

УДК 621.313.2

ФОРМИРОВАНИЕ ГРАФ-МОДЕЛИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ КОЛЛЕКТОРНО-ЩЕТОЧНОГО УЗЛА ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С УЧЕТОМ ТЕПЛОВЫХ ФАКТОРОВ

Харламов Виктор Васильевич,

доктор технических наук, заведующий кафедрой электрических машин и общей электротехники Омского государственного университета путей сообщения, Россия, 644046, г. Омск, пр. К. Маркса, 35. E-mail: hvv-omgups@mail.ru

Шкодун Павел Константинович,

кандидат технических наук, доцент кафедры электрических машин и общей электротехники Омского государственного университета путей сообщения, Россия, 644046, г. Омск, пр. К. Маркса, 35. E-mail: pkshk@mail.ru

Хлопцов Андрей Сергеевич,

аспирант кафедры электрических машин и общей электротехники Омского государственного университета путей сообщения, Россия, 644046, г. Омск, пр. К. Маркса, 35. E-mail: emoe@omgups.ru

Долгова Анна Владимировна,

кандидат технических наук, доцент кафедры информатики, прикладной математики и механики Омского государственного университета путей сообщений, Россия, 644046, г. Омск, пр. К. Маркса, 35. E-mail: lady_annie@mail.ru

Одной из актуальных проблем современного железнодорожного транспорта является повышение достоверности диагностирования технического состояния и энергоэффективности тяговых электродвигателей подвижного состава. Среди методов, положенных в основу систем технического диагностирования тяговых электродвигателей, наиболее перспективным является графо-аналитический метод, позволяющий отображать объект в пространстве диагностических признаков и повысить достоверность диагностирования. Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения достоверности диагностирования технического состояния коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей, что существенно влияет на энергоэффективность преобразования электрической энергии в системах электроснабжения железнодорожного транспорта.

Цель работы: создание исходной матрицы граф-модели для формирования таблицы синдромов и получения компонентов достижимости вершин граф-модели; расчет критического расстояния для усечения компонентов достижимости вершин граф-модели и формирование рабочей граф-модели, позволяющей осуществлять контроль качества функционирования коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей постоянного тока.

Методы исследования основаны на применении прикладной теории графов. Поставленные задачи решались на основе положений теории электрических машин, с применением методов экспертных оценок, графо-аналитического метода, а также методов математической статистики. В процессе расчетов и анализа математических зависимостей применялись электронные таблицы Microsoft Excel 2010 и встроенный в них язык программирования Visual Basic for Applications.

Результаты. Уточнена граф-модель коллекторно-щеточного узла тягового электродвигателя. На основании исходной матрицы сформирована матрица частных расстояний. Используя данные матрицы частных расстояний, сформированы синдромы и получены компоненты достижимости вершин граф-модели. Критическое расстояние определено как медиана значений по гистограмме расстояний всех длин маршрутов граф-модели. На основании найденного значения критического расстояния проведено усечение компонентов достижимости и скорректирован состав синдромов. В результате объединения усеченных синдромов сформирована рабочая граф-модель.

Ключевые слова:

Диагностирование, коллекторно-щеточный узел, граф-модель, компонент достижимости, синдром, тяговый электродвигатель.

Введение

Надежность и энергоэффективность тягового электроподвижного состава в значительной степени зависит от стабильной работы тяговых электрических двигателей (ТЭД) [1, 2]. Исправная работа ТЭД во многом обеспечивает реализацию максимальной производительности локомотива [3]. Одним из приоритетных направлений ОАО «Российские железные дороги» является снижение издержек при ремонте тягового подвижного состава,

обеспечение ресурсосбережения, а также поддержание технического состояния локомотивов, находящихся в эксплуатации [4].

Постановка задачи

Диагностирование сложных технических систем, одной из которых является коллекторно-щеточный узел (КЩУ) ТЭД, предполагает комплекс мероприятий по контролю и прогнозированию технического состояния. Техническое диагностирова-

ние деталей и узлов ТЭД определяется рядом операций, изложенных в утвержденной технологической документации, в которой предполагается контроль механических и электрических параметров. Контроль перечисленных параметров в ряде случаев не позволяет получать достоверных результатов о техническом состоянии КЩУ ТЭД. Отсюда возникает задача создания комплексной методики технического диагностирования, позволяющей получать достоверные сведения о техническом состоянии КЩУ ТЭД [5, 6].

В основу методики диагностирования положены методы математического анализа и моделирования. Большинство систем технического диагностирования используют информацию о состоянии узла в виде набора диагностических признаков, наиболее полно и достоверно определяющих его технические свойства. Применение графо-аналитического метода отображения объекта в пространстве признаков с построением граф-модели позволит повысить достоверность распознавания дефектов КЩУ ТЭД.

Методика исследований

Решение поставленной задачи основывается на граф-модели диагностирования КЩУ ТЭД в процессе приемо-сдаточных испытаний, параметры которой являются компонентами нелинейного дифференциального уравнения первого порядка, описывающего процесс коммутации в электродвигателе [7]:

$$L \frac{di}{dt} + \sum_{k=1} M_k \frac{di_k}{dt} = \Delta u_1(J) - \Delta u_2(J) - iR_s - e_k(t),$$

где $e_L = -L \frac{di}{dt}$ – ЭДС самоиндукции; L – индуктивность секции; i – мгновенное значение тока в секции; $e_M = -\sum_{k=1} M_k \frac{di_k}{dt}$ – ЭДС взаимной индукции;

M_k – взаимная индуктивность k -й секции; i_k – мгновенное значение тока в k -й секции; $\Delta u_1(J)$ и $\Delta u_2(J)$ – переходные падения напряжения под набегающим и сбегающим краями щетки; R_s – сопротивление коммутируемой секции; $e_k(t)$ – коммутирующая ЭДС, возникающая в секции при ее взаимодействии с магнитными полями в зоне коммутации.

Исходная граф-модель дополнена рядом диагностических параметров, учет которых позволяет полно отразить сложные процессы, протекающие в узлах ТЭД [8–11].

Воздействие электродугового искрения на поверхность ламели снижает прочность и повышает пластичность ее поверхностного слоя, изменяя структуру и механические свойства коллекторной меди. В связи с этим при контакте ламели с более твердой щеткой возрастает механический износ ламели и повышается вероятность заволакивания межламельного пространства продуктами износа контактной пары «коллектор–щетка» [12].

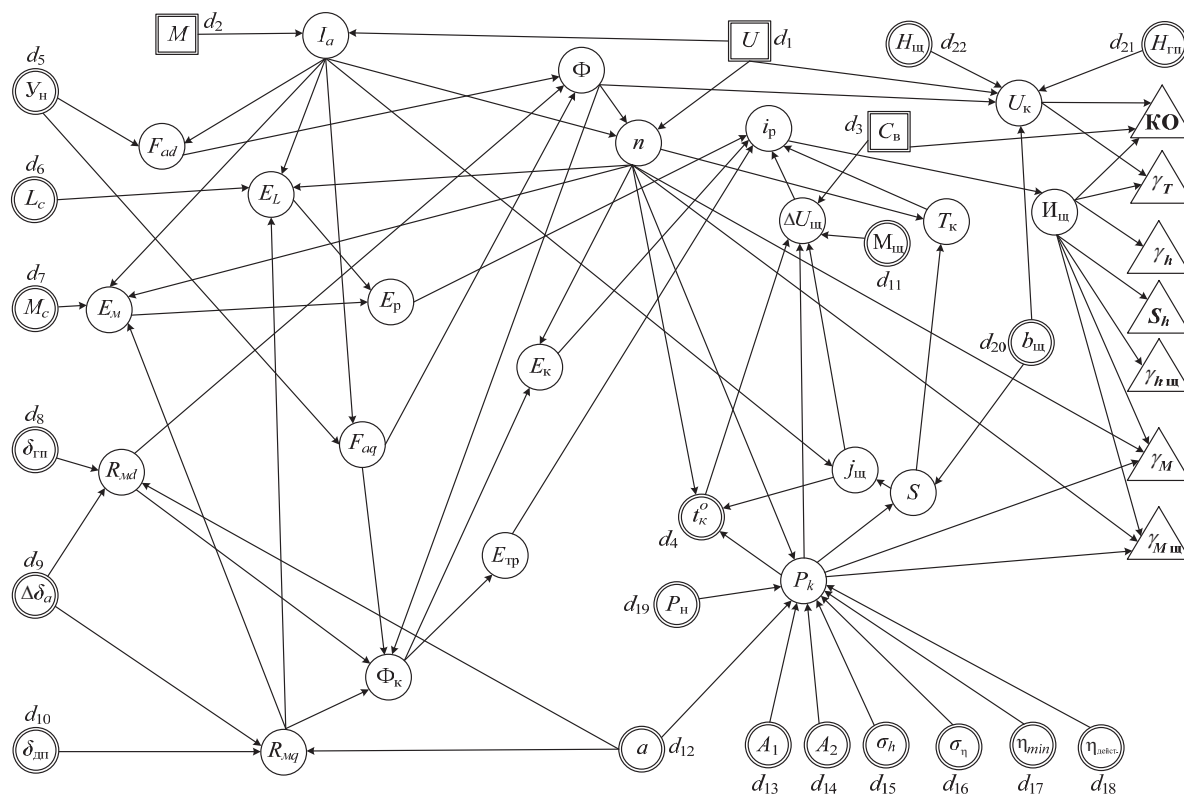


Рис. 1. Исходная граф-модель

Fig. 1. Original graph model

В уточненной граф-модели (рис. 1) учитываются диагностические параметры, отражающие влияние профиля коллектора на качество функционирования КЩУ ТЭД ($A_1, A_2, \sigma_h, \sigma_{\eta}, \dot{\eta}_{\min}, \dot{\eta}_{\text{дейст.}}$) [13], возможность возникновения кругового огня по коллектору при неблагоприятных потенциальных условиях, а также отражены причины возникновения электромеханического износа коллектора без учета (γ_m) и с учетом (γ_h, S_h) электродугового искрения и тепловые процессы, происходящие в КЩУ ТЭД (γ_t) [14–18].

В уточненной граф-модели КЩУ ТЭД используются следующие обозначения: I_a – ток якоря; U – напряжение на якоре; C_b – влажность; E_L – ЭДС самоиндукции; E_M – ЭДС взаимной индукции; E_k – ЭДС вращения; E_p – реактивная ЭДС; $E_{\text{тр}}$ – трансформаторная ЭДС; F_{ad} – МДС якоря по продольной оси; F_{aq} – МДС якоря по поперечной оси; R_{md} – магнитное сопротивление по продольной оси; R_{mq} – магнитное сопротивление по поперечной оси; Φ_k – магнитный поток в зоне коммутации; Φ – магнитный поток; n – частота вращения; $j_{\text{щ}}$ – плотность тока под щеткой; t_k^0 – температура коллектора; $\Delta U_{\text{щ}}$ – падение напряжения в щеточном контакте; P_k – давление в контакте «коллектор–щетка»; i_p – ток разрыва; T_k – период коммутации; $I_{\text{щ}}$ – искрение щеток; U_k – потенциальные условия на коллекторе; КО – круговой огонь; U_n – установка нейтрали; L_c – индуктивность секции якорной обмотки; M_c – взаимная индуктивность секции якорной обмотки; $\delta_{\text{тп}}$ – зазор под главными полюсами; $\Delta \delta_a$ – биение сердечника якоря; $\delta_{\text{щ}}$ – зазор под дополнительными полюсами; a – вибрация испытуемой машины; $M_{\text{щ}}$ – марка щетки; P_n – нажатие на щетку; $b_{\text{щ}}$ – ширина щеток и их раздвижка; $H_{\text{щ}}$ и $H_{\text{тп}}$ – несимметрия расположения щеток и главных полюсов; γ_t – тепловой износ коллектора; S – фактическая площадь контакта «коллектор–щетка»; γ_h – электромеханический износ коллектора по высоте пластины с учетом электродугового искрения; S_h – электромеханический износ коллектора по ширине пластины с учетом электродугового искрения; γ_m – электромеханический износ коллектора без учета электродугового искрения; $\gamma_{h\text{щ}}$ – электромеханический износ щетки; $\gamma_{m\text{щ}}$ – механический износ щетки. Дефекты: d_1 – отклонение напряжения на якоре машины от номинального значения; d_2 – отклонение момента на валу машины от нормы; d_3 – отклонение влажности воздуха от нормы; d_4 – отклонение температуры коллектора от нормы; d_5 – отклонение положения траверсы от геометрической нейтрали; d_6 – отклонение индуктивности секции якорной обмотки от нормы; d_7 – отклонение взаимной индуктивности секции якорной обмотки от нормы; d_8 – отклонение зазора под главными полюсами от нормы; d_9 – отклонение биения сердечника якоря от нормы; d_{10} – отклонение зазора под дополнительными полюсами от нормы; d_{11} – марка щетки не соответствует паспортным данным; d_{12} – уровень вибрации испытуемой машины превышает до-

пустимое значение; d_{13} – отклонение величины первой гармонической составляющей профиля коллектора от нормы; d_{14} – отклонение величины второй гармонической составляющей профиля коллектора от нормы; d_{15} – изменение среднего квадратического отклонения высоты профиля коллектора от нормы; d_{16} – изменение среднего квадратического отклонения второй производной профиля коллектора от нормы; d_{17} – отклонение минимального значения второй производной профиля коллектора от нормы; d_{18} – отклонение действующего значения второй производной профиля коллектора от нормы; d_{19} – уровень нажатия на щетку не соответствует норме; d_{20} – ширина щетки не соответствует норме; d_{21} – главные полюса расположены несимметрично; d_{22} – щетки расположены несимметрично.

Выявление соответствия дефектов, образующихся в результате эксплуатации КЩУ ТЭД, и диагностических параметров, характеризующих техническое состояние контактной пары «коллектор–щетка», основывается на применении двудольных графов. Одним из основных этапов формирования двудольного графа соответствия дефектов и диагностических параметров является построение рабочей граф-модели.

Первоначально производится упорядочение вершин граф-моделей методом экспертных оценок [19]. Затем каждому ребру граф-модели ставится в соответствие некоторая величина – вес ребра, характеризующий коэффициент связи между соответствующими параметрами. На основании весов ребер формируется исходная матрица смежности [20].

На основании исходной матрицы смежности сформирована матрица частных расстояний, с использованием которой определяются синдромы $D(e_i)$ и строится соответствующая таблица синдромов (таблица).

Таблица. Фрагмент таблицы синдромов

Table. Fragment of syndromes table

Параметр граф-модели Graph model parameter	Параметр граф-модели Graph model parameter								
	t_k^0	i_p	$\Delta U_{\text{щ}}$	P_k	$I_{\text{щ}}$	КО	S_h	γ_m	$\gamma_{m\text{щ}}$
ΣC_{ik1}		5	3		6	8			
ΣC_{ik4}		5	3		6		8		
ΣC_{ik7}		5	3		6				9
ΣC_{p8}				1				3	
ΣC_{p9}				1					3

В случае, если какая-либо строка матрицы частных расстояний имеет несколько ненулевых элементов, что означает разветвление маршрутов, то строятся подсиндромы $D^{(j)}(e_i)$ для каждого нулевого элемента, приравнивая поочередно остальные ненулевые элементы нулю. Результирующий синдром определяется следующим образом:

$$D(e_i) = \bigcup_j D^{(j)}(e_i).$$

Следующим шагом является построение компонентов достижимости $P(e)$ (на рис. 2 приведен компонент достижимости для параметра t_k^0). Для каждого $D(e_i)$ или $D^0(e_i)$ формировался маршрут, в котором последовательно отмечались все ненулевые элементы в порядке возрастания значений весов ребер ρ согласно методике, представленной в [20].

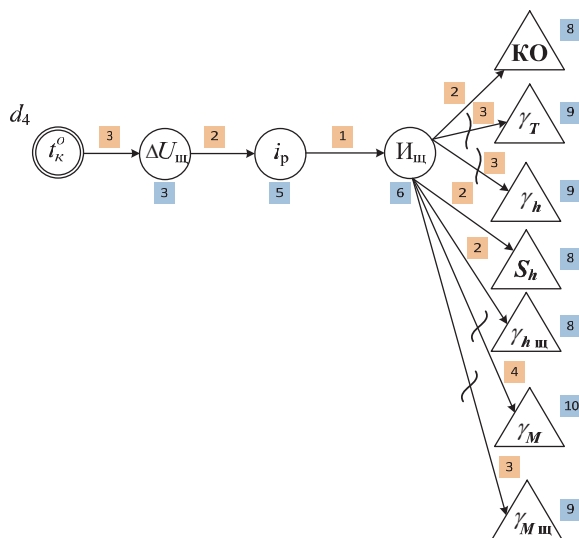


Рис. 2. Компонент достижимости параметра t_k^0

Fig. 2. Component of reachable vertex t_k^0

Критическое значение расстояния $\rho_{кр}=8$ определялось как медиана значений по гистограмме расстояний всех длин маршрутов.

Учитывая полученное значение $\rho_{кр}$, определены усеченные синдромы $\overline{D}(e)$ путем вычеркивания ненулевых элементов, значения которых превышают критическое значение. По полученным усеченным синдромам $\overline{D}(e)$ произведена коррекция состава синдромов $D(e_i)$. На рис. 2 усеченные компоненты достижимости отмечались волнистой линией [20].

Анализ усеченных компонентов достижимости $P(e)$ показал, что одним из параметров, оказывающих значительное влияние на внутренние параметры КЩУ ТЭД (КО, S_h , $\gamma_{h\text{ щ}}$), является температура коллектора t_k^0 .

Повышение температуры коллектора t_k^0 объясняется как механическими, так и электрическими причинами (рис. 3).

При повышении частоты вращения якоря n непосредственно возрастает частота появления ламели под щеткой. Рост температурной нагрузки обуславливается трением в контактной паре «коллектор–щетка», а также протеканием электрического тока через нее. Поскольку период, за который ламель совершает полный оборот, сокращается, коллекторная пластина не успевает охладиться до первоначальной температуры.

При увеличении контактного давления P_k возрастает сила трения в контактной паре «коллектор–щетка» и поверхностные слои коллекторной

меди нагреваются значительно. В случае уменьшения контактного давления P_k повышается вероятность отрыва щетки от коллектора и возникновения искрения, в связи с чем температура в контакте может повышаться. Изменение давления в контакте также влияет на реальную площадь взаимодействия контактной пары, изменяя плотность тока $j_{щ}$ в щеточном контакте.

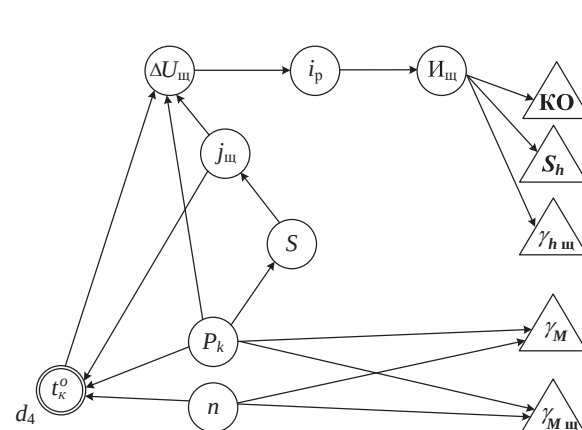


Рис. 3. Влияние температуры на внутренние параметры

Fig. 3. Temperature influence on internal parameters

Изменение температуры коллектора – один из факторов, определяющих падение напряжения в щеточном контакте $\Delta U_{щ}$ и, как следствие, величину тока разрыва i_p . Величина тока разрыва непосредственно влияет на уровень искрения под щетками, таким образом определяет вероятность возникновения кругового огня по коллектору при выгорании одной или нескольких ламелей ($S_h \rightarrow \max$) и обуславливает рост электромеханической составляющей износа щетки $\gamma_{h\text{ щ}}$.

В результате объединения усеченных компонентов достижимости $P(e)$ построена рабочая граф-модель (рис. 4), отличающаяся от исходной отсутствием ребер $\langle E_{тр}, i_p \rangle$, $\langle И_{щ}, \gamma_T \rangle$, $\langle И_{щ}, \gamma_h \rangle$, $\langle И_{щ}, \gamma_{M\text{ щ}} \rangle$, разорванных во всех рассматриваемых маршрутах:

$$O = \overline{D(e_1)} \cup \overline{D(e_2)} \cup \dots \cup \overline{D(e_n)},$$

где $\overline{D(e_1)}$, $\overline{D(e_2)}$, $\overline{D(e_n)}$ – усеченные синдромы вершин e .

Рабочая граф-модель не содержит параметра γ_h , определяющего электромеханический износ коллектора по высоте пластины с учетом электродугового искрения.

Анализ полученной граф-модели показывает, что разрыв ребер $\langle И_{щ}, \gamma_{M\text{ щ}} \rangle$, $\langle И_{щ}, \gamma_{M\text{ щ}} \rangle$ обусловлен преобладающим влиянием частоты вращения электродвигателя n и давления в щеточном контакте P_k над искрением под набегающим краем щетки при рассмотрении механического износа щеток $\gamma_{M\text{ щ}}$ и коллектора γ_M .

Физический смысл исключенного параметра γ_h – выгорание поверхности ламели по высоте под действием электродугового искрения под набегающим краем щетки. Необходимо отметить, что параметр γ_h учитывается в факторах γ_M и S_h следующим

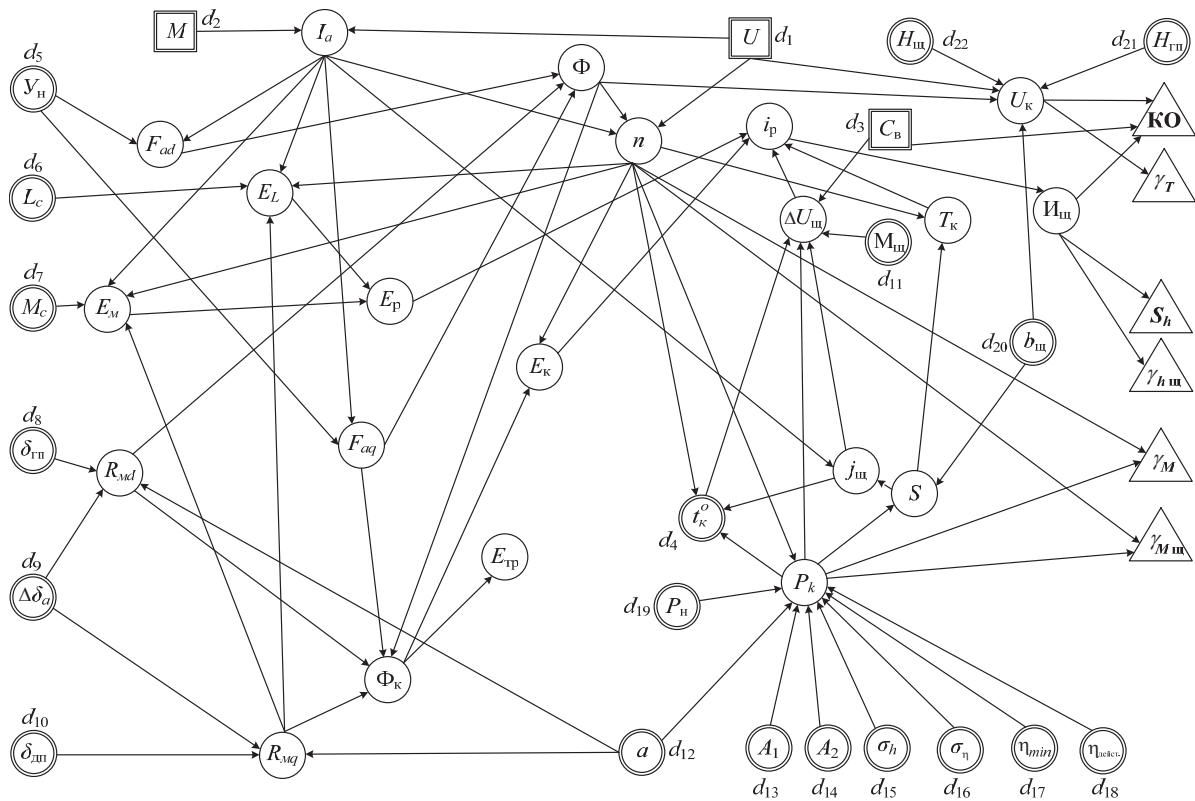


Рис. 4. Рабочая граф-модель КЩУ ТЭД

Fig. 4. Working graph model of commutator-brush unit of traction DC motor

образом: параметр γ_m характеризует электромеханический износ ламели без учета электродугового искрения, т. е. только от механического трения, параметр S_h – площадь поверхности ламели, подверженной электромеханическому износу от воздействия электродугового искрения. При износе поверхности ламели по ширине от воздействия электродугового искрения шероховатость пластины повышается, что увеличивает возможность возникновения искрения под набегающим краем щетки, и процесс повторится. Ввиду того, что γ_h носит локальный характер и не является определяющим для возникновения аварийных режимов работы двигателя, то приоритет в оценке износа следует отдавать параметру S_h . Величина γ_h , как правило, не превышает величины износа коллектора γ_m , поэтому может быть учтена в этих двух факторах.

Воздействие искрения на поверхность ламели увеличивает износ S_h , тем самым увеличивая шероховатость поверхности. Изменение шероховатости поверхности оказывает непосредственное влияние на механический износ ламели γ_m . Необходимо отметить, что значительные величины износов S_h и γ_h приводят к аварийному режиму работы ТЭД. Поскольку значительный износ γ_h возможно выявлять по другим параметрам до наступления аварийного режима работы, то необхо-

димостью в его оценке на этапе контроля работоспособности ТЭД отсутствует.

Заключение

Сформирована рабочая граф-модель КЩУ ТЭД как объекта преобразования электрической энергии в системах электроснабжения железнодорожного транспорта с учетом влияния тепловых факторов. Установлено, что искрение щеток электрической машины не оказывает существенного влияния на электромеханический износ коллектора без учета электродугового искрения и электромеханический износ щетки.

Обосновано исключение из рабочей граф-модели параметра электромеханического износа коллектора по высоте пластины с учетом электродугового искрения. Указанный вид износа учитывается в факторах электромеханического износа коллектора по ширине пластины, с учетом и без учета электродугового искрения.

Полученная рабочая граф-модель является основой для построения двудольного графа соответствия дефектов и диагностических параметров, определяющих техническое состояние и качество работы КЩУ ТЭД, а также определяет интенсивность электромеханического и теплового износа коллектора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 27.002–2009. Надежность в технике. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2010. – 32 с.
2. Кузнецов Н.Л. Надежность электрических машин: учебное пособие для вузов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 432 с.
3. Бочаров В.И. Тяговые электродвигатели электровозов. – Новочеркасск: Агентство «Наутилус», 1998. – 672 с.
4. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года: утверждена Правительством Российской Федерации от 17 июня 2008 г. № 877-р. URL: http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?id=3997&layer_id=5104&STRUCTURE_ID=704 (дата обращения: 07.11.2015).
5. Совершенствование технологии диагностирования технического состояния коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей электровозов: монография / В.В. Харламов, П.К. Шкодун, А.В. Долгова, Д.А. Ахунов – Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2015. – 198 с.
6. Харламов В.В. Методы и средства диагностирования технического состояния коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей и других коллекторных машин постоянного тока: монография. – Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2002. – 233 с.
7. Авилов В.Д. Оптимизация коммутационного процесса в коллекторных электрических машинах постоянного тока: монография. – Омск: Омский научный вестник, 2013. – 356 с.
8. Хольм Р. Электрические контакты. – М.: Иностранная литература, 1961. – 464 с.
9. Trends in fault diagnosis for electrical machines: a review of diagnostic techniques / H. Henaoui, G.A. Capolino, M. Fernandez-Cabanas, F. Filippetti, C. Bruzzese, E. Strangas, R. Pucsa, M. Riera-Guasp, S. Hedayati-Kia // IEEE Industrial Electronics Magazine. – 2014. – V. 8. – № 2. – P. 31–42.
10. Electric machines. Modeling, condition monitoring and fault diagnosis / A. Toliyat, S. Nandi, S. Choi, H. Meshgin-Kelm. – Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, 2012. – 272 p.
11. Харламов В.В., Шкодун П.К., Афонин А.П. Формирование эффективного множества диагностических параметров для контроля технического состояния коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей в условиях неидентичности коммутационных циклов // Известия Транссиба. – 2012. – № 4 (12). – С. 69–75.
12. Механизмы разупрочнения и разрушения контактного провода / В.Н. Лип, А.И. Кондратьев, Е.В. Муромцева, С.Н. Химухин // Дефектоскопия. – 2003. – № 12. – С. 32–38.
13. Ахунов Д.А. Повышение достоверности контроля профиля коллектора электрических машин вихрековым методом // Омский научный вестник. – 2012. – № 3 (113). – С. 223–226.
14. Сипайлов Г.А., Санников Д.И., Жадан В.А. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах: учебное пособие. – М.: Высшая школа, 1989. – 239 с.
15. Glowacz Ad., Glowacz An., Glowacz Z. Recognition of thermal images of direct current motor with application of area perimeter vector and Bayes classifier // Measurement Science Review. – 2015. – V. 15. – № 3. – P. 119–126.
16. Sebok M., Gutten M., Kucera M. Diagnostics of electric equipments by means of thermovision // Przegląd Elektrotechniczny. – 2011. – V. 87 (10). – P. 313–317.
17. Щербатов В.В., Рапопорт О.Л., Цукублин А.Б. Моделирование теплового состояния тягового электродвигателя для прогнозирования ресурса // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 7. – С. 156–159.
18. Термографические исследования коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей подвижного состава / В.В. Харламов, П.К. Шкодун, А.В. Долгова, А.С. Хлопцов // Известия Транссиба. – 2014. – № 3 (19). – С. 44–50.
19. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. – М.: Наука, 1986. – 544 с.
20. Диагностирование на граф-моделях: на примерах авиационной и автомобильной техники / Я.Я. Осис, Я.А. Гельфандбейн, З.П. Маркович, Н.В. Новожилова. – М.: Транспорт, 1991. – 244 с.

Поступила 10.11.2015 г.

UDC 621.313.2

CREATING A GRAPH MODEL FOR THE DIAGNOSIS OF THE TRACTION MOTOR COMMUTATOR-BRUSH UNIT CONSIDERING THERMAL FACTORS

Viktor V. Kharlamov,Omsk State Transport University,
35, Karl Marks Avenue, Omsk, 644046, Russia. E-mail: hvv-omgups@mail.ru**Pavel K. Shkodun,**Omsk State Transport University,
35, Karl Marks Avenue, Omsk, 644046, Russia. E-mail: pkshk@mail.ru**Andrey S. Khloptsov,**Omsk State Transport University,
35, Karl Marks Avenue, Omsk, 644046, Russia. E-mail: emoe@omgups.ru**Anna V. Dolgova,**Omsk State Transport University,
35, Karl Marks Avenue, Omsk, 644046, Russia. E-mail: lady_annie@mail.ru

Increasing of diagnosis accuracy of the technical condition and energy efficiency of the rolling stock traction motor is one of the current problems of the modern railway transport. Among the methods, which underlie a technical diagnostic system, the most promising is a semigraphical method, which displays the object in the space of diagnostic features and improves the accuracy of the diagnosis. The relevance of the discussed issue is caused by the need to increase the diagnosis accuracy of the technical condition of a traction motor commutator-brush unit, because it influences the energy efficiency of electric energy conversion in the power supply systems of railway transport.

The main aim of the study: creation of the parent graph model matrix to generate a table of syndromes and produce graph model components of reachable vertex. The calculation of the critical distance to trim graph model components of reachable vertex and formation of the working graph model to control the working quality of the commutator-brush unit of traction DC motor function.

The methods used in the study are based on the application of the applied graph theory. The problem is solved based on the provisions of the electrical machines theory, using the methods of expert estimations, semigraphical method and methods of mathematical statistics. In the process of calculation and analysis of mathematical relationships the authors used Microsoft Excel 2010 and programming language Visual Basic for Applications.

The results. The authors refined a commutator-brush unit traction motor graph model. Based on the parent matrix we also formed a matrix of partial distances. Using the matrix partial distances data the syndromes were formed and graph model components of reachable vertex were produced. Critical distance is defined as the median of the value of the histogram distance routes of all lengths graph model. Based on the determined critical distance value the components of reachable vertex were truncated and the syndromes were corrected. The merger of truncated syndromes led to the formation of a working model.

Key words:

Diagnosis, commutator-brush unit, graph model, component of reachable vertex, syndrome, traction motor.

REFERENCES

1. GOST R 27.002–2009. *Nadezhnost v tekhnike. Terminy i opredeleniya* [State Standard R 27.002–2009. The reliability of the technique. Terms and definitions]. Moscow, Standartinform, 2010. 32 p.
2. Kuznetsov N.L. *Nadezhnost elektricheskikh mashin* [The reliability of electrical machines]. Moscow, MEI Publ., 2006. 432 p.
3. Bocharov V.I. *Tyagovye elektrodvigateli elektrovozov* [Locomotive traction motors]. Novocherkassk, Nautilus Agency Publ., 1988. 672 p.
4. *Strategiya razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda. Utverzhdena Pravitelstvom Rossiyskoy Federatsii ot 17.06.2008 № 877-p* [Development strategy of railway transport in the Russian Federation until 2030. Approved by the Government of the Russian Federation on 17 June 2008, no. 877-p]. Available at: http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?id=3997&layer_id=5104&STRUCTURE_ID=704 (accessed 7 November 2015).
5. Kharlamov V.V., Shkodun P.K., Dolgova A.V., Akhunov D.A. *Sovershenstvovanie tekhnologii diagnostirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya kollektorno-shchetchnogo uzla tyagovykh elektrodvigateley elektrovozov* [Improving the technology of diagnosing the technical condition of the collector-brush assembly of electric traction motors]. Omsk, Omsk State Transport University Publ., 2015. 198 p.
6. Kharlamov V.V. *Metody i sredstva diagnostirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya kollektorno-shchetchnogo uzla tyagovykh elektrodvigateley i drugikh kollektornykh mashin postoyannogo toka* [Methods and means for diagnosing the technical condition of the traction motors collector-brush assembly and other collector DC machines]. Omsk, Omsk State Transport University Publ., 2002. 233 p.
7. Avilov V.D. *Optimizatsiya kommutatsionnogo protsessa v kollektornykh elektricheskikh mashinakh postoyannogo toka* [Optimization of the switching process in DC electric machines commutator]. Omsk, Omskiy Nauchnyy Vestnik Publ., 2013. 356 p.
8. Kholm R. *Elektricheskie kontakty* [Electric contacts]. Moscow, Foreign Literature Publ., 1961. 464 p.
9. Henaio H., Capolino G.A., Fernandez-Cabanas M., Filippetti F., Bruzzese C., Strangas E., Pucsa R., Riera-Guaspa M., Hedayati-Kia S. Trends in fault diagnosis for electrical machines: a review of diagnostic techniques. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2014, vol. 8, no. 2, pp. 31–42.

10. Toliyat A., Nandi S., Choi S., Meshgin-Kelm H. *Electric machines. Modeling, condition monitoring and fault diagnosis*. Boca Raton, Florida, USA, CRC Press, 2012. 272 p.
11. Kharlamov V.V., Shkodun P.K., Afonin A.P. Formirovanie effektivnogo mnozhestva diagnosticheskikh parametrov dlya kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya kollektorno-shchetchnogo uzla tyagovykh elektrodvigately v usloviyakh neidentichnosti kommutatsionnykh tsiklov [The formation of an effective set of diagnostic parameters to control the technical condition of the collector-brush assembly traction motors are not identical in terms of operating cycles]. *Trans-Siberian Bulletin*, 2012, no. 4 (12), pp. 69–75.
12. Li V.N., Kondratyev A.I., Muromtseva E.V., Khimukhin S.N. Mekhanizmy razuprochneniya i razrusheniya kontaktnogo provo-da [Mechanisms of weakening and destruction of the contact wire]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2003, no. 12, pp. 32–38.
13. Akhunov D.A. Povyshenie dostovernosti kontrolya profilya kollektora elektricheskikh mashin vikhretkovym metodom [Increasing the reliability of reservoir profile control of electric motors by eddy current method]. *Omskiy Nauchnyy Vestnik*, 2012, no. 3 (113), pp. 223 – 226.
14. Sipaylov G.A., Sannikov D.I., Zhadan V.A. *Teplovye, gidravlicheskie i aerodinamicheskie raschety v elektricheskikh mashinakh* [Thermal, hydraulic and aerodynamic calculations in electric machines]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1989. 239 p.
15. Glowacz Ad., Glowacz An., Glowacz Z. Recognition of thermal images of direct current motor with application of area perimeter vector and Bayes classifier. *Measurement Science Review*, 2015, vol. 15, no. 3, pp. 119–126.
16. Sebok M., Gutten M., Kucera M. Diagnostics of electric equipments by means of thermovision. *Przeglad Elektrotechniczny*, 2011, vol. 87 (10), pp. 313–317.
17. Shcherbatov V.V., Rapoport O.L., Tsukublin A.B. Modelirovanie teplovogo sostoyaniya tyagovogo elektrodvigatelya dlya prognozirovaniya resursa [Modeling of the thermal state of the traction motor to predict the resource]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2005, no. 7, pp. 156–159.
18. Kharlamov V.V., Shkodun P.K., Dolgova A.V., Khloptsov A.S. Termograficheskie issledovaniya kollektorno-shchetchnogo uzla tyagovykh elektrodvigately podvizhnogo sostava [Thermographic study of collector-brush assembly traction motors of rolling stock]. *The Trans-Siberian Bulletin*, 2014, no. 3 (19), pp. 44–50.
19. Bronshteyn I.N., Semendyaev K.A. *Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vtuzov* [Handbook of mathematics for engineers and students of technical colleges]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 544 p.
20. Osis Ya.Ya., Gelfandbeyn Ja.A., Markovich Z.P., Novozhilova N.V. *Diagnostirovanie na graf-modelyakh: na primerakh aviatsionnoy i avtomobilnoy tekhniki* [Diagnosis on graph models: the examples of aviation and automotive technology]. Moscow, Transport Publ., 1991. 244 p.

Received: 10 November 2015.