 50 Гц. Грузовые поезда ведут электровозы 2ЭС5К и 3ЭС5К с коллекторными тяговыми машинами пульсирующего тока, имеющими ряд ограничений. Одно из которых — качество коммутации на коллекторе тягового электродвигателя.

Основным решением задачи обеспечения безопасности движения поездов является увеличение показателей надёжности тяговых электродвигателей (ТЭД), которые являются слабым звеном электровозов, и часто выходят из строя. Количество их отказов находится на уровне 20...22%. Наибольшую трудность представляет повышение коммутационной надёжности [1].

### Критерии качества коммутации

Для оценки качества коммутации ТЭД используют два критерия.

Первый из них — среднее значение реактивных ЭДС в лимитирующем по коммутации режиме реализации максимальной мощности при конструкционной скорости двигателя

$$E_{pmax} = K_v K_n E_{pn}, \quad (1)$$

где  $K_v$  — скоростной коэффициент, равный отношению конструкционной скорости к ее номинальному значению;  $K_n$  — коэффициент использования мощности при конструкционной скорости;  $E_{pn}$  — среднее значение реактивных ЭДС в номинальном режиме, рассчитанное по методике Рихтера–Цорна.

Величина  $E_{pmax}$  для ТЭД с опорно-осевой подвеской не должна превышать  $[E_{pmax}] = 8$  В. При опорно-рамном подвешивании допускается  $[E_{pmax}] = 9$  В [2].

Вторым критерием является удельная мощность, коммутируемая одним щеткодержателем:

$$K_e = \frac{E_p i_a V_k}{2\beta_k L_{щ}}, \quad (2)$$

где  $i_a$  — ток параллельной ветви обмотки якоря;  $V_k$  — окружная скорость коллектора;  $\beta_k$  — коллекторное деление;  $L_{щ}$  — длина щеточного контакта.

В номинальном режиме  $K_e < [K_{ен}] = 15 \cdot 10^6$  Вт/(м·с), а в лимитирующем режиме  $K_e < [K_{емак}] = 25 \cdot 10^6$  Вт/(м·с) [3].

Более объективную оценку качества коммутации ТЭД дают стендовые испытания по определению области безыскровой работы (ОБР). Опыты по снятию ОБР ТЭД позволяют настраивать дополнительные полюса (ДП) на оптимальную коммутацию, но сами по себе весьма трудоемки и требуют наличия специального низковольтного генератора и квалифицированного персонала, поскольку степень искрения щеток оценивается по ГОСТ визуально. Таким образом, практическое значение определения теоретических параметров ОБР чрезвычайно актуально, так как «...расчетчик, проектирующий электрическую машину, получает возможность наглядно судить о ее коммутационной способности и, сопоставляя различные варианты расчета, выбрать среди них вариант с оптимальными коммутационными параметрами...» [4].

Исходя из разработанной методики прогнозирования искрения в качестве критерия качества коммутации предложено использовать теоретическую ширину ОБР ТЭД в лимитирующем режиме [5]. Для нее при расчете  $E_{pn}$  по методу Рихтера–Цорна запишем следующее выражение:

$$\Delta_{min} = \frac{200K_\theta [U_{ш}] K_{пр}}{K_{эм} E_{pn}}, \quad (3)$$

где  $K_\theta$  — коэффициент степени компенсации МДС реакции якоря в зоне коммутации;  $[U_{ш}]$  — напряжение искрообразования под щеткой;  $K_{эм}$  — коэффициент электромагнитных факторов;  $K_{пр} \approx 1,2$  — коэффициент преобразования с учетом принятых допущений, упрощающих методику расчета ширины ОБР.

Коэффициент  $K_\theta$  является, по существу, масштабным коэффициентом при переходе от ЭДС вращения,

индуктированных в коммутируемых секциях обмотки якоря, к МДС обмоток двигателя. При наличии компенсационной обмотки (КО) он определяется как:

$$K_{\theta} = \frac{\theta - 1}{\theta} = \frac{w_d + w_{ko} - w'_a}{w_d + w_{ko}}, \quad (4)$$

где  $\theta$  — степень компенсации реакции якоря;  $w_d$  — число витков катушки ДП;  $w_{ko}$  — число витков КО;  $w'_a$  — число витков обмотки якоря с учетом коммутируемых секций.

Напряжение  $[U_n]$  является физическим условием искрообразования, которое можно сформулировать следующим образом. В скользящем контакте создаются благоприятные для искрообразования условия при приложении к его  $\alpha$ -пятнам напряжения, превышающего предел, соответствующий напряжению, при котором сгорает частица щетки. В зависимости от марки щеток  $[U_n]$  составляет 2,5...3,5 В [6].

Коэффициент  $K_{эм}$  характеризует влияние на процесс искрообразования электромагнитных факторов. Путем аналитического решения дифференциального уравнения, описывающего процесс разрыва добавочного тока коммутации в общем случае многоламельного щеточного перекрытия, для данного коэффициента получено следующее выражение:

$$K_{эм} = \left( \frac{\gamma + 1}{2} + 0,5\varepsilon \right) \left[ 1 + \frac{K_{щ} [1 - (1 - \tau_p)^{A-1}]}{A-1} \right] - \frac{2K_{щ} [1 - \tau_p - (1 - \tau_p)^{A-1}]}{A-2}, \quad (5)$$

где  $\gamma = \gamma_p - \varepsilon$  ( $\varepsilon < 1$ ) — целая часть расчетного коэффициента щеточного перекрытия  $\gamma_p$ ;  $K_{щ}$  — коэффициент конструкции щетки (1,0 — для сплошной щетки; 0,8; 0,75 — для разделенных на две и три части);  $A$  — безразмерный параметр коммутации;  $\tau_p$  — относительное время разрыва коммутируемого контура.

С учетом температурной зависимости удельного сопротивления материала щетки параметры  $A$  и  $\tau_p$  при искрообразовании составляют:

$$A = \frac{R_n t_n}{1,5L_p}; \quad (6)$$

$$\tau_p = 1 - 1,4 \frac{R_n}{R_{\alpha}}. \quad (7)$$

Определим входящие в (6), (7) параметры  $R_n$ ,  $t_n$ ,  $L_p$  и  $R_{\alpha}$  для лимитирующего режима работы ТЭД из следующих выражений.

Контактное сопротивление ламели коллектора, полностью перекрытой щетками:

$$R_{\text{кл}} = \frac{\Delta U}{J(\beta_k - b_n)L_{\text{щ}}}, \quad (8)$$

где  $\Delta U$ ,  $J$  — падение напряжения и плотность тока под щеткой в лимитирующем режиме;  $b_n$  — толщина межламельной изоляции.

Ламельный период:

$$t_n = \frac{\beta_k - b_n}{V_{\text{кmax}}}, \quad (9)$$

где  $V_{\text{кmax}}$  — окружная скорость коллектора при конструкционной скорости.

Результирующая индуктивность обособленной секции, завершающей коммутацию пазового тока, в момент разрыва ее контура при коэффициенте демпфирования для равносекционной обмотки якоря  $K_n = 0,85$  [4]:

$$L_p = 2,125 \cdot 10^{-6} [(\lambda_n + \lambda_k)l_a + \lambda_n l_n], \quad (10)$$

где  $\lambda_n$ ,  $\lambda_k$ ,  $\lambda_n$  — коэффициенты удельных магнитных проводимостей пазовой части, по коронкам зубцов и лобовой части коммутируемой секции, вычисляемые по методике Рихтера–Цорна;  $l_a$  — активная длина якоря;  $l_n$  — длина лобовой части проводника секции.

Среднее сопротивление  $\alpha$ -пятен  $R_{\alpha}$  рассчитывается по методике, изложенной в [7].

Многолетняя эксплуатационная практика показывает, что машины, имеющие ширину ОБР при номинальной нагрузке 5...6%, не испытывают коммутационных затруднений. И наоборот, в машинах с шириной ОБР 1...2% очень часто в процессе эксплуатации наступает искрение вследствие наложения мелких причин, чаще всего механического характера, приводящих к исчезновению ОБР или смещению ее оси [4, 8]. Опыт построенных и испытанных ТЭД доказывает, что при ширине ОБР в номинальном режиме  $[\Delta_n] = 6\%$  они также не испытывают коммутационных затруднений в процессе эксплуатации.

Следовательно, с учетом критерия (2) для минимально допустимой ширины ОБР ТЭД в лимитирующем режиме запишем:

$$[\Delta_{\text{min}}] = \frac{[\Delta_n][K_{ен}]}{[K_{е\text{max}}]} = \frac{6 \cdot 15}{25} = 3,6.$$

Ширина ОБР в лимитирующем режиме работы ТЭД не в полной мере характеризует его коммутационную способность, поскольку зависит от конструкции ДП и рода тока нагрузки.

В последнее время витки катушек ДП ТЭД располагают не по всей высоте их сердечника, а вблизи от внешней поверхности якоря [2, 3]. Это снижает поток рассеяния ДП и уменьшает число витков катушек без ущерба для качества коммутации. При этом понижается коэффициент степени компенсации  $K_{\theta}$  и  $\Delta_{\text{min}}$ , следовательно, при расположении катушки ДП вблизи от поверхности якоря для минимально допустимой ширины ОБР в первом приближении можно принять

$$[\Delta_{\text{min}}] = \frac{3,6}{K_{\text{кл}}},$$

где  $K_{\text{кл}}$  — коэффициент конструкции ДП ( $K_{\text{кл}} = 1$  при распределении катушки ДП по всей высоте сердечника).

ка;  $K_{\text{кл}} \approx 0,369/0,264 = 1,4$  при ее размещении вблизи от поверхности якоря, где 0,369 и 0,264 — коэффициенты степени компенсации ТЭД НБ-418К6 и НБ-514).

Учитывая, что при питании ТЭД пульсирующим током качество коммутации ухудшается в среднем на 20% [9], в общем случае для минимально допустимой ширины ОБР можно записать:

$$[\Delta_{\text{min}}] = \frac{3,6K_{\text{рт}}}{K_{\text{кл}}}, \quad (11)$$

где  $K_{\text{рт}}$  — коэффициент рода тока ( $K_{\text{рт}} = 1,0$  для ТЭД постоянного тока;  $K_{\text{рт}} = 1,2$  для ТЭД пульсирующего тока;  $K_{\text{рт}} = 1,1$  для ТЭД двойного питания).

С учетом (3) и (11) критерий коммутационной способности ТЭД представим в следующем виде:

$$K_{\text{с}} = \frac{\Delta_{\text{min}}}{[\Delta_{\text{min}}]} = \frac{67K_{\text{кл}}K_{\theta}[U_{\text{и}}]}{K_{\text{рт}}K_{\text{эм}}E_{\text{рн}}} \geq 1. \quad (12)$$

Отметим, что чем больше КС, тем лучше коммутационная способность ТЭД.

### Критерии качества коммутации

Параметр	Тяговые электродвигатели пульсирующего тока				
	НБ-412К	НБ-418К6	НБ-514	НБ-420Б	НБ-407Б
$E_{\text{рн}}, \text{В}$	5,8	5,0	5,4	5,5	5,4
$K_{\text{в}}$	1,976	2,292	2,254	2,243	2,158
$K_{\text{и}}$	0,540	0,546	0,585	0,711	0,546
<b><math>E_{\text{рmax}}, \text{В}</math></b>	<b>6,2</b>	<b>6,3</b>	<b>7,1</b>	<b>8,8</b>	<b>6,4</b>
$i_{\text{дн}}, \text{А}$	85,8	146,7	150,8	125,0	89,2
$V_{\text{кн}}, \text{м/с}$	29,4	24,2	24,6	23,7	26,3
$\beta_{\text{к}} \cdot 10^{-3}, \text{м}$	3,95	4,69	4,69	4,51	3,95
$L_{\text{ш}} \cdot 10^{-3}, \text{м}$	100	96	96	80	80
<b><math>K_{\text{емак}} \cdot 106, \text{Вт/(м}\cdot\text{с)}</math></b>	<b>19,8</b>	<b>24,8</b>	<b>29,2</b>	<b>36,1</b>	<b>23,8</b>
$K_{\text{кл}}$	1,0	1,0	1,4	1,0	1,0
$w_{\text{д}}$	10	8	5	15	10
$w_{\text{ко}}$	10	6	7	15	10
$w'_{\text{а}}$	13,47	8,83	8,83	20,09	13,64
$K_{\theta}$	0,327	0,369	0,264	0,330	0,318
Марка щетки	ЭГ61	ЭГ61	ЭГ61А	ЭГ61	ЭГ61
$[U_{\text{и}}], \text{В}$	3,1	3,1	3,4	3,1	3,1
$R_{\text{а}}, \text{Ом}$	1,26	1,26	1,54	1,26	1,26
$K_{\text{рт}}$	1,2	1,2	1,2	1,1	1,1
$\gamma_{\text{р}}$	3,80	5,06	5,06	5,28	4,81
$R_{\text{л}} \cdot 10^{-4}, \text{Ом}$	497	432	460	450	611
$t_{\text{и}} \cdot 10^{-3}, \text{с}$	509	620	620	623	521
$L_{\text{р}} \cdot 10^{-6}, \text{Г}$	2,99	2,72	2,72	3,03	3,40
$\tau_{\text{р}}$	0,945	0,952	0,958	0,950	0,932
$A$	0,564	0,656	0,699	0,617	0,626
$K_{\text{эм}}$	9,70	12,67	12,76	13,66	10,59
<b><math>\Delta_{\text{min}}, \%</math></b>	<b>4,34</b>	<b>4,35</b>	<b>3,14</b>	<b>3,28</b>	<b>4,15</b>

В таблице приведены результаты расчета по формулам (1) — (3) и (12) критериев для оценки качества коммутации  $E_{\text{рmax}}, K_{\text{емак}}, \Delta_{\text{min}}$  и КС ТЭД грузовых электровозов переменного тока, справочные данные по которым взяты из [10]. Коэффициент электромагнитных факторов рассчитывали по (5) — (10) с использованием экспериментальных вольтамперных характеристик щеток марки ЭГ61 и ЭГ61А.

### Выводы

Анализ данных таблицы показал, что предложенный критерий коммутационной способности КС объективно характеризует качество коммутации ТЭД в лимитирующем режиме работы и согласуется с многолетней практикой их эксплуатации: двигатель НБ-420Б обладал низким уровнем коммутационной способности и на электровозе ВЛ82М был заменен на ТЭД НБ-407Б, а двигатель НБ-514, благодаря новой конструкции ДП и использованию щеток марки ЭГ61А, успешно заменил на электровозе ВЛ85 ТЭД НБ-418К6, хотя ОБР последнего двигателя шире.

## Литература

1. Щербakov В.Г. и др. Тяговые электродвигатели электровозов. Новочеркасск: Наутилус, 1998.
2. Находкин М.Д., Василенко Г.В., Бочаров В.И., Козорезов М.А. Проектирование тяговых электрических машин. М.: Транспорт, 1976.
3. Курбасов А.С., Седов В.И., Сорин Л.Н. Проектирование тяговых электродвигателей. М.: Транспорт, 1987.
4. Толкунов В.П. Теория и практика коммутации машин постоянного тока. М.: Энергия, 1974.
5. Девликамов Р.М. Прогнозирование искрения в щеточном контакте коллекторной электрической машины и оценка ее коммутационной надежности // Известия вузов. Серия «Электромеханика». 2007. № 1. С. 20—22.
6. Плакс А.В., Изварин М.Ю. Параметры коллекторных тяговых двигателей при моделировании переходных процессов в цепях электровозов // Вестник ВЭЛНИИ. 2004. № 1. С. 112—118.
7. Девликамов Р.М. Некоторые уточнения теории фриттингов в скользящем контакте электрических машин // Известия вузов. Серия «Электромеханика». 2010. № 1. С. 26—31.
8. Evstaf'ev A., Boronenko Yu., Izvarin M. A Device and Algorithm for Defecting the Skidding of Wheel Sets of Electric Rolling Stock // Russian Electric Eng. 2017. V. 88. Iss. 10. Pp. 672—675.
9. Мазнев А.С., Евстафьев А.М. Улучшение энергетики электровозов переменного тока // Электроника и электрооборудование транспорта. 2009. № 5 — 6. С. 19—21.
10. Дубровский З.М., Попов В.И., Тушканов Б.А. Грузовые электровозы переменного тока. М.: Транспорт, 1991.

## Сведения об авторах:

**Девликамов Рашит Музаферович** — кандидат технических наук, доцент кафедры электротехнических комплексов автономных объектов и электрического транспорта НИУ «МЭИ»

**Слепцов Михаил Александрович** — кандидат технических наук, профессор кафедры электротехнических комплексов автономных объектов и электрического транспорта НИУ «МЭИ», e-mail: SleptsovMA@mpei.ru

## Information about authors:

**Devlikamov Rashit M.** — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Electrical Engineering Complexes of Self-Contained Objects and Electrical Transport Dept., NRU MPEI

**Sleptsov Mikhail A.** — Ph.D. (Techn.), Professor of Electrical Engineering Complexes of Self-Contained Objects and Electrical Transport Dept., NRU MPEI, e-mail: SleptsovMA@mpei.ru

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

**Conflict of interests:** the authors declare no conflict of interest

**Статья поступила в редакцию:** 22.10.2019

**The article received to the editor:** 22.10.2019

## References

1. Shcherbakov V.G. i dr. Tyagovye Elektrodvigateli Elektrovozov. Novocherkassk: Nautilus, 1998. (in Russian).
2. Nakhodkin M.D., Vasilenko G.V., Bocharov V.I., Kozorezov M.A. Proektirovanie tyagovykh Elektricheskikh Mashin. M.: Transport, 1976. (in Russian).
3. Kurbasov A.S., Sedov V.I., Sorin L.N. Proektirovanie Tyagovykh Elektrodvigateley. M.: Transport, 1987. (in Russian).
4. Tolkunov V.P. Teoriya i Praktika Kommutatsii Mashin Postoyannogo Toka. M.: Energiya, 1974. (in Russian).
5. Devlikamov R.M. Prognozirovanie Iskreniya v Shchetochnom Kontakte Kollektornoy Elektricheskoy Mashiny i Otsenka ee Kommutatsionnoy Nadezhnosti. Izvestiya Vuzov. Seriya «Elektromekhanika». 2007;1: 20—22. (in Russian).
6. Plaks A.V., Izvarin M.Yu. Parametry Kollektornykh Tyagovykh Dvigatelay pri Modelirovanii Perekhodnykh Protsesov v Tsepyakh Elektrovozov. Vestnik VEINII. 2004;1:112—118. (in Russian).
7. Devlikamov R.M. Nekotorye Utochneniya Teorii Frittingov v Skol'zyashchem Kontakte Elektricheskikh Mashin. Izvestiya Vuzov. Seriya «Elektromekhanika». 2010;1:26—31. (in Russian).
8. Evstaf'ev A., Boronenko Yu., Izvarin M. A Device and Algorithm for Defecting the Skidding of Wheel Sets of Electric Rolling Stock. Russian Electric Eng. 2017;88;10:672—675.
9. Maznev A.S., Evstaf'ev A.M. Uluchshenie Energetiki Elektrovozov Peremennogo Toka. Elektronika i Elektrooborudovanie Transporta. 2009;5—6:19—21. (in Russian).
10. Dubrovskiy Z.M., Popov V.I., Tushkanov B.A. Gruzovye Elektrovozy Peremennogo Toka. M.: Transport, 1991. (in Russian).