

На правах рукописи

Качин Олег Сергеевич

**ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА СКОЛЬЗЯЩЕГО КОНТАКТА
УНИВЕРСАЛЬНЫХ КОЛЛЕКТОРНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ**

Специальность 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2008

Работа выполнена на кафедре электропривода и электрооборудования Томского политехнического университета.

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор,
Бекишев Рудольф Фридрихович

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор,
Авилов Валерий Дмитриевич

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
Данекер Валерий Аркадьевич

Ведущая организация: ФГУП «Томский электротехнический завод»

Защита диссертации состоится 24 декабря 2008 года в 10 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.11 при Томском политехническом университете в ауд. 217 8-го учебного корпуса по адресу: 634050, г. Томск, ул. Усова, 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского политехнического университета, по адресу: 634034, ул. Белинского, 55 или на сайте: www.lib.tpu.ru

Автореферат разослан «___» ноября 2008 года.

Ученый секретарь
совета по защите докторских и
кандидатских диссертаций,
к.т.н., доцент

Ю.Н. Дементьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Из технической литературы известно, что отказ коллекторно-щеточного узла (КЩУ) универсальных коллекторных электрических машин (КЭМ) ввиду износа его элементов составляет до 48% от общего числа отказов данного типа машин. Одним из путей решения этого вопроса является совершенствование, а также разработка методов оценки состояния КЩУ и коммутационной напряженности универсальных КЭМ не только при работе уже готовой машины, но и на стадии ее проектирования.

В связи с изложенным актуальным является создание адекватной расчётной модели изнашивания электрических щеток (ЭЩ), так как именно они в подавляющем большинстве случаев ограничивают ресурс работы скользящего электрического контакта (СК) рассматриваемого класса машин. Модель должна в максимальной степени учитывать влияние фрикционной, электрокоррозионной (токовой) и электроэрозионной составляющих изнашивания щеток, а также механическое состояние коллектора и подшипников электрической машины (ЭМ).

Производителям универсальных КЭМ необходимо программное обеспечение (ПО), которое позволит проводить виртуальные эксперименты с целью отработки различных конструктивных решений ЭМ и оптимизации ряда параметров, определяющих степень искрения под щетками и ресурс их работы.

Несмотря на существенный вклад многих исследователей в изучение свойств СК, его поведение в динамике все еще недостаточно изучено ввиду сложности протекающих процессов, а также отсутствия специальных измерительных систем и методик обработки измеряемой информации. Кроме того, различные отрасли промышленности нуждаются в современных высокоточных измерительных системах для их использования на различных стадиях технологических процессов изготовления изделий, а также их последующего диагностирования в процессе эксплуатации.

Решение обозначенных проблем является актуальной задачей и представляет научный и практический интерес.

Целью диссертационной работы является разработка программных и технических средств для повышения ресурса СК универсальных КЭМ.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- создание математической модели изнашивания щеток универсальных КЭМ, объединяющей в себе основные параметры, влияющие на изнашивание фрикционной, электроэрозионной и электрокоррозионной природы, а также учитывающей механическое состояние коллектора и подшипниковых узлов (ПУ), коммутационных процессов и других параметров работы СК в процессе наработки на ресурс;
- разработка программного обеспечения для проведения виртуальных экспериментов, позволяющего оценить и отработать различные конструктивные решения основных элементов электрических машин и оптимизировать ряд их параметров с целью повышения ресурса КЩУ универсальных коллекторных электрических машин;

- создание методов и средств экспериментальных исследований механического состояния КЩУ и ПУ в процессе эксплуатации ЭМ;
- разработка новых конструктивных решений для повышения ресурса КЩУ ЭМ.

Методы исследований. Теоретические и экспериментальные исследования процессов изнашивания элементов СК проведены на основе теории электрических машин, теории фрикционной усталости и теории планирования эксперимента. Основные расчетные соотношения получены на базе экспериментальных исследований на реальных электрических машинах. Виртуальные эксперименты проводились на ЭВМ с помощью специализированного ПО, разработанного при участии автора. В процессе расчетов математических зависимостей и анализа данных применялись пакеты программ MATLAB, MathCAD, Excel, регрессионный анализ выполнен с помощью программы Table Curve. Разработка оригинальных программных продуктов осуществлялась в средах AVR Studio и Visual C++.

Научная новизна результатов диссертационной работы заключается в следующем:

- разработанная математическая модель (ММ) изнашивания щеток универсальных КЭМ в процессе наработки на ресурс впервые наиболее полно учитывает основные электрофизические свойства элементов СК и условия его функционирования, а также влияние контактной жесткости, профиля коллектора и вибрационных характеристик ПУ;
- предложен оригинальный метод определения поправочных коэффициентов к составляющим изнашивания электрических щеток на основе сочетания метода планирования виртуальных экспериментов и реальных ресурсных испытаний базовой электрической машины;
- созданы методы бесконтактных измерений профилей вращающихся элементов машин, а также линейных микроперемещений и вибраций контролируемых поверхностей, обладающие мировой новизной, отличительной особенностью которых является коррекция результатов измерений на основе тестового перемещения измерительного преобразователя;
- разработаны методы диагностирования механического состояния КЩУ и ПУ на основе специальной математической обработки массива измеренных в процессе работы электрической машины профилей коллекторов;
- созданы конструкции демпфированных обмоток якоря и индуктора с анизотропией магнитных свойств, обладающие мировым уровнем новизны и отличающиеся улучшенными коммутационными свойствами.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

- разработанное программное обеспечение позволяет прогнозировать ресурс щеток в процессе проектирования и модернизации универсальных КЭМ с учетом максимального числа факторов, характеризующих работу СК (реальное состояние профиля коллектора и ПУ, технические характеристики традиционных и нетрадиционных конфигураций активной зоны и конструкций обмоток якоря);

- предложенные методы диагностирования механического состояния коллекторов и ПУ ЭМ обеспечивают снижение систематических погрешностей измерений, обусловленных различиями удельных электрических сопротивлений поверхностных слоев отдельных ламелей коллектора, разностью температур нагрева ламелей, неидентичностью расположения ламелей в корпусе коллектора, изменением скорости вращения объекта контроля, неточностью ориентации измерительного преобразователя (ИП) относительно контролируемой поверхности, а также внешними вибрационными воздействиями на объект контроля;
- разработанная методика анализа массива измеренных профилей коллекторов на основе модифицированных выражений для расчета коэффициентов ряда Фурье позволяет осуществлять отдельную оценку вибрационных воздействий коллекторов и ПУ на механическую устойчивость СК как по мгновенным, так и по усредненным значениям параметров вибраций, что позволяет выработать рекомендации относительно нормируемого профиля коллектора и его стабильности в процессе наработки на ресурс, а также о целесообразности использования тех или иных конструкций коллекторов и ПУ;
- созданные конструкции активных элементов электрической машины и выработанные рекомендации относительно величины давления в СК, позволяют достичь увеличения ресурса КЩУ универсальных коллекторных электродвигателей до 40%.

Реализация результатов работы. Выполнение ряда задач диссертационной работы осуществлялось в соответствии с государственными контрактами в рамках ФЦНТП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники» на 2002-2006 годы № 02.442.11.7107 от 26 октября 2005 г. «Разработка интеллектуального измерительного комплекса для дистанционного контроля микроперемещений элементов машин и механизмов, их теплового состояния и электрических свойств» и № 02.442.11.7267 от 28 февраля 2006 г. «Разработка электромеханических преобразователей коллекторного типа с повышенной энергоэффективностью».

По заказу компании «LG Electronics Inc.» разработан и передан для использования вариант методики расчета ресурса работы щеток универсальных коллекторных электрических машин малой мощности.

Диагностический комплекс для бесконтактного контроля профиля вращающихся элементов машин в статических и динамических режимах их работы прошел испытания на предприятии ОАО «Бурейская ГЭС».

Использование материалов диссертационной работы предприятиями подтверждено актами о внедрении и испытании, представленными в приложении.

Результаты диссертационной работы используются при выполнении НИОКР №52/у от 10.08.2008 по программе «УМНИК» Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на международных научно-практических конференциях «Современные техника и технологии» (Томск, 2005-2008 гг.), международных научно-технических конференциях «Электромеханические преобразователи энергии» (Томск, 2005, 2007 гг.), «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты» (Крым, Алушта, 2006 г.), «Неразрушающий контроль и диагностика» (Томск, 2008 г.), всероссийской научно-технической конференции «Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования» (Томск, 2006 г.), всероссийской научно-практической конференции «Системы автоматизации в образовании, науке и производстве» (Новокузнецк, 2007 г.), научно-технической конференции «Электронные и электромеханические системы и устройства» (Томск, 2006 г.), научно-практической конференции «Инновации в атомной отрасли: проблемы и решения». (Северск, 2007 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 18 печатных работ, в том числе 6 статей в журналах по списку ВАК, 6 патентов РФ на изобретения, 1 положительное решение по заявке на изобретение, 3 свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех основных разделов, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем работы составляет 178 страниц, содержит 76 иллюстраций, 3 таблицы, список литературы из 123 наименований, 3 приложения на 13 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении проведен анализ существующего отечественного и зарубежного программного обеспечения для проектирования электрических машин, обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы ее цель, основные задачи, научная новизна и практическая ценность исследований.

В первой главе проведен обзор современного состояния работ в области оценки механического состояния коллекторно-щеточных и подшипниковых узлов в процессе эксплуатации электрических машин.

На основании обзора существующих методик экспериментальной оценки профилей коллекторов и проведенных с участием автора исследований предложен новый метод измерения зазора между измерительным преобразователем (ИП) и контролируемой поверхностью [7]. Суть данного метода заключается в следующем:

– проводятся опорные измерения и выполняются дополнительные измерения после перемещения измерительного преобразователя на образцовую величину δ_0 :

$$y_0 = a \cdot x, \quad y_d = a \cdot (x + \delta_0), \quad (1)$$

где y_0 , y_d – выходной параметр измерительного устройства при опорном и дополнительном измерении, м; a – коэффициент коррекции измерительного тракта прибора; x – измеряемый зазор между ИП измерительного устройства и

объектом измерения, м; δ_0 – образцовая величина изменения зазора, определяющая заданную точность измерений, м;

– вычисляются коэффициенты коррекции измерительного тракта прибора и реальное значение зазора между ИП и контролируемой областью объекта измерений:

$$a = \frac{y_d - y_0}{\delta_0}, \quad x = \frac{y_0}{a}. \quad (2)$$

Следует отметить, что при измерениях без применения коррекции, погрешности могут достигать нескольких десятков процентов, а с использованием предложенного метода они снижаются в десятки раз. Данный метод наиболее подходит для статических измерений, т.к. в динамических режимах величина зазора между измерительным преобразователем и одной и той же точкой контролируемой поверхности может изменяться в пределах десятков мкм, например, вследствие наличия биений вала якоря ЭМ в ПУ от оборота к обороту.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что в динамических режимах зазор между ИП и контролируемой областью объекта может быть описан уравнением, которое включает сумму реального значения зазора ($x_{\text{реальн.}}$) и ряда гармонических вибраций ПУ. Тогда при достаточно большом числе измерений среднее значение гармонических составляющих $\rightarrow 0$, а среднее значение зазора $\rightarrow x_{\text{реальн.}}$.

На основе вышеизложенного при участии автора был разработан метод измерения зазора между измерительным преобразователем и контролируемой поверхностью в динамических режимах [14]. Суть предложенного метода измерений состоит в следующем:

- проводится серия из N_0 опорных измерений зазора;
- выполняется перемещение ИП на образцовую величину δ_0 , которая определяется по уравнению:

$$\delta_0 \geq \frac{(\Delta\delta + 2 \cdot \Delta\pi) \cdot (x + \Delta x)}{\Delta x}, \quad (3)$$

где $\Delta\delta$ – максимальная погрешность изменения зазора на образцовую величину, м; $\Delta\pi$ – максимальная погрешность определения y_0 и y_d в сериях последовательных измерений, м; Δx – допустимая погрешность измерений зазора, м; x – значение измеряемого зазора, м;

- проводится серия из N_d дополнительных измерений зазора (измененного на образцовую величину δ_0);

– результаты серий опорных и дополнительных измерений зазора определяются как средние значения из N_0 и N_d последовательных измерений в соответствии с выражениями:

$$y_0 = \frac{\sum_{i=1}^{i=N_0} y_{0,i}}{N_0}, \quad y_d = \frac{\sum_{i=1}^{i=N_d} y_{d,i}}{N_d}; \quad (4)$$

– выполняется коррекция измерительного тракта прибора согласно выражению (2).

На основе данного метода измерений были разработаны другие бесконтактные способы измерения: вибраций и профиля контролируемой поверхности в динамических режимах [7].

Помимо профиля коллектора, для практики эксплуатации ЭМ представляют интерес параметры вибраций ПУ. Автором предложен метод выделения профиля коллектора и вибраций якоря в ПУ из массива последовательных измерений зазора между ИП и коллектором на работающей машине, структура которого представлена на рис. 1.

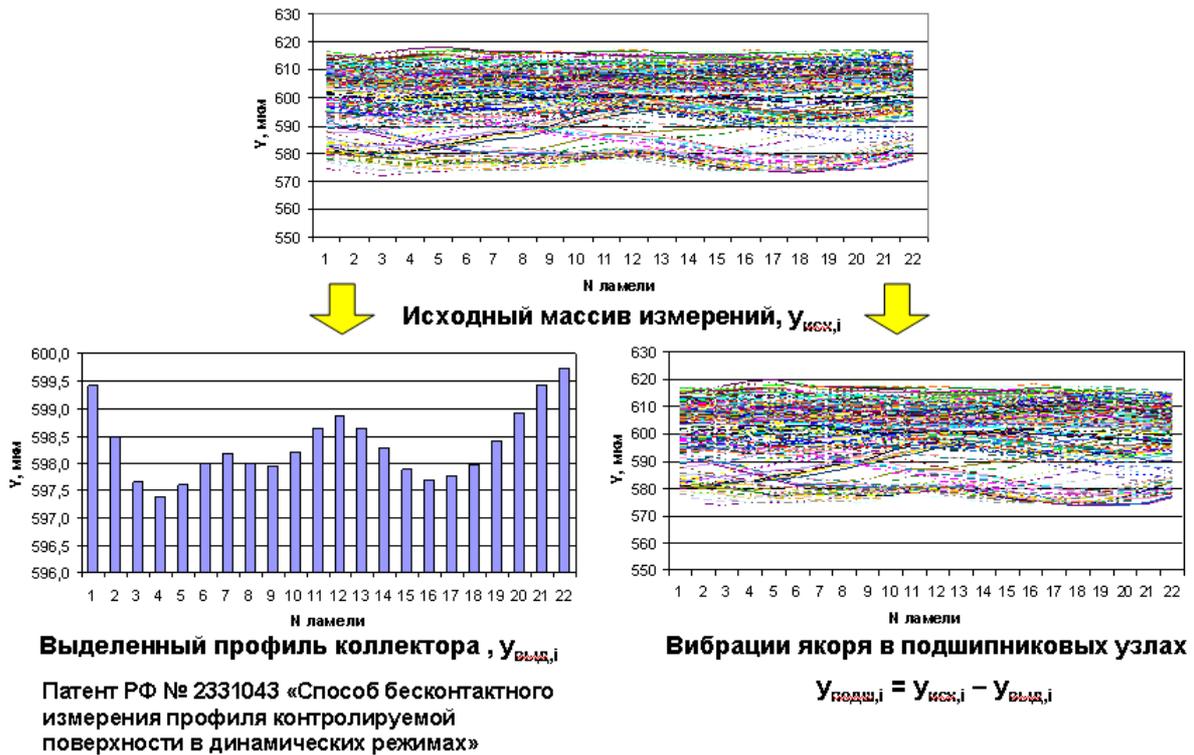


Рис. 1. Выделение профиля коллектора и массива вибраций ПУ из массива измерений

Автором предложены оригинальные выражения для расчета коэффициентов ряда Фурье a_j и b_j применительно к профилю коллектора ЭМ:

$$a_j = \frac{\sum_{i=1}^K y_i \left(\cos \left[\omega_j \cdot \left(-\frac{T}{2K} + \frac{T}{K} \cdot (i-1) \right) \right] - \cos \left[\omega_j \cdot \left(-\frac{T}{2K} + \frac{T}{K} \cdot i \right) \right] \right)}{\pi \cdot j}; \quad (5)$$

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^K y_i \left(\sin \left[\omega_j \cdot \left(-\frac{T}{2K} + \frac{T}{K} \cdot i \right) \right] - \sin \left[\omega_j \cdot \left(-\frac{T}{2K} + \frac{T}{K} \cdot (i-1) \right) \right] \right)}{\pi \cdot j}, \quad (6)$$

где y_i – i -ое значение профилограммы, соответствующее i -ой ламели; $i = 1 \div K$, K – количество коллекторных пластин; $T = 2\pi/\omega$; j – номер гармоники; ω_j – угловая частота j – той гармоники ($\omega_j = \omega \cdot j$; $\omega = 2 \cdot \pi \cdot n_{кол}/60$ – частота первой гармоники).

Преимуществом применения предложенных выражений (5,6) для гармонического анализа по сравнению с дискретным преобразованием Фурье

(ДПФ), является существенно более точное выполнение обратного преобразования Фурье при использовании части гармоник. Применение предложенных выражений в данном случае снижает погрешность восстановления профиля при обратном преобразовании Фурье в 5-6 раз по сравнению с ДПФ.

С помощью выражений (5,6) выделенный профиль коллектора $u_{\text{выд}}$ разлагается на динамический профиль $u_{\text{дин}}$ (состоящий из гармоник, воздействующих на движение щетки в колодце щеткодержателя) и расчетный профиль коллектора $u_{\text{расч}}$ (состоящий из гармоник, демпфируемых контактным слоем СК (высокочастотный спектр)):

$$u_{\text{дин},i} = \sum_{j=1}^m (a_j \sin(\omega_j \cdot t_i) + b_j \cos(\omega_j \cdot t_i)); u_{\text{расч},i} = \sum_{j=m+1}^N (a_j \sin(\omega_j \cdot t_i) + b_j \cos(\omega_j \cdot t_i)), \quad (7)$$

где $m \approx \pi \cdot \frac{D_k}{b_{\text{щ.д}}}$ – ближайшее целое число, D_k – диаметр коллектора,

$b_{\text{щ.д}}$ – ширина щетки по дуге окружности коллектора; $t_i = T(i-1)/K$;

N – максимальное число анализируемых гармонических составляющих.

Для определения усредненных параметров работы ПУ (перемещение, скорость и ускорение внутреннего кольца подшипника) применялась разработанная автором специальная методика:

– выполняется разделение массива данных о вибрациях якоря на два массива, содержащих только возрастающие и только спадающие кривые вибраций (к возрастающим относятся кривые, у которых зазор между первой ламелью коллектора и ИП бесконтактного профилометра увеличивается от предыдущего оборота к последующему, остальные кривые вибраций якоря относятся к спадающим);

– производится усреднение массива со спадающими или возрастающими кривыми вибраций якоря и поворот усредненной кривой к оси:

$$u_{\text{пов}} = y_i - y_1 - (y_K - y_1) \cdot \frac{i-1}{K-1}, \quad (8)$$

где $u_{\text{пов}}$ – повернутая к оси кривая вибраций якоря;

$i = 1 \div K$, K – количество коллекторных пластин;

– выполняется синтез преобразованной кривой вибраций якоря путем объединения повернутой к оси кривой и зеркальной ей:

$$y_n^{\text{преобр}} = \begin{cases} y_n^{\text{пов}}, & n = 1 \div K; \\ y_n^{\text{зер}}, & \text{где } y_{K+n}^{\text{зер}} = -y_{K-n}^{\text{пов}}, n = (K+1) \div (2K-1). \end{cases} \quad (9)$$

Разработанная методика позволяет устранить эффект Гиббса и снизить погрешность определяемых значений ускорений до 30 раз.

Предложенные выше методы апробированы в ходе экспериментальных исследований механического состояния КЩУ и ПУ универсального

электродвигателя LG VCE280E02 в процессе наработки на ресурс в номинальном режиме работы (35000 об/мин, 1800 Вт).

Полученные в ходе экспериментальных исследований данные о динамике изменения механического состояния коллектора и ПУ в процессе наработки электродвигателя LG VCE280E02 на ресурс представлены на рис. 2–5. Из представленных данных следует, что все рассмотренные величины за время ресурсных испытаний существенно возросли: максимальные значения перепадов между ламелями – в 7,8 раз, а средние значения перепадов вдоль окружности коллектора – в 13,5 раз; среднее значение ускорений, действующих на щетку со стороны поверхности коллектора – в 6,5 раз; амплитуда вибраций якоря электродвигателя – в 5,9 раза, а среднее значение виброускорений якоря – в 6,6 раза. Как следует из приведенных на рис. 5 данных, за время работы

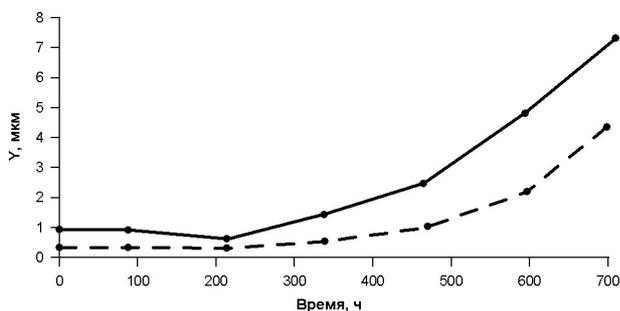


Рис. 2. Динамика изменения максимальных (—) и средних (---) значений перепадов между ламелями коллектора вдоль его окружности в период ресурсных испытаний

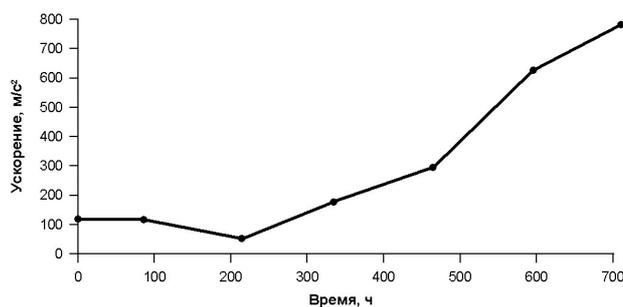


Рис. 3. Динамика изменения среднего ускорения щетки, обусловленного воздействием со стороны рабочей поверхности коллектора в процессе ресурсных испытаний электродвигателя

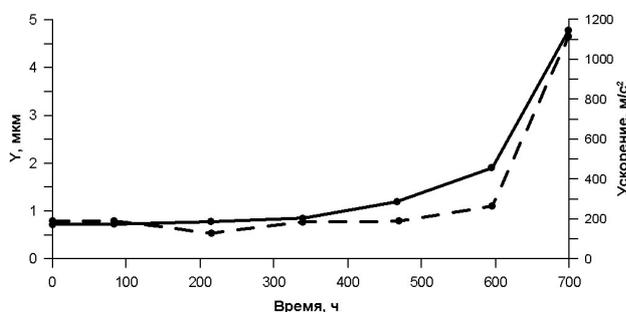


Рис. 4. Динамика изменения максимумов перемещений якоря (—) и среднего значения виброускорений якоря электродвигателя (---) в процессе наработки на ресурс

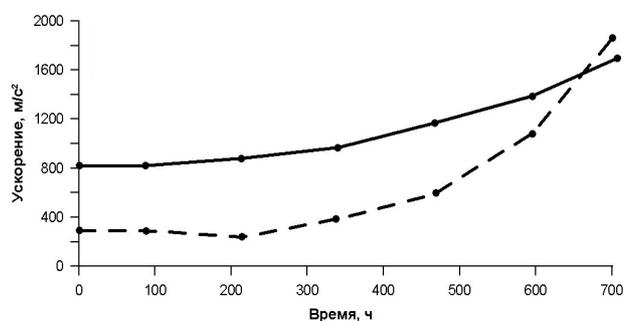


Рис. 5. Ускорение, развиваемое нажимной пружиной (—), а также суммарное среднее виброускорение коллектора и подшипниковых узлов электродвигателя (---) в процессе наработки на ресурс

электродвигателя суммарное среднее виброускорение щетки от воздействия коллектора и якоря возросло в 6,5 раз и к концу ресурсных испытаний достигло предельной величины для нормальной работы КЩУ. Для дальнейшего увеличения срока службы рассматриваемого электродвигателя необходимо обеспечить более надежное контактирование СК щетка-коллектор на конечном этапе эксплуатации электрической машины. С этой целью может быть выполнен ряд конструктивных мер, касающихся щеточного узла, коллектора или подшипников.

Полученные за время ресурсных испытаний экспериментальные данные показали, что коллектор имеет двукратный запас ресурса в сравнении с ресурсом комплекта щеток, поэтому целесообразно принимать меры для увеличения ресурса комплекта щеток, определяющего ресурс КЩУ.

Вторая глава посвящена разработке математической модели изнашивания электрических щеток. Анализ имеющихся материалов по данной тематике показал отсутствие цельной ММ для расчета изнашивания ЭЩ, объединяющей в себе основные параметры, влияющие на изнашивание фрикционной, электроэрозионной и электрокоррозионной природы. Более того, в существующих моделях не принималось во внимание механическое состояние КЩУ и ПУ, а также его изменение в процессе работы ЭМ.

На основе обобщения имеющейся в литературе информации, а также на базе экспериментальных исследований кафедр электрических машин, электропривода и электрооборудования ТПУ разработана математическая модель изнашивания щеток, представленная выражениями (10-13):

$$\Delta_{щ} = (C_{ф}^{щ} \cdot P_{ср.щ} + C_{I}^{щ} \cdot P_{ср.щ}^{0,5} + C_{э}^{щ} \cdot W_{и}) \cdot \delta t, \quad (10)$$

где $\Delta_{щ}$ – износ щетки; $P_{ср.щ}$ – среднее давление щетки на временном интервале δt ; $C_{ф}^{щ}$, $C_{I}^{щ}$ и $C_{э}^{щ}$ – коэффициенты, характеризующие интенсивность фрикционной, электрокоррозионной (токовой) и электроэрозионной составляющих изнашивания; $W_{и}$ – средняя суммарная энергия искрения коммутационных циклов под щеткой за оборот якоря ЭМ.

В свою очередь, коэффициенты фрикционной, токовой и эрозионной составляющих изнашивания находятся в соответствии с выражениями:

$$C_{ф}^{щ} = 10^{-7} \cdot \mu \cdot v_{кол} \cdot K_{ф} / H_{щ}; \quad (11)$$

$$C_{I}^{щ} = 10^{-3} \cdot \mu \cdot v_{кол}^{3/4} \cdot \rho_y^{1/2} \cdot (I_a / p)^{1/2} \cdot K_I / (H_{щ}^{1/2} \cdot (K_{щ} \cdot C_{щ} \cdot \gamma_{щ})^{1/4}); \quad (12)$$

$$C_{э}^{щ} = 10^{-3} \cdot n_{кол} \cdot \rho_y \cdot K_э / (60 \cdot U_d \cdot b_{щд} \cdot l_{щ} \cdot (K_{щ} \cdot C_{щ} \cdot \gamma_{щ})^{1/2}), \quad (13)$$

где μ – коэффициент трения; $v_{кол}$ – линейная скорость рабочей поверхности коллектора; $K_{ф}$ – поправочный коэффициент к фрикционной составляющей изнашивания; $H_{щ}$ – твердость поверхности материала щетки; ρ_y – удельное сопротивление материала щетки; I_a – ток якоря; p – число пар полюсов; K_I – поправочный коэффициент к электрокоррозионной составляющей изнашивания; $K_{щ}$ – коэффициент теплопроводности материала щетки; $C_{щ}$ – удельная теплоемкость материала щетки; $\gamma_{щ}$ – плотность материала щетки; $n_{кол}$ – частота вращения коллектора; $K_э$ – поправочный коэффициент к эрозионной составляющей изнашивания; U_d – среднее напряжение горения дуги; $b_{щд}$ – ширина щетки по дуге дорожки скольжения; $l_{щ}$ – длина щетки.

Для приближенных оценок целесообразности применения тех или иных конструктивных решений в ЭМ при помощи разработанной ММ можно воспользоваться поправочными коэффициентами $K_{ф}$, K_I и $K_э$ для аналогичных по техническим характеристикам ЭМ (в случае, если уже имеется наработанная в ходе предыдущих исследований база данных поправочных коэффициентов). Если необходима более достоверная информация, то поправочные

коэффициенты K_ϕ , K_I и K_Σ определяют на основе предложенного автором метода, подробнее описанного в третьей главе.

Как следует из выражения (10), величина контактного давления является важным параметром модели и влияет на все составляющие изнашивания ЭЩ, в том числе и на электроэрозионную через изменение контактного сопротивления (КС) и энергии коммутационного искрения. Величина КС постоянно изменяется вследствие уменьшения нажатия пружины на щетку по мере ее изнашивания, а также изменения геометрии коллектора и вибраций ПУ в процессе наработки ЭМ на ресурс, поэтому учет изменения контактного давления от механического состояния КЩУ представляется наиболее сложной задачей. С целью упрощения расчетов коммутационных процессов с учетом влияния механики СК, целесообразно оперировать эквивалентным нажатием на щетку, при котором достигается такой же уровень коммутационного искрения, что и при реальном изменении давления под щеткой на рассматриваемом временном интервале.

Для нахождения средней энергии искрения коммутационных циклов под щеткой за оборот (W_{cp}) необходимо определить среднюю величину энергии коммутационного искрения при изменении усилия в скользящем контакте от F_{min} до F_{max} вследствие вибрационных воздействий коллектора и ПУ. Для расчета коммутационных процессов применялась разработанная ранее на кафедре ЭПО ТПУ программа, позволяющая рассчитывать процессы коммутации в коллекторных ЭМ малой мощности. Вычислив величину W_{cp} , определяем соответствующее ей эквивалентное нажатие на щетку F_Σ на кривой распределения энергии коммутационного искрения $W_{и}$ от F (рис. 6).

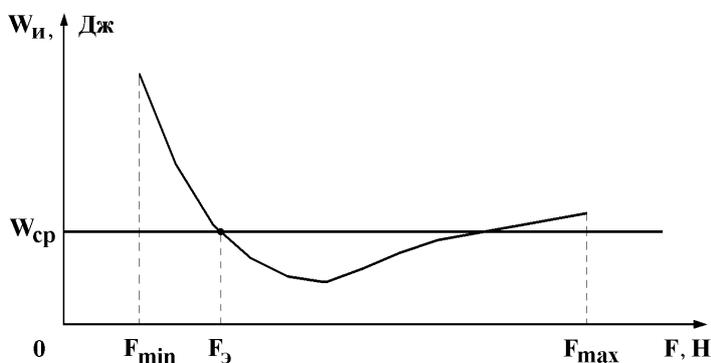


Рис. 6. Нахождение эквивалентного нажатия на щетку F_Σ , при котором достигается такой же уровень коммутационного искрения, что и при реальном изменении усилия в СК от F_{min} до F_{max} на рассматриваемом временном интервале.

Величины F_{min} и F_{max} определяются согласно следующим выражениям:

$$F_{min} = \frac{F_{наж} - a_{cp} \cdot m_{щ.п} - m_{щ.п} \cdot g}{1 + \mu \cdot v \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{\Delta_k}{z}\right)} ; \quad F_{max} = \frac{F_{наж} + a_{cp} \cdot m_{щ.п} + m_{щ.п} \cdot g}{1 - \mu \cdot v \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{\Delta_k}{z}\right)}, \quad (14)$$

где $F_{наж}$ – расчетная сила нажатия пружины с учетом текущего износа щетки, Н; a_{cp} – суммарное среднее виброускорение щетки от воздействия коллектора и подшипниковых узлов, m/c^2 ; $m_{щ.п}$ – расчетная масса щетки для ее текущего износа, кг; g – ускорение свободного падения, m/c^2 ; μ – коэффициент трения скольжения для пары щетка-коллектор; v – коэффициент трения щетки о щеткодержатель; Δ_k – зазор между колодцем щеткодержателя и коллектором; z – длина части щетки, расположенной в щеткодержателе.

Вычислительные эксперименты, проведенные с использованием разработанного ПО, показали, что сама кривая зависимости $W_{и}$ от F меняется в процессе наработки электрической машины на ресурс (рис. 7), поэтому целесообразно выбирать периодичность пересчета эквивалентного нажатия на щетку $F_э$ в зависимости от требуемой точности расчетов.

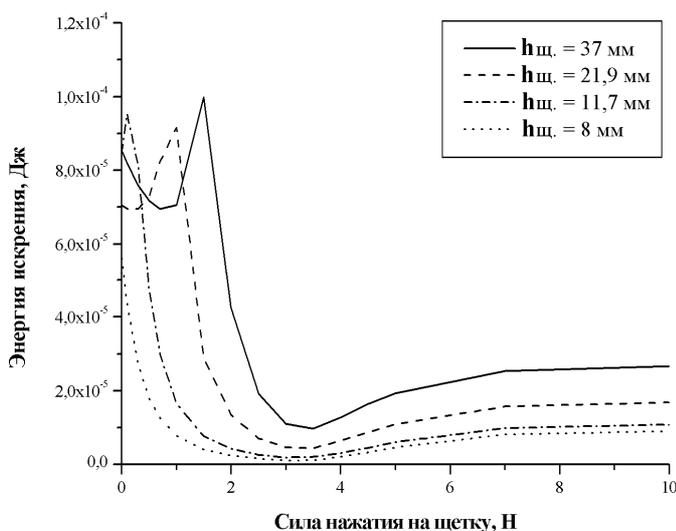


Рис. 7. Зависимость энергии искрения коммутируемых секций паза от силы нажатия на щетку для различных радиальных размеров щетки электродвигателя LG VCE280E02

Как уже было отмечено выше, величина контактного сопротивления определяет уровень энергии

коммутационного искрения, поэтому от точности ее расчета зависит достоверность вычисления электроэрозионной составляющей изнашивания электрических щеток. Ввиду того, что точный расчет контактных сопротивлений во время коммутационного цикла с малым шагом требует проведения значительного объема вычислений при моделировании ресурсных испытаний, в разработанном ранее ПО применялся метод экспоненциальной аппроксимации временной зависимости КС по двум точкам (в начале и конце коммутационного цикла), позволяющий существенно сократить время вычислений. Однако для контактной пары медь М1 – щетка ЭГ74 аппроксимированные по этому методу величины КС отличаются от реальных значений в среднем на 196%.

Автором предложена методика ускоренного расчета КС, включающая в себя точный расчет КС в начале ($r_{сб(нач)}$), середине ($r_{сб(ср)}$) и конце ($r_{сб(кон)}$) коммутационного цикла и последующую экспоненциальную аппроксимацию зависимости КС по найденным трем точкам. Выражение для приближенного вычисления КС сбегавшего края щетки в этом случае имеет следующий вид:

$$r_{сб} = A_{сб} + B_{сб} \cdot e^{-\frac{(T_k-t)}{\tau_{сб}}}, \quad (15)$$

где $r_{сб}$ – контактное сопротивление сбегавшего края щетки, Ом;

$$A_{сб} = r_{сб(кон)} - B_{сб}, \text{ Ом}; \quad B_{сб} = \frac{(r_{сб(ср)} - r_{сб(кон)})^2}{r_{сб(нач)} + r_{сб(кон)} - 2 \cdot r_{сб(ср)}}, \text{ Ом}; \quad T_k - \text{ время ком-}$$

мутационного цикла, с; t – текущее время (изменяется от 0 до T_k), с;

$$\tau_{сб} = \frac{-T_k}{\ln\left(\frac{r_{сб(нач)} - r_{сб(кон)} + B_{сб}}{B_{сб}}\right)}, \text{ с.}$$

По аналогии формируется выражение для набегавшего края щетки.

Величины КС, аппроксимированные по предложенному методу, отличаются от реальных значений для рассмотренного ранее случая в среднем на 33%, что в 5,9 раза меньше, чем с используемой ранее аппроксимацией.

В третьей главе рассмотрены предложенный алгоритм расчета изнашивания ЭЩ коллекторных электрических машин малой мощности, а также ПО, реализующее данный алгоритм.

Так как расчет изнашивания щеток с постоянным пересчетом коммутационных процессов на ЭВМ занимает много машинного времени и малоприспособен для практического использования, автором был разработан алгоритм ускоренного расчета изнашивания ЭЩ на базе разработанной ММ, свободный от указанного недостатка.

Предлагаемый алгоритм расчета изнашивания щеток состоит из ряда больших и малых циклов расчета. Начальными условиями для каждого большого цикла расчета изнашивания щеток являются текущее механическое состояние коллекторно-щеточного узла и подшипников электрической машины, а также текущий радиальный размер щетки и величина нажатия пружины на щетку. В алгоритме принято допущение о линейном характере износа в течение большого цикла расчета, так как результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о близком к линейному характере изнашивания щеток на ограниченном временном интервале, что подтверждают и многочисленные данные других авторов. Краткое описание большого цикла алгоритма:

1. Задание начальных условий: механического состояния КЩУ и ПУ ЭМ, радиального размера щетки и силы нажатия на щетку.

2. Определение эквивалентного нажатия на щетку $F_{\text{э}}$, и среднего контактного давления $P_{\text{ср.щ.1}}$.

3. Первый малый цикл расчета:

— подсчет суммарной энергии искровых разрядов, выделяемой под щеткой за время малого цикла (с учетом конструктивных особенностей индуктора и якорных обмоток):

$$W_{\gamma} = \sum_{j=1}^K \sum_{g=1}^S |W_{j,\gamma,g}|, \quad (16)$$

где j – номер ламели; K – число ламелей в коллекторе; g – номер коммутационного цикла; S – количество оборотов в малом цикле расчета; γ – номер малого цикла расчета изнашивания;

— предварительный расчет изнашивания щетки $\Delta_{\text{лок.1}}^{\text{щ}}$ за время большого цикла расчета изнашивания δt :

$$\Delta_{\text{лок.1}}^{\text{щ}} = (C_{\text{ф}}^{\text{щ}} \cdot P_{\text{ср.щ.1}} + C_{\text{г}}^{\text{щ}} \cdot P_{\text{ср.щ.1}}^{0,5} + C_{\text{э}}^{\text{щ}} \cdot \sum_{j=1}^K \sum_{g=1}^S |W_{j,1,g}|/S) \cdot \delta t; \quad (17)$$

— предварительный пересчет текущего радиального размера щетки:

$$h_{\text{щ.тек}} = h_{\text{щ.тек}} - \Delta_{\text{лок.1}}^{\text{щ}}. \quad (18)$$

Новое значение размера щетки в радиальном направлении является начальным условием для второго малого цикла расчета.

4. Второй малый цикл расчета:

— подсчет суммарной энергии искрения, выделяемой под щеткой за время 2-го малого цикла по выражению (16) и вычисление скорости и ускорения электроэрозионного изнашивания:

$$f^{\text{ш}} = C_{\text{э}}^{\text{ш}} \cdot \sum_{j=1}^K \sum_{g=1}^S |W_{j,1,g}|, \quad n^{\text{ш}} = (C_{\text{э}}^{\text{ш}} \cdot \sum_{j=1}^K \sum_{g=1}^S |W_{j,2,g}| - C_{\text{э}}^{\text{ш}} \cdot \sum_{j=1}^K \sum_{g=1}^S |W_{j,1,g}|) / \delta t. \quad (19)$$

5. Расчет скорости фрикционного, электрокоррозионного и электроэрозионного изнашивания ЭЩ на большом цикле расчета:

$$(d\Delta_{\text{ф}}^{\text{ш}}/dt) = C_{\text{ф}}^{\text{ш}} \cdot P_{\text{ср.ш } 1}; \quad (d\Delta_{\text{I}}^{\text{ш}}/dt) = C_{\text{I}}^{\text{ш}} \cdot P_{\text{ср.ш } 1}^{0,5}; \quad (d\Delta_{\text{э}}^{\text{ш}}/dt) = f^{\text{ш}} + n^{\text{ш}} \cdot \delta t.$$

Пересчет величины суммарного износа щетки $\Delta^{\text{ш}}$:

$$\Delta^{\text{ш}} = \Delta^{\text{ш}} + [(d\Delta_{\text{ф}}^{\text{ш}}/dt) + (d\Delta_{\text{I}}^{\text{ш}}/dt) + (d\Delta_{\text{э}}^{\text{ш}}/dt)] \cdot \delta t. \quad (20)$$

6. Вычисление текущего радиального размера электрической щетки путем вычитания величины суммарного износа электрической щетки из ее исходного радиального размера:

$$h_{\text{щ.тек}} = h_{\text{щ.исх}} - \Delta^{\text{ш}}. \quad (21)$$

Большие циклы расчета с обновленными начальными условиями (радиальный размер щетки, механическое состояние КЩУ и ПУ ЭМ) повторяются до тех пор, пока радиальный размер щетки не достигнет минимального уровня, установленного заводом-изготовителем. После этого расчет изнашивания щетки считается завершенным, а сумма периодов больших циклов расчета изнашивания (δt) и будет равна искомому времени наработки электрической щетки.

В данном разделе предложен метод определения поправочных коэффициентов к фрикционной, электрокоррозионной и электроэрозионной составляющим изнашивания ЭЩ для различных типоразмеров коллекторных ЭМ при помощи сочетания метода планирования виртуальных экспериментов и реальных ресурсных испытаний базовой ЭМ.

Линейная модель изнашивания ЭЩ учитывает взаимодействие трех факторов: коэффициентов фрикционной $K_{\text{ф}}$, электрокоррозионной K_{I} и электроэрозионной $K_{\text{э}}$ составляющих изнашивания ЭЩ:

$$y_{\text{расч.к}} = b_{k0} + b_{k1}x_1 + b_{k2}x_2 + b_{k3}x_3 + b_{k12}x_1x_2 + b_{k13}x_1x_3 + b_{k23}x_2x_3 + b_{k123}x_1x_2x_3 \quad (22)$$

где $y_{\text{расч.к}}$ – расчетная величина суммарного изнашивания щетки электрической машины для заданного времени t_k ; b_{kj} – коэффициенты полинома; x_1 – кодированное значение коэффициента $K_{\text{ф}}$; x_2 – кодированное значение коэффициента K_{I} ; x_3 – кодированное значение коэффициента $K_{\text{э}}$.

Для того, чтобы определить кодированные значения коэффициентов x_1 , x_2 и x_3 , необходимо составить и решить систему из трех уравнений (23). В данной системе на каждом из трех различных временных отрезков (в начале ($t_{\text{нач}}$), середине ($t_{\text{ср}}$) и конце ($t_{\text{кон}}$) временного интервала) соответствующая расчетная величина изнашивания щетки ЭМ приравнивается к ее фактическому износу:

$$\begin{cases} y_{\text{нач}} = b_{10} + b_{11}x_1 + b_{12}x_2 + b_{13}x_3 + b_{112}x_1x_2 + b_{113}x_1x_3 + b_{123}x_2x_3 + b_{1123}x_1x_2x_3 \\ y_{\text{ср}} = b_{20} + b_{21}x_1 + b_{22}x_2 + b_{23}x_3 + b_{212}x_1x_2 + b_{213}x_1x_3 + b_{223}x_2x_3 + b_{2123}x_1x_2x_3 \\ y_{\text{кон}} = b_{30} + b_{31}x_1 + b_{32}x_2 + b_{33}x_3 + b_{312}x_1x_2 + b_{313}x_1x_3 + b_{323}x_2x_3 + b_{3123}x_1x_2x_3 \end{cases} \quad (23)$$

Для вычисления коэффициентов полинома b_{kj} каждого из трех уравнений по матрице планирования полного факторного эксперимента выполняются 8 виртуальных экспериментов. Для проведения всех виртуальных экспериментов использовалась предложенная автором ММ изнашивания ЭЩ и созданное на ее основе ПО. По результатам проведенных вычислений были определены следующие значения поправочных коэффициентов для ММ изнашивания щеток электродвигателя LG VCE280E02: $K_\phi = 1,6607$, $K_I = 0,1624$, $K_\omega = 0,6778$. Среднее отклонение расчетных величин изнашивания щетки с учетом вычисленных коэффициентов (K_ϕ , K_I и K_ω) от реальных значений за время ресурсных испытаний рассматриваемой ЭМ не превысило 2%, что подтверждает адекватность предложенной ММ изнашивания ЭЩ и правомерность предложенных методик для прогнозирования ресурсных характеристик щеток при модернизации ЭМ.

Для учета изменения механического состояния профиля коллектора или ПУ во времени, необходимо иметь возможность прогнозировать значения коэффициентов ряда Фурье a_j и b_j в любой момент времени в процессе наработки на ресурс. С этой целью автором было предложено осуществлять регрессию данных, полученных экспериментальным путем для исследуемого класса ЭМ.

Таким образом, подготовка данных о механическом состоянии профиля коллектора и вибрациях якоря в ПУ для загрузки в программу выглядит следующим образом:

1. формирование коэффициентов ряда Фурье a_j , b_j для N-гармоник на основе экспериментальных данных;
2. получение путем регрессии непрерывных функций $a_j(t)$, $b_j(t)$;
3. сохранение коэффициентов уравнения регрессии функций $a_j(t)$ и $b_j(t)$.

На основе разработанной ММ изнашивания ЭЩ создано ПО для расчета ресурсных характеристик щеток ЭМ малой мощности. В качестве базовой была взята разработанная на кафедре ЭПЭО ТПУ программа, позволяющая рассчитывать процессы коммутации в коллекторных ЭМ малой мощности, в том числе и в машинах с нетрадиционными конструкциями активной зоны.

Автором в программу были внесены следующие изменения:

- разработана математическая модель изнашивания щеток с учетом электромагнитной архитектуры машины и ее коммутационной напряженности, характеристик материала щеток и нажимного устройства, жесткости контактного слоя щетка-коллектор, механического состояния КЩУ и ПУ с учетом его изменения в процессе эксплуатации ЭМ;

- реализован уточненный расчет КС в процессе коммутации;
- разработан блок ввода информации об исходном механическом состоянии КЩУ (профиль коллектора, вибрации со стороны коллектора и ПУ);
- разработан модуль, позволяющий учитывать изменения механического состояния КЩУ и ПУ в процессе эксплуатации ЭМ при расчете коммутации.

Данный программный продукт позволяет выполнять следующие виды расчетов: распределение магнитной индукции в воздушном зазоре с учетом реакции якоря и сдвига щеток с нейтралей; величины коммутирующей ЭДС в процессе коммутации; токи разрыва и энергии искрения коммутируемых секций; величин деформаций контактного слоя; электросопротивлений набегающего и сбегавшего краев щетки в процессе коммутации с учетом механики КЩУ и жесткости контактного слоя щетка-коллектор; величины изнашивания щеток (рис. 8).

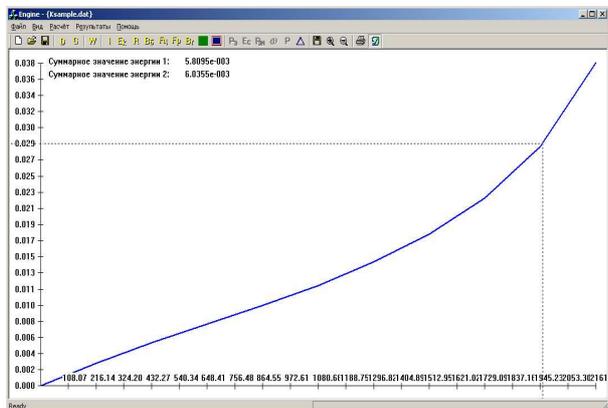


Рис. 8. Расчетная величина изнашивания щетки (по оси OX – время, ч; по оси OY – величина изнашивания щетки, м)

С использованием разработанного ПО были проведены исследования характеристик изнашивания щеток высокоскоростного коллекторного электродвигателя LG VCE280E02,

результаты которых представлены в таблице 1.

Таблица 1

| Интервал времени, ч | Фрикционная составляющая изнашивания, мм | Интенсивность изнашивания, мкм/ч | Электрокоррозионная составляющая изнашивания, мм | Интенсивность изнашивания, мкм/ч | Электроэрозионная составляющая изнашивания, мм | Интенсивность изнашивания, мкм/ч | Суммарная величина изнашивания, мм | Суммарная интенсивность изнашивания, мкм/ч |
|---------------------|--|----------------------------------|--|----------------------------------|--|----------------------------------|------------------------------------|--|
| 0-140 | 0,76 | 5,43 | 3,53 | 25,21 | 1,77 | 12,65 | 6,06 | 43,30 |
| 140-280 | 0,70 | 4,98 | 3,38 | 24,13 | 1,13 | 8,08 | 5,21 | 37,19 |
| 280-420 | 0,64 | 4,55 | 3,23 | 23,08 | 1,21 | 8,63 | 5,08 | 36,27 |
| 420-560 | 0,55 | 3,96 | 3,01 | 21,53 | 1,51 | 10,78 | 5,08 | 36,27 |
| 560-700 | 0,50 | 3,55 | 2,85 | 20,37 | 2,26 | 16,12 | 5,61 | 40,04 |

Из таблицы 1 следует, что за время виртуальных ресурсных испытаний интенсивность фрикционной и электрокоррозионной составляющих изнашивания щеток снизилась на 34,6%, и 19,2% соответственно. Интенсивность электроэрозионной составляющей изнашивания ЭЩ на начальном этапе несколько уменьшилась (приработка элементов КЩУ), но затем возросла (ухудшение геометрии коллектора и ПУ ЭМ, о чем свидетельствуют результаты экспериментальных исследований, описанные в первой главе) и в конце виртуальных испытаний превысила первоначальное значение на 27,4%.

Следует отметить, что в среднем суммарная расчетная величина изнашивания щетки (с учетом найденных коэффициентов K_f , K_1 и K_3) отличается от фактических значений, полученных во время ресурсных испытаний рассматриваемой ЭМ, не более чем на 2%, что подтверждает

адекватность предложенной ММ изнашивания ЭЩ и правильность определения ее коэффициентов.

В четвертой главе предложены пути увеличения ресурса СК универсальных электрических машин. На основании исследований, проведенных с использованием разработанного ПО, были предложены конструкции демпфирующих обмоток якоря, позволяющих снизить энергию искрения секций паза якоря (а следовательно и ресурса щеток) путем уменьшения индуктивностей секций, увеличения взаимных магнитных связей между соседними секциями [8, 9], и индуктора, имеющего в средних частях основных полюсов сужения нормальных продольных сечений для увеличения магнитного сопротивления поперек основных полюсов, что обеспечивает снижение поперечного магнитного потока приблизительно в два раза [13].

Разработанные ММ и ПО позволили автору провести виртуальные исследования влияния величины контактного давления (для нажимной пружины с постоянным нажатием) из интервала от 2 до 3,5 Н (удельное давление 300-525 г/см²) на ресурсные характеристики универсального коллекторного электродвигателя с учетом изменения механического состояния КЩУ, результаты которых представлены на рис. 9.



Рис. 9. Изменение ресурса КЩУ электродвигателя LG VCE280E02 в зависимости от величины нажатия на щетку с учетом изменения механического состояния КЩУ

Из гистограммы, представленной на рис. 9, можно сделать вывод, что выбрав силу нажатия на щетку из интервала 2,8 – 3,3 Н (удельное давление 420-495 г/см²), можно добиться увеличения ресурса КЩУ рассмотренного типа ЭМ до 10,8% с учетом изменений механического состояния КЩУ в процессе эксплуатации. Одновременно с этим, представленные данные наглядно демонстрируют важность правильного подбора характеристик нажимного устройства: разница в силе нажатия всего в 0,6 Н (90 г/см²) при снижении силы нажатия с 2,6 до 2 Н может привести к сокращению ресурса КЩУ на 22%. Кроме этого, были проведены виртуальные исследования разработанных конструкций обмоток и индуктора, результаты которых представлены в таблице 2. Из представленных данных можно сделать вывод, что наиболее предпочтительными способами увеличения ресурса КЩУ рассмотренной ЭМ являются варианты 5-7, позволяющие достичь увеличения ресурса скользящего контакта более чем на 40%.

Таблица 2

| № | Изменения в конструкции электродвигателя LG VCE280E02 | Увеличение ресурса КЩУ, % |
|---|---|---------------------------|
| 1 | Постоянное нажатие (3,1 Н) | 10,79 |
| 2 | Демпфированные обмотки якоря | 9,54 |
| 3 | Демпфированные обмотки якоря + Постоянное нажатие | 26,98 |
| 4 | Анизотропный индуктор | 26,35 |
| 5 | Анизотропный индуктор + Постоянное нажатие | 37,61 |
| 6 | Анизотропный индуктор + Демпфированные обмотки якоря | 36,08 |
| 7 | Анизотропный индуктор + Демпфированные обмотки якоря + Постоянное нажатие | 41,59 |

Следует отметить, что разработанная ММ и ПО позволили выполнить виртуальные эксперименты и дать оценку эффективности предложенных технических решений минуя дорогостоящие стадии изготовления опытных образцов и проведения длительных ресурсных испытаний.

Заключение

В работе получены следующие основные результаты:

1. Создана математическая модель изнашивания щеток универсальных КЭМ, учитывающая основные факторы, характеризующие работу СК, в том числе состояние профиля коллектора и подшипниковых узлов в процессе эксплуатации, которая позволяет прогнозировать ресурс щеток на стадиях проектирования ЭМ и создания различных модификаций серийных изделий.
2. Предложена методика прогнозирования динамики механического состояния профиля коллектора и подшипниковых узлов в процессе наработки ЭМ на ресурс, позволяющая определять профиль коллектора и параметры вибраций якоря в ПУ, для любого момента времени в процессе виртуальных ресурсных испытаний ЭМ.
3. Разработан метод определения поправочных коэффициентов к фрикционной, электрокоррозионной и электроэрозионной составляющим изнашивания щеток для различных модификаций базовой ЭМ, позволяющий снизить погрешности расчетов изнашивания электрических щеток до 2-4%.
4. Созданы алгоритмы определения постоянного эквивалентного усилия в СК на заданном временном интервале, приближенного расчета КС на основе экспоненциальной аппроксимации исходной зависимости по трем точкам, а также оценки динамики электроэрозионной составляющей изнашивания щеток на заданном временном интервале, которые позволяют многократно сократить время виртуальных испытаний ЭМ на ресурс.
5. Разработаны конструкции демпфированных обмоток якоря и индуктора с анизотропией магнитных свойств, а также выработаны рекомендации относительно характеристики нажимного устройства щеткодержателя, позволяющие увеличить ресурс работы щеток ЭМ. Серия проведенных виртуальных ресурсных испытаний электродвигателя LG VCE280E02 показала возможность повышения ресурса щеток у данной ЭМ до 40 % при использовании предложенных технических решений.
6. Разработаны методы бесконтактных измерений профилей вращающихся элементов машин и математической обработки результатов измерений,

включающие процедуру коррекции результатов измерений, а также сепарацию массивов результатов измерений в динамических режимах на профиль и вибрации контролируемого объекта с последующим определением виброускорений, воздействующих на щетки, позволяющие повысить точность измерений (погрешности измерений снижаются на десятки процентов) и расширить функциональные возможности измерительных систем.

7. На основе более 11000 измерений профиля коллектора, выполненных в процессе ресурсных испытаний электродвигателя LG VCE280E02, и их последующей математической обработки выявлено, что вибрационные воздействия якоря на щетки в среднем в 1,6 раза превышают аналогичные воздействия профиля коллектора, а средние значения ускорений, действующих на щетку как со стороны поверхности коллектора, так и со стороны якоря, возрастают более чем в 6 раз к концу ресурсных испытаний ЭМ и достигают критических величин, приводящих к потере контакта щеток с большинством коллекторных пластин. Полученные результаты экспериментальных исследований механического состояния СК являются базовой информацией для разработки конструктивных мер по улучшению работы СК подобных ЭМ.

Основные работы, опубликованные по теме диссертации

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Качин, С. И. Коммутирующие свойства обмоток якорей коллекторных машин электроприводов на начальном этапе коммутации / С. И. Качин, Ю. С. Боровиков, **О. С. Качин**, Е. Н. Клыжко // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 5. – С. 136–140.
2. Качин, С. И. Анализ коммутирующих свойств обмоток якорей электроприводов на завершающей стадии процесса коммутации / С. И. Качин, Ю. С. Боровиков, **О. С. Качин**, В. Ю. Саблуков, Е. Н. Клыжко // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 7. – С. 41–44.
3. Качин, С. И. Основные направления совершенствования универсальных коллекторных двигателей электроприводов на основе оптимизации их электромагнитной структуры / С. И. Качин, Ю. С. Боровиков, **О. С. Качин**, В. Ю. Саблуков, Е. Н. Клыжко // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 2. – С. 195–200.
4. Качин, С. И. Повышение ресурсных характеристик скользящего контакта коллекторных машин электроприводов / С. И. Качин, Ю. С. Боровиков, **О. С. Качин** // Изв. Вузов. Электромеханика. – 2006. – №3 – С. 8–13.
5. **Качин, О. С.** Диагностирование механического состояния коллекторно-щеточного узла высокоскоростной электрической машины в процессе ресурсных испытаний // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т.311.–№ 4.–С.118–122.
6. **Качин, О. С.** Методика определения вибрационных параметров работы подшипниковых узлов для бесконтактных измерительных систем // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312. – № 2. – С. 349–352.

Патенты и свидетельства о регистрации:

7. Пат. 2234054 РФ, МПК⁷ G01B 7/14. Способ измерения зазора между измерительным преобразователем и контролируемой поверхностью (варианты) / С. И. Качин, Ю. С. Боровиков, **О. С. Качин**, М. А. Нечаев. Заявлено 17.07.2003; Оpubл. 10.08.2004, Бюл. № 22. – 13 с.: ил.

8. Пат. 2269192 РФ, МПК H02K 3/12. Якорь коллекторной электрической машины / С. И. Качин, Ю. С. Боровиков, **О. С. Качин**. Заявлено 05.05.2004; Оpubл. 27.01.2006, Бюл. № 03.–8 с.: ил.
9. Пат. 2277282 РФ, МПК H02K 3/12. Обмотка якоря электрической машины / С. И. Качин, Ю. С. Боровиков, **О. С. Качин**. Заявлено 16.03.2005; Оpubл. 27.05.2006, Бюл. № 15. – 10 с.: ил.
10. Программа расчета мгновенных давлений в скользящем контакте щетка-коллектор / С. И. Качин, Ю. С. Боровиков, **О. С. Качин**, Е. Н. Клыжко // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2006610773 от 26.02.2006.
11. Программа расчета коммутирующих электродвижущих сил электрической машины малой мощности / С. И. Качин, Ю. С. Боровиков, **О. С. Качин**, Е. Н. Клыжко // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2007610892 от 22.02.2007.
12. Программа расчета магнитного поля электрической машины / С.И. Качин, Ю. С. Боровиков, **О. С. Качин**, Е. Н. Клыжко // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2007610891 от 22.02.2007.
13. Пат. 2313879 РФ, МПК H02K 1/14. Сердечник статора коллекторной электрической машины / С. И. Качин, **О. С. Качин**, Е. Н. Клыжко. Заявлено 29.08.2006; Оpubл. 27.12.2007, Бюл. № 36. – 15 с.: ил.
14. Пат. 2327104 РФ, МПК G01B 7/14. Способ измерения зазора между измерительным преобразователем и контролируемой поверхностью в динамических режимах / С. И. Качин, **О. С. Качин**. Заявлено 09.01.2007; Оpubл. 20.06.2008, Бюл. № 17. – 12 с.: ил.
15. Пат. 2331043 РФ, МПК G01B 7/34. Способ бесконтактного измерения профиля контролируемой поверхности в динамических режимах / С. И. Качин, **О. С. Качин**. Заявлено 26.03.2007; Оpubл. 10.08.2008, Бюл. № 22. – 10 с.: ил.
16. Положительное решение по заявке на изобретение №2007117290/28. Способ бесконтактного измерения вибраций контролируемой поверхности / С. И. Качин, **О. С. Качин**. Заявлено 08.05.2007.

Публикации в других изданиях:

17. **Качин, О. С.** Прогнозирование ресурса щеток коллекторных электрических машин // Тезисы докладов XVII науч.-техн. конф. «Электронные и электромеханические системы и устройства», ФГУП НПП «Полюс». – Томск, 2006. – С. 158–160.
18. **Качин, О. С.** Экспериментальные исследования механического состояния кол-лекторно-щеточного узла высокоскоростной электрической машины в процессе ресурсных испытаний // Труды XIII международной науч.-практ. конф. «Современные Техника и Технологии». – Томск, 2007. – Т. 1. – С. 430–432.

Личный вклад автора. Четыре работы написаны автором единолично. В работах, написанных в соавторстве, автору принадлежат: выражения для расчета энергии коммутационного искрения и коэффициента демпфирования [1, 2]; выражение для оценки ресурса работы комплекта щеток [3]; оптимизация нажатия на щетку [4]; определение величины базового перемещения ИП [7, 14-16]; размещение обмотки в пазах якоря [8, 9]; разработка части алгоритмов [10-12]; предложения по конфигурации индуктора [13].