

В настоящее время универсальные коллекторные электрические машины малой мощности, обладающие хорошими энергетическими показателями и регулировочными характеристиками, находят широкое применение в различных сферах современной человеческой жизнедеятельности. Анализ отказов универсальных коллекторных машин, проведенный различными авторами, позволил установить, что отказ коллекторно-щеточного узла (КЩУ) составляет до 48% общего числа отказов машин, а основной причиной его выхода из строя является износ элементов КЩУ. Одним из путей решения этого вопроса является совершенствование коллекторно-щеточных узлов, а также разработка методов оценки их состояния и коммутационной напряженности коллекторных электрических машин не только при работе уже готовой машины, но и на стадии ее проектирования. В работе рассматривается проблема увеличения ресурса коллекторных машин, исследован механизм изнашивания элементов КЩУ, выработаны практические конструктивные решения и рекомендации по повышению ресурса КЩУ электрических машин.

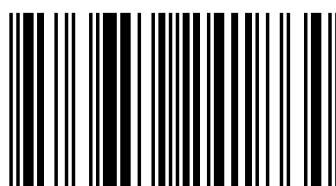
Увеличение ресурса электродвигателей



Олег Качин
Сергей Качин

Олег Качин

В 2005 году окончил Томский политехнический университет. В 2008 году присуждена степень кандидата технических наук. Неоднократно являлся лауреатом всероссийских и международных конкурсов. Автор и соавтор более 50 научных работ. В настоящее время доцент Национального исследовательского Томского политехнического университета.



978-3-659-24186-4

Качин, Качин

Увеличение ресурса скользящего контакта коллекторных электродвигателей

Монография

LAP
LAMBERT
Academic Publishing

**Олег Качин
Сергей Качин**

**Увеличение ресурса скользящего контакта
коллекторных электродвигателей**

**Олег Качин
Сергей Качин**

**Увеличение ресурса
скользящего контакта
коллекторных
электродвигателей**

Монография

LAP LAMBERT Academic Publishing

Impressum / Выходные данные

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek: Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Alle in diesem Buch genannten Marken und Produktnamen unterliegen warenzeichen-, marken- oder patentrechtlichem Schutz bzw. sind Warenzeichen oder eingetragene Warenzeichen der jeweiligen Inhaber. Die Wiedergabe von Marken, Produktnamen, Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen u.s.w. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutzgesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Библиографическая информация, изданная Немецкой Национальной Библиотекой. Немецкая Национальная Библиотека включает данную публикацию в Немецкий Книжный Каталог; с подробными библиографическими данными можно ознакомиться в Интернете по адресу <http://dnb.d-nb.de>.

Любые названия марок и брендов, упомянутые в этой книге, принадлежат торговой марке, бренду или запатентованы и являются брендами соответствующих правообладателей. Использование названий брендов, названий товаров, торговых марок, описаний товаров, общих имён, и т.д. даже без точного упоминания в этой работе не является основанием того, что данные названия можно считать незарегистрированными под каким-либо брендом и не защищены законом о брэндах и их можно использовать всем без ограничений.

Coverbild / Изображение на обложке предоставлено: www.ingimage.com

Verlag / Издатель:

LAP LAMBERT Academic Publishing

ist ein Imprint der / является торговой маркой

AV Akademikerverlag GmbH & Co. KG

Heinrich-Böcking-Str. 6-8, 66121 Saarbrücken, Deutschland / Германия

Email / электронная почта: info@lap-publishing.com

Herstellung: siehe letzte Seite /

Напечатано: см. последнюю страницу

ISBN: 978-3-659-24186-4

Copyright / АВТОРСКОЕ ПРАВО © 2012 AV Akademikerverlag GmbH & Co. KG

Alle Rechte vorbehalten. / Все права защищены. Saarbrücken 2012

Авторы

Доктор технических наук,

профессор, директор института дистанционного образования

Национального исследовательского Томского политехнического университета

C.И. Качин

Кандидат технических наук,

доцент кафедры "Электропривод и электрооборудование"

Национального исследовательского Томского политехнического университета

O.C. Качин

Рецензенты

Доктор технических наук,

профессор, заведующий кафедрой

Омского государственного университета путей сообщения

B.Д. Асилов

Кандидат технических наук,

доцент кафедры "Электротехника и автоматика"

Томского государственного архитектурно-строительного университета

B.M. Педиков

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. Разработка методов и средств экспериментальных исследований механического состояния коллекторно-щеточных и подшипниковых узлов в процессе эксплуатации электрических машин.....	11
1.1. Разработка бесконтактных методов измерений профилей вращающихся элементов машин и регистрации линейных микроперемещений повышенной точности.....	11
1.2. Метод определения профиля коллектора в динамических режимах и анализ его воздействие на коллекторно-щеточный узел.....	23
1.3. Методика определения параметров вибраций подшипниковых узлов (перемещение, скорость, ускорение).....	30
1.4. Экспериментальные исследования коллекторно-щеточного и подшипниковых узлов электрической машины в процессе ресурсных испытаний.....	40
1.4.1. Цель, объект и методика испытаний.....	40
1.4.2. Описание аппаратной части бесконтактного измерительного комплекса.....	41
1.4.3. Полученные в результате ресурсных испытаний данные.....	44
2. Разработка математической модели изнашивания щеток универсальных коллекторных электрических машин	61
2.1. Моделирование фрикционной, электрокоррозионной (токовой) и электроэррозионной составляющих изнашивания щеток универсальных коллекторных электродвигателей	61
2.2. Влияние профиля коллектора и вибраций подшипниковых узлов на процесс коммутации	72
2.3. Методика расчета контактных сопротивлений в процессе коммутации.....	79

3. Разработка программного продукта для оценки ресурса скользящего контакта универсальных коллекторных электродвигателей.....	87
3.1. Алгоритм расчета изнашивания щеток электрических машин....	87
3.2. Метод определения поправочных коэффициентов математической модели изнашивания щеток для различных конструкций универсальных коллекторных электродвигателей	92
3.3. Методика определения динамики механического состояния профиля коллектора и подшипниковых узлов в процессе наработки электрической машины на ресурс.....	97
3.4. Программное обеспечение для расчета ресурса скользящего контакта универсальных коллекторных электрических машин.....	102
3.5. Исследование характеристик изнашивания высокоскоростного коллекторного электродвигателя с помощью разработанного программного обеспечения.....	109
4. Пути увеличения ресурса скользящего контакта универсальных коллекторных электродвигателей.....	117
4.1. Исследование влияния нажатия на щетку на ресурсные характеристики универсального коллекторного электродвигателя.....	117
4.2. Исследование влияния конструкций обмоток якоря на ресурсные характеристики универсального коллекторного электродвигателя.....	123
4.3. Исследование влияния анизотропии индуктора на ресурсные характеристики универсального коллекторного электродвигателя.....	130
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	139
ЛИТЕРАТУРА.....	142

ВВЕДЕНИЕ

Данная научно-исследовательская работа выполнена сотрудниками Национального исследовательского Томского политехнического университета.

В настоящее время универсальные коллекторные электрические машины малой мощности, обладающие хорошими энергетическими показателями и регулировочными характеристиками, находят широкое применение в различных сферах современной человеческой жизнедеятельности. В этих условиях все большее значение приобретают вопросы снижения массогабаритных показателей, повышения коэффициента полезного действия, увеличения ресурса и улучшения функциональных характеристик данного класса электрических машин.

Анализ отказов универсальных коллекторных машин, проведенный различными авторами, позволил установить, что отказ коллекторно-щеточного узла (КЩУ) составляет до 48% общего числа отказов машин, а основной причиной его выхода из строя является износ элементов КЩУ [26, 35, 36]. Одним из путей решения этого вопроса является совершенствование коллекторно-щеточных узлов, а также разработка методов оценки их состояния и коммутационной напряженности коллекторных электрических машин не только при работе уже готовой машины, но и на стадии ее проектирования.

Проблема увеличения ресурса коллекторных машин связана с обеспечением высокой износостойкости элементов скользящего контакта (СК). Однако для теоретического обоснования повышенной износостойкости и понимания процесса изнашивания элементов СК электрических машин, необходимо исследовать механизм изнашивания и разработать методы оценки износостойкости элементов КЩУ, поэтому изучение закономерностей трения и изнашивания элементов СК электрических машин и определение практических рекомендаций по повышению ресурса КЩУ являются актуальными.

Естественно, что достижение намеченной цели невозможно без проведения глубоких теоретических и экспериментальных исследований, охватывающих

весь комплекс вопросов, связанных с усовершенствованием как электрической машины в целом, так и отдельных ее элементов.

Из практики изготовления и эксплуатации коллекторных электрических машин известно, что часто при неудовлетворительной коммутации машины особое внимание следует уделить работе КЩУ и выбору соответствующей марки щеток. Во многих случаях именно правильный выбор марки щеток определяет удовлетворительное протекание коммутационного процесса, что можно объяснить изменением электрических и механических свойств подобранный пары. Поэтому не случайно, что большинство исследователей связывают работу электрической машины в целом со свойствами СК.

Анализ отечественной и зарубежной литературы показал, что начало изучению свойств скользящего электрического контакта было положено К.И. Шенфером, И. Нейкирхеном. Дальнейшее развитие этот вопрос получил в работах О.Г. Вегнера, М.Ф. Каравасева, Б.Ф. Токарева, В.И. Толкунова, А.И. Скороспешкина, В.В. Фетисова, Г.А. Сипайлова, В.Д. Авилова, Р.Ф. Бекишева и ряда других авторов [1, 2, 17, 18, 23, 24, 30, 31, 40-44, 79, 94-96, 100-102, 121]. Однако, из-за сложности взаимосвязей и многообразия явлений, сопровождающих прохождение тока в скользящем контакте в момент коммутации секций, проблема обеспечения высокой коммутационной устойчивости коллекторных электрических машин до сих пор полностью не решена.

Задача повышения ресурса КЩУ осуществляется по ряду основных направлений:

- путем разработки новых конструкций активных элементов электрических машин (индуктора и якоря), позволяющих оптимизировать их электромагнитную структуру;
- улучшение эксплуатационных свойств КЩУ за счет применения более совершенных материалов и конструктивных решений;
- правильный выбор большого числа параметров электромагнитной, электрофизической и механической природы, определяющих основные

процессы преобразования энергии в электрических машинах, в том числе коммутационные и явления изнашивания СК.

В данной работе в той или иной степени рассмотрены указанные выше способы улучшения коммутации коллекторных электрических машин и увеличения ресурса КЩУ.

Наиболее перспективным методом улучшения параметров электрических машин является их проектирование на основе в максимальной степени адекватных математических моделей с использованием современной вычислительной техники и специального программного обеспечения [13, 14, 21, 39, 51, 64, 67, 114]. Это позволяет еще на стадии проектирования выбирать значения основных конструктивных параметров электрической машины, оценивать ее коммутационные и ресурсные характеристики и, тем самым, избежать дорогостоящего изготовления и испытаний промежуточных конструктивных вариантов электрической машины.

Авторами был проведен анализ существующего отечественного и зарубежного программного обеспечения для проектирования электрических машин (ANSYS, ELCUT, Motor-CAD, Spark, RMxprt и другие). Подавляющее большинство программ реализуют в себе только функции проектирования обмоток якоря, индуктора и решение полевых задач методом конечных элементов. Данные программы больше подходят для проектирования асинхронных, синхронных и бесколлекторных типов электрических машин, так как они совсем не учитывают такие параметры КЩУ, как профиль коллектора, мгновенное значение контактного давления, жесткость СК, влияние вибрационных воздействий на щетку со стороны подшипниковых узлов. Как показывают исследования различных авторов, в том числе и исследования автора, проведенные в ходе выполнения данной работы, механическое состояние КЩУ за время ресурса электродвигателя постоянно изменяется, оказывая влияние на коммутационные циклы электрической машины, поэтому представляется важным максимально полно учитывать механическое состояние КЩУ в конкретные моменты времени для точного расчета коммутации. В ряду

вышеуказанных программ исключение составляет программа Spark производства компании LG Electronics. Данная программа содержит в себе модуль расчета коммутации, учитывающий такие параметры КЩУ, как мгновенное значение контактного давления и жесткость СК (алгоритм для данного модуля был разработан в ТПУ). Но данная программа не учитывает изменение механики КЩУ в период работы электрической машины, более того, данная программа все еще находится в разработке и недоступна широкому кругу пользователей. Таким образом, на сегодняшний день нет специализированного программного продукта для проектирования коллекторных машин, максимально учитывавшего указанные выше параметры работы КЩУ.

Актуальной также является проблема исследования механического состояния КЩУ и подшипниковых узлов в процессе эксплуатации коллекторных машин. Для диагностирования подшипниковых узлов широкое распространение получили методы вибрационной диагностики [11, 27, 29, 71, 99, 120], но они достаточно дороги в реализации и не лишены недостатков. Диагностирование же КЩУ, особенно в динамических режимах, развито слабо. Поэтому, работы в области бесконтактного диагностирования профилей коллекторов и вибраций якорей в рабочих режимах, представляют научный и практический интерес.

Представленная работа состоит из введения, четырех основных глав заключения и списка литературы.

В первой главе проведен обзор современного состояния работ в области оценки механического состояния коллекторов и подшипниковых узлов в процессе эксплуатации электрических машин. Предложены способы измерения зазора между измерительным преобразователем и контролируемой поверхностью в статическом и динамическом режимах. Предложена методика выделения профиля коллектора и вибраций якоря ЭМ в подшипниках из массива последовательных измерений зазора между измерительным преобразователем и коллектором на работающей машине. Получены

оригинальные выражения для расчета коэффициентов ряда Фурье применительно к коллекторам ЭМ. Приводится описание предложенной автором методики определения усредненных параметров работы подшипниковых узлов (перемещение, скорость и ускорение внутреннего кольца подшипника). Приводится анализ экспериментальных данных, полученных в результате ресурсных испытаний высокоскоростного универсального электродвигателя VCE280E02 (35000 об/мин, 1800 Вт, LG Electronics).

Вторая глава посвящена разработке математической модели изнашивания щеток универсальных коллекторных электрических машин, учитывающей механическое состояние коллектора и ПУ, а также его изменение в процессе наработки ЭМ на ресурс. В главе приведены аналитические выражения, описывающие фрикционную, электрокор-розионную и электроэррозионную составляющие изнашивания электрических щеток. Предложен метод учета влияния механического состояния коллектора и ПУ на расчет коммутационных процессов. Приведены аналитические выражения для экспоненциальной аппроксимации временной зависимости контактных сопротивлений по трем точкам (в начале, середине и конце коммутационного цикла), позволяющие существенно сократить время расчета коммутационных процессов

В третьей главе приведено описание алгоритма расчета изнашивания щеток коллекторных электрических машин малой мощности. Излагаются возможности разработанного программного обеспечения, реализующего предложенный алгоритм. Излагается методика определения поправочных коэффициентов к фрикционной, электрокоррозионной и электроэррозионной составляющим изнашивания щеток для различных типоразмеров коллекторных ЭМ при помощи метода планирования полного факторного виртуального эксперимента с использованием разработанного программного обеспечения. В главе приведены результаты виртуальных исследований характеристик фрикционной, электрокоррозионной и электроэррозионной составляющих изнашивания щеток высокоскоростного коллекторного электродвигателя LG

VCE280E02, проведенных с использованием разработанного программного обеспечения.

В четвертой главе предлагаются основные направления увеличения ресурса щеток универсальных коллекторных электрических машин на примере электродвигателя LG VCE280E02. Приведены результаты виртуальных исследований, выполненных с применением разработанного ПО, влияния следующих изменений в конструкцию рассмотренной ЭМ на величину изнашивания щеток: нажимного устройства с постоянной характеристикой нажатия различной величины; конструкции демпфированных обмоток якоря; анизотропного индуктора с увеличенным магнитным сопротивлением поперек основных полюсов.

1. Разработка методов и средств экспериментальных исследований механического состояния коллекторно-щеточных и подшипниковых узлов в процессе эксплуатации электрических машин

1.1. Разработка бесконтактных методов измерений профилей вращающихся элементов машин и регистрации линейных микроперемещений повышенной точности

Актуальность разработки обусловлена необходимостью создания инструментальных средств и методов дистанционного контроля механического состояния, формы и размеров ответственных элементов машин и механизмов на стадиях технологического процесса их изготовления и в процессе эксплуатации. Это позволяет получать объективную информацию об измеряемых параметрах в динамических режимах работы, что не обеспечивается большинством традиционных измерительных систем. Кроме того, известные системы подобного рода имеют достаточно высокую стоимость.

На электромашиностроительных предприятиях всего мира большое внимание уделяется контролю качества рабочей поверхности коллекторов и контактных колец, который проводится неоднократно и на различных этапах производства [20, 28, 32, 112, 118]. Однако, как показывает практика, этот контроль не всегда оказывается эффективным, поскольку он выполняется лишь в статическом режиме с помощью миниметрических головок и не учитывает всей совокупности центробежных, вибрационных и температурных нагрузок действующих на коллектор в работающей машине. Поэтому в последнее время предприятия-изготовители коллекторных электрических машин (ЭМ) и эксплуатирующие их организации все в большей степени сталкиваются с необходимостью контроля поверхности коллекторов и контактных колец при разработке, производстве, эксплуатации и ремонте ЭМ, как в статических, так и в динамических режимах [103, 105, 106, 108, 113, 117, 122].

Повышение точности, уменьшение времени измерений, а также обеспечение возможности проведения измерений зазоров в процессе взаимных перемещений измерительного преобразователя (ИП) и объекта контроля являются актуальными на сегодняшний день задачами.

Из литературных источников известны способы измерения зазоров между ИП и контролируемой поверхностью с помощью измерительных устройств для бесконтактного контроля механического состояния деталей машин на основе, например, преобразователей емкостного и вихревокового типов [108, 112, 113, 117, 122]. На результаты измерений данными устройствами при используемых методах измерений, как правило, оказывают влияние различного рода внешние факторы, например: удельное электрическое сопротивление контролируемых поверхностей, скорость относительного перемещения ИП и контролируемой поверхности, а также их взаимное расположение и др.

Известен способ измерения профилей коллекторов и механического состояния роторов ЭМ путем динамической градуировки измерительного устройства с помощью образцовой медной пластины заданной высоты, наклеенной на одну из пластин коллектора [25]. Данный способ предполагает вмешательство в объект измерения (наклеивание образцовой пластины) и не гарантирует необходимую точность градуировки для остальных пластин коллектора, т.к. они могут иметь различное удельное электрическое сопротивление поверхностного слоя вследствие особенностей механической обработки поверхности коллектора, разную температуру и т.п., что непосредственно влияет на результаты измерений вихревковым ИП.

Предложенные ниже бесконтактные методы измерений профилей вращающихся элементов машин лишены перечисленных недостатков и позволяют повысить точность измерений. Рассмотрим первый из них.

Способ измерения зазора между измерительным преобразователем и контролируемой поверхностью. Данный способ защищен патентом РФ №2234054 [81]. Сущность предлагаемого способа измерений состоит в следующем. При использовании бесконтактного измерительного устройства

(например, с вихревоковым преобразователем), градуировочная характеристика которого выполнена линейной [22], зависимость выходного параметра от измеряемой величины записывается в виде выражения:

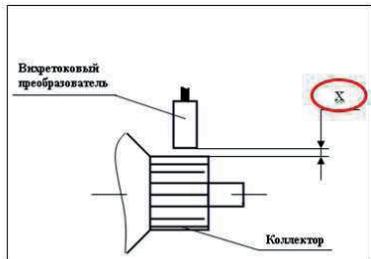
$$y = a \cdot x . \quad (1.1)$$

Из данного выражения следует, что выходной параметр измерительного устройства пропорционален не только измеряемому зазору x , но и параметру градуировочной характеристики a , являющемуся, по существу, коэффициентом усиления измерительного тракта, который в общем случае зависит от многих параметров, в том числе от внешних воздействий на объект измерения и элементы измерительного устройства.

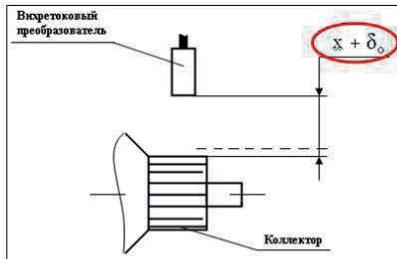
Погрешности измерений могут быть обусловлены неодинаковыми удельными электрическими сопротивлениями отдельных ламелей коллектора (особенно их поверхностного слоя, свойства которого могут зависеть от технологии обработки), разностью температур нагрева ламелей и неточностьюю ориентации датчика относительно измеряемой цилиндрической поверхности, а также неидентичностью расположения ламелей в корпусе коллектора, значением скорости вращения коллектора, а также изменением температуры окружающей среды.

Поэтому целесообразно осуществлять коррекцию параметра a в процессе измерений, что позволяет повышать точность измерений.

Предложенная методика заключается в следующем. На первом этапе выполняется опорное измерение зазора между ИП и контролируемой поверхностью (рис. 1.1). Затем производится перемещение ИП на образцовую величину δ_0 , которое фиксируется, например, с помощью шкалы отсчета микрометрического винта (либо измерительных головок и т.п.). После этого выполняется дополнительное измерение зазора (рис. 1.1).



Этап №1



Этап №2

Рис. 1.1. Положение измерительного преобразователя при опорном и дополнительном измерениях

При этом будем иметь систему двух уравнений с одинаковым параметром a , поскольку измерения проводятся на одном объекте при идентичных возмущающих воздействиях

$$y_o = a \cdot x,$$

$$y_d = a \cdot (x \pm \delta_0), \quad (1.2)$$

где y_o , y_d – выходной параметр измерительного устройства при опорном и дополнительном измерении, м; a – коэффициент коррекции измерительного тракта прибора; x – измеряемый зазор между измерительным преобразователем измерительного устройства и объектом измерения, м; δ_0 – образцовая величина изменения зазора, м.

Далее, путем решения системы (1.2) определяют коэффициент коррекции измерительного тракта прибора и реальное значение зазора между ИП и контролируемой областью объекта измерений:

$$a = \frac{y_d - y_o}{\pm \delta_0}, \quad x = \frac{y_o}{a}. \quad (1.3)$$

Таким образом, выражение (1.3) обеспечивает достаточно простую корректировку параметра a линейной градуировочной характеристики измерительного устройства при изменении зазора, что позволяет существенно снизить отрицательное влияние систематических погрешностей на результат измерения.

Для того чтобы погрешность измерения зазора от неточности его изменения на образцовую величину не превышала заданного значения, необходимо изменять зазор до тех пор, пока при увеличении или при уменьшении зазора соответственно не будут выполняться условия:

$$y_2 \geq y_1 \cdot \left(1 + \frac{\Delta}{\Delta x}\right); \quad y_2 \leq y_1 \cdot \left(1 - \frac{\Delta}{\Delta x}\right), \quad (1.4)$$

где Δ – максимальная погрешность изменения зазора на образцовую величину δ_0 , м; Δx – допустимая погрешность измерений зазора, обусловленная неточностью изменения зазора на образцовую величину, м.

Рассмотрим пример осуществления измерений с использованием предложенного метода. Пусть параметр градуировочной характеристики (коэффициент усиления измерительного канала) определен при измерении зазора между ИП и ламелью №1 коллектора. Тогда градуировочная характеристика прибора ($y = f(x)$) представляет собой прямую, проходящую через ноль под углом 45° к оси абсцисс, рис. 1.2. При этом значения на выходе прибора соответствуют истинному расстоянию от измерительного преобразователя ИП до контролируемой поверхности ламели №1 коллектора, а прямая 1 является эталонной градуировочной характеристикой (выходной характеристикой профилометра), то есть $y_a = x_{баз}$.

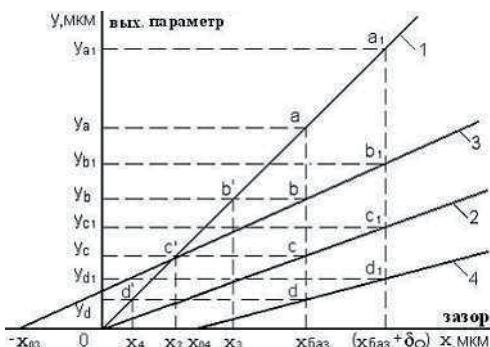


Рис. 1.2

В случае, если ламель №2 с тем же уровнем профиля, что и ламель №1, имеет другое удельное электросопротивление (температуру или неидентичное положение относительно ИП, то градуировочная характеристика прибора при контроле ламели №2 пойдет под другим углом к

оси абсцисс (например, как прямая 2 на рис. 1.2). При этом показания прибора на ламели №2 (y_c) будут интерпретированы как расстояние x_2 , соответствующее

точке c' на градуировочной характеристики 1. Измеренное значение x_2 здесь отличается от истинного значения $x_{баз}$. По аналогии неверно будут интерпретированы и показания других ламелей.

Для ликвидации расхождений между измеренными значениями и истинными величинами зазоров, необходимо наклоны характеристик 2, 3, 4 привести к эталонному значению, которым является наклон характеристики 1. Тангенс угла наклона эталонной характеристики 1 равен 1. Углы наклона характеристик 2, 3, 4 в общем случае неизвестны и их требуется определить каким-либо образом.

С этой целью в процессе измерения осуществляется образцовое перемещение δ_o ИП относительно измеряемого объекта в сторону увеличения зазора, которое фиксируется, например, с помощью шкалы отсчета микрометрического винта (либо миниметрических измерительных головок и т.п.). При этом фактическая величина зазора между ИП и ламелями №1, 2 станет равной ($x_{баз} + \delta_o$). Показание прибора для точки a_1 характеристики 1 будет равно y_{a1} ($y_{a1} = x_{баз} + \delta_o$). Показания прибора для ламелей 2, 3, 4 будут при этом равны y_{c1}, y_{b1}, y_{d1} . В результате тангенсы углов наклона характеристик 2, 3, 4,... i находятся по выражению:

$$\operatorname{tg} \alpha_i = \frac{\Delta y_i}{\delta_o} = a_i, \quad (1.5)$$

где α_i – угол наклона i -ой характеристики; Δy_i – приращение показаний прибора на i -ой характеристике при перемещении преобразователя на величину δ_o .

Соответственно откорректированные показания прибора на i -ой характеристике равны:

$$y_{\text{откор},i} = y_i / a_i. \quad (1.6)$$

При этом откорректированные в соответствии с предложенным способом градуировочные характеристики прибора для ламелей №2, 3, 4 будут выглядеть так, как это показано на рисунке 1.3. Показание прибора на характеристике 3

при этом равно y_{bo} , что соответствует ординате точки b'_0 на прямой 1 и зазору

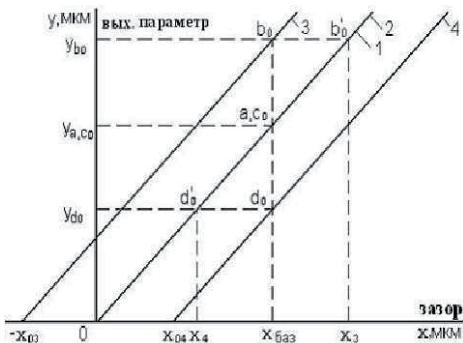


Рис. 1.3

x_3 ($x_3 = x_{\text{баз}} + x_{03}$). Аналогично показание прибора на характеристикике 4 равно y_{do} , что соответствует ординате точки d'_0 на эталонной прямой 1 и зазору x_4 ($x_4 = x_{\text{баз}} - x_{04}$). Следовательно, откорректированные показания прибора соответствуют фактическим значениям зазоров между ИП и контролируемыми коллекторными пластинами.

По аналогии может быть выполнена корректировка параметра градуировочной характеристики в случае уменьшения зазора на образцовую величину d_0 .

Следует отметить, что при измерениях без применения предложенной коррекции погрешности могут достигать нескольких десятков процентов, а с использованием предложенного метода снижаются в десятки раз.

Недостатком рассмотренного способа является то, что он не учитывает изменение зазора между ИП и контролируемой поверхностью в динамических режимах работы, например, вращающихся элементов машин вследствие наличия механической неидентичности положения вала в подшипниковых узлах (ПУ) от оборота к обороту. Данная неидентичность обусловлена неточностью изготовления подшипников скольжения или качения, явлениями изнашивания их элементов в процессе эксплуатации, а также вибрационными явлениями различного рода. Изменения зазора между ИП и одним и тем же местом контролируемой поверхности при этом могут достигать десятков мкм, что приводит к существенному расхождению между измеренным и реальным значениями образцовой величины изменения зазора, а это ведет к повышению погрешности измерений. Следовательно, рассмотренный способ наиболее полезен для измерения элементов машин в статическом состоянии.

Кроме того, величина образцового изменения зазора δ_0 в рассматриваемом способе в момент начала измерений неизвестна. Поэтому, как правило, требуется выполнить несколько циклов изменения зазора и дополнительного его измерения до выполнения условий 1.4. Это усложняет процедуру и увеличивает время измерения.

Таким образом, необходим другой способ для измерения профилей элементов машин в динамических режимах, лишенный перечисленных выше недостатков. Перейдем к рассмотрению данного способа.

Способ измерения зазора между измерительным преобразователем и контролируемой поверхностью в динамических режимах работы. Данный способ защищен патентом РФ №2327104 [85].

На рисунке 1.4 представлена экспериментальная зависимость изменения зазора между неподвижным ИП и рабочей поверхностью одной из ламелей коллектора в зависимости от порядкового номера измерения при постоянной частоте вращения якоря. Из графика видно, что изменение указанного зазора в процессе вращения якоря достигает 35 мкм.

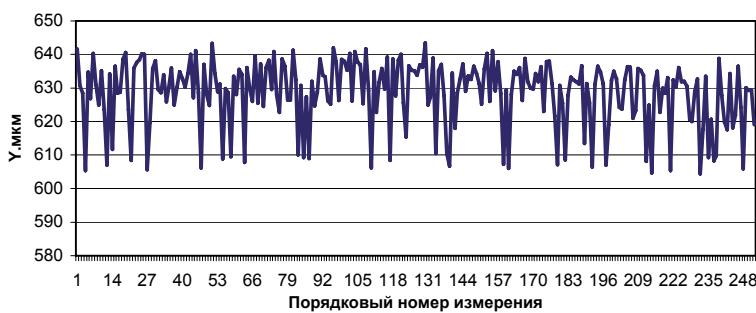


Рис. 1.4. Экспериментальная зависимость изменения зазора между неподвижным ИП и одной из ламелей коллектора

В случае, когда измеряемый зазор нестабилен в процессе измерений, как это продемонстрировано на рис. 1.4, целесообразно оперировать средними величинами выходных параметров измерительного устройства, которые определяются, соответственно, средними значениями указанного зазора. Данное положение следует из допущения, что отклонения величины зазора

между ИП и контролируемой поверхностью вращающихся элементов машин от его среднего значения являются периодической функцией. В этом случае указанный зазор может быть описан уравнением, которое включает сумму истинного значения зазора и ряда гармонических составляющих. Тогда среднее значение гармонических составляющих зазора стремится к нулю при достаточно большом числе измерений, а среднее значение зазора, соответственно, стремится к его истинному значению. Например, пусть зазор описывается уравнением:

$$x = x_i + x_a \cdot \sin(\varphi + \omega \cdot t), \quad (1.7)$$

где x_i – истинное значение зазора; x_a – амплитуда первой гармоники отклонения зазора от его истинного значения; φ – начальный угол первой гармоники; ω – угловая частота вращения (или вибрации) элемента машины; t – текущее время.

Тогда среднее значение зазора за заданное время t_3 будет равно:

$$x_{cp} = \frac{\int_0^{t_3} x \cdot dt}{t_3} = x_i - \frac{x_a \cdot \cos(\varphi + \omega \cdot t_3) - x_a \cdot \cos\varphi}{\omega \cdot t_3} + \frac{c}{t_3}, \quad (1.8)$$

где c – постоянная интегрирования.

Анализ выражения (1.8) показывает, что при $t_3 \rightarrow \infty$ имеем $x_{cp} \rightarrow x_i$.

Соответственно среднее значение выходного параметра измерительного устройства y_{cp} в этом случае будет стремиться к истинному значению y .

Данные выводы справедливы и для любой дискретной сходящейся последовательности, примером которой может служить ряд последовательных измерений на рис. 1.4. Причем для подобного ряда всегда можно определить количество измерений N , при котором погрешность определения y_{cp} не будет превышать заданной максимальной (пределной) величины Δp , т.е. выполняется условие

$$\frac{\sum_{n=1}^{N} y_n}{N} - \frac{\sum_{n=1}^{\infty} y_n}{\infty} \leq \pm \Delta n , \quad (1.9)$$

где $\frac{\sum_{n=1}^{\infty} y_n}{\infty}$ – предел числовой последовательности.

Поведение среднего значения измеряемой величины (измерение производится дискретно во времени) для рассмотренного случая ($x_i = 110$ мкм; $x_a = 20$ мкм; $\omega = 3141$ с⁻¹; $\varphi = 1,57$ рад.) иллюстрируется графиком на рис. 1.5, из которого видно, что среднее значение измеряемой величины при достаточно большом числе измерений приближается к ее истинному значению.

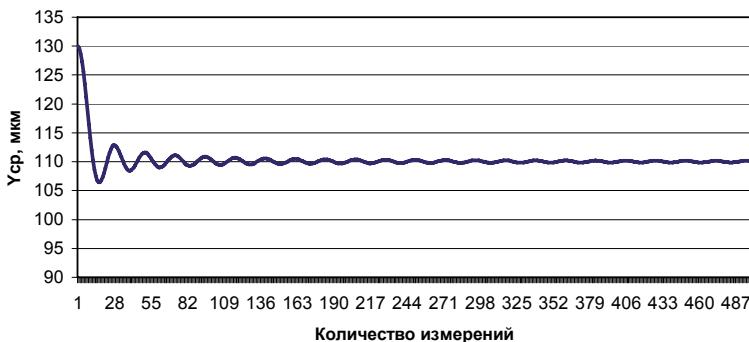


Рис. 1.5. Поведение среднего значения измеряемой величины при достаточно большом числе измерений

Экспериментальная зависимость среднего значения зазора между ИП и одной и той же ламелью коллектора носит аналогичный характер, что иллюстрируется кривой на рис. 1.6 (для результатов измерений, представленных на рис. 1.4). Существуют различные математические методы и программные продукты для нахождения предела числовой последовательности, представленной на рис. 1.5. Например, локальные максимумы данной последовательности могут быть аппроксимированы логарифмической зависимостью, из которой определяется предел последовательности.

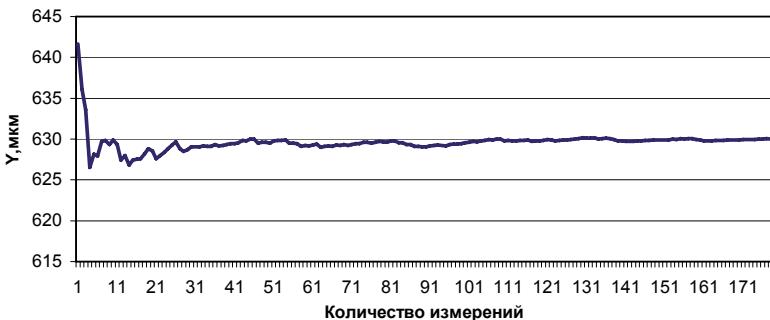


Рис. 1.6. Экспериментальная зависимость среднего значения зазора между неподвижным ИП и одной и той же ламелью коллектора

Сущность предложенного метода измерений состоит в следующем:

1) Проводится серия из N_o опорных измерений зазора.

2) Выполняется перемещение ИП на образцовую величину δ_o , которая определяется с учетом погрешности выполнения данного перемещения и заданных погрешностей измерений:

$$\delta_o \geq \frac{(\Delta\delta + 2 \cdot \Delta\pi) \cdot (x + \Delta x)}{\Delta x}, \quad (1.10)$$

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

При выполнении условия (1.10) обеспечивается требуемая точность измерений в конкретном цикле измерений на конкретном механизме.

3) Проводится серия из N_d дополнительных измерений зазора (измененного на образцовую величину δ_o).

Результаты серий опорных и дополнительных измерений зазора определяются как средние значения из N_o и N_d последовательных измерений в соответствии с выражениями:

$$y_o = \frac{\sum_{i=1}^{N_o} y_{o,i}}{N_o}, \quad y_d = \frac{\sum_{i=1}^{N_d} y_{d,i}}{N_d}. \quad (1.11)$$

4) Выполняется коррекции измерительного тракта прибора согласно выражению (1.3).

Из выражения (1.10) может быть получено выражение для вычисления погрешности измерений:

$$\Delta x = \frac{(\Delta\delta + 2 \cdot \Delta\pi) \cdot x}{(\delta_o - \Delta\delta - 2 \cdot \Delta\pi)}, \quad (1.12)$$

где Δx – погрешность измерений зазора, м; $\Delta\delta$ – максимальная погрешность увеличения зазора на образцовую величину, м; $\Delta\pi$ – максимальная погрешность определения y_o и y_d в сериях последовательных измерений, м; x – значение измеряемого зазора, м; δ_o – образцовая величина изменения зазора, м.

Выражение (1.12) показывает, что погрешность измерений зазора во многом зависит от технических характеристик измерительной системы. В частности, $\Delta\delta$ – зависит от точности механизма, осуществляющего образцовое перемещение, δ_o – зависит от протяженности линейного участка выходной характеристики измерительного тракта. Из выражения (1.12) следует, что целесообразно выполнять измерения на минимально возможном расстоянии от контролируемой поверхности x . Максимальное отклонение отдельных показаний измерительного прибора от среднего значения показаний в процессе измерений $\Delta\pi$ зависит от числа измерений и определяется согласно выражению (1.9).

На основе предложенного метода измерений зазора между ИП и контролируемой поверхностью в динамических режимах были разработаны другие бесконтактные способы измерения: вибраций и профиля контролируемой поверхности в динамических режимах [86, 87].

Таким образом, разработаны новые бесконтактные методы измерений профилей вращающихся элементов машин и регистрации линейных микроперемещений повышенной точности для статических и динамических режимов работы. Предложенные способы бесконтактных измерений обеспечивают снижение погрешностей, обусловленных различиями удельных электрических сопротивлений поверхностных слоев отдельных ламелей коллектора, разностью температур их нагрева, неидентичностью расположения ламелей в корпусе коллектора, неточностью ориентации датчика относительно измеряемой поверхности, скоростью вращения коллектора, а также внешними вибрационными воздействиями на объект контроля, что повышает точность измерений и расширяет область применения программно-аппаратных измерительных комплексов.

1.2. Метод определения профиля коллектора в динамических режимах и анализ его воздействие на коллекторно-щеточный узел

Поверхность цилиндрического коллектора, как бы точно он ни был изготовлен, всегда в большей или меньшей степени отличается от геометрически правильной боковой поверхности кругового цилиндра. Профиль коллектора, как правило, характеризуется наличием овальностей, многогранностей, выступанием и западанием как отдельных, так и групп ламелей коллектора. На электромашиностроительных предприятиях всего мира большое внимание уделяется контролю качества рабочей поверхности коллекторов, который проводится неоднократно и на различных этапах производства. Однако, как показывает практика, этот контроль не всегда оказывается эффективным, поскольку он выполняется лишь в статическом режиме с помощью миниметрических головок и не учитывает всей совокупности центробежных, вибрационных и температурных нагрузок действующих на коллектор в работающей машине. В динамике рельеф коллектора существенно изменяется под действием центробежных сил и других нагрузок. Увеличение перепадов между соседними ламелями, наряду с другими

неблагоприятными факторами, приводит к дополнительной нестабильности контактирования, а в наиболее неблагоприятных случаях - к нарушению нормальных условий токосъема. Поэтому с целью диагностики состояния и прогнозирования ресурса коллекторно-щеточного узла (КЩУ), необходимо иметь как можно более полную информацию об истинном профиле коллектора в любых режимах работы.

При измерении профиля коллекторов ЭМ в динамических режимах работы при помощи бесконтактного профилометра, выходные данные несут в себе информацию как о самом профиле коллектора, так и о вибрациях якоря относительно индуктора вследствие неидеальности ПУ. С практической же точки зрения наиболее важны профиль коллектора и вибрации ПУ в отдельности. В связи с этим, актуальной является разработка методик выделения полезной информации из всего массива измерений.

На рис. 1.7 представлен массив данных $y_{\text{исх}}$, состоящий из 252 измерений, выполненных бесконтактным профилометром с использованием предложенного выше способа измерения зазора между измерительным преобразователем и контролируемой поверхностью в динамических режимах работы [85]. Ресурс электродвигателя на момент измерений составлял 83,5 часа (Все приводимые в качестве примера результаты получены в ходе экспериментальных исследований, проведенных в ходе выполнения данной работы. Более подробная информация о методике и объекте исследований, а также о применявшемся оборудовании и полученных результатах содержится в разделе 1.4 данной главы).

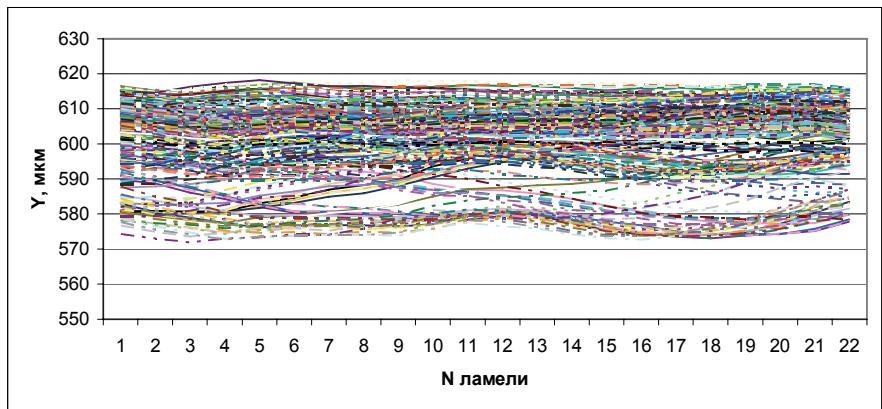


Рис. 1.7. Массив измерений, выполненных бесконтактным профилометром с применением коррекции результатов измерений на основе базового перемещения

С использованием предложенного способа бесконтактного измерения профиля контролируемой поверхности в динамических режимах (Патент РФ №2331043) [86] был получен выделенный профиль коллектора $y_{выд}$ относительно средней линии, представленный на рис. 1.8.

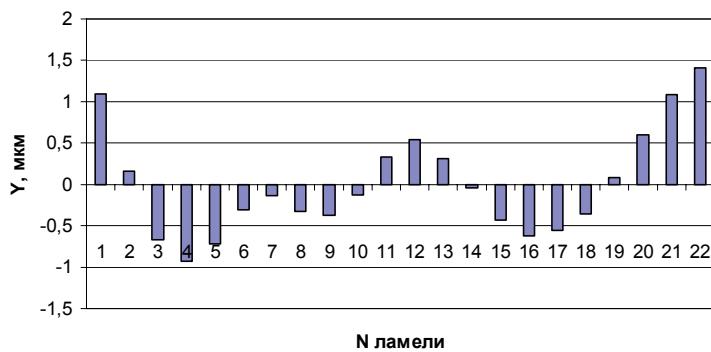


Рис. 1.8. Выделенный профиль коллектора относительно средней линии

Выделенный из массива измерений профиль коллектора $y_{выд}$ несет в себе значительный объем гармонических составляющих, часть которых воздействует на щетки электрической машины как на элемент колебательной системы, другие же демпфируются контактным слоем и не оказывают

существенного влияния на щетки. Для более детального анализа необходимо выделенный профиль коллектора $y_{\text{выд}}$ разложить в ряд Фурье.

Любую периодическую функцию $y(t)$, определенную на интервале одного периода T , и удовлетворяющую условиям Дирихле (ограниченная, кусочно-непрерывная, с конечным числом разрывов 1-го рода) можно разложить в ряд Фурье:

$$S(t) = (b_0/2) + \sum_{j=1}^{\infty} (a_j \sin(j\omega t) + b_j \cos(j\omega t)), \quad (1.13)$$

где $a_j = (2/T) \int_0^T y(t) \sin(j\omega t) dt$,

$$b_j = (2/T) \int_0^T y(t) \cos(j\omega t) dt - \text{коэффициенты Фурье};$$

j – номер гармоники; $\omega = 2\pi/T$.

Рассмотрим произвольный профиль коллектора электрической машины с числом ламелей, равным K , вращающейся со скоростью $\omega = 2\pi n_{\text{кол}}/60$. Период $T = 2\pi/\omega$. Выберем пределы интегрирования для коэффициентов ряда Фурье согласно рис. 1.9.

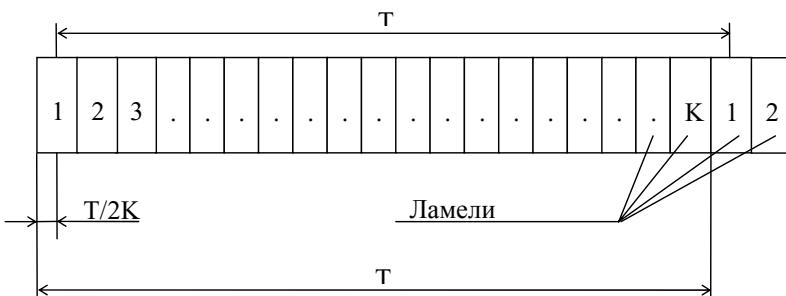


Рис. 1.9. Развёртка коллектора

Тогда коэффициент ряда Фурье a_j можно записать следующим образом:

$$a_j = \frac{2}{T} \cdot \int_{0 - \frac{T}{2K}}^{T - \frac{T}{2K}} y(t) \sin(j\omega t) dt =$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{2}{T} \cdot \left[\int_{0 - \frac{T}{2K}}^{\frac{T}{K} - \frac{T}{2K}} y_1 \sin(j\omega t) dt + \int_{\frac{T}{K} - \frac{T}{2K}}^{\frac{2T}{K} - \frac{T}{2K}} y_2 \sin(j\omega t) dt + \dots + \int_{\frac{(K-1)T}{K} - \frac{T}{2K}}^{T - \frac{T}{2K}} y_K \sin(j\omega t) dt \right] = \\
&= \frac{2}{T} \left[\left(-\frac{y_1}{j\omega} \cos(j\omega t) \Big|_{0 - \frac{T}{2K}}^{\frac{T}{K} - \frac{T}{2K}} \right) + \left(-\frac{y_2}{j\omega} \cos(j\omega t) \Big|_{\frac{T}{K} - \frac{T}{2K}}^{\frac{2T}{K} - \frac{T}{2K}} \right) + \dots + \left(-\frac{y_K}{j\omega} \cos(j\omega t) \Big|_{\frac{(K-1)T}{K} - \frac{T}{2K}}^{T - \frac{T}{2K}} \right) \right] = \\
&= \frac{\sum_{i=1}^K y_i \left(\cos \left[\omega_j \cdot \left(-\frac{T}{2K} + \frac{T}{K} \cdot (i-1) \right) \right] - \cos \left[\omega_j \cdot \left(-\frac{T}{2K} + \frac{T}{K} \cdot i \right) \right] \right)}{\pi \cdot j}.
\end{aligned}$$

Коэффициент b_j рассчитывается по аналогии с a_j . Таким образом, коэффициенты ряда Фурье a_j и b_j рассчитываются по выражениям:

$$a_j = \frac{\sum_{i=1}^K y_i \left(\cos \left[\omega_j \cdot \left(-\frac{T}{2K} + \frac{T}{K} \cdot (i-1) \right) \right] - \cos \left[\omega_j \cdot \left(-\frac{T}{2K} + \frac{T}{K} \cdot i \right) \right] \right)}{\pi \cdot j}; \quad (1.14)$$

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

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 ($\omega_j = \omega \cdot j$; $\omega = 2\pi n_{\text{кол}}/60$ – частота первой гармоники).

Проанализировав публикации по данной теме, можно констатировать, что выражения для расчета коэффициентов ряда Фурье a_j и b_j , полученные применительно к коллекторам электрических машин, являются оригинальными. Преимуществом применения предложенных выражений (1.14) для гармонического анализа по сравнению с дискретным преобразованием

Фурье, является существенно более точное выполнение обратного преобразования Фурье при использовании части гармоник. Применение предложенных выражений в указанном случае снижает погрешность восстановления профиля при обратном преобразовании Фурье в 5-7 раз по сравнению с ДПФ. Кроме этого, при применении ДПФ становится невозможной работа с гармониками, порядковый номер которых превышает число выборок (в нашем случае это количество коллекторных пластин K).

В данной работе во всех расчетах профили задаются относительно средней линии, следовательно, постоянная составляющая ($b_0/2$) из выражения (1.13) равна нулю. Таким образом, форма рабочей поверхности произвольного коллектора описывается тригонометрической суммой, состоящей из N-гармоник:

$$S_t = \sum_{j=1}^N (a_j \sin(\omega_j \cdot t) + b_j \cos(\omega_j \cdot t)), \quad (1.15)$$

где j – номер гармоники;

ω_j – угловая частота j – той гармоники ($\omega_j = \omega \cdot j$; $\omega = 2 \cdot \pi \cdot n_{\text{кол}} / 60$ - частота первой гармоники);

t – текущее время при определении S_t ;

a_j , b_j – коэффициенты ряда Фурье.

Введем определение динамического профиля коллектора: динамический профиль коллектора $y_{\text{дин}}$ – это профиль, состоящий из гармоник, действующих на движение щетки в колодце щеткодержателя. Для получения динамического профиля коллектора $y_{\text{дин}}$, необходимо при разложении выделенного из экспериментальных данных профиля коллектора $y_{\text{выд}}$ в ряд Фурье ограничиться ближайшим целым числом m гармонических составляющих. Число гармонических составляющих m находится по следующему выражению [7, 8]:

$$m \approx \pi \cdot \frac{D_k}{b_{\text{ш.д}}}, \quad (m \leq K) \quad (1.16)$$

где D_k – диаметр коллектора;

$b_{шд}$ – ширина щетки по дуге окружности коллектора;

K – количество коллекторных пластин.

Таким образом, динамический профиль коллектора $y_{дин}$ может быть описан следующим выражением:

$$y_{дин,i} = \sum_{j=1}^m (a_j \sin(\omega_j \cdot t_i) + b_j \cos(\omega_j \cdot t_i)), \quad (1.17)$$

где $t_i = T(i-1)/K$.

Гармоники более высокого порядка на щетку, как на элемент колебательной системы, существенного влияния оказывать не будут, так как они демпфируются контактным слоем.

Динамический профиль коллектора $y_{дин}$, полученный из выделенного профиля $y_{выд}$ (рис. 1.8), представлен на рис. 1.10.

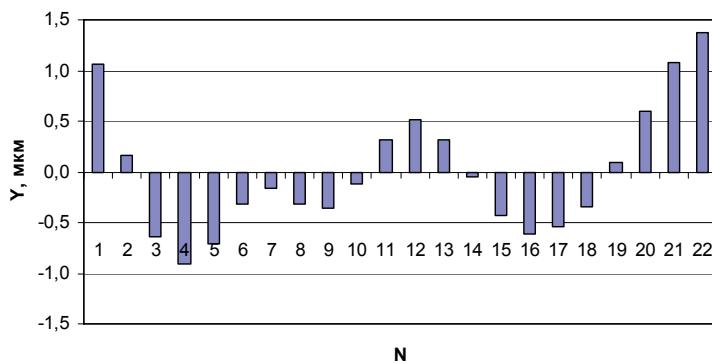


Рис. 1.10. Динамический профиль коллектора

Профиль, состоящий из гармоник, демпфируемых контактным слоем элементов СК (высокочастотный спектр) называется расчетным профилем коллектора $y_{расч}$ и находится по выражению:

$$y_{расч,i} = \sum_{j=m+1}^N (a_j \sin(\omega_j \cdot t_i) + b_j \cos(\omega_j \cdot t_i)), \quad (1.18)$$

где N – максимальное число анализируемых гармонических составляющих;

$t_i = T(i-1)/K$.

Иными словами, расчетный профиль коллектора может быть также получен согласно следующему выражению:

$$y_{\text{расч},i} = y_{\text{выд},i} - y_{\text{дин},i}. \quad (1.19)$$

Расчетный профиль коллектора $y_{\text{расч}}$, полученный из выделенного профиля $y_{\text{выд}}$ (рис. 1.8), представлен на рис. 1.11.

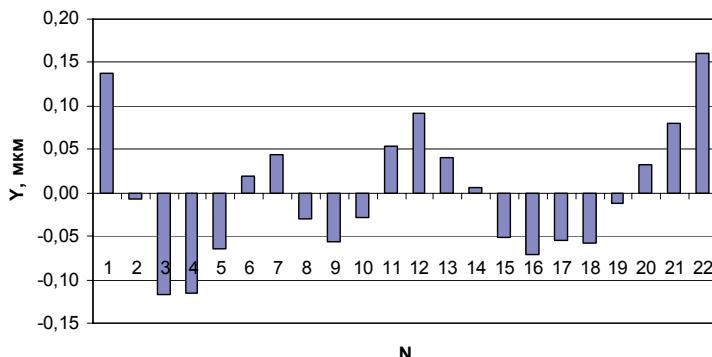


Рис. 1.11. Расчетный профиль коллектора

Таким образом, получен профиль коллектора, выделенный из первоначального массива результатов измерений, выполненных на работающей ЭМ бесконтактным профилометром при помощи предложенной методики, основанной на усреднении вибраций ПУ.

Предложена методика разделения профиля коллектора на динамический профиль (воздействующий на движение щетки в колодце щеткодержателя) и расчетный профиль (демпфируемый контактным слоем элементов СК и необходимый для определения контактных давлений в процессе расчета контактных сопротивлений).

1.3. Методика определения параметров вибраций подшипниковых узлов (перемещение, скорость, ускорение)

Подшипники качения являются наиболее распространенными элементами конструкции любого роторного механизма, они осуществляют

пространственную фиксацию вращающихся роторов и воспринимают большую часть статических и динамических усилий, возникающих в работающем механизме. Состояние подшипников является важнейшей составляющей технического состояния механизма, его исправности и работоспособности.

В последние годы увеличивается количество работ по созданию новых способов диагностирования подшипников качения, разработке устройств для совершенствования отдельных элементов существующих технических средств. Это подтверждает актуальность проблемы повышения качества подшипников качения, сложность ее решения, необходимость поиска новых методов диагностирования, позволяющих осуществлять как комплексную оценку технического состояния подшипников, так и выявлять отдельные виды дефектов.

Во время работы механическое состояние подшипника изменяется, соответственно изменяются перемещение (вибрации), скорость и ускорения, возникающие в подшипниковом узле (ПУ). В самом общем случае состояние подшипника, качения и развитие его дефектов, за весь период его службы можно разделить на пять этапов [88, 90]. Эти этапы схематически показаны на рис. 1.12. Состояние подшипника определяется двумя ломаными линиями. Нижняя соответствует уровню фона вибрации на каждом этапе развития дефектов, верхняя - уровню пиков вибрации.

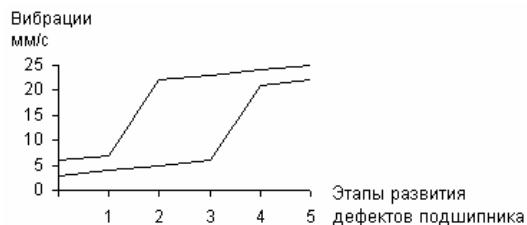


Рис. 1.12. Вибрации в подшипнике в зависимости от этапа развития дефектов

До начала первого этапа (на рисунке 1.12 это до отметки «1») общее техническое состояние подшипника считается идеальным.

Этап 1. В подшипнике появляется и начинает развиваться какой-либо дефект, возникают ударные виброимпульсы. Уровень вибраций по своей величине при этом остается неизменным, т. к. дефект носит локальный характер и на общем состоянии подшипника пока не сказывается.

Этап 2. Начиная с точки «2» на рисунке 1.12 ударные импульсы в подшипнике достигают по своей энергии практически максимального значения. На данной стадии остановить дальнейшее развитие дефекта практически невозможно, началось его саморазвитие.

Этап 3. Это зона перехода подшипника к полной деградации. Дефект столь велик, что подшипник уже не обеспечивает вращение вала с минимальным трением, увеличивается энергия, выделяющаяся в подшипнике и начинается его саморазрушение.

Этап 4. Это последний этап развития дефекта, когда он охватил весь подшипник. Работы подшипников в этой зоне следует избегать.

Этап 5. Это этап ожидания аварии.

Все вышеперечисленные этапы ухудшения состояния подшипника свойственны практически всем видам дефектов, имеющих место в любых разновидностях подшипников. В зависимости от ряда эксплуатационных параметров подшипников могут лишь наблюдаться различия в длительности этапов и интенсивности процессов в них, но общая картина развития не меняется.

Определение параметров работы ПУ во времени очень важно с точки зрения прогнозирования ресурса элементов КЦУ. Для повышения достоверности прогноза необходимо знать, на сколько изменяются параметры перемещения, скорости и ускорения внутреннего кольца у данного типа подшипника по мере износа.

В разделе 1.2 данной работы был рассмотрен метод получения выделенного профиля коллектора $u_{\text{выд}}$ из первоначального массива измерений $u_{\text{исх}}$. Профили, описывающие вибрации якоря, могут быть получены путем

вычитания выделенного профиля коллектора $y_{\text{выд}}$ из кривых, составляющих первоначальный массив измерений $y_{\text{исх}}$:

$$y_{\text{подш.}i} = y_{\text{исх.}i} - y_{\text{выд.}i}. \quad (1.20)$$

Вибрации якоря электрической машины могут быть вызваны многими причинами как механической, так и электромагнитной природы, но преобладающими, на наш взгляд, являются вибрации, обусловленные радиальными перемещениями внутреннего кольца подшипника, вызванные износом элементов ПУ. Согласно статистическим исследованиям отказов коллекторных электрических машин [36], наиболее часто выходит из строя подшипник со стороны КЩУ, так как он работает в наиболее тяжелых условиях (повышенная температура, продукты износа КЩУ и т.д.). Поэтому в данной работе по вибрациям якоря электрической машины со стороны коллектора мы делаем выводы о состоянии подшипниковых узлов.

Массив кривых, описывающих вибрации якоря для первоначального массива измерений $y_{\text{исх}}$, показанного на рис. 1.7 и выделенного профиля коллектора $y_{\text{выд}}$, изображенного на рис. 1.8, представлен на рис. 1.13.

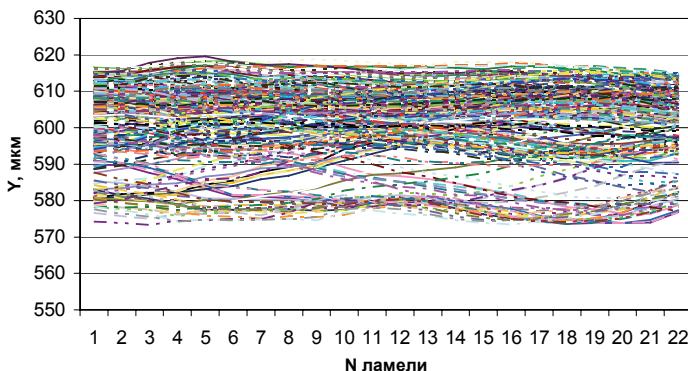
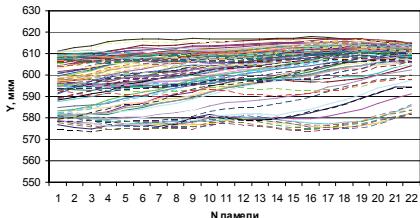


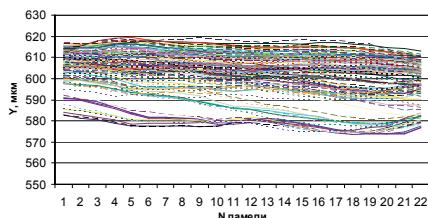
Рис. 1.13. Массив кривых, описывающих вибрации якоря

Для определения усредненных параметров работы ПУ (перемещение, скорость и ускорение внутреннего кольца подшипника) необходимо применение специальных методик [48, 50].

Если рассмотреть каждую кривую, описывающую вибрации якоря, в отдельности, то можно увидеть, что некоторые из них возрастающие, а другие спадающие. Таким образом, первым шагом является разделение массива вибраций якоря на два массива, содержащих только возрастающие и только спадающие кривые (рис. 1.14).



Массив возрастающих кривых



Массив спадающих кривых

Рис. 1.14. Разделение массива вибраций якоря на два массива

К возрастающим будем относить кривые, у которых зазор между первой ламелью коллектора и измерительным преобразователем (ИП) бесконтактного профилометра увеличивается от предыдущего оборота к последующему обороту, то есть выполняется условие (1.21). Если зазор между первой ламелью коллектора и ИП бесконтактного профилометра уменьшается от предыдущего оборота к последующему обороту, то есть выполняется условие (1.22), то кривая относится к группе спадающих.

$$y_{1.1} \leq y_{1.2}; \quad (1.21)$$

$$y_{1.1} \geq y_{1.2}, \quad (1.22)$$

где $y_{1.1}$ – измеренное значение зазора между первой ламелью и ИП бесконтактного профилометра за первый оборот коллектора;

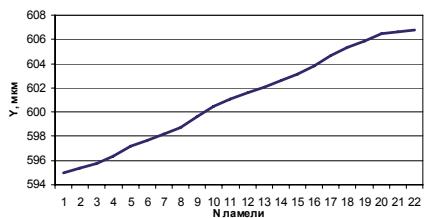
$y_{1.2}$ – измеренное значение зазора между первой ламелью и ИП бесконтактного профилометра за второй оборот коллектора.

Далее необходимо для каждой из возрастающих и спадающих кривых проделать следующие действия:

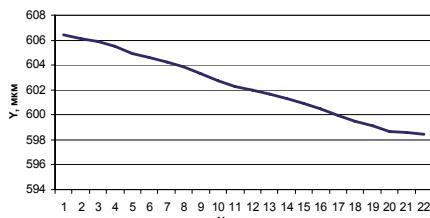
- выполнить гармонический анализ;
- найти значения виброперемещений, выброскорости и выброускорения

внутреннего кольца подшипника в пределах развертки вибраций за оборот;
– найти среднее значение для каждого из параметров.

В ходе исследований было определено, что полученные вышеописанным способом средние значения виброперемещений, виброскорости и виброускорения внутреннего кольца подшипника полностью совпадают со значениями, полученными из предварительно усредненных возрастающих и спадающих кривых, описывающих вибрации якоря. Таким образом, можно значительно сократить время расчетов, если сначала найти усредненную кривую для массива, содержащего возрастающие кривые, описывающие вибрации якоря, а уже затем проводить анализ усредненной кривой. Аналогичным образом поступают и с массивом, содержащим спадающие кривые. Усредненные кривые для массивов, содержащих возрастающие и спадающие кривые вибраций якоря, приведены на рис. 1.15.



Усредненная возрастающая кривая



Усредненная спадающая кривая

Рис. 1.15. Усредненные кривые для массивов, содержащих возрастающие и спадающие кривые вибраций якоря

В ходе многочисленных измерений с использованием бесконтактного профилометра и последующей математической обработки согласно предложенным методикам выявлено, что оба массива имеют приблизительно одинаковое количество возрастающих и спадающих кривых. Полученные значения ускорений для усредненных кривых в том и другом случае очень схожи по модулю (разница составляет не более 10%). Таким образом, с целью упрощения процедуры расчета и сокращения времени допустимо рассматривать лишь одну из усредненных кривых, описывающих вибрации якоря. В данной работе далее будем рассматривать операции только над

усредненной спадающей кривой, описывающей вибрации якоря. Для усредненной возрастающей кривой все операции полностью идентичны.

Следующий этап – гармонический анализ и нахождение значений выброскорости и виброускорения внутреннего кольца подшипника. Для этого необходимо иметь математическую зависимость, описывающую усредненную спадающую кривую, описывающую вибрации якоря. Для получения математического описания необходимо разложить средний спадающий профиль вибраций якоря на гармонические составляющие.

В ряд Фурье, может быть разложена не только периодическая, но и произвольная непериодическая функция, заданная на интервале (a, b) , если нас не интересует ее поведение за пределами данного интервала. Применение разложения в ряд Фурье автоматически означает периодическое продолжение данной функции за пределами заданного интервала в обе стороны с периодом $T = b - a$. Однако при этом на краях интервала может возникнуть эффект Гиббса, если уровень сигнала на краях не совпадает и образуются скачки сигнала при его периодическом повторении (рис. 1.16).

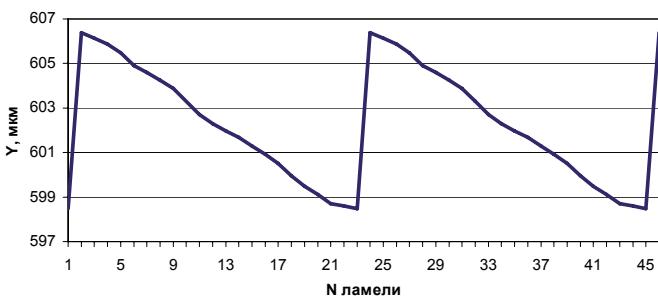


Рис. 1.16. Периодическое повторение сигнала с несовпадающим уровнем на краях

Эффект Гиббса имеет место всегда при резких нарушениях монотонности функций [104]. На скачках эффект максимальен, во всех других случаях амплитуда пульсаций зависит от характера нарушения монотонности функции.

При нахождении ускорений подшипниковых вибраций для усредненной спадающей кривой, показанной на рис. 1.15 и подобных ей, на краях

наблюдается резкое увеличение амплитуды – эффект Гиббса (рис. 1.17). Указанные всплески достаточно сильно искажают реальное значение виброускорения.

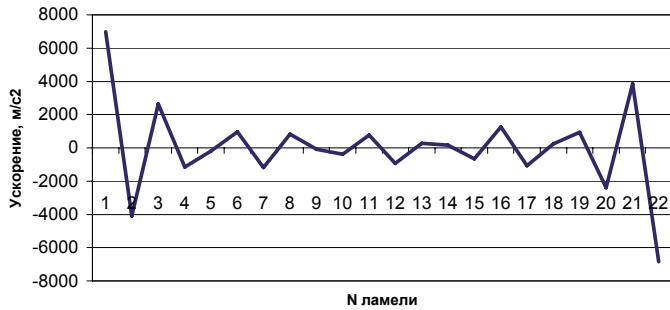


Рис. 1.17. Виброускорения якоря ЭМ вследствие вибраций в ПУ, полученные из не преобразованной кривой

Минимизировать этот негативный эффект, а значит повысить точность получаемых результатов, помогает метод, предложенный Корнелием Ланцошем [72]. Для этого необходимо выполнить преобразование кривой таким образом, чтобы ее начало совпадало с ее концом, то есть выполнялось условие:

$$y_1 = y_K, \quad (1.23)$$

где K – количество коллекторных пластин.

В качестве примера рассмотрим преобразование усредненной спадающей кривой, описывающей вибрации якоря ЭМ, представленной на рис. 1.15. Для выполнения условия (1.23) необходимо совершить следующее преобразование:

$$y_{\text{пов}} = y_i - y_1 - (y_K - y_1) \cdot \frac{i-1}{K-1}, \quad (1.24)$$

где $y_{\text{пов}}$ – повернутая к оси кривая;

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

Повернутая к оси усредненная спадающая кривая виброперемещений якоря ЭМ представлена на рис. 1.18.

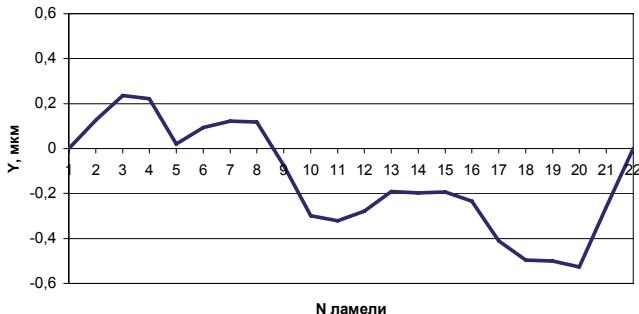


Рис. 1.18. Повернутая к оси усредненная спадающая кривая виброперемещений якоря ЭМ

Проведенные экспериментальные исследования показали, что выполненные согласно выражению (1.24) преобразования снижают эффект Гиббса, но не избавляют от него полностью. Это происходит вследствие того, что полученная кривая, изображенная на рисунке 1.18, несимметрична относительно оси ОY. Поэтому, при ее периодическом повторении возникает нарушение монотонности на краях кривой.

Избежать этого поможет добавление зеркально-отраженной кривой, полученной согласно выражению:

$$y_{K+n}^{\text{зеп}} = -y_{K-n}^{\text{пov}}, \quad (1.25)$$

где $n = 1 \div (K-1)$, K – количество коллекторных пластин.

Далее следует последний этап – получение преобразованной кривой путем объединения повернутой к оси и зеркально-отраженной кривых:

$$y_n^{\text{обр}} = \begin{cases} y_n^{\text{пov}}, & n = 1 \div K; \\ y_n^{\text{зеп}}, & n = (K+1) \div (2K-1), \end{cases} \quad (1.26)$$

где K – количество коллекторных пластин.

Преобразованная согласно предложенной методике кривая, представлена на рис. 1.19.

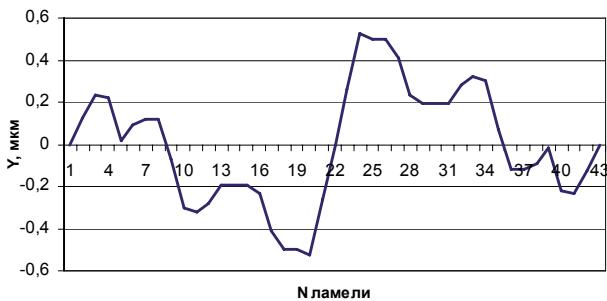


Рис. 1.19. Преобразованная согласно предложенной методике кривая

Таким образом, получена преобразованная кривая, описывающая вибрации якоря, свободная от влияния эффекта Гиббса.

Кривая вычисленных ускорений для данной кривой представлена на рис. 1.20.

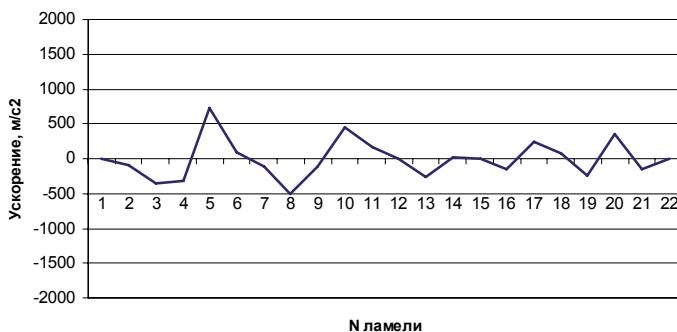


Рис. 1.20. Виброускорения якоря ЭМ вследствие вибраций в ПУ, полученные из преобразованной по предложенному методу кривой

Сравнивая рис. 1.17 с рис. 1.20 можно сделать вывод: возмущения на краях последней кривой отсутствуют, следовательно полученные с использованием предложенного метода значения ускорений более точны. В зависимости от рассматриваемого числа гармоник предложенная методика позволяет повысить точность определения значений виброускорений якоря в десять и более раз.

В заключение отметим, что разработанная методика определения параметров работы подшипниковых узлов позволяет устраниить негативное влияние эффекта Гиббса и снизить погрешность определяемых значений ускорений.

1.4. Экспериментальные исследования коллекторно-щеточного и подшипниковых узлов электрической машины в процессе ресурсных испытаний

1.4.1. Цель, объект и методика испытаний

Целью проведения испытаний является получение неизвестной ранее информации о состоянии профиля коллектора высокоскоростной электрической машины (ЭМ), величине и характеру подшипниковых вибраций, а также о степени их влияния на механическое состояние коллекторно-щеточного узла в процессе наработки на ресурс. Полученная в ходе испытаний информация должна стать основой для выработки рекомендаций относительно повышения ресурса работы коллекторно-щеточного узла.

Объектом испытаний: электродвигатель пылесосного агрегата фирмы LG модели VCE280E02, частота вращения 35000 об/мин, мощность 1800 Вт марка щеток: Hoffman/HG25KVP.

Во время испытаний электродвигатель работал в номинальном режиме, с вентиляторной нагрузкой. В целях обеспечения пожарной безопасности включение электродвигателя производилось только в дневное время, поэтому среднее время работы двигателя составило 10 часов в сутки. Во время работы электродвигателя периодически оценивались такие параметры, как напряжение, ток, температура окружающей среды и степень искрения под щетками.

Испытания на ресурс проводились при следующих средних параметрах:

- напряжение сети 220 В;
- потребляемый ток 8,2 А;
- средняя температура окружающей среды 24,22 °С;
- искрение от $1\frac{1}{2}$ до 2 баллов.

Периодически, с интервалом 35-45 часов, производились измерения изнашивания щеток микрометром, а также измерения профиля коллектора электрической машины при помощи бесконтактного измерительного комплекса, разработанного в ТПУ. Погрешность измерений зазора Δx находилась в интервале от 0,3 до 0,8 мкм.

1.4.2. Описание аппаратной части бесконтактного измерительного комплекса

Для измерений профиля коллектора в процессе испытаний использовался разработанный на кафедре электропривода и электрооборудования программно-аппаратный комплекс [52, 54-56, 62], общий вид и функциональная схема которого представлены на рис. 1.21, 1.22.



Рис. 1.21. Общий вид диагностической системы

В данном комплексе аналоговая часть выдает сигнал в диапазоне - 2...6 В, что пропорционально диапазону расстояний от измерительной щели датчика до измеряемой поверхности 0...800 мкм. В качестве измерительного преобразователя (ИП) используется датчик вихревокового типа. Метод вихревокового контроля характеризуется высокой стабильностью результатов измерений, помехоустойчивостью к магнитным и электрическим полям машины, простотой реализации, надежностью и сравнительно низкой стоимостью аппаратуры [20]. Локальность контроля ИП определяется зоной концентрации поля, которая может изменяться тем или иным способом в зависимости от конкретных задач, что обеспечивается специальными конструкциями ИП.



Рис. 1.22. Функциональная схема бесконтактного измерительного комплекса

Узкая диаграмма направленности применяемого ИП позволяет дифференцировать уровни профилей коллекторных пластин с шириной от полутора миллиметров.

Блок АЦП выполнен на современной элементной базе (Analog Devices AD9241, 14 bit, микроконтроллер (МК) Atmel ATmega128) и предназначен для

оцифровки выходного сигнала аналоговой части и передачи результатов измерений в персональный компьютер (ПК).

ПК предназначен для управления работой контроллера, приема результатов измерений и их математической обработки.

Для удобства дальнейшего развития комплекса большинство подсистем разработано в виде автономных модулей, связанных друг с другом по быстродействующим последовательным каналам связи. Имеются слоты расширения для добавления новых устройств.

Измерения начинаются по фронту датчика синхронизации (ДС), что позволяет синхронизировать все серии измерений с заданным положением коллектора. Помимо точки начала отсчета на коллекторе сигнал синхронизации дает возможность измерения скорости его вращения.

Наличие шагового привода измерительного преобразователя позволяет автоматизировать процесс измерений.

В состав комплекса включен модуль управления исследуемой машиной мощностью до 2 кВт, позволяющий регулировать скорость двигателя в широких пределах. Это придает комплексу способность в автоматическом режиме проводить ряд испытаний узлов ЭМ, в частности, ресурсных испытаний КЩУ с периодическими замерами профиля коллектора.

В таблице 1.1 приведены основные технические характеристики одноканального варианта измерительного комплекса.

Таблица 1.1

№ п.п.	Параметр	Единицы измерения	Значение параметра
1	Тип датчика	—	вихреветковый
2	Расстояние от датчика до коллектора	мкм	0-800
3	Разрешающая способность	мкм	0,1
4	Частота съема информации с датчика	MHz	1
5	Диапазон рабочих температур	°C	от -15 до 80
6	Минимальный тангенциальный размер коллекторной пластины	мм	1,5
7	Максимальная линейная скорость объекта измерений	м/с	100

Продолжение Таблицы 1.1

8	Наружный диаметр коллектора, не менее	мм	15
9	Синхронизация	—	оптоэлектронная
10	Отображение информации	—	монитор ПК
11	Габаритные размеры измерительного блока	мм	120 * 210 * 240
12	Ширина дорожки измеряемого профиля коллектора	мм	10

Интеллектуальный алгоритм разработанного программного обеспечения контроллера и ПК позволяет выполнять отдельные измерения, серии измерений, либо заданную технологией программу измерений, например, оценить изменения профиля коллектора при вариации скоростей вращения. Результаты измерений (например, профиля коллектора) подвергаются математической обработке и представляются на мониторе ПК в графическом виде. Математическая обработка первичной измеряемой информации осуществляется в соответствии с разработанным методом базовой коррекции (Патент РФ №2234054).

1.4.3. Полученные в результате ресурсных испытаний данные

Экспериментальные исследования поведения скользящего контакта (СК) на частоте вращения 35000 об/мин позволили получить неизвестную ранее информацию о состоянии КЩУ в динамических режимах работы, об изменении профиля коллектора высокоскоростной ЭМ в процессе эксплуатации, о величине и характере подшипниковых вибраций, а также о степени их влияния на механическое состояние КЩУ в процессе наработки на ресурс.

В испытываемой ЭМ применяются графитовые электрические щетки марки HG25 ($36,5 \times 10,75 \times 6,2$ мм, плотность $\rho = 1750$ кг/м³). Динамика изнашивания щетки и коллектора ЭМ в процессе ресурсных испытаний представлена на рис. 1.23 и рис. 1.24 соответственно.

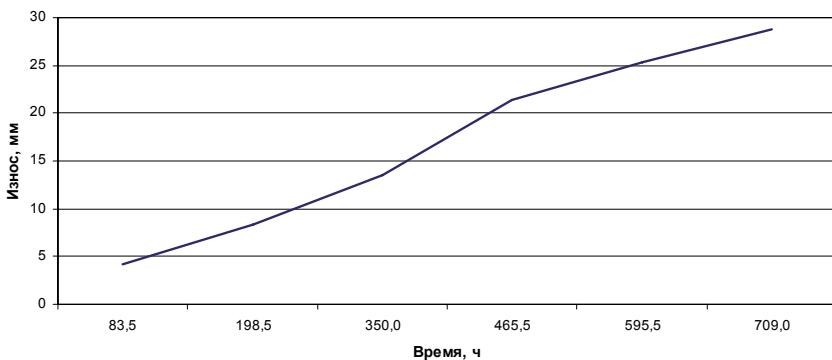


Рис. 1.23. Динамика изнашивания щетки HG25

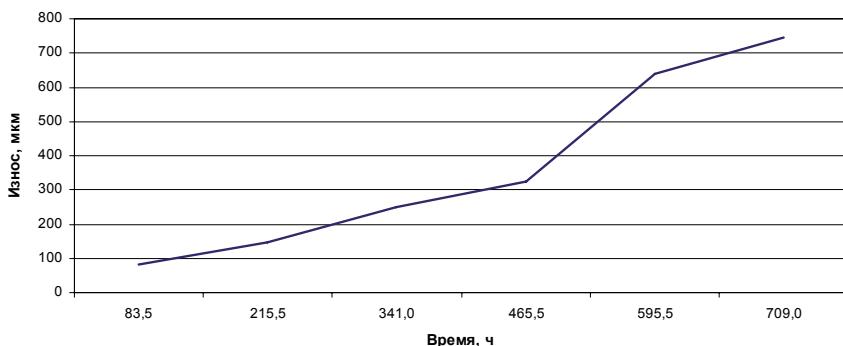


Рис. 1.24. Динамика изнашивания коллектора

Из представленных графиков видно, что износ щетки за время ресурсных испытаний составил 28,8 мм (1900 мм^3), в то время как износ коллектора в радиальном направлении составил 0,74 мм (532 мм^3). С учетом того, что при уменьшении диаметра коллектора величина изнашивания в радиальном направлении возрастает, получены данные, свидетельствующие о 2-х кратном запасе ресурса коллектора в сравнении с ресурсом комплекта щеток (исходя из данных производителя электродвигателя о величине запаса на износ ламели в 2 мм). Поэтому в данном случае ресурс электродвигателя определяется именно величиной изнашивания электрических щеток (минимальная остаточная высота щетки оговорена производителем электродвигателя), в то время как состояние коллектора еще позволяет увеличить время работы ЭМ.

С использованием предложенных методик, описанных в разделах 1.1 – 1.3, из всего массива измерений, проведенных бесконтактным профилометром, была выделена интересующая нас информация о механическом состоянии КЩУ и ПУ в процессе наработки ЭМ на ресурс.

Состояние профиля коллектора высокоскоростной ЭМ в процессе ресурсных испытаний представлено на рисунке 1.25.

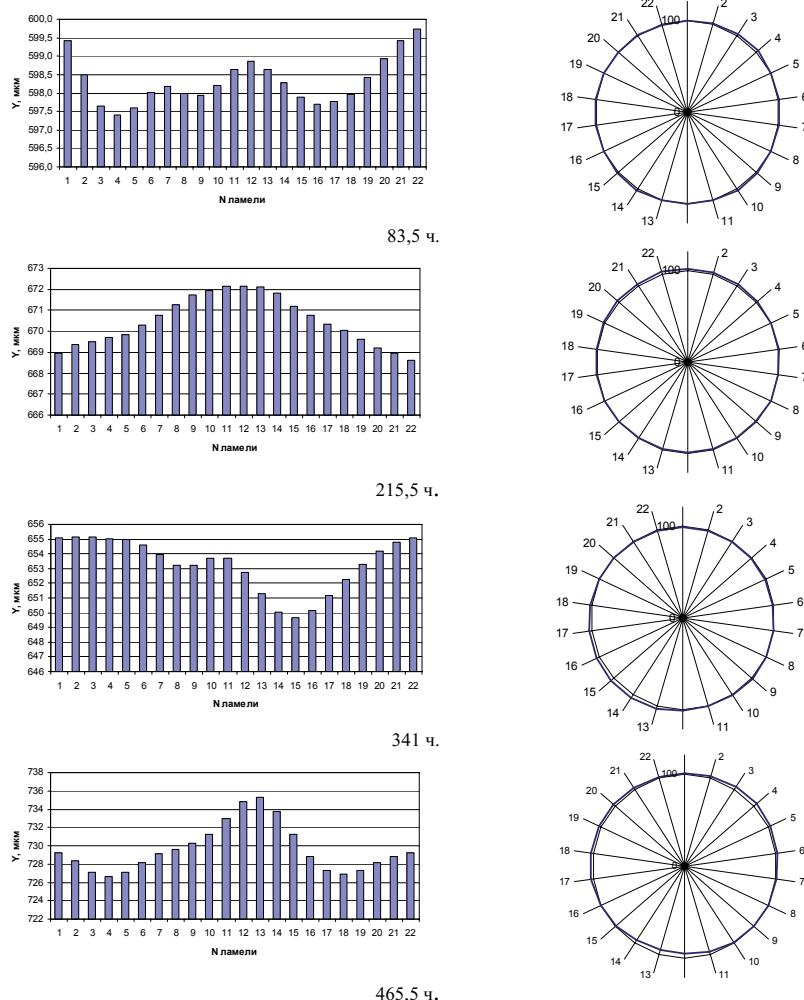


Рис. 1.25. Изменение профиля коллектора в процессе наработки ЭМ на ресурс

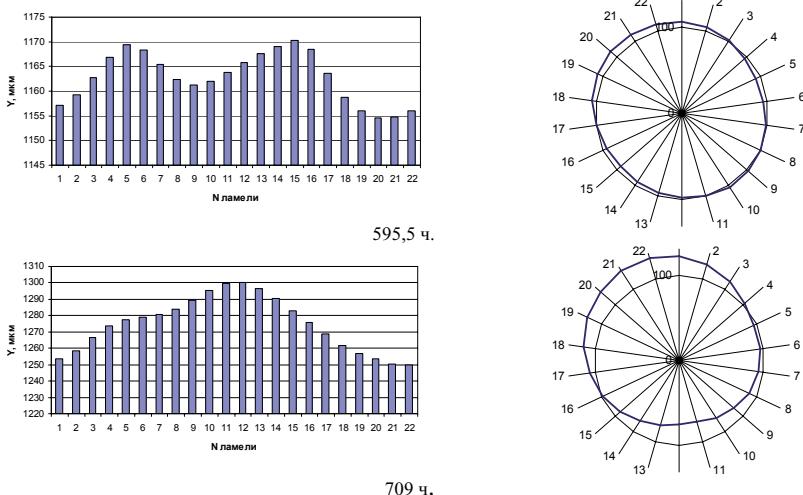


Рис. 1.25 (Продолжение). Изменение профиля коллектора в процессе наработки ЭМ на ресурс

Как видно из приведенных графиков, за время ресурсных испытаний электродвигателя, геометрия коллектора существенно изменяется. В частности, интенсивные изменения профиля коллектора происходят уже после 350 часов работы, то есть приблизительно после выработки половины ресурса электродвигателем.

Динамика изменений значений перепадов между соседними ламелями коллектора в процессе ресурса представлена на рис. 1.26. Из приведенных данных следует, что максимальные значения перепадов между ламелями за время ресурсных испытаний возросли в 7,8 раз, а среднее значение перепадов вдоль окружности коллектора возросло в 13,5 раз.

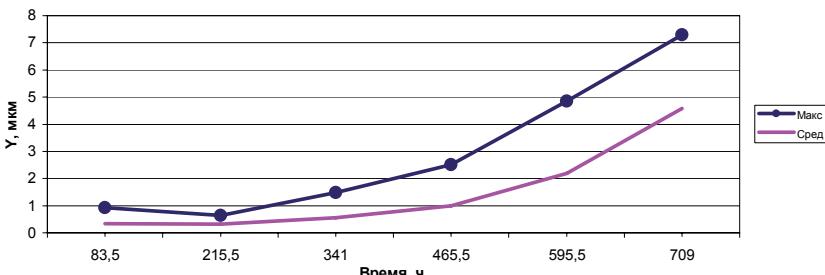


Рис. 1.26. Динамика изменения максимальных и средних значений перепадов между ламелями коллектора вдоль окружности коллектора в период ресурсных испытаний

Из графиков, приведенных на рис. 1.26, следует: в первые 220 часов работы ЭМ максимальные значения перепадов между ламелями уменьшаются на треть, среднее значение перепадов вдоль окружности коллектора также уменьшается, но незначительно (83,5 ч. – 0,34 мкм, 215,5 ч. – 0,32 мкм). Это свидетельствует о том, что в этот период идет приработка коллектора. Далее в процессе работы геометрия коллектора постепенно ухудшается.

Следует особо отметить, что полученные благодаря предложенному способу бесконтактного измерения профиля контролируемой поверхности в динамических режимах (Патент РФ №2331043) [86] максимальные значения перепадов между ламелями коллектора и максимальное отклонение ламелей от идеальной окружности заданного радиуса на начальном этапе испытаний (0,93 и 1,4 мкм, рис. 1.8) соответствуют данным, полученным компанией LG Electronics при помощи контактного прецизионного профилографа-профилометра на новом коллекторе (0,67 и 1,68 мкм соответственно, рис. 1.27) в статическом режиме. Если взглянуть на первоначальный массив данных, полученных при помощи бесконтактного профилометра (рис. 1.7) на работающей ЭМ, то становится очевидным, что без применения предложенного метода измерений невозможно получить столь точные результаты ввиду больших вибраций якоря в ПУ. Это еще раз доказывает работоспособность и

практическую ценность предложенных методов, основанных на базовой коррекции результатов измерений.

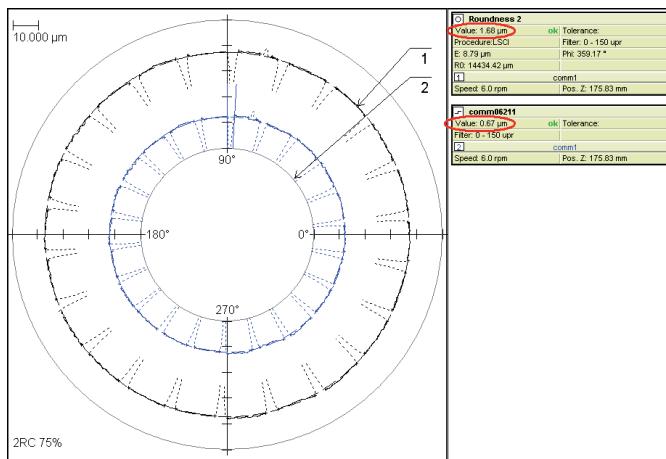


Рис. 1.27. Результаты измерений перепадов между ламелями нового коллектора, выполненные с использованием контактного прецизионного профилографа-профилометра в статическом режиме

Из литературы известно, что при разложении вибрационного сигнала от тела вращения в ряд Фурье, 1-я гармоника характеризует эксцентрикситет, 2-я гармоника характеризует эллиптичность, а 3-я гармоника характеризует трехгранность [90]. На рисунках 1.28–1.30 приведена динамика изменения амплитуды каждой из перечисленных гармоник за время ресурсных испытаний электродвигателя.

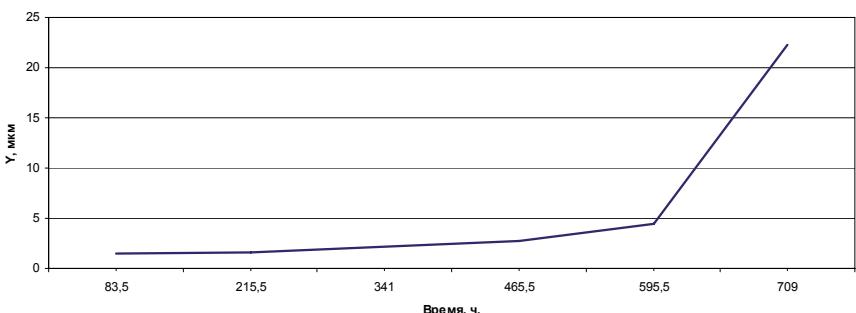


Рис. 1.28. Динамика изменения эксцентрикситета коллектора (1-ой гармоники) за время ресурса электродвигателя

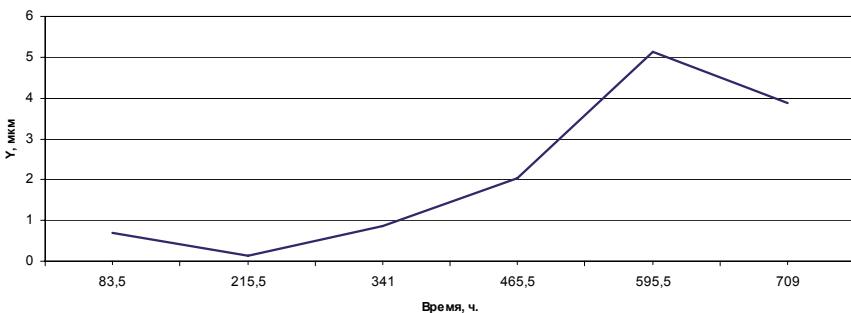


Рис. 1.29. Динамика изменения эллиптичности коллектора (2-ой гармоники) за время ресурса электродвигателя

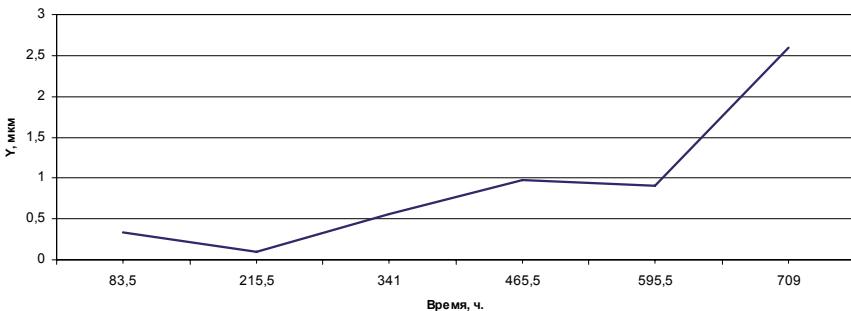


Рис. 1.30. Динамика изменения трехгранности коллектора (3-ей гармоники) за время ресурса электродвигателя

Из приведенных графиков видно, что в первые 220 часов работы электродвигателя амплитуды гармоник уменьшаются или слабо увеличиваются (в частности, эксцентрикситет) – идет приработка поверхности коллектора. Далее происходит рост амплитуды всех гармоник. Эксцентрикситет за время ресурса электродвигателя возрос в 21,2 раза, эллиптичность возросла в 5,6 раза, а трехгранность увеличилась в 7,7 раза. Приведенные данные еще раз демонстрируют ухудшение профиля коллектора в процессе наработки ЭМ на ресурс.

Согласно методике, описанной в разделе 1.2, были определены ускорения, действующие на щетку со стороны коллектора. Для данного типа двигателя согласно выражению (1.16) было вычислено число гармоник, действующих на щетку: $m = 11$. Гармоники более высокого порядка на щетку как на элемент

колебательной системы существенного влияния не оказывают, так как демпфируются контактным слоем СК. На рис. 1.31 представлены кривые ускорений, действующих на щетку со стороны коллектора в процессе работы электродвигателя.

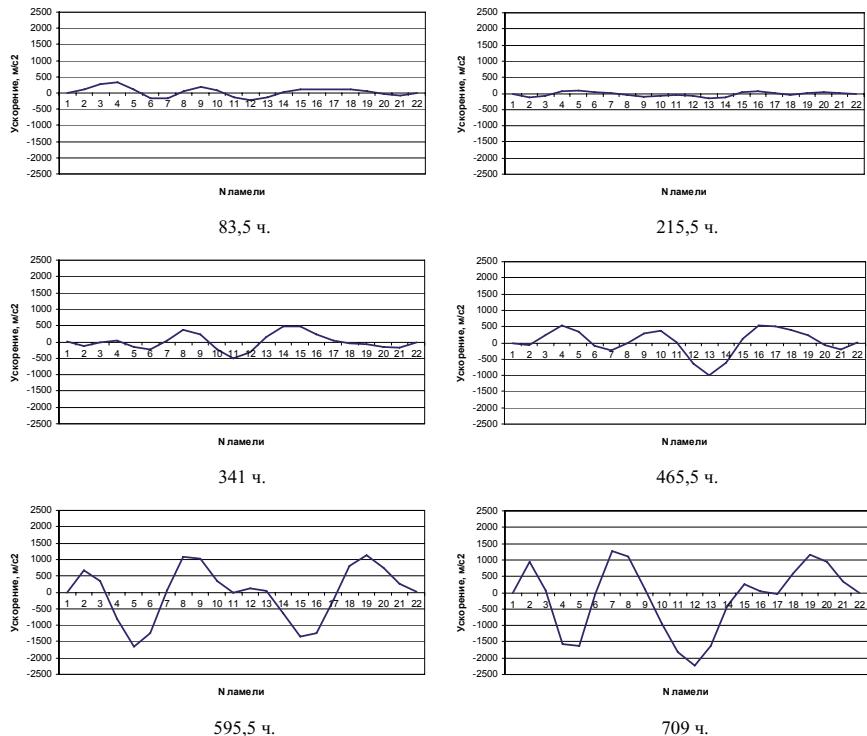


Рис. 1.31. Значения ускорений, действующих на щетку со стороны коллектора в процессе наработки электродвигателя на ресурс.

На рис.1.35 показана динамика изменения среднего ускорения, действующего на щетку со стороны коллектора в процессе ресурсных испытаний ЭМ.

Из представленных на рис. 1.31, 1.35 графиков видна область приработки коллектора, далее амплитуда ускорений возрастает по мере увеличения времени работы электродвигателя, что свидетельствует об ухудшении геометрии коллектора вследствие его неравномерного изнашивания и, возможно, ухудшения монолитности из-за снижения прочности в результате

механических и тепловых воздействий. Средние значения ускорений, действующих на щетку со стороны поверхности коллектора, за время ресурсных испытаний электродвигателя возросли в 6,5 раз. Максимальные значения ускорений, действующих на щетку со стороны поверхности коллектора, превышают средние значения в среднем в 2,7 раза в течение всего периода ресурсных испытаний ЭМ.

Информация о состоянии подшипниковых узлов получена с помощью оригинальных методик обработки массива результатов измерений, описанных в разделе 1.3. В действительности мы выделяем информацию о вибрациях якоря ЭМ, но основная часть этих вибраций обусловлена именно радиальными перемещениями внутреннего кольца подшипника вследствие изнашивания элементов ПУ. Усредненные вибрации якоря в течение ресурсных испытаний электродвигателя представлены на рис. 1.32.

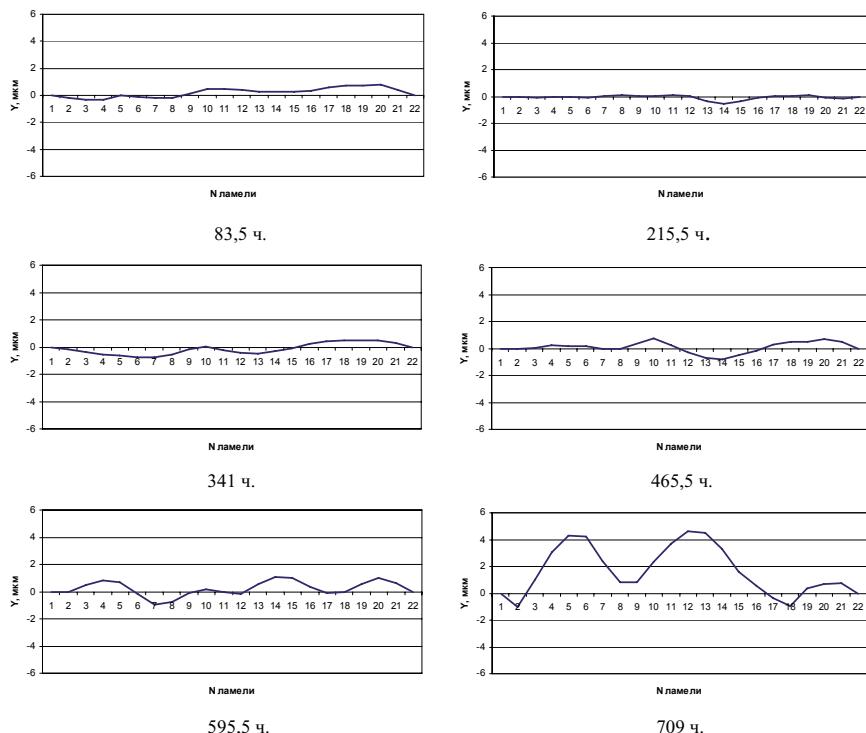


Рис. 1.32. Усредненные вибрации якоря, обусловленные биениями подшипников в процессе ресурса электродвигателя

Динамика изменения максимумов вибраций якоря, обусловленных биениями в ПУ в процессе наработки ЭМ на ресурс, представлена на рис. 1.33. Из приведенного графика следует, что за время ресурсных испытаний максимальный размах вибраций якоря возрос в 5,9 раза.

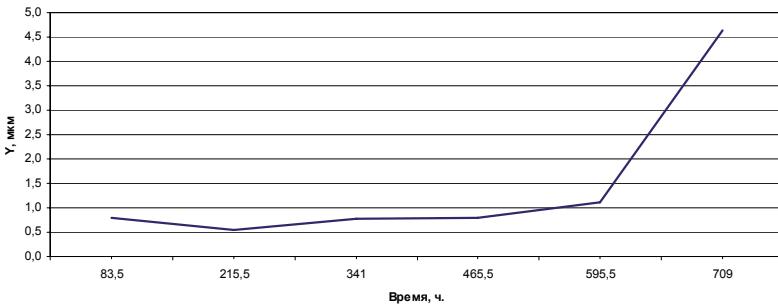


Рис. 1.33. Динамика изменения максимумов вибраций якоря, обусловленных биениями подшипников в процессе ресурса электродвигателя

Используя данные о вибрациях якоря ЭМ, можно определить виброскорость ивиброускорение. На рис. 1.34 представлено распределение средних значений виброускорений якоря ЭМ вдоль окружности с учетом 11 гармоник (в данном случае), действующих на щетку как на элемент колебательной системы.

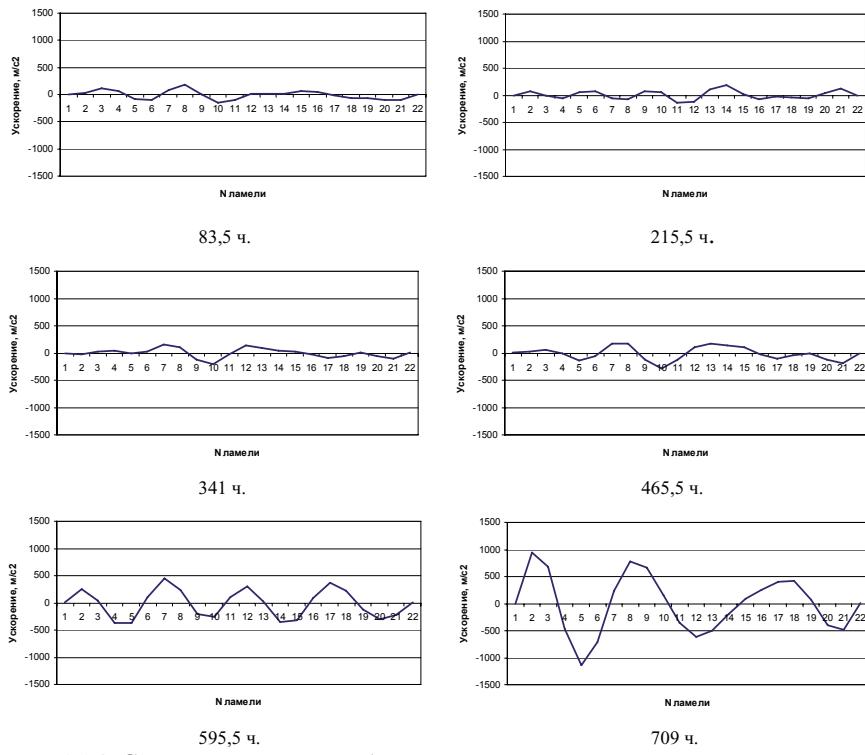


Рис. 1.34. Средние значения виброускорений якоря электродвигателя вдоль окружности, обусловленные биениями в ПУ в процессе наработки ЭМ на ресурс, 11 гармоник

Динамика изменения среднего значения виброускорений якоря в процессе ресурса электродвигателя с учетом 11 гармоник представлена на рис. 1.35. Из графика видно, что среднее значение виброускорений якоря ЭМ возрастает и в конце ресурса превышает начальное значение в 6,6 раза.



Рис. 1.35. Динамика изменения средних ускорений со стороны коллектора и якоря (вследствие износа подшипниковых узлов) электродвигателя в процессе ресурса

Обладая данными о средних значениях ускорений, действующих на щетку со стороны поверхности коллектора $a_{\text{кол}}$, а также данными о средних виброускорениях якоря электрической машины $a_{\text{якоря}}$ вследствие вибраций в подшипниковых узлах, можно определить суммарное среднее виброускорение $a_{\text{сум}}$, действующее на щетку в процессе работы электродвигателя:

$$a_{\text{сум}} = a_{\text{кол}} + a_{\text{якоря}}. \quad (1.27)$$

Изменение среднего суммарного виброускорения в процессе ресурсных испытаний электродвигателя отражено на рис. 1.36.

Используя значение коэффициента жесткости нажимной пружины ($C = 55 \text{ Н/м}$) и, воспользовавшись полученными данными о динамике изнашивания щетки (рис. 1.23), можно вычислить силу нажатия на щетку и ее массу в каждый момент времени. Используя полученные данные, можно определить ускорение $a_{\text{пруж}}$, развиваемое нажимной пружиной в любой момент времени в процессе наработки ЭМ на ресурс, рис. 1.36.

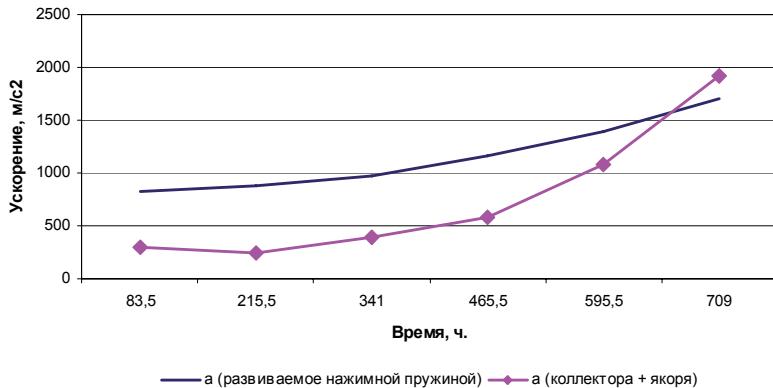


Рис. 1.36. Ускорение, развивающееся нажимной пружиной и суммарное среднее виброускорение коллектора и ПУ в процессе ресурса электродвигателя

Как видно из приведенных данных, за время работы электродвигателя суммарное среднее виброускорение (коллектора и якоря) возросло в 6,5 раз и достигло предельной величины для нормальной работы КЩУ. Это свидетельствует о том, что в некоторые моменты времени возможно нарушение контактирования в СК щетка-коллектор (зависание щетки).

Анализируя данные, представленные на рис. 1.36, можно прийти к выводу, что для дальнейшего увеличении ресурса электродвигателя необходимо обеспечить надежное контактирование в СК щетка-коллектор на конечном этапе ресурса ЭМ путем либо корректировки кривой ускорения, развиваемого нажимной пружиной (необходимо, чтобы величина ускорения на конечном этапе ресурса возросла), либо корректировки кривой суммарного среднего виброускорения коллектора и якоря ЭМ (необходимо, чтобы кривая была более пологая и величина ускорения на конечном этапе ресурса уменьшилась), как это продемонстрировано на рис. 1.37.

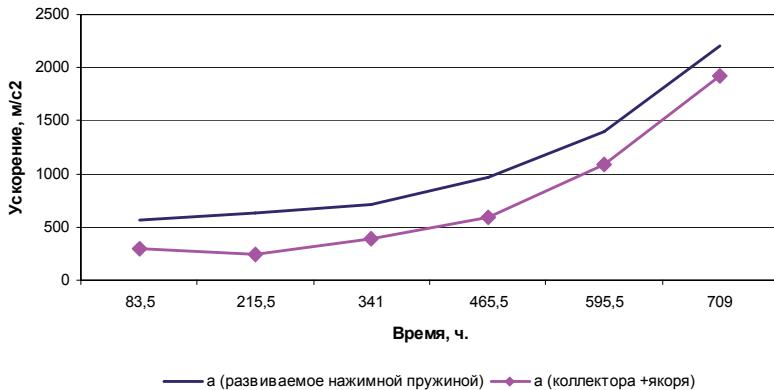


Рис. 1.37. Ускорение, развивающееся нажимной пружиной и суммарное среднее виброускорение коллектора и ПУ в процессе ресурса электродвигателя

Кривая ускорения, развивающегося нажимной пружиной зависит от силы нажатия $F_{\text{пруж}}$ и массы щетки $m_{\text{щ}}$. Поэтому, корректировка данной кривой возможна путем изменения следующих параметров: характеристики пружины, типа нажимного устройства, марки щетки.

Кривая суммарного среднего виброускорения коллектора и якоря электрической машины может быть скорректирована путем улучшения прочностных характеристик коллектора или применением более качественных и износостойких подшипников.

Разработанные методики, описанные в разделах 1.1 – 1.3, позволили выделить информацию о величине и характере вибраций якоря, об изменении профиля коллектора в процессе эксплуатации ЭМ, а также о многих других параметрах КЩУ и ПУ из всего массива измерений, проведенных бесконтактным профилометром [47, 49, 53].

Из полученных экспериментальных данных четко прослеживается тенденция ухудшения профиля коллектора по мере его изнашивания, а также возрастание вибраций и виброускорений со стороны якоря электрической машины, что свидетельствуют об износе и зарождающихся дефектах в ПУ.

Следует отметить, что за время ресурсных испытаний вибрационные воздействия якоря электродвигателя на щетки были в среднем в 1,6 раза выше в

сравнении с аналогичными воздействиями профиля коллектора. Одним из путей продления ресурса ЭМ может служить установка более качественных, более износостойких подшипников, или же применение в них более качественных смазочных материалов для продления их ресурса. Эти меры призваны уменьшить подшипниковые вибрации и виброускорения, что улучшит коммутационные процессы и повысит ресурс КЩУ, однако данные меры требуют проведения значительного объема дополнительных экспериментальных исследований и экономического обоснования.

Выводы

1. При измерениях зазора между измерительным преобразователем (ИП) и контролируемой поверхностью в статических режимах следует применять метод базовой коррекции результатов измерений, в котором уточнение выходной характеристики измерительного прибора осуществляется на основании результатов опорного и дополнительных измерений, отличающихся на образцовую величину изменения зазора δ_0 .

При измерениях зазора между ИП и контролируемой поверхностью в динамических режимах первоначально следует удалить из выходного сигнала измерительного прибора периодические составляющие путем определения средних значений в сериях последовательных опорных и дополнительных измерений, отличающихся на образцовую величину изменения зазора δ_0 , а затем применять метод базовой коррекции результатов измерений.

2. Для достижения наибольшей точности измерений следует выбирать максимальную величину образцового изменения зазора δ_0 в пределах линейного участка выходной характеристики измерительного тракта прибора и повышать точность перемещения ИП при изменении зазора.

3. Предложенные методы экспериментального определения профиля коллектора и вибраций якоря в подшипниках в динамических режимах, основанные на выделении из массивов опорных и дополнительных измерений средних значений измеряемых зазоров и последующей коррекции результатов

измерений, позволяют практически исключить влияние вибраций якоря в ПУ на результаты измерений.

4. Предложены выражения для расчета коэффициентов ряда Фурье a_j и b_j , которые позволяют в 5-6 раз точнее выполнять обратное преобразование Фурье дискретной функции при использовании части гармоник по сравнению с дискретным преобразованием Фурье, что позволяет повысить точность вычисления значений ускорений, действующих на щетки ЭМ как со стороны профиля коллектора, так и со стороны подшипников.

5. В ходе проведенных исследований выявлено, что массив кривых, описывающих вибрации якоря в ПУ, можно разделить на два массива, содержащих только возрастающие и только спадающие кривые, причем оба массива несут практически идентичную информацию о вибрациях якоря (полученные значения ускорений якоря в том и другом случае отличаются не более чем на 5-10%). Поэтому для экономии вычислительных ресурсов целесообразно проводить анализ лишь одного из указанных массивов.

6. Предложенная методика преобразования кривых, описывающих вибрации якоря в ПУ, включающая в себя поворот кривой к оси и ее зеркальное отражение, позволяет устраниить эффект Гиббса и повысить до 30 раз точность определения значений виброускорений якоря.

7. Проведенные исследования показали, что метод, реализующий гармонический анализ каждой кривой из массива, описывающего вибрации якоря в ПУ, в отдельности с последующим усреднением полученных данных с точки зрения конечного результата эквивалентен методу, реализующему гармонический анализ кривой, полученной усреднением всех кривых рассматриваемого массива. С точки зрения сокращения времени расчетов последний вариант является более предпочтительным.

8. В ходе проведенных экспериментальных исследований в процессе ресурсных испытаний электродвигателя LG VCE280E02 выявлено, что ресурс коллектора более чем в 2 раза превышает аналогичный показатель комплекта щеток. К концу ресурсных испытаний рассмотренной ЭМ основные параметры,

характеризующие механическое состояние КЩУ и ПУ, возросли в следующее число раз: среднее значение перепадов между соседними ламелями - 13,5, а максимальное значение - 7,8; среднее значение ускорений, действующих на щетку со стороны поверхности коллектора - 6,5; амплитуда вибраций якоря в ПУ - 5,9; среднее значение виброускорений якоря - 6,6. Следует отметить, что за время ресурсных испытаний вибрационные воздействия якоря электродвигателя на щетки были в среднем в 1,6 раза выше в сравнении с аналогичными воздействиями профиля коллектора.

2. Разработка математической модели изнашивания щеток универсальных коллекторных электрических машин

2.1. Моделирование фрикционной, электрокоррозионной (токовой) и электроэрозионной составляющих изнашивания щеток универсальных коллекторных электродвигателей

Ключевым вопросом, в значительной мере определяющим основные эксплуатационные характеристики электромеханических преобразователей коллекторного типа на современном техническом уровне, остается проблема повышения их ресурсных характеристик и коммутационной надежности, которая зачастую является основным тормозом, препятствующим их совершенствованию.

Одним из возможных путей ее решения является создание математических моделей электромеханических преобразователей энергии и разработка на их основе расчетных методик и программных продуктов, позволяющих осуществлять вычислительные эксперименты с целью разработки высокоэффективных технических решений и выбора оптимальных величин регулируемых параметров. Это позволит еще на стадии проектирования обеспечивать повышение ресурса работы, удельных энергетических характеристик и электромагнитной совместимости с электронными устройствами электромеханических преобразователей энергии.

В свою очередь, создание математических моделей электромеханических преобразователей коллекторного типа невозможно без глубоких теоретических исследований в области изнашивания скользящих электрических контактов, электроэрозионных явлений при возникновении коммутационных дуговых разрядов, а также процессов коммутации секций обмотки якоря, позволяющих выявить причины возникновения искрения под щетками в различных режимах работы и основные факторы, определяющие ресурс коммутирующего аппарата.

Коллекторно-щеточный узел применяется в технике уже более 100 лет, о работе этого узла собран огромный экспериментальный и теоретический

материал. Исследованию влияния различных факторов на эксплуатационные характеристики коллекторно-щеточного аппарата и их роли в процессе коммутации посвящены многие работы, научные исследования в указанных направлениях выполняются в ТПУ на протяжении ряда лет [6-10, 17, 18, 30, 31, 58], но теория щеточного контакта разработана все еще недостаточно глубоко.

Фрикционная составляющая изнашивания щеток электрических машин. Прежде всего, скользящему контакту свойственно наличие силы трения, которая в свою очередь определяет ряд других особенностей: состояние контактных поверхностей, дополнительный нагрев, местное контактное давление [78]. Вследствие наличия трения, скользящему контакту присущ фрикционный износ, связанный с изнашиванием за счет среза (абразивный износ) и изнашиванием за счет молекулярного сцепления. Абразивное изнашивание относят к механическому изнашиванию. При абразивном изнашивании износ материала происходит в результате режущего или царапающего действия твердых частиц. Такими частицами могут быть микровыступы более твердой поверхности, твердые частицы износа, оксидной пленки и т.д. [66, 75, 80, 110, 111]. Твердыми частицами в случае изнашивания щеточно-коллекторного узла являются продукты износа щеток и коллектора. В технической литературе встречаются различные, но близкие по сути выражения для оценки фрикционного износа. Например, в работах И. В. Крагельского [69, 70] приведено следующее выражение:

$$h = k \cdot \frac{P_a \cdot L}{P_T}, \quad (2.1)$$

где h – высота изношенного слоя;

k – безразмерный коэффициент;

L – путь трения;

P_a – номинальное давление;

P_T – давление текучести.

В другом источнике [68] говорится о том, что износ прямо пропорционален нагрузке и обратно пропорционален твердости: $I \sim q/H$. В работе Рагнара Хольма [109], а также в [89] приведено выражение для механического изнашивания следующего вида:

$$W = Z \cdot \frac{P \cdot S}{H}, \quad (2.2)$$

где W – объем стертого материала при движении на пути S ;

Z – безразмерный коэффициент;

S – путь скольжения;

H – твердость поверхности более мягкого материала контактной пары;

P – контактное давление на пути S .

В нескольких источниках [69-70, 109, 73, 74] отмечено влияние скорости скольжения объектов на износ, однако не приводится какой-либо математической зависимости. В работах [110, 111] приведено степенное выражение для аппроксимации скорости изнашивания:

$$I = k \cdot v_{ck}^m \cdot P^n, \quad (2.3)$$

где I – скорость изнашивания;

k – безразмерный коэффициент;

v_{ck} – скорость скольжения;

P – контактное давление;

m, n – показатели степени.

В работах [110, 111] также приведен график, основанный на экспериментальных исследованиях, характеризующий влияние давления P на

интенсивность изнашивания электрических щеток при прохождении электрического тока и в его отсутствие. Из графика следует, что зависимость интенсивности изнашивания от давления Р при отсутствии тока в скользящем контакте носит линейный характер. Это говорит о том, что показатель степени давления Р в выражении для оценки механического изнашивания (2.3) равен единице.

Путем обобщения и уточнения имеющихся в литературе данных, было предложено следующее выражение для оценки фрикционного изнашивания щеток электрических машин:

$$\Delta_{\text{щ.ф}} = \left[10^{-6} \cdot \mu \cdot v_{\text{кол}} \cdot K_{\phi}/H_{\text{щ}} \right] \cdot P_{\text{ср.щ}} \cdot \delta t, \quad (2.4)$$

где $\Delta_{\text{щ.ф}}$ – фрикционный износ щетки на временном интервале δt , м;

μ – коэффициент трения скольжения для пары щетка-коллектор;

$v_{\text{кол}}$ – линейная скорость рабочей поверхности коллектора, м/с;

K_{ϕ} – поправочный коэффициент к фрикционной составляющей изнашивания;

$H_{\text{щ}}$ – твердость поверхности материала щетки, Н/м²;

$P_{\text{ср.щ}}$ – среднее давление щетки на временном интервале δt , Н/м²;

δt – временной интервал расчета изнашивания, с.

Введем коэффициент, характеризующий интенсивность фрикционной составляющей изнашивания: $C_{\phi}^{\text{щ}} = 10^{-6} \cdot \mu \cdot v_{\text{кол}} \cdot K_{\phi}/H_{\text{щ}}$. Тогда выражение (2.4) запишется в виде:

$$\Delta_{\text{щ.ф}} = C_{\phi}^{\text{щ}} \cdot P_{\text{ср.щ}} \cdot \delta t. \quad (2.5)$$

Электрокоррозионная составляющая изнашивания щеток. Из литературных источников и экспериментов известно, что при прохождении тока (без коммутационного искрения) через скользящий контакт медный

коллектор-щетка или медное кольцо-щетка, изнашивание возрастает [109-111].

В частности, в [109] приведено следующее упрощенное выражение:

$$W = S \cdot P \cdot \left(W_0 + W_1 \cdot \sqrt{\frac{I}{10}} \right), \quad (2.6)$$

где W – объемный износ щетки;

S – путь скольжения;

P – контактное давление на пути S ;

W_0 – коэффициент, характеризующий механический износ;

W_1 – коэффициент, характеризующий электрический износ;

I – сила тока.

Как отмечается в [109], выражение $I/10$ вместо I выбрано для того, чтобы сделать W_0 и W_1 , выражающими соответственно механический и электрический износ, почти одинаковыми при $I \approx 10$ А. Отмечено, что W_0 и W_1 являются функциями скорости скольжения. Исходя из изложенного, токовая составляющая из выражения (2.6) в общем виде запишется следующим образом:

$$W = 10^{-3} \cdot v \cdot P \cdot W_1 \cdot I^{1/2} \cdot \delta t, \quad (2.7)$$

где v – скорость скольжения.

Подробные исследования физических процессов, вызывающих явление повышенного износа в скользящем контакте при прохождении электрического тока, не проводились, но предполагается, что износ коллектора (контактного кольца) происходит путем переноса ионов меди с их поверхности в контактную поверхность щетки под действием электрического поля. Хотя количество меди, переносящейся при этом очень мало, оно, по-видимому, является причиной

образования абразивных зерен меди и окислов, вследствие чего поверхность становится шероховатой. Кроме того, отдельные участки поверхности коллектора и щетки при прохождении через них электрического тока нагреваются и размягчаются, а затем более легко подвергаются механическому разрушению. Оба этих явления увеличивают изнашивание [78, 89, 109]. Таким образом, представляется важным дополнить упрощенное выражение (2.7) величинами, влияющими на выделение, распределение и передачу тепла в скользящем контакте щетка-коллектор: коэффициент трения, удельное сопротивление и теплоемкость материала щетки. Выражение (2.7) также было дополнено величиной, характеризующей твердость материала щетки. В ходе исследований, было получено более полное выражение, характеризующее токовую (электрокоррозионную) составляющую изнашивания щеток, удобное для практического применения:

$$\Delta_{щ.I} = \left[10^{-4} \cdot \mu \cdot v_{кол}^{3/4} \cdot \rho_y^{1/2} \cdot (I_a/p)^{1/2} \cdot K_I / (H_{щ}^{1/2} \cdot (K_{щ} \cdot C_{щ} \cdot \gamma_{щ})^{1/4}) \right] \cdot P_{ср.щ}^{1/2} \cdot \delta t, \quad (2.8)$$

где $\Delta_{щ.I}$ – токовый (электрокоррозионный) износ щетки на временном интервале δt , м;

μ – коэффициент трения скольжения для пары щетка-коллектор;

$v_{кол}$ – линейная скорость рабочей поверхности коллектора, м/с;

ρ_y – удельное сопротивление материала щетки, Ом · м;

I_a – ток якоря, А;

p – число пар полюсов;

K_I – поправочный коэффициент к токовой составляющей изнашивания;

$H_{щ}$ – твердость поверхности материала щетки, Н/м²;

$K_{щ}$ – коэффициент теплопроводности материала щетки, кал/(м · с · град);

$C_{щ}$ – удельная теплоемкость материала щетки, кал/(кг · град);

$\gamma_{щ}$ – плотность материала щетки, кг/м³;

$P_{ср.щ}$ – среднее давление щетки на временном интервале δt , Н/м²;

δt – временной интервал расчета изнашивания, с.

Введем коэффициент, характеризующий интенсивность токовой (электрокоррозионной) составляющей изнашивания щеток электрических машин: $C_I^{\text{щ}} = 10^{-3} \cdot \mu \cdot v_{\text{кол}}^{3/4} \cdot \rho_y^{1/2} \cdot (I_a/p)^{1/2} \cdot K_I / (H_{\text{щ}}^{1/2} \cdot (K_{\text{щ}} \cdot C_{\text{щ}} \cdot \gamma_{\text{щ}})^{1/4})$. Тогда выражение (2.8) запишется в виде:

$$\Delta_{\text{щ},I} = C_I^{\text{щ}} \cdot P_{ср.щ}^{0.5} \cdot \delta t. \quad (2.9)$$

Электроэррозионная составляющая изнашивания щеток электрических машин. Как уже было отмечено в разделе 1.4 данной работы, поверхность цилиндрического коллектора отличается от геометрически правильной боковой поверхности кругового цилиндра. Профиль коллектора характеризуется наличием биений, овальностей, многогранностей, выступанием и западанием как отдельных, так и групп ламелей коллектора. Это приводит к дополнительной нестабильности контактирования, а в наиболее неблагоприятных случаях к нарушению нормальных условий токосъема. В динамике рельеф коллектора изменяется под действием центробежных сил, на него накладываются колебания якоря и вибрации подшипников. Нарушение нормальных условий контактирования, вызванное механическими причинами, а также электромагнитные условия протекания коммутации приводят к искрению и электрической эрозии. Интенсивность искрения и определяет степень электрической эрозии коллектора и щеток [78]. Наличие искрения в скользящем контакте влияет на износ следующим образом: во-первых, оно вызывает испарение материала с контактной поверхности; во-вторых, делает поверхность шероховатой, что увеличивает механический износ. Объем материала W_a , испаренного электрической дугой, пропорционален количеству

электричества Q , которое прошло через эту дугу и может быть выражено формулой [109]:

$$W_a = \gamma \cdot Q, \quad (2.10)$$

где W_a – объем материала, испаренного электрической дугой;

Q – количество электричества дуги;

γ – константа материала.

Аналогичная формула упомянута и в работе [89].

В другом литературном источнике [78] приведена следующая формула:

$$V = 1/6 \cdot \pi \cdot k_2 \cdot (3/4 \cdot k_1^2 + k_2^2) \cdot W, \quad (2.11)$$

где V – объем электроэррозионного разрушения;

k_1 – коэффициент, учитывающий диаметр зоны поражения;

k_2 – коэффициент, учитывающий глубину зоны поражения;

W – энергия импульса.

Практика показывает, что чем больше интенсивность искрения, тем больше заметны следы эрозии на контактных поверхностях. Путем обобщения и дополнения имеющихся в литературе сведений, было получено выражение, характеризующее электроэррозионную составляющую изнашивания щеток электрических машин:

$$\Delta_{\text{щ.э}} = \left[10^{-6} \cdot n_{\text{кол}} \cdot \rho_y \cdot K_3 / \left(60 \cdot U_d \cdot b_{\text{щд}} \cdot l_{\text{щ}} \cdot (K_{\text{щ}} \cdot C_{\text{щ}} \cdot \gamma_{\text{щ}})^{1/2} \right) \right] \cdot W_i \cdot \delta t, \quad (2.12)$$

где $\Delta_{\text{щ.э}}$ – электроэррозионный износ щетки на временном интервале δt , м;

$n_{\text{кол}}$ – частота вращения коллектора, об/мин;

ρ_y – удельное сопротивление материала щетки, Ом · м;

K_3 – поправочный коэффициент к электроэррозионной составляющей изнашивания;

U_d – среднее напряжение горения дуги, В;

$b_{\text{щд}}$ – тангенциальный размер щетки по дуге дорожки скольжения, м;

$l_{\text{щ}}$ – аксиальный размер щетки, м;

$K_{\text{щ}}$ – коэффициент теплопроводности материала щетки, кал/(м · с · град);

$C_{\text{щ}}$ – удельная теплоемкость материала щетки, кал/(кг · град);

$\gamma_{\text{щ}}$ – плотность материала щетки, кг/ m^3 ;

W_i – средняя суммарная энергия искрения коммутационных циклов под щеткой за оборот, Дж;

δt – временной интервал расчета изнашивания, с.

Введем коэффициент, характеризующий интенсивность электроэррозионной составляющей изнашивания щеток электрических машин:

$$C_3^{\text{щ}} = 10^{-6} \cdot n_{\text{кол}} \cdot \rho_y \cdot K_3 / \left(60 \cdot U_d \cdot b_{\text{щд}} \cdot l_{\text{щ}} \cdot (K_{\text{щ}} \cdot C_{\text{щ}} \cdot \gamma_{\text{щ}})^{1/2} \right). \quad \text{Тогда выражение}$$

(2.12) запишется в виде:

$$\Delta_{\text{щ.э}} = C_3^{\text{щ}} \cdot W_i \cdot \delta t. \quad (2.13)$$

Имея зависимости для всех трех составляющих изнашивания, можно записать математическую модель изнашивания щеток электрических машин малой мощности в радиальном направлении:

$$\Delta_{\text{щ}} = \Delta_{\text{щ,ф}} + \Delta_{\text{щ,I}} + \Delta_{\text{щ,з}} = \left(C_{\phi}^{\text{щ}} \cdot P_{\text{ср.щ}} + C_I^{\text{щ}} \cdot P_{\text{ср.щ}}^{0,5} + C_3^{\text{щ}} \cdot W_{\text{и}} \right) \cdot \delta t . \quad (2.14)$$

В результате теоретических и экспериментальных исследований создана расчетная модель изнашивания щеток электрических машин, позволяющая осуществлять расчет изнашивания щеток во времени и определять ресурс их работы.

Поправочные коэффициенты K_{ϕ} , K_I и K_3 определяются исходя из ресурсных испытаний изнашивания щетки базовой электрической машины.

Все параметры, обуславливающие работу скользящего контакта, тесно взаимосвязаны друг с другом. Например, при износе щетки изменяется ее масса. Также меняется сила нажатия, так как деформация пружины уменьшается по мере изнашивания щетки. Изменение этих параметров влечет за собой изменение контактного давления, величин контактных сопротивлений, токов разрыва, энергий искрения секций, соотношения фрикционной, токовой и эрозионной составляющих изнашивания контактных элементов. В работе [78] отмечено, что исследование продуктов эрозии скользящего контакта под микроскопом показало: с изменением нажатия меняется соотношение частиц разного происхождения. При увеличении нажатия возрастает процентное содержание частиц, образовавшихся в результате механического износа. Соответственно уменьшается в процентном отношении количество частиц, образовавшихся в результате электрической эрозии.

Следует отметить, что в математической модели изнашивания щеток учтено влияние многих факторов, влияющих на ухудшение коммутации. В частности, при расчете энергии коммутационного искрения, учитываются изменения таких механических параметров КЦУ, как геометрический профиль коллектора, характер вибраций в подшипниковых опорах, контактное давление, износ щетки и другие.

Безусловно, существуют факторы, не учтенные в рассматриваемой математической модели (2.14), но влияющие на скорость изнашивания щеток электрических машин, такие как влажность и газовый состав окружающей

среды, характер нагрузки, режим работы электродвигателя и другие. Однако, согласно [110, 111], коэффициент трения электрографитных щеток по нагретому коллектору слабо зависит от температуры при содержании водяных паров выше $13 \text{ г}/\text{м}^3$, что соответствует нормальной влажности. Влажность воздуха оказывает сильное влияние на износ щеток только в случае очень малого содержания водяных паров, меньше критического (от 1 до $3 \text{ г}/\text{м}^3$). Если же содержание водяного пара в воздухе превышает критическое, то влажность слабо сказывается на износе щеток [109]. На взгляд автора, наиболее весомым фактором, влияющим на ресурс работы электрощеток является режим работы электродвигателя, так как при реверсивном режиме работы ресурс коллекторно-щеточного узла может быть меньше в 3-6 раз из-за ухудшения коммутации. Следует отметить, что перечисленные выше факторы могут быть учтены в поправочных коэффициентах для фрикционной, токовой и эрозионной составляющих изнашивания (K_ϕ , K_I , K_3) после проведения дополнительных экспериментальных исследований в конкретных условиях, отличающихся от нормальных.

Таким образом, можно констатировать, что разработанная математическая модель изнашивания щеток электрических машин малой мощности является наиболее полной и готовой к практическому применению моделью из рассмотренных на сегодняшний день. Приведенные зависимости позволили реализовать алгоритм расчета величины изнашивания щеток численным методом с использованием разработанного программного обеспечения.

2.2. Влияние профиля коллектора и вибраций подшипниковых узлов на процесс коммутации

Качество электрического скользящего контакта в реальных условиях эксплуатации электрической машины в значительной степени определяется механическим состоянием коллекторно-щеточного узла. Основными параметрами, характеризующими механическое состояние КЩУ, являются: удельное нажатие на щетку, окружная скорость коллектора, перепады между коллекторными пластинами, эксцентризитет и эллиптичность коллектора, вибрации якоря ЭМ в ПУ [6-10, 17, 40, 41, 57, 58]. В процессе работы ЭМ происходит процесс изнашивания электрической щетки, вследствие чего изменяется ее радиальный размер и масса, а также сила ее нажатия на рабочую поверхность коллектора. При этом усилие взаимодействия элементов СК варьируется вследствие механических воздействий со стороны коллектора и вибраций якоря в подшипниках в пределах от минимального (F_{\min}) до максимального (F_{\max}) значений, определяемых согласно следующим выражениям:

$$F_{\min} = \frac{F_{\text{nаж}} - a_{\text{cp}} \cdot m_{\text{ш,p}} - m_{\text{ш,p}} \cdot g}{1 + \mu \cdot v \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{\Delta_k}{z}\right)} ; F_{\max} = \frac{F_{\text{nаж}} + a_{\text{cp}} \cdot m_{\text{ш,p}} + m_{\text{ш,p}} \cdot g}{1 - \mu \cdot v \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{\Delta_k}{z}\right)} , \quad (2.15)$$

где $F_{\text{nаж}}$ – расчетная сила нажатия пружины с учетом текущего износа щетки, Н; a_{cp} – суммарное среднее виброускорение коллектора и подшипниковых узлов, м/с^2 ; $m_{\text{ш,p}}$ – расчетная масса щетки для текущего износа щетки, кг; g – ускорение свободного падения, м/с^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.

Необходимо отметить, что, как следует из выражений (2.15), средние значения F_{\min} и F_{\max} будут индивидуальными для каждого конкретного момента

времени в течение срока службы электрической машины, поэтому для последующих расчетов процессов коммутации необходимо пересчитывать данные величины с необходимой периодичностью.

Кроме того, с целью упрощения расчетов коммутационных процессов с учетом влияния механики скользящего контакта, целесообразно при этом оперировать эквивалентным нажатием (усилием взаимодействия элементов СК) на щетку, при котором достигается такой же суммарный уровень коммутационного искрения, что и при реальном изменении давления под щеткой на рассматриваемом временном отрезке.

Из практики эксплуатации ЭМ известно, что зависимость интенсивности коммутационного искрения от давления в СК имеет неоднозначный характер. Так, например, чрезмерное снижение нажатия на щетку ухудшает механическое состояние КЩУ, что сопровождается значительным увеличением коммутационного искрения. С другой стороны, повышение нажатия на щетку свыше определенного предела приводит к уменьшению величин контактных сопротивлений пары щетка-коллектор, что влечет снижение коммутирующей способности СК и, как следствие, также увеличение коммутационного искрения. На рис. 2.1 приведен схематичный U-образный график зависимости коммутационной энергии искрения паза от силы нажатия на щетку, описанный в литературе [73, 74].

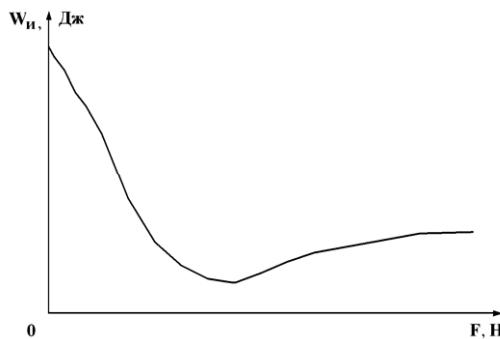


Рис. 2.1. Зависимость коммутационной энергии искрения паза от силы нажатия на щетку

Для нахождения средней энергии искрения коммутационных циклов под щеткой за оборот W_{cp} и соответствующего ей нажатия F , в первую очередь, необходимо построить кривую W_i от F на интервале от F_{min} до F_{max} . В общем случае, энергия искрения паза находится как сумма энергий искрений коммутируемых секций:

$$W_{паза} = \sum_{k=1}^{U_n} W_k = \sum_{k=1}^{U_n} \frac{L_s \cdot i_{p,k}^2 \cdot G_p}{2}, \quad (2.16)$$

где $W_{паза}$ – суммарная энергия искрения секций паза; W_k – энергия искрения k -ой секции паза; L_s – индуктивность коммутируемой секции; $i_{p,k}$ – ток разрыва k -ой секции паза; G_p – коэффициент демпфирования (показывает, какая часть энергии, выделяющаяся при разрыве короткозамкнутого контура, остается несдемпфированной обмоткой).

Далее, разобьем отрезок от F_{min} до F_{max} на n равных частей и вычислим энергию искрения коммутационных циклов под щеткой за оборот W_i для различных величин нажатий на щетку, рис. 2.2.

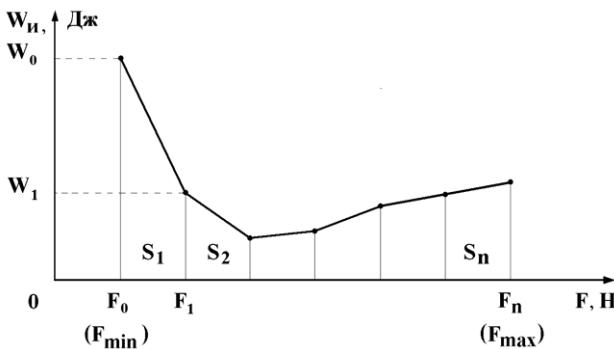


Рис. 2.2. Зависимость коммутационной энергии искрения паза от силы нажатия на щетку

Для нахождения средней энергии искрения коммутационных циклов под щеткой за оборот W_{cp} , необходимо площадь S под кривой на интервале от F_{min} до F_{max} разделить на длину этого интервала.

Так как мы имеем дело с кусочно-линейной аппроксимацией функции $W_i = f(F)$, рис. 2.2, то в этом случае площадь S под кривой равна сумме площадей n трапеций ($S_1..S_n$):

$$S = \sum_{m=0}^{n-1} S_m = \frac{\left(W_0 + \sum_{i=1}^{n-1} 2W_i + W_n \right) \cdot \Delta F}{2}, \quad (2.17)$$

где W_i – i -я энергия искрения коммутационных циклов под щеткой за оборот;

$\Delta F = F_i - F_{i-1}$ – изменение силы нажатия на щетку на каждом отрезке.

Далее, находим значение средней энергии искрения коммутационных циклов под щеткой за оборот W_{cp} на интервале от F_{min} до F_{max} :

$$W_{cp} = \frac{S}{n \cdot \Delta F} = \frac{W_0 + \sum_{i=1}^{n-1} 2W_i + W_n}{2 \cdot n}. \quad (2.18)$$

Вычислив W_{cp} , можно найти соответствующее ей эквивалентное нажатие на щетку F_s на кривой распределения W_i от F (рис. 2.3). В случае, если имеется более одной точки пересечения между кривой распределения W_i от F и прямой W_{cp} , то за эквивалентное нажатие F_s принимается наименьшая величина (как правило, при этом обеспечиваются худшие условия коммутации).

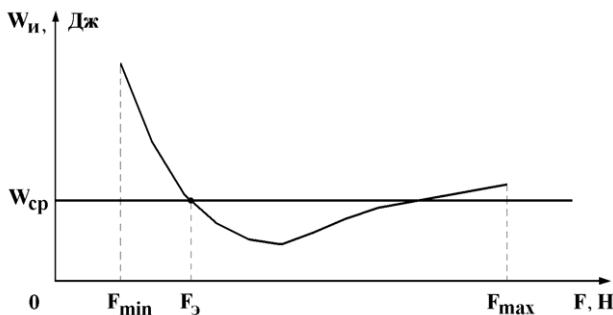


Рис. 2.3. Определение эквивалентного нажатия на электрическую щетку

Более подробно алгоритм вычисления эквивалентного нажатия на электрическую щетку F_s , реализованный в разработанном программном продукте, представлен на рисунке 2.4 и включает в себя следующие основные действия:

- задание числа интервалов n , на которые будет разбит отрезок от F_{\min} до F_{\max} ;
- вычисление среднего ускорения a_{cp} , вызванного воздействиями на щетку со стороны рабочей поверхности коллектора, а также вибрациями якоря электрической машины в подшипниковых узлах;
- вычисление значений F_{\min} и F_{\max} ;
- вычисление энергий искрения коммутационных циклов под щеткой за оборот для различных нажатий на щетку из интервала от F_{\min} до F_{\max} при идеальной механике КЩУ;
- вычисление площадей n элементарных трапеций ($S_1..S_n$) под кривой, рис.2.2;
- определение значения средней энергии искрения коммутационных циклов под щеткой за оборот W_{cp} ;
- определение ближайшего к F_{\min} интервала, на котором происходит пересечение между прямой W_{cp} и кривой распределения W от F ;
- вычисление значения эквивалентного нажатия F_s .

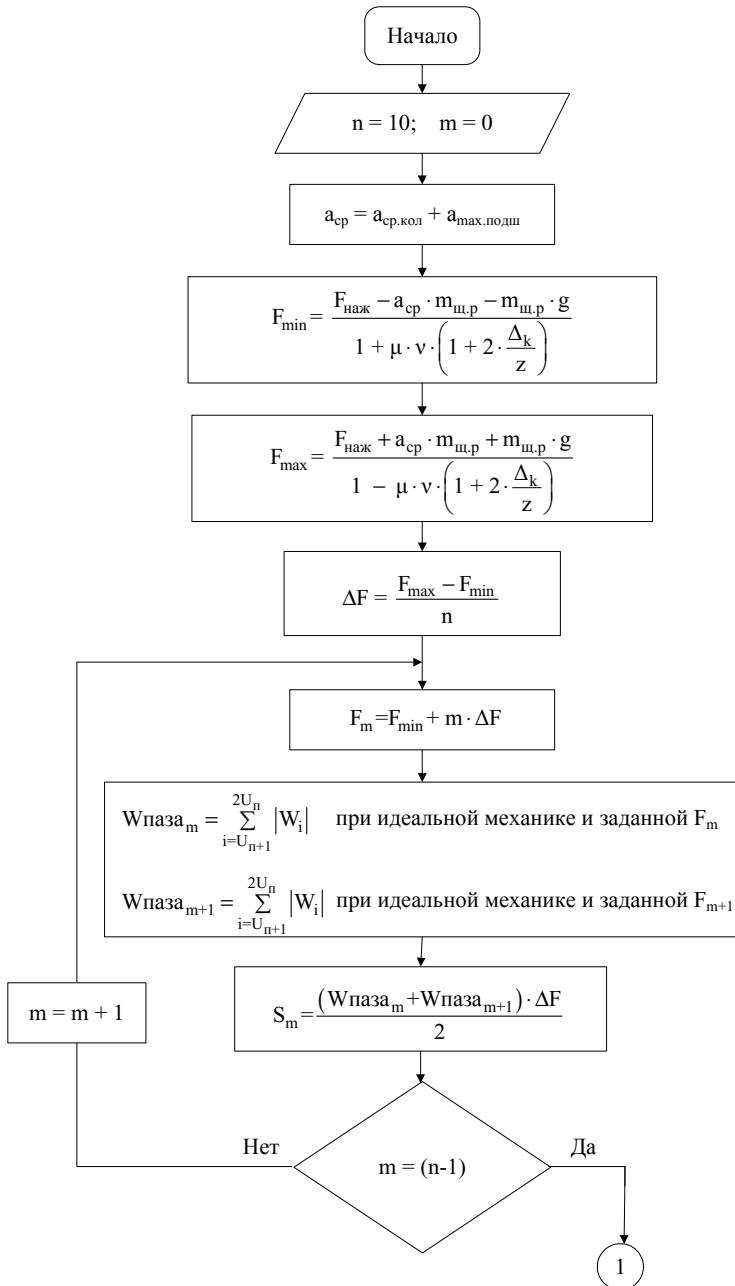


Рис. 2.4. Алгоритм определения эквивалентного нажатия на электрическую щётку

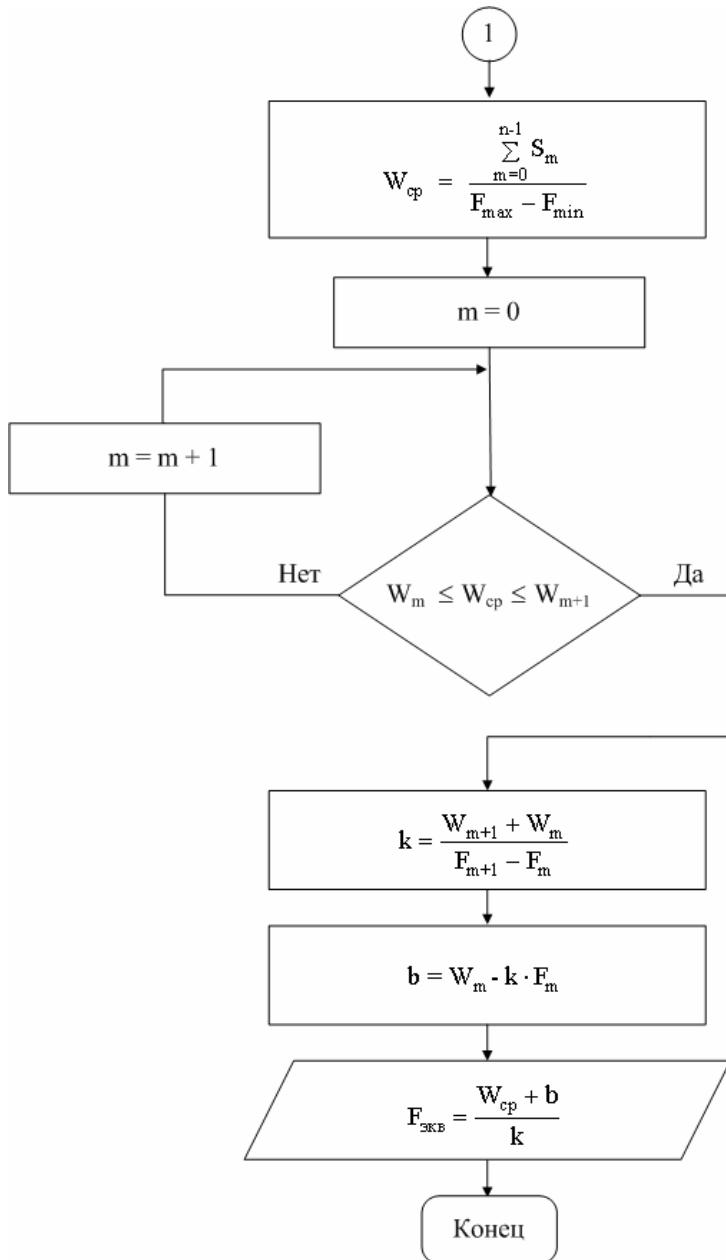


Рис. 2.4. (Продолжение) Алгоритм определения эквивалентного нажатия на электрическую щетку

Как уже было отмечено выше, в процессе наработки электродвигателя на ресурс, величины минимального F_{min} и максимального F_{max} нажатия на щетку изменяются, так как меняется масса щетки и сила нажатия пружины, а также суммарное среднее виброускорение коллектора и подшипниковых узлов. Необходимо также отметить следующее: виртуальные эксперименты, выполненные с использованием разработанного программного обеспечения и описанные в разделе 3.4 данной работы, показали, что сама кривая W_n от F также меняется в процессе наработки электрической машины на ресурс, поэтому целесообразно варьировать периодичность пересчета эквивалентного нажатия на щетку F_e , в зависимости от требуемой точности расчетов.

Полученное значение эквивалентного нажатия на щетку F_e используется далее при расчете контактных сопротивлений скользящего контакта, а значит и для расчета электроэрозионной составляющей изнашивания электрических щеток.

Таким образом, в данном разделе предложена методика, позволяющая учитывать изменение механических параметров КЩУ на процесс коммутации путем вычисления средней энергии искрения коммутационных циклов под щеткой за оборот W_{cp} и определением соответствующего ей эквивалентного нажатия F_e на электрическую щетку.

2.3. Методика расчета контактных сопротивлений в процессе коммутации

Процесс коммутации секций коллекторной электрической машины в значительной степени определяется величиной и характером изменения во времени сопротивлений под набегающим и сбегающим краями щетки. Электрические свойства скользящего контакта (СК), в свою очередь, зависят от динамики перемещений контактных элементов относительно друг друга, качества контактных поверхностей, наличия и свойств промежуточного слоя (политуры, пылевидных продуктов изнашивания и т.д.), влажности и температуры окружающей среды, удельного нажатия на щетку и таких

параметров, как плотность тока в контакте и электрические характеристики материалов контактных элементов [6-10, 37, 57, 58, 107].

Большая часть перечисленных факторов тем или иным образом связана с физико-механическими характеристиками материалов, применяемых в качестве элементов токосъема.

Влияние влажности окружающего воздуха может быть исключено из рассмотрения, поскольку влажность воздуха в нормальных условиях эксплуатации электрических машин меняется в незначительных пределах, а ее влияние в высоконагруженных (по току и скорости вращения) машинах на электрические характеристики СК невелико [57].

В работе [57] отмечено, что основными факторами, определяющими качество контактирования элементов СК в статическом режиме, являются плотность тока под щеткой, давление в контакте и температура окружающей среды (в области элементов скользящего контакта).

Математическая модель для расчета контактных сопротивлений набегающего и сбегающего краев щетки, учитывая все перечисленные выше факторы была разработана в Томском политехническом университете. В работе [57] представлена модель для расчета контактных сопротивлений сбегающего и набегающего краев щетки, применимая для основной массы универсальных коллекторных двигателей со щеточным перекрытием $1 < \beta_{\text{щ}} \leq 2$.

На рис. 2.5 представлена кривая изменения контактного сопротивления сбегающего края щетки пары медь М1 – щетка ЭГ74, вычисленная с шагом $\Delta t = 50$ мкс в соответствии с выражением, представленным в [57]. Построенную таким образом кривую далее будем называть «реальной».

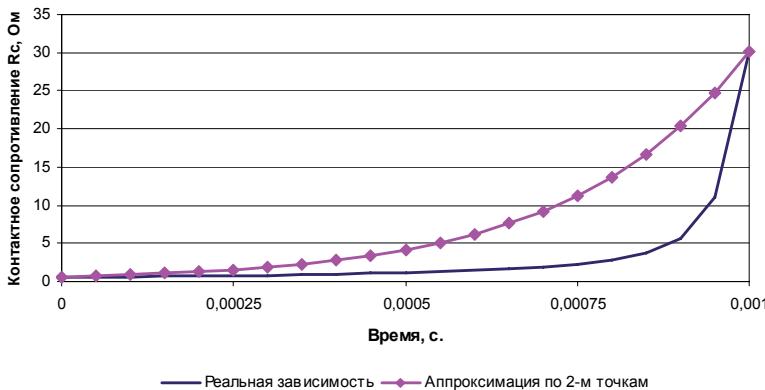


Рис. 2.5. Реальная и аппроксимированная по 2-м точкам кривая изменения контактного сопротивления сбегающего края щетки

Ввиду того, что точный расчет динамики контактных сопротивлений во время коммутационного цикла с малым шагом (например, с шагом 50 мкс) требует значительного объема вычислений, он малопригоден при моделировании ресурсных испытаний электрических машин на ЭВМ. В связи с этим, автором работы [57] было принято решение проводить расчет для ограниченного числа точек с последующей аппроксимацией. Для сбегающего края щетки расчеты производились только для двух точек – в начальный и конечный моменты коммутационного цикла с последующим применением экспоненциальной аппроксимации по двум вычисленным точкам (рис. 2.5). Для набегающего края щетки производится аналогичный набор вычислений.

Перечисленные выше меры позволяют значительно сократить затраты машинного времени для вычисления контактных сопротивлений, однако, как следует из рисунка 2.5, аппроксимированные величины контактных сопротивлений могут достаточно сильно отличаться от реальных значений: в среднем на 196%, а максимально на 390% (рис. 2.7).

Несмотря на то, что величина тока разрыва в машинах малой мощности определяется контактными сопротивлениями под набегающим и сбегающим краями в конце коммутационного цикла [57], тем не менее, существующие

отклонения от реальной зависимости могут приводить к существенным погрешностям в расчетах токов разрыва.

Автором предложена методика, включающая в себя дополнительный расчет величин контактных сопротивлений в середине коммутационного цикла. Иными словами выполняются расчеты величин контактных сопротивлений в начале ($r_{\text{сб(нач)}}$), середине ($r_{\text{сб(ср)}}$) и конце ($r_{\text{сб(кон)}}$) коммутационного цикла с последующей экспоненциальной аппроксимацией по найденным трем точкам.

Контактное сопротивление для сбегающего края щетки в середине коммутационного цикла находится по выражению:

$$r_{\text{сб(ср)}} = \frac{R_7 \cdot R_8 \cdot R_9}{R_7 + R_8 + R_9 + R_7 \cdot R_9}, \quad (2.19)$$

где $R_7 = \frac{K_{22} \cdot \rho_y \cdot h_{\text{щ.тек}}}{l_{\text{щ}} \cdot b_{\text{л.д}}}$ – сопротивление по телу части щетки, перекрытой

ламелью коллектора;

K_{2i} – коэффициент, характеризующий степень электропроводности (зависит от плотности тока, температуры окружающей среды и контактного давления. Например, K_{23} – коэффициент для контактного давления P_3);

ρ_x – удельное сопротивление материала щетки в поперечном направлении;

ρ_y – удельное сопротивление материала щетки в продольном направлении;

$h_{\text{щ.тек}}$ – текущий радиальный размер щетки;

$l_{\text{щ}}$ – аксиальный размер щетки;

$b_{\text{л}}$ – ширина ламели;

$b_{\text{щ.д}}$ – тангенциальный размер щетки по дуге дорожки скольжения;

$\delta_{\text{изд}}$ – ширина межламельной изоляции по дуге;

$$R_8 = \frac{K_{22}(K_{12}\rho_x\rho_y)^{0.5}}{l_{\text{щ}}} \cdot \operatorname{cth} \left(\frac{0.5 \cdot b_{\text{щ.д}} + 0.5 \cdot \delta_{\text{изд}}}{h_{\text{щ.тек}}} \cdot \left(\frac{K_{12}\rho_x}{\rho_y} \right)^{0.5} \right) - \text{сопротивле-}$$

ние по телу передней неперекрытой части щетки;

K_{1i} – коэффициент, характеризующий степень увеличения контактирования в зависимости от щеточного перекрытия (зависит от плотности тока, температуры окружающей среды и контактного давления).

Например, K_{12} – коэффициент для контактного давления P_2 ;

$$R_9 = \frac{K_{22}(K_{12}\rho_x\rho_y)^{0.5}}{l_{\text{щ}}} \cdot \operatorname{cth} \left(\frac{0.5 \cdot b_{\text{щ,д}} - 0.5 \cdot \delta_{\text{из,д}} - b_{\text{л,д}}}{h_{\text{щ,тек}}} \cdot \left(\frac{K_{12}\rho_x}{\rho_y} \right)^{0.5} \right) - \text{сопротивление по телу задней неперекрытой части щетки.}$$

Аналогично можно вычислить контактное сопротивление для набегающего края щетки в середине коммутационного цикла. Более подробная информация о расчете контактных сопротивлений приведена в соответствующем алгоритме, представленном в приложении.

Выражение для приближенного вычисления контактного сопротивления сбегающего края щетки по известным трем точкам имеет следующий вид:

$$r_{\text{сб}} = A_{\text{сб}} + B_{\text{сб}} \cdot e^{-\frac{(T_k-t)}{\tau_{r_{\text{сб}}}}}, \quad (2.20)$$

где $A_{\text{сб}} = r_{\text{сб(кон)}} - B_{\text{сб}}$, Ом;

$$B_{\text{сб}} = \frac{(r_{\text{сб(cp)}} - r_{\text{сб(кон)}})^2}{r_{\text{сб(нач)}} + r_{\text{сб(кон)}} - 2 \cdot r_{\text{сб(cp)}}}, \text{ Ом;}$$

T_k – время коммутационного цикла, с;

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

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

По аналогии формируется выражение для набегающего края щетки:

$$r_{\text{нб}} = A_{\text{нб}} + B_{\text{нб}} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{r_{\text{нб}}}}}, \quad (2.21)$$

где $r_{\text{нб}}$ – контактное сопротивление набегающего края щетки, Ом;

$$A_{\text{нб}} = r_{\text{нб(нач)}} - B_{\text{нб}}, \text{ Ом};$$

$$B_{\text{нб}} = \frac{(r_{\text{нб(cp)}} - r_{\text{нб(нач)}})^2}{r_{\text{нб(кон)}} + r_{\text{нб(нач)}} - 2 \cdot r_{\text{нб(cp)}}}, \text{ Ом};$$

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

Аппроксимированная по трем точкам (в начале, середине и конце коммутационного цикла) кривая изменения контактного сопротивления сбегающего края щетки представлена на рис. 2.6.

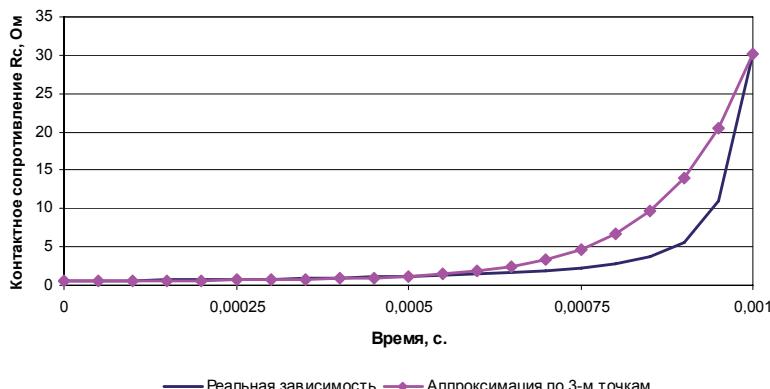


Рис. 2.6. Реальная и аппроксимированная по 3-м точкам кривая изменения контактного сопротивления сбегающего края щетки

Предложенная методика расчета контактных сопротивлений требует несколько больше машинного времени в сравнении с предыдущим вариантом, однако точность аппроксимации существенно увеличивается: теперь аппроксимированные величины отличаются от реальных значений для рассмотренного ранее случая в среднем на 33% (против 196% в предыдущем варианте), а максимально на 154% (в предыдущем варианте 390%), рис. 2.7. Это позволяет повысить точность расчета коммутационного процесса, что, в свою очередь, влияет на точность определения величины изнашивания электрических щеток.

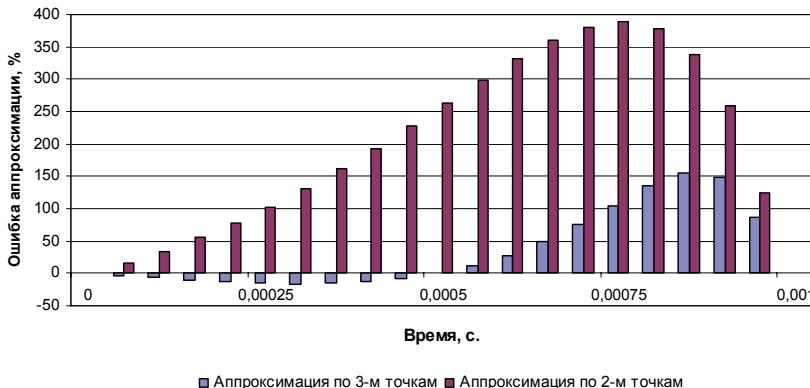


Рис. 2.7. Ошибка аппроксимации для вариантов по 2-м и по 3-м точкам

Таким образом, предложена более точная методика расчета контактных сопротивлений в процессе коммутации, которая позволяет в 5,9 раза снизить погрешность вычисления величины КС по сравнению с ранее применяемой методикой.

Выводы

- Предложенные выражения, описывающие фрикционную, электрокоррозионную и электроэррозионную составляющие изнашивания щеток, в совокупности формируют математическую модель изнашивания щеток универсальных КЭМ, позволяющую учитывать максимальное количество факторов, характеризующих работу СК (характеристики контактных материалов, реальное состояние профиля коллектора и ПУ в процессе эксплуатации ЭМ, коммутационная напряженность, определяемая техническими характеристиками традиционных и нетрадиционных конфигураций активной зоны и конструкций обмоток якоря).
- Предложенная методика определения эквивалентной величины усилия взаимодействия элементов СК на заданном временном отрезке, обеспечивающей такой же суммарный уровень коммутационного искрения, что

и при вибрационном воздействии профиля коллектора и ПУ, позволяет в десятки раз сократить время расчета ресурса щеток ЭМ.

3. Предложенная методика расчета контактных сопротивлений в процессе коммутации, основанная на экспоненциальной аппроксимации по предварительно вычисленным значениям КС в начале, середине и конце коммутационного цикла, позволяет до 6 раз снизить погрешность вычисления величин КС по сравнению с используемой ранее в ПО аппроксимацией и повысить точность вычисления тока разрыва коммутируемой секции, что ведет к уточнению величины энергии искрения, выделяемой под щеткой и, соответственно, к уточнению результатов расчета изнашивания щеток ЭМ.

4. Разработанные алгоритмы определения эквивалентного усилия в СК на заданном временном интервале, обеспечивающего такую же среднюю энергию искрения под щеткой, что и при реальной механике СК, а также приближенного расчета контактных сопротивлений на основе предложенной уточненной экспоненциальной аппроксимации исходной зависимости позволяют многократно сократить время виртуальных испытаний ЭМ на ресурс.

3. Разработка программного продукта для оценки ресурса скользящего контакта универсальных коллекторных электродвигателей

3.1. Алгоритм расчета изнашивания щеток электрических машин

Обширная практика эксплуатации ЭМ малой мощности показывает, что основным фактором, ограничивающим их срок службы, является ресурс КЩУ [26, 35, 36], который, в свою очередь, в подавляющем большинстве случаев определяется временем наработки электрических щеток. Например, экспериментальные исследования высокоскоростного универсального электродвигателя LG VCE280E02 (раздел 1.4), свидетельствуют о 2-х кратном запасе ресурса коллектора в сравнении с ресурсом комплекта щеток.

Разработанная математическая модель, представленная в главе 2 данной работы, позволяет производить расчет величины изнашивания щеток ЭМ, учитывая такие изменяющиеся параметры, как геометрический профиль коллектора, характер вибраций в ПУ, давление в СК щетка-коллектор, электросопротивления набегающего и сбегающего краев щетки в процессе коммутации с учетом механики КЩУ, энергии коммутационного искрения. Однако расчет изнашивания щеток с постоянным пересчетом всех перечисленных выше динамических параметров на ЭВМ занимает слишком много времени, поэтому, малопригоден для практического использования.

Актуальной задачей, по мнению автора, является разработка алгоритма ускоренного расчета изнашивания электрических щеток на базе разработанной математической модели, свободного от указанного выше недостатка. Следующей задачей является создание на базе разработанного алгоритма прикладного программного обеспечения (ПО) для оценки ресурса щеток ЭМ, который мог бы быть использован для оптимизации конструкций электродвигателей с целью увеличения ресурса КЩУ.

Предлагаемый автором алгоритм расчета изнашивания щеток состоит из нескольких больших и малых циклов расчета. Начальными условиями для каждого большого цикла расчета изнашивания щеток являются текущее

механическое состояние КЩУ и ПУ электрической машины, а также текущий радиальный размер щетки и величина нажатия пружины на щетку. Например, первый большой цикл расчета на рисунке 3.1 начинается в точке 0 и заканчивается в точке 1. Далее производится пересчет всех перечисленных выше параметров., устанавливаются новые начальные условия и начинается второй большой цикл (точки 1-2, рис. 3.1). Большие циклы выполняются до тех пор, пока радиальный размер щетки не достигнет минимально допустимой величины, установленной заводом-изготовителем. Из изложенного следует, что чем меньше будет продолжительность большого цикла расчета, тем точнее будет полученная кривая изнашивания электрощетки, однако полный расчет наработки щетки на ресурс займет больше машинного времени.

Следует также отметить, что в предложенном алгоритме принято допущение о постоянстве механических параметров КЩУ и ПУ в течение большого цикла расчета (десятки часов), так как они изменяются значительно медленнее, чем величина контактного сопротивления или радиальный размер щетки, влияющие на процесс коммутации.

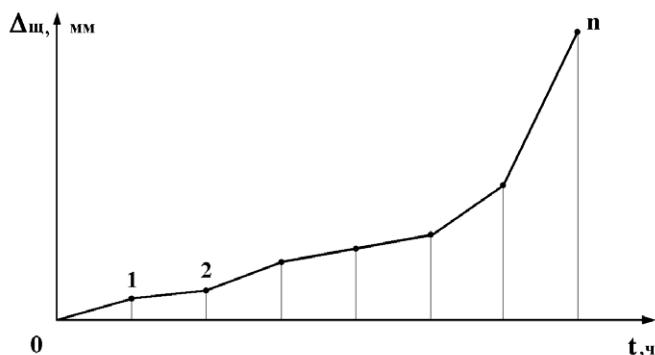


Рис. 3.1. Поэтапный расчет величины изнашивания электрощетки

Рассмотрим подробнее предложенный автором алгоритм в части реализации большого цикла расчета изнашивания щеток. Как уже было отмечено, алгоритм расчета изнашивания начинается с задания начальных условий: механического состояния коллектора и подшипниковых узлов (ПУ) электрической машины, радиального размера щетки и силы нажатия на щетку.

Далее выполняется первый малый цикл расчета, в ходе выполнения которого производится подсчет суммарной энергии искровых разрядов, выделяемой под щеткой за время этого цикла, согласно следующему выражению:

$$W_{\gamma} = \sum_{j=1}^K \sum_{g=1}^S |W_{j,\gamma,g}|, \quad (3.1)$$

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.

Следует отметить, что при подсчете величины энергии искрения учитываются такие важные факторы, оказывающие влияние на процесс коммутации, как конструктивные особенности индуктора, якорных обмоток, а также текущее механическое состояние коллекторно-щеточных и подшипниковых узлов электрической машины.

Далее, согласно методике, изложенной в разделе 2.1 данной работы, вычисляется эквивалентное нажатие на щетку F_{γ} , а также среднее контактное давление $P_{\text{ср.щ.1}}$ с учетом текущего состояния перечисленных выше динамических параметров.

Затем, с помощью выражения 3.2 производится предварительный расчет изнашивания щетки $\Delta_{\text{лок.1}}^{\text{щ}}$ со средним контактным давлением $P_{\text{ср.щ.1}}$ и усредненной энергией коммутационного искрения за время большого цикла расчета изнашивания δt :

$$\Delta_{\text{лок.1}}^{\text{щ}} = (C_{\phi}^{\text{щ}} \cdot P_{\text{ср.щ.1}} + C_{r'}^{\text{щ}} \cdot P_{\text{ср.щ.1}}^{0.5} + C_{\gamma}^{\text{щ}} \cdot \sum_{j=1}^K \sum_{g=1}^S |W_{j,1,g}| / S) \cdot \delta t, \quad (3.2)$$

где $P_{\text{ср.щ.1}}$ – среднее давление щетки во время первого малого цикла расчета;

$C_{\phi}^{\text{щ}}$ – коэффициент, характеризующий интенсивность фрикционной составляющей изнашивания щеток;

C^{III}_1 – коэффициент, характеризующий интенсивность электрокоррозионной составляющей изнашивания щеток;

C^{III}_3 – коэффициент, характеризующий интенсивность электроэррозионной составляющей изнашивания щеток;

δt – продолжительность большого цикла расчета изнашивания щетки.

Далее, производится предварительный пересчет текущего радиального размера щетки:

$$h_{\text{ш,тек}} = h_{\text{ш,тек}} - \Delta_{\text{лок.1}}^{\text{III}}. \quad (3.3)$$

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

На втором малом цикле расчета с помощью выражения 3.1 производится подсчет суммарной энергии искрения, выделяемой под щеткой за время второго малого цикла.

Далее, на основе полученных данных об энергиях искрения на первом и втором малых циклах расчета, производится вычисление скорости (3.4) и ускорения (3.5) электроэррозионного изнашивания:

$$f^{\text{III}} = C^{\text{III}}_3 \cdot \sum_{j=1}^K \sum_{g=1}^S |W_{j,1,g}|, \quad (3.4)$$

$$n^{\text{III}} = (C^{\text{III}}_3 \cdot \sum_{j=1}^K \sum_{g=1}^S |W_{j,2,g}| - C^{\text{III}}_3 \cdot \sum_{j=1}^K \sum_{g=1}^S |W_{j,1,g}|) / \delta t. \quad (3.5)$$

На следующем этапе алгоритма производится расчет скорости фрикционного, токового и электроэррозионного изнашивания электрической щетки на большом цикле расчета:

$$(d\Delta_{\phi}^{\text{III}}/dt)_m = C^{\text{III}}_{\phi} \cdot P_{\text{ср.ш.1}},$$

$$(d\Delta_I^{\text{III}}/dt)_m = C^{\text{III}}_I \cdot P_{\text{ср.ш.1}}^{0.5}, \quad (3.6)$$

$$(d\Delta_g^{\text{III}}/dt)_m = f^{\text{III}} + n^{\text{III}} \cdot \delta t.$$

Используя полученные данные, производится расчет величины фрикционной, токовой и электроэрозионной составляющих изнашивания щетки на большом цикле расчета:

$$\begin{aligned}\Delta_{\phi}^{\text{III}} &= \delta t \cdot (d\Delta_{\phi}^{\text{III}}/dt)_m, \\ \Delta_I^{\text{III}} &= \delta t \cdot (d\Delta_I^{\text{III}}/dt)_m, \\ \Delta_3^{\text{III}} &= \delta t \cdot (d\Delta_3^{\text{III}}/dt)_m.\end{aligned}\quad (3.7)$$

Затем вычисляется величина суммарного износа электрической щетки:

$$\Delta^{\text{III}} = \Delta_{\phi}^{\text{III}} + \Delta_I^{\text{III}} + \Delta_3^{\text{III}}. \quad (3.8)$$

Далее, осуществляется реальный пересчет текущего радиального размера щетки ЭМ путем вычитания величины суммарного износа электрической щетки из ее исходного радиального размера:

$$h_{\text{щ.тек}} = h_{\text{щ.исх}} - \Delta^{\text{III}}. \quad (3.9)$$

После определения текущего размера электрощетки в радиальном направлении, большой цикл расчета считается завершенным.

Как уже было отмечено, большие циклы расчета с обновленными исходными данными о радиальном размере щетки и о механическом состоянии коллекторно-щеточного и подшипниковых узлов электрической машины (эквивалентном нажатии на щетку) 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.

3.2. Метод определения поправочных коэффициентов математической модели изнашивания щеток для различных конструкций универсальных коллекторных электродвигателей

В главе 2 данной работы описано создание математической модели изнашивания щеток коллекторных электрических машин. Недостатком предложенной модели является необходимость задания соответствующих значений поправочных коэффициентов к составляющим изнашивания электрощеток с целью учета индивидуальных особенностей ЭМ различных типоразмеров и повышения точности расчетов.

Для приближенных оценок целесообразности применения тех или иных предполагаемых конструктивных решений в ЭМ при помощи разработанной математической модели можно воспользоваться данными поправочными коэффициентами к расчетной модели для аналогичных по техническим характеристикам ЭМ (в случае, если уже имеется наработанная в ходе предыдущих исследований база поправочных коэффициентов).

В том случае, если необходима уточненная информация о расчетных параметрах ЭМ, например, при отработке конструкций для создания модификаций конкретного типоразмера электродвигателя, целесообразно определить поправочные коэффициенты K_ϕ , K_I , K_s математической модели изнашивания щеток конкретно для данного типоразмера электродвигателя. При этом в максимальной степени будут учтены основные индивидуальные параметры электрической машины, а это повышает достоверность расчетов.

Для нахождения поправочных коэффициентов математической модели изнашивания щеток воспользуемся методом планирования эксперимента. Данный метод обладает высокой эффективностью - для получения требуемой информации проводится минимальное число опытов; позволяет проводить одновременное исследование влияния нескольких переменных параметров машины на ее показатели; дает возможность получить зависимости между

параметрами ЭМ и ее показателями в простой математической форме – в виде полинома [3, 4, 12, 38, 76, 77, 97, 98].

Согласно методу планирования эксперимента, искомые коэффициенты K_ϕ , K_l , K_s математической модели изнашивания щеток называются факторами. На подготовительном этапе необходимо выбрать основной уровень и интервал варьирования для каждого фактора. Выбор экспериментальной области факторного пространства связан с тщательным анализом априорной информации. В рассматриваемом случае, исходя из наработанных материалов предыдущих исследований, были выбраны следующие основные уровни и интервалы варьирования факторов: $K_\phi = 0,9 \pm 0,18$; $K_l = 0,113 \pm 0,022$; $K_s = 0,45 \pm 0,09$.

Влияние поправочных коэффициентов K_ϕ , K_l и K_s на расчет величины изнашивания электрических щеток согласно выражениям (2.4, 2.8 и 2.12) линейно, поэтому для определения значений поправочных коэффициентов методом планирования эксперимента была выбрана линейная модель. В рассматриваемом случае модель должна учитывать взаимодействия трех факторов: поправочных коэффициентов фрикционной K_ϕ , токовой K_l и электроэррозионной K_s , составляющих изнашивания электрических щеток:

$$y_i = b_{k0} + b_{k1}x_1 + b_{k2}x_2 + b_{k3}x_3 + b_{k12}x_1x_2 + b_{k13}x_1x_3 + b_{k23}x_2x_3 + b_{k123}x_1x_2x_3, \quad (3.10)$$

где y_i – расчетная величина суммарного изнашивания щетки ЭМ для i -ого

эксперимента, $i = 1, 2, \dots, N$, где N – количество экспериментов;

k – номер временного отрезка;

$b_{k(\dots)}$ – коэффициенты полинома для k -ого временного отрезка;

x_1 – кодированное значение коэффициента K_ϕ для фрикционной составляющей изнашивания щетки ЭМ;

x_2 – кодированное значение коэффициента K_l для токовой составляющей изнашивания щетки ЭМ;

x_3 – кодированное значение коэффициента K_s для электроэррозионной составляющей изнашивания щетки ЭМ.

Для того, чтобы определить кодированные значения [3, 4] коэффициентов (x_i) к составляющим изнашивания щеток, необходимо составить и решить систему из трех уравнений (3.11). В данной системе уравнений для каждого из трех различных временных отрезков соответствующая расчетная величина изнашивания щетки электрической машины приравнивается к ее фактическому износу.

Ресурс исследуемого электродвигателя LG VCE280E02 за время ресурсных испытаний составил 709 ч. Для проведения вычислений были выбраны следующие временные отрезки: I - 140 ч, II - 420 ч и III - 700 ч (начало, середина и конец ресурсных испытаний):

$$\begin{cases} y_I = b_{I0} + b_{I1}x_1 + b_{I2}x_2 + b_{I3}x_3 + b_{II2}x_1x_2 + b_{II3}x_1x_3 + b_{I23}x_2x_3 + b_{III23}x_1x_2x_3; \\ y_{II} = b_{II0} + b_{II1}x_1 + b_{II2}x_2 + b_{II3}x_3 + b_{III2}x_1x_2 + b_{III3}x_1x_3 + b_{II23}x_2x_3 + b_{III123}x_1x_2x_3; \\ y_{III} = b_{III0} + b_{III1}x_1 + b_{III2}x_2 + b_{III3}x_3 + b_{III12}x_1x_2 + b_{III13}x_1x_3 + b_{III23}x_2x_3 + b_{III123}x_1x_2x_3. \end{cases} \quad (3.11)$$

Вернемся к линейной модели изнашивания щеток ЭМ (3.10). Для проведения полного факторного эксперимента, в котором реализуются все возможные сочетания верхних и нижних уровней рассматриваемых факторов, необходимо провести 8 различных экспериментов (3 фактора, 2 уровня каждого фактора, получаем $N = 2^3$). Матрица планирования полного факторного эксперимента для трех факторов представлена в таблице 3.1.

Таблица 3.1

№ Эксперимента	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	y
1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	y_1
2	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	y_2
3	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	y_3
4	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	y_4
5	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	y_5
6	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	y_6
7	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	y_7
8	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	y_8

Для проведения каждого из восьми экспериментов использовалась разработанная автором математическая модель изнашивания щеток и созданное

с ее использованием ПО, подробнее описанное в разделе 3.4 данной работы. Таким образом, указанные эксперименты проводились не реально, а виртуально при помощи математической модели. Например, при проведении виртуального эксперимента №2 из таблицы 3.1 в математическую модель изнашивания электрощеток были заданы следующие уровни факторов: $K_{\phi} = 1,08$ (высокий); $K_I = 0,091$ (низкий); $K_3 = 0,36$ (низкий). Далее, с применением разработанного программного обеспечения был выполнен расчет изнашивания щетки y_2 на заданном временном интервале.

В рамках подготовки данной работы были проведены виртуальные эксперименты по расчету изнашивания электрощеток при следующих условиях: учитывалось изменение механического состояния КЩУ и ПУ в процессе наработки на ресурс (раздел 3.3). Малый цикл расчета изнашивания щеток составлял 6 периодов сетевого напряжения (0,12 с), большой цикл расчета изнашивания был установлен в размере 70 ч.

В частности, в ходе виртуальных экспериментов с использованием разработанного ПО при $t = 140$ ч (I-ый временной отрезок), были получены следующие результаты изнашивания электрической щетки, мм:

$$y_1 = 7,371962491; y_2 = 6,213241026; y_3 = 7,26371441; y_4 = 9,416798711; \\ y_5 = 5,898893279; y_6 = 7,90403498; y_7 = 9,062550061; y_8 = 7,583694386$$

Фактическая величина изнашивания щетки за указанный промежуток времени составила $y_1 = 6,01$ мм.

Далее находим коэффициенты полинома (3.10). Для рассмотренного выше примера были вычислены следующие коэффициенты:

$$b_{I0} = (y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5 + y_6 + y_7 + y_8) / 8 = 7,589361168105$$

$$b_{I1} = (-y_1 + y_2 - y_3 + y_4 - y_5 + y_6 - y_7 + y_8) / 8 = 0,190081107643$$

$$b_{I2} = (-y_1 - y_2 + y_3 + y_4 + y_5 - y_6 + y_7 + y_8) / 8 = 0,742328223980$$

$$b_{I3} = (y_1 - y_2 - y_3 + y_4 - y_5 + y_6 + y_7 - y_8) / 8 = 0,849475392795$$

$$b_{I12} = (y_1 - y_2 - y_3 + y_4 + y_5 - y_6 - y_7 + y_8) / 8 = -0,021523951175$$

$$b_{I13} = (-y_1 - y_2 + y_3 + y_4 + y_5 + y_6 - y_7 - y_8) / 8 = 0,031499177083$$

$$b_{123} = (-y_1 + y_2 - y_3 + y_4 + y_5 - y_6 + y_7 - y_8) / 8 = 0,058509601469$$

$$b_{1123} = (y_1 + y_2 + y_3 + y_4 - y_5 - y_6 - y_7 - y_8) / 8 = -0,022932008402$$

Описанные выше операции по вычислению величин изнашивания щетки y_i и коэффициентов полинома (3.10) были проведены не только для $t = 140$ ч, но и для временных отрезков в 420 ч и 700 ч соответственно.

Далее, используя экспериментальные данные о реальных величинах изнашивания щеток рассматриваемого электродвигателя на указанных временных отрезках ($y_1 = 6,01$ мм, $y_{11} = 16,12$ мм, $y_{123} = 28,11$ мм), была составлена система уравнений (3.11). В ходе решения данной системы уравнений были найдены следующие значения кодированных коэффициентов: $x_1 = 4,226$, $x_2 = 2,186$, $x_3 = -4,247$.

Вычисленные значения коэффициентов обеспечивают равенство расчетной и фактической величин изнашивания электрощетки на трех рассмотренных временных отрезках.

Далее необходимо перевести найденные кодированные значения коэффициентов в натуральные согласно выражению, указанному в [3, 4], для их последующего применения в математической модели изнашивания щеток ЭМ.

После выполнения данных преобразований были получены следующие натуральные значения поправочных коэффициентов к составляющим изнашивания щеток исследуемого электродвигателя LG VCE280E02:

- поправочный коэффициент к фрикционной составляющей изнашивания электрощеток (2.4) $K_\phi = 1,6607$;
- поправочный коэффициент к электрокоррозионной составляющей изнашивания электрощеток (2.8) $K_I = 0,1624$;
- поправочный коэффициент к электроэррозионной составляющей изнашивания электрощеток (2.12) $K_e = 0,6778$.

Среднее отклонение расчетных величин изнашивания щетки с учетом вычисленных коэффициентов (K_ϕ , K_I и K_e) 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.

Таким образом, в данном разделе предложена методика определения поправочных коэффициентов к составляющим изнашивания электрощеток для различных типоразмеров коллекторных ЭМ на основе сочетания метода планирования виртуальных экспериментов и реальных ресурсных испытаний ЭМ. Предложенная методика позволяет повысить точность математической модели изнашивания щеток на основе минимального количества экспериментальных данных ресурсных испытаний базовой ЭМ. Кроме этого, определены уточненные поправочные коэффициенты к математической модели изнашивания электрических щеток высокоскоростного универсального коллекторного электродвигателя LG VCE280E02.

3.3. Методика определения динамики механического состояния профиля коллектора и подшипниковых узлов в процессе наработки электрической машины на ресурс

В разделах 1.1-1.3 данной работы описаны методики, с помощью которых из первоначального массива измерений, выполненных бесконтактным профилометром, можно получить выделенный профиль коллектора и усредненную кривую виброперемещений якоря в ПУ, а затем разложить полученные кривые для их дальнейшего анализа в ряд Фурье путем нахождения соответствующих коэффициентов ряда a_j , b_j согласно выражению (1.14). Таким образом, каждую гармонику ряда Фурье можно записать в следующем виде:

$$y_j = a_j \cdot \sin(\omega_j \cdot t) + b_j \cdot \cos(\omega_j \cdot t), \quad (3.12)$$

где j – номер гармоники;

ω_j – угловая частота j – той гармоники ($\omega_j = \omega \cdot j$; $\omega = 2\pi \cdot n_{\text{кол}} / 60$ - частота первой гармоники);

a_j , b_j – коэффициенты ряда Фурье j -ой гармоники.

Следует отметить, что коэффициенты ряда Фурье a_j и b_j постоянно изменяются в процессе наработки электрической машины на ресурс, поскольку значительно изменяется механическое состояние коллектора и ПУ, как это отражено в разделе 1.4. Поэтому амплитуда любой гармоники в начале, середине и в конце ресурсных испытаний будет иметь разную величину. В качестве примера на рис. 3.2 точками обозначены значения коэффициента b_j первой гармонической составляющей профиля коллектора, выделенные из экспериментальных данных, полученных в процессе наработки электродвигателя LG VCE280E02 на ресурс.

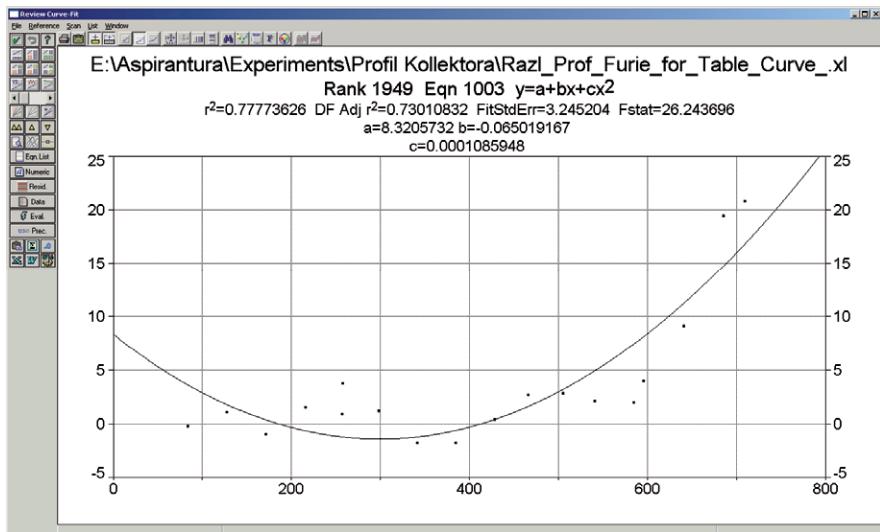


Рис. 3.2. Значения коэффициента b_j первой гармонической составляющей профиля коллектора в процессе наработки электродвигателя LG VCE280E02 на ресурс,
а также кривая регрессии значений коэффициента b_j

Для моделирования 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 было принято решение выполнять

регрессию данных, полученных экспериментальным путем. Этот этап очень важен, так как от правильности выбора типа и порядка уравнения регрессии напрямую зависит точность всех последующих вычислений. Например, для некоторых случаев подойдет линейная регрессия полиномом первого порядка, для других – экспоненциальная и т.д. Выбор типа и порядка уравнения регрессии определяется из максимального совпадения расчетной и экспериментальной кривой изнашивания щетки ЭМ.

Исходя из вышеизложенного, была выполнена регрессия данных, полученных экспериментальным путем, уравнением следующего вида:

$$y(t) = c + d \cdot t + f \cdot t^2, \quad (3.13)$$

где c, d, f – постоянные коэффициенты.

Для рассмотренного примера с помощью специализированной математической программы Table Curve были вычислены следующие значения коэффициентов полинома: $c = -0,043674521$; $d = 6,8673549 \cdot 10^{-5}$; $f = 8,1182385 \cdot 10^{-7}$. Построенная кривая регрессии значений коэффициента b_j первой гармонической составляющей профиля коллектора также представлена в окне программы Table Curve, рис. 3.2.

Таким образом, зная значения коэффициентов c, d, f какой-либо гармонической составляющей и задавшись временем t , можно вычислить значение коэффициентов ряда Фурье a_j или b_j этой гармонической составляющей для заданного времени.

Проделав процедуру регрессии для каждой из гармоник ряда Фурье, получим свой набор коэффициентов c, d, f для a_j и b_j соответственно. На рис. 3.3 приведен пример текстового файла, содержащего разделенные пробелом значения коэффициентов c, d, f для 22 гармоник профиля коллектора, разложенного в ряд Фурье.

B(J)_Commutator - Блокнот					
Файл	Правка	Формат	Вид	Справка	×
-2.997813432	0.02692115	-5.69152e-05			
0.67158911	-0.002482961	2.4448e-06			
0.31075174	-0.002149143	3.9882e-07			
-0.054237584	0.00087292	-8.60279e-07			
0.06956904	-0.000212086	1.2005e-07			
-0.066413141	0.00040504	-3.69097e-07			
0.03074454	-0.000191298	2.5407e-07			
0.00382517	-1.52135e-05	4.0818e-08			
0.04686710	-0.000259797	2.78e-07			
-0.021501471	0.00014052	-1.36806e-07			
0.00476845	-4.58084e-05	8.1481e-08			
-0.017917893	0.00011710	-1.14005e-07			
0.03244645	-0.000179859	1.9246e-07			
0.00218581	-8.69343e-06	2.3324e-08			
0.01434745	-8.92725e-05	1.1857e-07			
-0.024904928	0.00015189	-1.38411e-07			
0.02046148	-6.23782e-05	3.531e-08			
-0.012052796	0.00019398	-1.91173e-07			
0.04906606	-0.000339338	6.2971e-08			
0.06715891	-0.000248296	2.4448e-07			
-0.142753021	0.00128196	-2.71025e-06			
-3.33875e-16	1.9519e-18	5.1632e-22			

Рис. 3.3. Текстовый файл, содержащий значения коэффициентов с, d, f для 22 гармоник профиля коллектора, разложенного в ряд Фурье

Подготовка данных о механическом состоянии профиля коллектора и вибрациях якоря в ПУ для загрузки в ПО выглядит следующим образом:

1. формирование коэффициентов ряда Фурье a_j , b_j для требуемого числа гармоник на основе экспериментальных данных;
2. получение путем регрессии непрерывных функций $a_j(t)$, $b_j(t)$;
3. запись коэффициентов уравнения регрессии для функций $a_j(t)$ и $b_j(t)$ в файл(ы).

Таким образом, в результате выполнения описанных выше процедур формируются в общей сложности четыре файла: два файла с коэффициентами регрессии с, d, f для коэффициентов a_j и b_j ряда Фурье профиля коллектора и два файла с коэффициентами регрессии с, d, f для коэффициентов a_j и b_j ряда Фурье усредненной кривой виброперемещений якоря в подшипниковых узлах.

Краткий порядок действий по восстановлению кривых, описывающих профиль коллектора и вибрации якоря в ПУ, выглядит следующим образом:

- формирование для требуемого числа гармоник и заданного времени t коэффициентов ряда Фурье a_j , b_j на основе хранящихся в файлах коэффициентов регрессионного полинома c , d , f согласно выражению:

$$a_{jt} = c_a + d_a \cdot t + f_a \cdot t^2; \\ b_{jt} = c_b + d_b \cdot t + f_b \cdot t^2, \quad (3.14)$$

где j – номер гармоники;

a_{jt} , b_{jt} – коэффициенты ряда Фурье j -ой гармоники для момента времени t ;

c_a , d_a , f_a – коэффициенты регрессионного полинома для a_{jt} ;

c_b , d_b , f_b – коэффициенты регрессионного полинома для b_{jt} .

- формирование профилограммы коллектора или кривой, описывающей вибрации якоря в ПУ из N -гармоник ряда Фурье для конкретного момента времени t согласно выражению:

$$y_{it} = \sum_{j=1}^N (a_{jt} \cdot \sin(\omega_j \cdot t_i) + b_{jt} \cdot \cos(\omega_j \cdot t_i)), \quad (3.15)$$

где y_{it} – i -ое значение профилограммы для заданного времени t , соответствующее i -ой ламели;

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

j – номер гармоники;

N – максимальное число анализируемых гармонических составляющих;

$t_i = T(i-1)/K$;

$T = 2\pi/\omega$.

Следует отметить, что при выборе другого типа и порядка уравнения регрессии, число коэффициентов c , d , f в файле может быть иным, как и выражение 3.14 для получения a_j , b_j для заданного времени t .

Проведенные с помощью разработанного программного обеспечения расчеты показали, что значения виброускорений, действующих на щетку со стороны восстановленного по коэффициентам c , d , f профиля коллектора ЭМ отличаются от аналогичных значений, полученных из исходного профиля коллектора в среднем на 10-20%.

В заключение отметим, что разработанная методика учета изменения механического состояния профиля коллектора и ПУ в процессе наработки высокоскоростной ЭМ малой мощности на ресурс характеризуется достаточной степенью адекватности. Данная методика применяется в разработанном ПО для расчета ресурсных характеристик щеток универсальных коллекторных электродвигателей, описанном в следующем разделе.

3.4. Программное обеспечение для расчета ресурса скользящего контакта универсальных коллекторных электрических машин

В качестве основы программного обеспечения была взята разработанная на кафедре ЭПЭО ТПУ программа [19, 58]. Данное ПО позволяет рассчитывать процессы коммутации в коллекторных ЭМ малой мощности, в том числе и в машинах с нетрадиционными конструкциями активной зоны. Программный продукт выполнен на языке программирования Visual C++.

Автором в программу были внесены следующие изменения:

- реализован уточненный расчет контактных сопротивлений в процессе коммутации;
- разработан блок ввода информации об исходном механическом состоянии КЩУ (профиль коллектора, амплитуда вибраций со стороны подшипниковых узлов, амплитуда вибраций со стороны коллектора);
- разработан модуль, позволяющий учитывать изменения механического состояния КЩУ в процессе эксплуатации ЭМ при расчете коммутации;

- реализована разработанная 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 профиля коллектора и подшипниковых узлов в процессе эксплуатации ЭМ.

Данный программный продукт позволяет выполнять следующие виды расчетов:

- распределение магнитной индукции в воздушном зазоре с учетом реакции якоря и сдвига щеток с нейтрали;
- величины коммутирующей ЭДС в процессе коммутации;
- токи разрыва коммутируемых секций;
- энергии искрения коммутируемых секций;
- величин деформаций контактного слоя;
- электросопротивлений набегающего и сбегающего краев щетки в процессе коммутации с учетом механики КЩУ и жесткости контактного слоя щетка-коллектор;
- величины изнашивания электрических щеток.

Исходные данные для расчетов задаются в главном окне редактирования данных, изображенном на рисунке 3.4. Здесь вводятся основные параметры электрической машины: номинальное питающее напряжение и его частота (при работе на переменном токе), а также номинальная частота вращения, диаметры статора, якоря и коллектора, число ламелей коллектора, параметры якорных обмоток и некоторые другие данные.

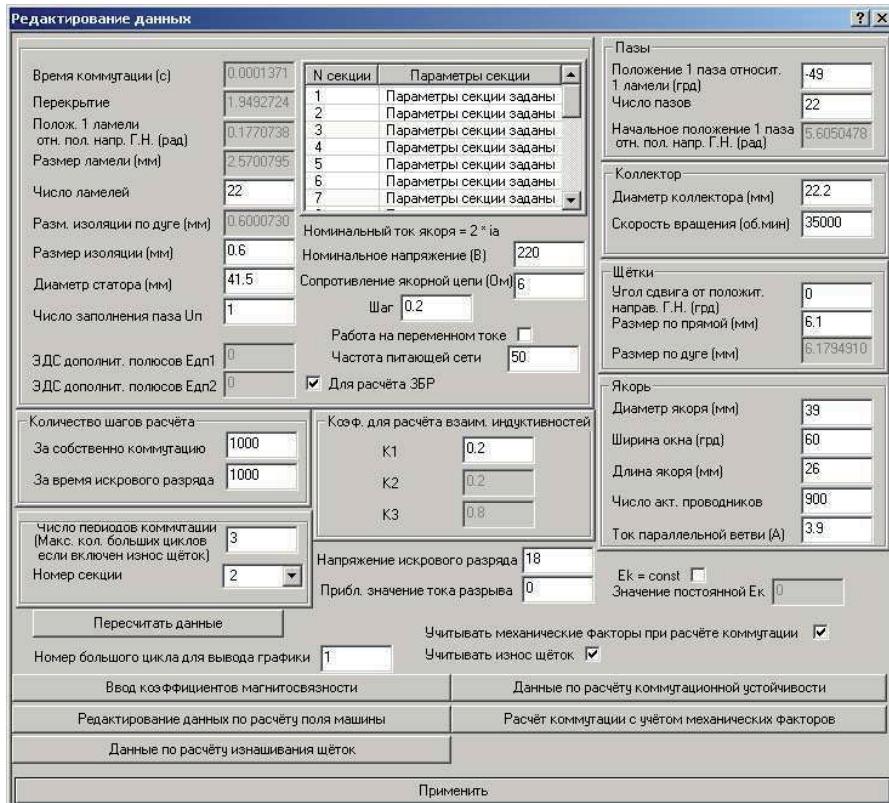


Рис. 3.4. Главное окно редактирования данных

В окне задания параметров секции, представленном на рис. 3.5, могут быть заданы: активное и индуктивное сопротивления секции и ее конфигурация (число катушек, число витков в каждой катушке, расположение секций в пазах якоря ЭМ). Таким образом, предусмотрен ввод данных для любых конструкций якорных обмоток, в том числе и для вариантов демпфированных обмоток с числом секций в пазу $U_n = 1 - 3$.

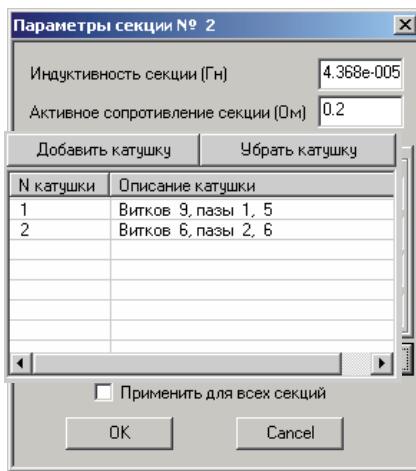


Рис. 3.5. Окно задания параметров секции

Механические параметры КЩУ, влияющие на коммутационные процессы, также вводятся в программу. К ним относятся: профиль коллектора, вибрации якоря в подшипниковых опорах, геометрические размеры и электрофизические параметры щеток, жесткость контактного слоя, параметры нажимного устройства и другие данные. Большинство перечисленных выше параметров могут быть введены посредством диалогового окна, изображенного на рис. 3.6.

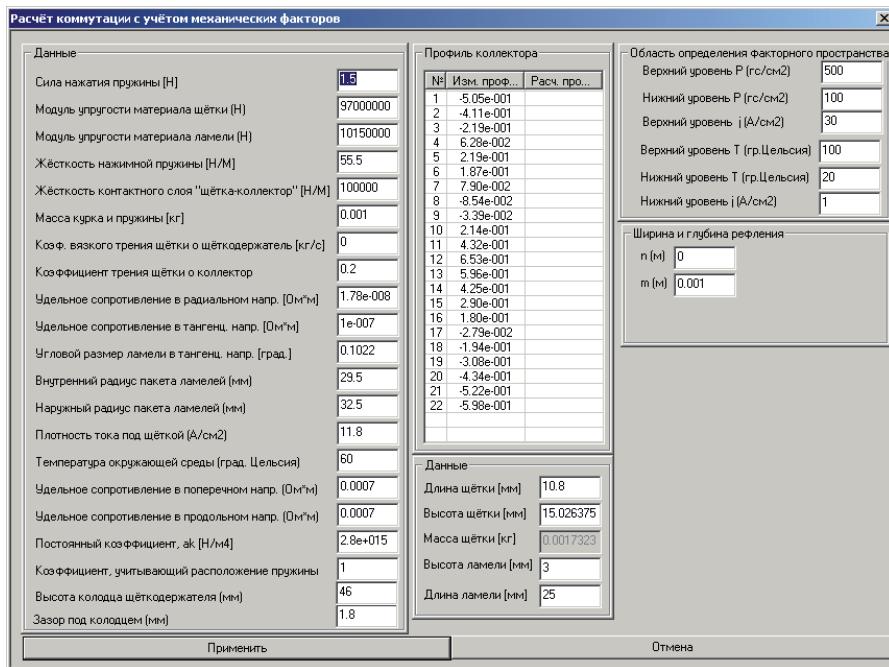


Рис. 3.6. Окно ввода параметров коллекторно-щеточного узла

Зависимости, описывающие профиль коллектора и вибрации якоря в подшипниках в процессе эксплуатации, вводятся в программу в виде предварительно подготовленных текстовых файлов, содержащих коэффициенты регрессионного полинома. Подробнее о процессе подготовки указанных файлов, а также о процедуре воссоздания из хранящихся в них коэффициентов кривых, описывающих профиль коллектора и вибрации якоря в подшипниках, изложено в разделе 3.3.

В окно, изображенное на рис. 3.7, вносятся данные для расчета изнашивания щеток: поправочные коэффициенты к фрикционной, электрокоррозионной и электроэррозионной составляющим изнашивания электрощеток, удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности, твердость, плотность материала щеток и коллекторных пластин, длительность

малого и большого расчетных циклов изнашивания щеток, а также некоторые другие параметры.

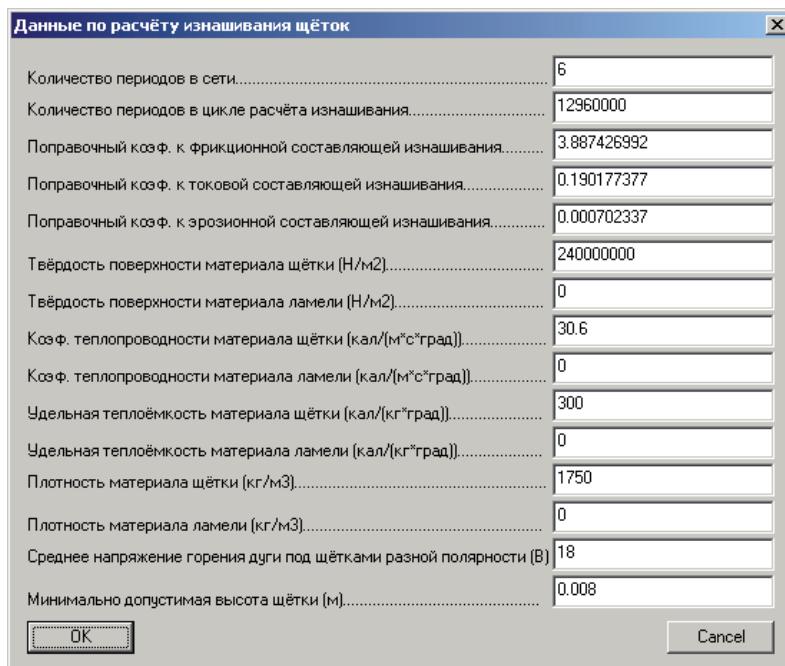
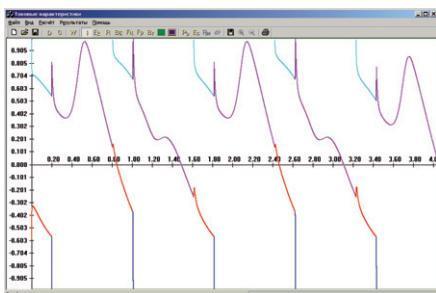


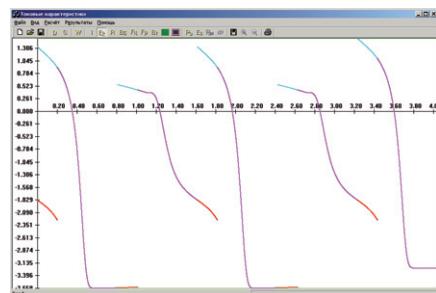
Рис. 3.7. Данные для расчета изнашивания щеток ЭМ

Также в программное обеспечение вводятся данные, необходимые для магнитного расчета электрической машины. Например, возможно задание параметров индуктора электрической машины с анизотропией магнитных свойств.

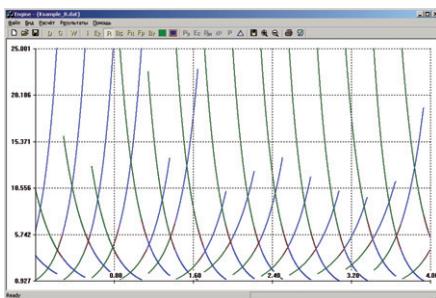
Примеры некоторых из результатов выполненных расчетов приведены на рисунке 3.8.



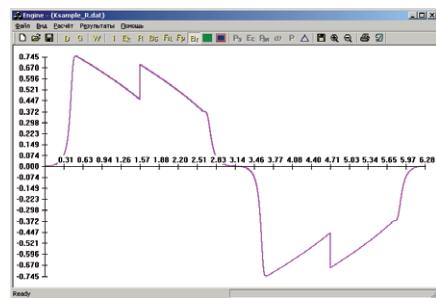
Изменение тока в коммутируемой секции (по оси OX – угол поворота якоря, рад; по оси OY –ток, А)



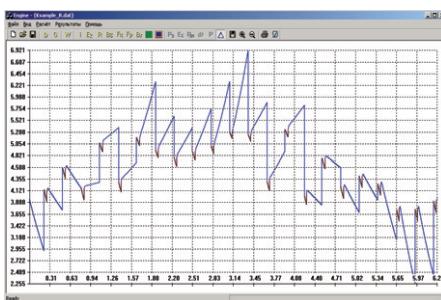
Изменение ЭДС в коммутируемой секции (по оси OX – угол поворота якоря, рад; по оси OY – ЭДС, В)



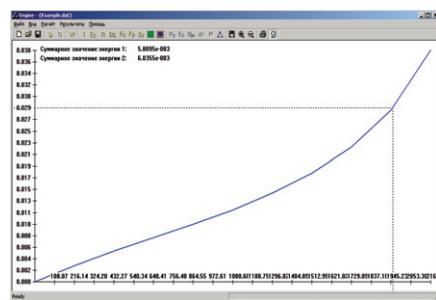
Изменение величины контактного электросопротивления при заданном механическом состоянии КЩУ (по оси OX – угол поворота якоря, рад; по оси OY – контактное сопротивление, Ом)



Распределение магнитной индукции в воздушном зазоре анизотропного индуктора (по оси OX – угол поворота якоря, рад; по оси OY – магнитная индукция, Тл)



Деформации контактного слоя (по оси OX – угол поворота якоря, рад; по оси OY – деформация, мкм)



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

Рис. 3.8.

Таким образом, на базе разработанной математической модели изнашивания щеток ЭМ, создан программный продукт, позволяющий рассчитывать процессы коммутации в коллекторных электрических машинах малой мощности и определять величину изнашивания электрощеток с учетом максимального числа факторов, характеризующих работу СК: конструктивных особенностей индуктора, конструкций обмоток якоря, а также с учетом изменения механического состояния КЩУ и подшипников исследуемого типа электрической машины в процессе эксплуатации.

Разработанное программное обеспечение позволяет проводить виртуальные эксперименты на этапе проектирования ЭМ с целью оценки влияния различных конструктивных решений на коммутационные процессы и на ресурс КЩУ. Это значительно сокращает временные и материальные затраты на проектирование и отработку различных конструкций ЭМ на физических моделях, а также на их последующие ресурсные испытания.

3.5. Исследование характеристик изнашивания высокоскоростного коллекторного электродвигателя с помощью разработанного программного обеспечения

На основе виртуальных испытаний, проведенных с помощью разработанного ПО, выполнены исследования характеристик изнашивания электрических щеток высокоскоростного универсального коллекторного электродвигателя LG VCE280E02 мощностью 1800 Вт.

На рисунке 3.12 представлена динамика изнашивания щетки рассматриваемого электродвигателя, вычисленная с использованием разработанного программного продукта на основе предложенной математической модели изнашивания щеток ЭМ и уточненных поправочных коэффициентов. Динамика изнашивания электрической щетки, полученная в ходе реальных ресурсных испытаний электродвигателя, описанных в разделе 1.4, также изображена на рисунке 3.12.

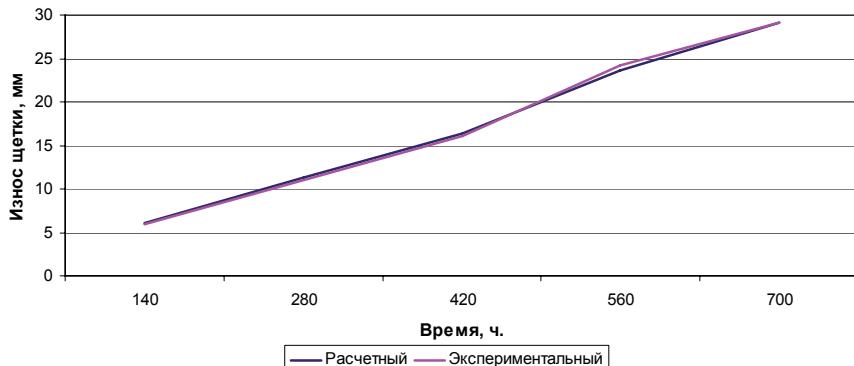


Рис. 3.12. Расчетный и реальный износ щеток электродвигателя LG VCE280E02 в процессе ресурсных испытаний

Среднее расхождение расчетных и реальных величин изнашивания щетки за время ресурсных испытаний электродвигателя не превысило 2%, что подтверждает адекватность предложенной математической модели изнашивания электрощеток и правомерность предложенных методик для прогнозирования ресурсных характеристик щеток при модернизации ЭМ.

Следует отметить, что разработанная математическая модель изнашивания щеток электрических машин малой мощности и созданное на ее базе программное обеспечение позволяют производить раздельную оценку каждой из составляющих изнашивания: фрикционной, электрокоррозионной (токовой) и электроэрозионной. На рис. 3.13 приведены гистограммы, иллюстрирующие величину изнашивания щетки в радиальном направлении для каждой составляющей изнашивания электрической щетки в процессе виртуальной наработки на ресурс электродвигателя LG VCE280E02.

Из представленных на рисунке данных следует, что основную долю в изнашивании электрической щетки составляет электрокоррозионная составляющая. Далее следуют электроэрозионная и фрикционная составляющие изнашивания щетки.

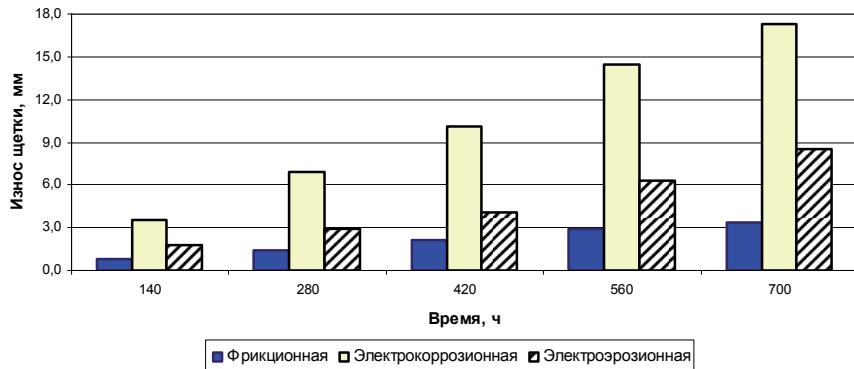


Рис. 3.13. Динамика изменения составляющих изнашивания электрической щетки за время виртуальной наработки на ресурс электродвигателя LG VCE280E02

Обобщенные количественные данные о величине и скорости изнашивания для составляющих изнашивания щеток HG25 в процессе виртуальных ресурсных испытаний электродвигателя LG VCE280E02 с использованием разработанного ПО приведены в таблице 3.1. Величина каждой составляющей изнашивания оценивалась за равные временные отрезки, равные 140 ч. Интенсивность изнашивания каждой составляющей принималась постоянной и равной отношению величины соответствующей составляющей изнашивания ко времени отрезку между измерениями (140 ч).

Таблица 3.1

Интервал времени, ч	Величина изнашивания для фрикционной составляющей, мм	Интенсивность изнашивания, мкм/ч	Величина изнашивания для токовой составляющей, мм	Интенсивность изнашивания, мкм/ч	Величина изнашивания для электророзационной составляющей, 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

Результаты вычислений, приведенные в таблице 3.1 показывают, что за время наработки высокоскоростного электродвигателя LG VCE280E02 на ресурс, величина фрикционной составляющей изнашивания щетки уменьшается на 34,2% по сравнению с первоначальным значением. Это связано с тем, что сила нажатия цилиндрической пружины на щетку ослабевает по мере износа щетки в процессе работы электрической машины.

Величина электрокоррозионной составляющей изнашивания щетки также уменьшается на 19,3% по мере работы электродвигателя. По-видимому, это объясняется так называемым «смазывающим действием электрического тока»: по мере наработки ЭМ на ресурс, микронеровности на контактной поверхности коллектора постепенно уменьшаются, это ведет к уменьшению плотности тока в СК щетка-коллектор и к уменьшению разогрева а-пятыен, что повышает их стойкость к механическому разрушению [78, 89, 109].

Значение электроэрозионной составляющей изнашивания электрощетки увеличивается на 27,7% по мере наработки электродвигателя на ресурс (таблица 3.1). Достаточно высокое значение электроэрозионной составляющей изнашивания щетки на начальном этапе ресурсных испытаний (рис. 3.13) связано, по мнению автора, с повышенным уровнем коммутационного искрения в процессе приработки элементов КЩУ. Далее следует этап эксплуатации электродвигателя с уже приработанными элементами КЩУ, поэтому уровень электроэрозионного изнашивания остается сравнительно низким. Заключительный этап эксплуатации электрической машины сопровождается постепенным ухудшением механического состояния КЩУ вследствие ухудшения геометрии контактной поверхности коллектора и механического состояния ПУ, поэтому величина электроэрозионной составляющей постепенно возрастает и в результате увеличивается почти на треть по сравнению с первоначальным значением.

На рисунке 3.14 показаны кривые, иллюстрирующие процентное содержание каждой из упомянутых выше составляющих изнашивания электрической щетки от величины общего износа для различных отрезков времени в процессе проведенных виртуальных ресурсных испытаний высокоскоростного электродвигателя.

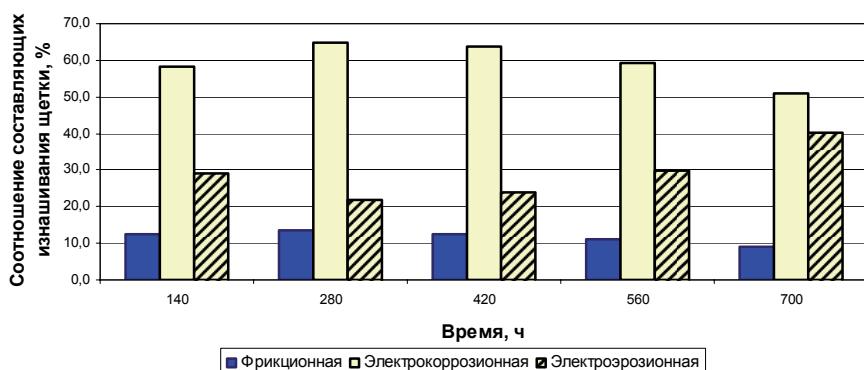


Рис. 3.14. Процентное соотношение фрикционной, электрокоррозионной и электроэрозионной составляющих изнашивания щетки электродвигателя LG VCE280E02 в процессе виртуальных ресурсных испытаний

Как следует из представленных на рисунке 3.14 данных, доля фрикционной составляющей до 420 часов наработки электродвигателя остается постоянной и равной приблизительно 13%. По мере износа щетки (и соответствующего уменьшения давления в контакте) доля фрикционной составляющей изнашивания постепенно уменьшается и, к концу ресурсных испытаний, составляет 9% от суммарного объема износа.

Доля электрокоррозионной составляющей изнашивания щетки в начальный период времени возрастает с 53 до 65% от общего объема, а затем, по мере работы электродвигателя уменьшается до 51%.

Электроэррозионная составляющая в первые 140 ч работы электродвигателя составляет 29% от общей величины изнашивания щетки. В последующем она уменьшается до 22-23%, но после 420 ч наработки электродвигателя электроэррозионная составляющая начинает нарастать и, к концу ресурсных испытаний, достигает 40% от суммарной величины изнашивания щетки.

В ходе проведенных виртуальных испытаний было вычислено расчетное время наработки электродвигателя LG VCE280E02 на ресурс - 682 ч, в то время как реальное составило 709 ч. Таким образом, время наработки рассматриваемой ЭМ на ресурс было вычислено с погрешностью в 4%. Среднее отклонение расчетных величин изнашивания щетки от фактических значений за время ресурсных испытаний рассматриваемой ЭМ не превысило 2%.

Таким образом, с помощью разработанного ПО были проведены виртуальные исследования характеристик изнашивания электрических щеток универсального коллекторного электродвигателя LG VCE280E02, в результате которых были получены данные о величине, динамике и скорости изменения каждой из составляющих изнашивания электрических щеток в процессе наработки на ресурс. Полученная в результате исследований информация может быть использована для мероприятий по оптимизации конструкций ЭМ с целью увеличения ресурса электрических щеток.

Выводы

1. Предложенный алгоритм ускоренных виртуальных испытаний щеток на ресурс, включающий процедуру оценки скорости и ускорения электроэррозионной составляющей изнашивания щеток на основе расчетов энергий коммутационного искрения в локальных циклах коммутации в начале и в конце временного шага расчета ресурса, позволяет в десятки тысяч раз сократить время виртуальных испытаний КЭМ на ресурс щеток.
2. Предложенная методика определения поправочных коэффициентов к фрикционной, электрокоррозионной и электроэррозионной составляющим математической модели изнашивания щеток для различных типоразмеров универсальных коллекторных электрических машин (КЭМ) на основе сочетания метода планирования виртуальных экспериментов и реальных ресурсных испытаний ЭМ позволяет повысить точность математической модели изнашивания щеток, используя минимальное количество экспериментальных данных ресурсных испытаний базовой ЭМ. Применение данного метода для электродвигателя LG VCE280E02 позволило уточнить поправочные коэффициенты к составляющим математической модели изнашивания электрощеток на 20-30% и достигнуть точности прогнозирования ресурса комплекта щеток в 2-4%.
3. Разработанная методика определения динамики механического состояния профиля коллектора и ПУ в процессе наработки ЭМ на ресурс, основанная на регрессии результатов гармонического анализа полученных экспериментальных данных полиномом, позволяет определить профиль коллектора и вибрации якоря в ПУ, для любого требуемого момента времени из интервала ресурсных испытаний ЭМ. Проведенные с помощью разработанного ПО расчеты показали, что значения виброускорений, действующих на щетку со стороны восстановленного по коэффициентам полинома профиля коллектора ЭМ, отличаются от аналогичных значений, полученных из исходного профиля коллектора, в среднем на 10-20%.
4. Разработанные автором блоки, реализующие разработанную математическую модель изнашивания щеток универсальных КЭМ, уточненный

расчет контактных сопротивлений в процессе коммутации, ввод информации об исходном механическом состоянии КЩУ, учет изменения механического состояния КЩУ в процессе эксплуатации ЭМ при расчете коммутации, позволили повысить точность производимых расчетов и расширить функциональные возможности базового программного обеспечения для расчета процессов коммутации в коллекторных ЭМ малой мощности, разработанное на кафедре ЭПЭО ТПУ.

5. Проведенные с использованием разработанного ПО виртуальные исследования характеристик изнашивания электрических щеток электродвигателя LG VCE280E02 позволили оценить динамику каждой из трех составляющих изнашивания щеток: фрикционной, электрокоррозионной и электроэрозионной в процессе наработки рассматриваемой ЭМ на ресурс. Так, доля каждой из составляющих изнашивания щетки в общем объеме износа за время виртуальных ресурсных испытаний рассмотренной ЭМ изменяется следующим образом: фрикционной- постепенно уменьшается с 13% на начальном этапе до 9% в конце испытаний; электрокоррозионной- в начальный период времени возрастает с 53 до 65%, затем, по мере наработки ЭМ на ресурс, уменьшается до 51%; электроэрозионной- на начальном этапе работы электродвигателя составила 29% (происходит процесс приработки элементов КЩУ и ПУ), в последующем она уменьшается до 22-23%, но во второй половине ресурсных испытаний доля электроэрозионной составляющей начинает нарастать и, к концу ресурсных испытаний, достигает 40% (ухудшение механического состояния КЩУ и ПУ). К концу виртуальных ресурсных испытаний рассмотренного электродвигателя интенсивность фрикционной и электрокоррозионной составляющих изнашивания щетки уменьшается на 34,2% (ввиду уменьшения нажатия на щетку по мере ее изнашивания) и 19,3% (усиление смазывающего действия тока) соответственно, а интенсивность электроэрозионной составляющей изнашивания электрощетки увеличивается на 27,7% (ввиду ухудшения механического состояния КЩУ и ПУ).

4. Пути увеличения ресурса скользящего контакта универсальных коллекторных электродвигателей

4.1. Исследование влияния нажатия на щетку на ресурсные характеристики универсального коллекторного электродвигателя

Выбор силы прижатия щетки к рабочей поверхности коллектора – достаточно сложная инженерная задача. Чрезмерно сильное нажатие на щетку ведет к повышению фрикционной составляющей изнашивания последней, слишком слабое нажатие приведет к неустойчивому контактированию пары щетка-коллектор и к возрастанию электроэрозионной составляющей изнашивания щетки [78, 89]. Кроме этого, в процессе эксплуатации электрической машины существенно изменяется механическое состояние КЩУ: изменяется профиль коллектора, прогрессируют вибрации якоря в подшипниковых узлах. Радиальный размер щетки электрической машины также изменяется в процессе эксплуатации ввиду изнашивания, а значит, изменяется ее масса, электрическое сопротивление и т.д. [59, 115]. В [89] приведена зависимость относительного износа щеток от давления на них, которая имеет U-образный характер и ярко выраженную область оптимального давления на щетку, рис. 4.1.

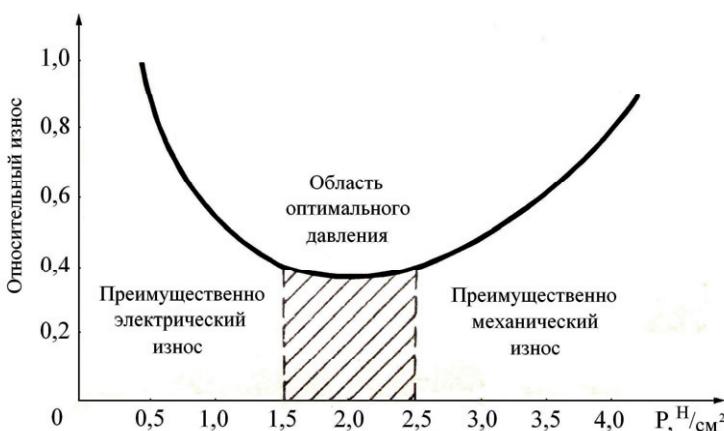


Рис. 4.1. Зависимость относительного износа щеток от давления

Обычно, усилие нажатия на щетку подбирают, руководствуясь справочной литературой [73, 74] в зависимости от скорости вращения, условий эксплуатации, плотности тока в СК щетка-коллектор. Однако, рекомендации, описанные в справочной литературе, не могут учесть всего многообразия конструктивных особенностей ЭМ и, поэтому, они могут служить лишь базовым ориентиром для последующего уточнения, проводимого, как правило, экспериментальным путем.

На рис. 4.2 приведены графики зависимости энергии искрения коммутируемых секций паза от силы нажатия на щетку при идеальной механике КЩУ для различных радиальных размеров щетки в процессе наработки на ресурс. Данные зависимости получены в ходе виртуальных исследований процесса коммутации секции паза коллекторного электродвигателя LG VCE280E02 с применением разработанного ПО. Следует отметить, что рассматриваемый электродвигатель имеет число секций, приходящихся на один паз $U_{\text{пп}}=1$.

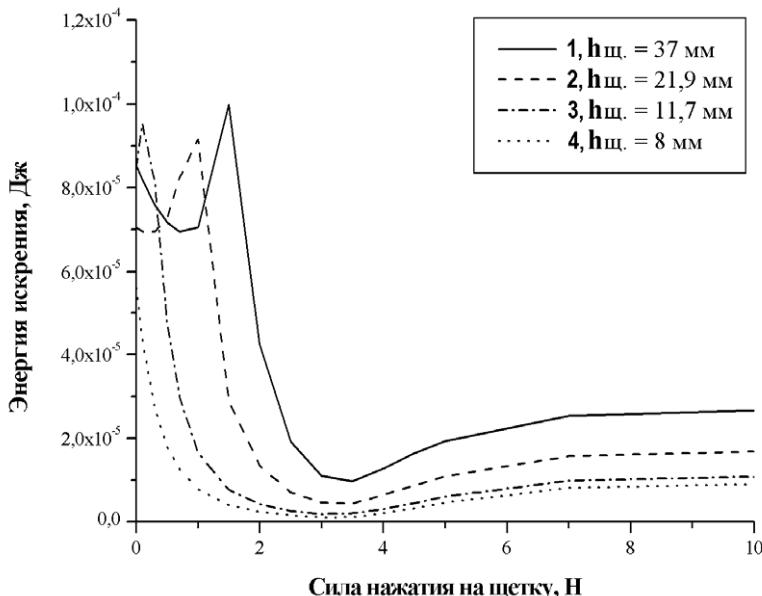


Рис. 4.2. Зависимость энергии искрения коммутируемых секций паза от силы нажатия на щетку для различных радиальных размеров щетки электродвигателя LG VCE280E02 (при идеальном контакте щетка-коллектор)

Из представленных графиков следует, что энергия искрения существенно зависит от величины нажатия пружины на щетку. Для изображенных на рис. 4.2 кривых характерно наличие максимума и минимума. Максимум, вероятно, является следствием резонансных электромагнитных явлений в коммутируемых секциях, существование которых отмечалось другими авторами [58]. Это явление безусловно представляет интерес и подлежит дальнейшему исследованию.

На примере первой кривой можно видеть, что при уменьшении силы нажатия от 3,5 до 1,5 Н (удельное давление $525-225 \text{ г/см}^2$), энергия искрения возрастает более чем в 10 раз! Из графиков, изображенных на рис. 4.2, также следует, что каждая кривая имеет область ярко выраженного диапазона оптимальных нажатий на щетку, который достаточно узок на начальном этапе эксплуатации электродвигателя, а затем расширяется по мере изнашивания щетки электрической машины.

В стандартном исполнении указанного электродвигателя нажимное устройство выполнено в виде щеткодержателя с установленной в нем цилиндрической пружиной, имеющей коэффициент жесткости $C = 55 \text{ Н/м}$. Сила нажатия пружины щеткодержателя на неизношенную щетку ЭМ (радиальный размер щетки 37 мм) составляет 3,7 Н (удельное давление 555 г/см^2), а на предельно изношенную щетку (радиальный размер 8 мм) – 2,1 Н (удельное давление 315 г/см^2), рис. 4.3.

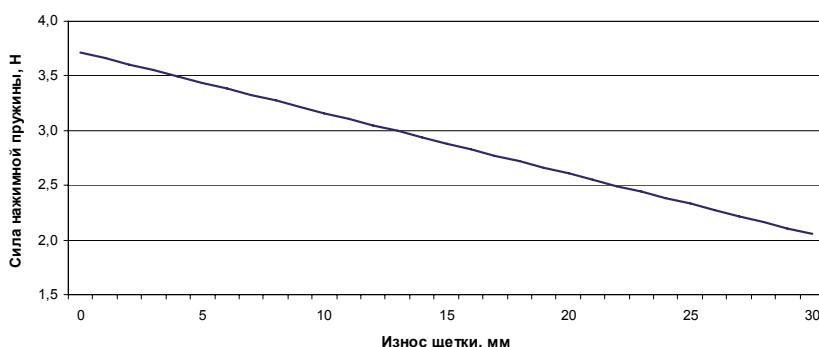


Рис. 4.3. Изменение силы нажатия на щетку в зависимости от величины ее износа

Сопоставив информацию о диапазоне нажатий на щетку данного электродвигателя с данными, представленными на рис. 4.2, можно сделать вывод о том, что сила нажатия на щетку в процессе ее изнашивания практически всегда соответствует минимальной энергии искрения секции для случая идеального контактирования щетки и коллектора.

Анализируя кривую, представленную на рисунке 4.3 и данные последнего столбца таблицы 3.1, можно сделать вывод о том, что с уменьшением степени нажатия на щетку уменьшается скорость (интенсивность) ее изнашивания. Однако это справедливо до определенного предела, обусловленного механическим состоянием КЩУ, при котором дальнейшее уменьшение нажатия на щетку в совокупности с ухудшающейся механикой КЩУ ведет к увеличению искрения и повышенному электроэрозионному износу щетки. Весь отрезок ресурсных испытаний электродвигателя можно условно разделить на три этапа. I этап (0-420 ч) наименее благоприятен с точки зрения скорости изнашивания электрощетки, так как начальное нажатие пружины на щетку достаточно высоко, что приводит к интенсивному фрикционному изнашиванию последней. II этап (420-560 ч) является наиболее благоприятным, так как сила нажатия на щетку уже достаточно мала, одновременно с этим механика КЩУ все еще удовлетворительная и не ведет к резкому возрастанию электроэрозионной составляющей изнашиванию щетки. III этап (560-709 ч) показывает, что несмотря на продолжающееся уменьшение усилия нажатия на щетку и, соответственно, уменьшение фрикционной составляющей изнашивания, скорость изнашивания щетки электродвигателя возрастает. Это может быть объяснено возросшей электроэрозионной составляющей изнашивания щеток на заключительном этапе ресурсных испытаний вследствие ухудшения механики КЩУ (раздел 1.4).

Идеальный вариант нажимного устройства должен обеспечивать строгое определенное нажатие на щетку в каждый конкретный момент эксплуатации электродвигателя для обеспечения ее минимального изнашивания. Как мы уже убедились, проанализировав рисунок 4.3 и данные таблицы 3.1, классическое

нажимное устройство с цилиндрической пружиной не способствует оптимальному изнашиванию электрощеток. По мнению автора, сила нажатия на щетку в начале эксплуатации электродвигателя (радиальный размер щетки 37 мм) несколько завышена, с целью обеспечить должную степень контактирования между щеткой и коллектором на заключительном этапе срока службы электродвигателя. Это ведет к излишнему увеличению фрикционной составляющей изнашивания щетки. Повышение ресурса комплекта щеток может быть достигнуто путем замены цилиндрической пружины на пружину с постоянным нажатием.

Автором были проведены виртуальные эксперименты по наработке на ресурс электродвигателя LG VCE280E02 с учетом изменения механического состояния КЩУ с помощью разработанного программного обеспечения. Ресурс КЩУ электродвигателя в стандартном исполнении (709 ч.) был принят за базовую величину. Относительное изменение ресурса (разность между вычисленным ресурсом и базовой величиной, отнесенная к базовой величине ресурса) в зависимости от силы нажатия на щетку, представлено на рис. 4.4. Сила нажатия на щетку выбиралась из интервала от 2 до 3,5 Н (удельное давление 300-525 г/см²) и оставалась постоянной на всем протяжении испытаний на ресурс.



Рис. 4.4. Изменение ресурса КЩУ с постоянным нажатием в сравнении с базовым вариантом для электродвигателя LG VCE280E02

Из гистограммы, представленной на рис. 4.4, можно сделать вывод, что применив нажимное устройство с постоянной характеристикой нажатия и, выбрав силу нажатия на щетку из интервала 2,8 – 3,3 Н (удельное давление 420–495 г/см²), можно добиться увеличения ресурса КЩУ данного типа электродвигателя до 10,8% с учетом изменений механического состояния КЩУ в процессе эксплуатации электродвигателя. Одновременно с этим, данные, представленные на рис. 4.4, еще раз 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%!

На рисунках 4.5 и 4.6 представлены интенсивности (скорости) фрикционной, электрокоррозионной и электроэррозионной составляющих изнашивания электрической щетки электродвигателя LG VCE280E02 для стандартной нажимной пружины и для нажимного устройства с постоянным нажатием величиной 3,3 Н.

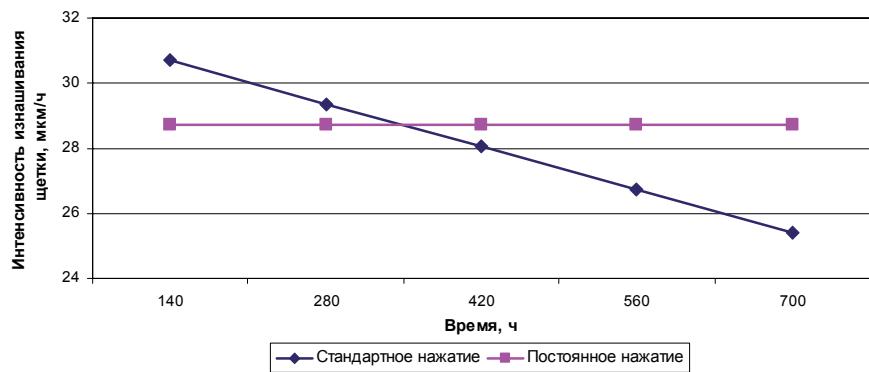


Рис. 4.5. Суммарная интенсивность фрикционной и электрокоррозионной составляющих изнашивания щетки электродвигателя LG VCE280E02

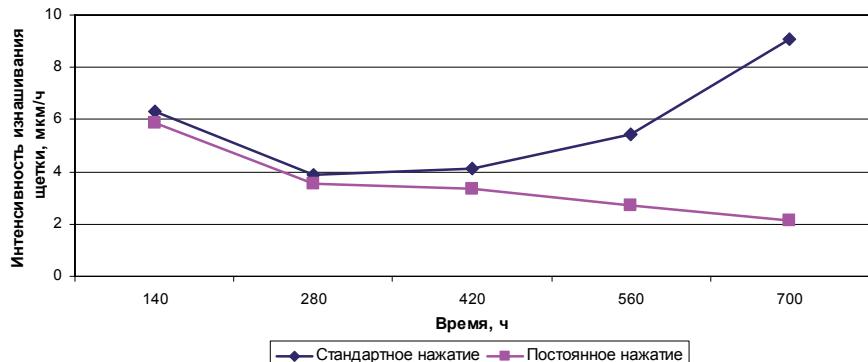


Рис. 4.6. Интенсивность электроэрозионной составляющей изнашивания щетки электродвигателя LG VCE280E02

Вычислительные эксперименты с учетом изменения механического состояния КЩУ, проведенные с использованием разработанного ПО, показали, что характеристики стандартной нажимной пружины электродвигателя LG VCE280E02 близки к оптимальным. Поэтому замена цилиндрической пружины на пружину с постоянным нажатием не является целесообразной в рассмотренной ЭМ, так как не дает значительного увеличения ресурса КЩУ. Однако предложенный подход нахождения оптимального нажатия на щетку с применением разработанного ПО может играть важную роль для других конструкций электрических машин.

4.2. Исследование влияния конструкций обмоток якоря на ресурсные характеристики универсального коллекторного электродвигателя

В связи с непрерывным ростом требований, предъявляемых к универсальным коллекторным электродвигателям в отношении их перегрузочной способности, удельной мощности, диапазону регулирования и т.д., проблема коммутации становится все более актуальной. Важную роль в снижении коммутационной напряженности электрических машин играют конструкция и параметры якорной обмотки. В Томском политехническом университете активно ведутся разработки различных вариантов инновационных конструкций демпфированных обмоток, позволяющих улучшить процесс

коммутации путем уменьшения индуктивностей секций, увеличения взаимных магнитных связей между соседними секциями.

Применение демпфированных обмоток особенно актуально в универсальных коллекторных электрических машинах, поскольку ввиду высоких удельных показателей мощности на единицу массы или объема, у них отсутствуют добавочные полюса, а также ограничен объем паза для размещения в нем различных конструкций пазовых демпферов [15, 16, 60, 61, 63, 65].

Рассмотрим один из вариантов демпфированной обмотки, разработанной с участием автора и защищенной патентом РФ №2277282 [83]. Данная обмотка состоит из многовитковых секций, которые, в свою очередь, состоят из последовательно соединенных катушек, уложенных под всеми полюсами таким образом, что близлежащие стороны соседних катушек отстоят друг от друга на одно зубцовое деление, а направление намотки любых двух соседних катушек является встречным. Число катушек на пару полюсов удовлетворяет условию:

$$2 < N \leq 1 + Z \cdot (1 - \xi) / (2 \cdot p), \quad (4.1)$$

где N – число катушек секции, приходящееся на пару полюсов;

Z – число пазов якоря; $\xi = \alpha \cdot p / \pi$ – относительный угловой размер полюсного наконечника; α – угловой размер полюсного наконечника вдоль расточки индуктора, рад; p – число пар полюсов.

При этом катушки, расположенные под каким-либо полюсом, смешены по пазам якоря на одно зубцовое деление и выполнены с одинаковым шагом по якорю. Величины шагов катушек по якорю под соседними полюсами при нечетном числе пазов и четном числе катушек на пару полюсов, либо при четном числе пазов и нечетном числе катушек на пару полюсов отличаются на одно зубцовое деление. Причем в последнем случае больший шаг по якорю имеют катушки под тем полюсом, под которым размещается большее число катушек.

На рис. 4.7 представлены секции предлагаемой обмотки с четным числом пазов якоря и четным числом катушек равной ширины на пару полюсов, у которой активные стороны расположены в пределах межполюсной дуги в процессе коммутации.

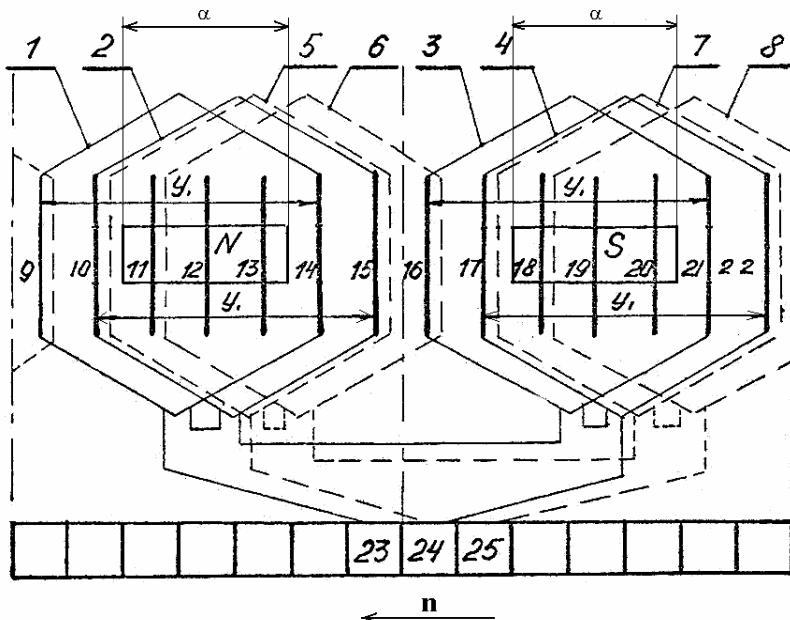


Рис. 4.7. Демпфированная обмотка якоря электрической машины

Рассмотрим работу представленной обмотки. В процессе перемещения коллектора относительно щетки, последняя сначала набегает на коллекторные пластины 23, 24 (рис. 4.7) и электрически замыкает первую секцию из катушек 1, 2, 3, 4. Затем щеткой замыкаются коллекторные пластины 24, 25 (при щеточном перекрытии больше единицы) и закорачивается вторая секция из катушек 5, 6, 7, 8. После этого коллекторная пластина 23 выходит из под щетки и завершается процесс коммутации первой секции из катушек 1, 2, 3, 4. При этом одна часть электромагнитной энергии первой секции передается посредством взаимной магнитной связи второй секции из катушек 5, 6, 7, 8, а другая ее часть выделяется в воздушном зазоре под щеткой в виде искрового разряда.

Вычислительные исследования влияния рассмотренной конструкции демпфированной обмотки якоря на ресурсные характеристики универсального электродвигателя LG VCE280E02 (число секций, приходящихся на один паз $Up=1$) проводились с использованием разработанного ПО при идеальной механике КЩУ. Это обусловлено тем, что электроэррозионная составляющая изнашивания щеток в большей степени зависит от электромагнитных параметров, и в меньшей степени от механического состояния КЩУ. Более того, в этом случае вычисления занимают значительно меньше временных ресурсов. Тенденции, выявленные при идеальном механическом состоянии профиля коллектора и ПУ правомерны и для реальных условий работы КЩУ.

Разработанный программный продукт позволяет сравнить параметры работы рассматриваемого электродвигателя как со стандартной обмоткой, так и с предложенным вариантом демпфированной обмотки якоря. Результаты проведенных расчетов на постоянном токе приведены на рисунках 4.8 и 4.9 соответственно.

Данные завершающего (искрового) этапа коммутации секций			
№ секции	Ток разрыва, А	Энергия разрыва W , Дж	Коэффициент демпфирования
1	-0.41194	-1.10023e-005	1.54373
2	-0.41194	-1.10023e-005	1.54373
3	-0.41192	-1.10012e-005	1.54369
4	-0.41190	-1.10000e-005	1.54367
5	-0.41189	-1.09991e-005	1.54365
6	-0.41186	-1.09972e-005	1.54357
7	-0.41186	-1.09972e-005	1.54357
8	-0.41185	-1.09961e-005	1.54353
9	-0.41183	-1.09949e-005	1.54351
10	-0.41182	-1.09940e-005	1.54349
11	-0.41180	-1.09930e-005	1.54343
12	-0.41183	-1.09949e-005	1.54351
13	-0.41183	-1.09949e-005	1.54351
14	-0.41181	-1.09939e-005	1.54348
15	-0.41179	-1.09926e-005	1.54346
16	-0.41178	-1.09918e-005	1.54343
17	-0.41175	-1.09898e-005	1.54335
18	-0.41175	-1.09898e-005	1.54335
19	-0.41174	-1.09888e-005	1.54332

Суммарная энергия разрыва по якорю, Дж 2.41884e-004

Рис. 4.8. Суммарная энергия искрения за один оборот якоря для варианта электрической машины LG VCE280E02 со стандартной петлевой обмоткой якоря

Данные завершающего (искрового) этапа коммутации секций			
№ секции	Ток разрыва, А	Энергия разрыва W, Дж	Коэффициент демпфирования
1	-0.42125	-6.49284e-006	1.30676
2	-0.42119	-6.48999e-006	1.30659
3	-0.42118	-6.48974e-006	1.30657
4	-0.42106	-6.48474e-006	1.30629
5	-0.42103	-6.48316e-006	1.30620
6	-0.42102	-6.48278e-006	1.30618
7	-0.42095	-6.47996e-006	1.30601
8	-0.42095	-6.47996e-006	1.30601
9	-0.42095	-6.47971e-006	1.30600
10	-0.42083	-6.47473e-006	1.30572
11	-0.42079	-6.47304e-006	1.30562
12	-0.42079	-6.47304e-006	1.30562
13	-0.42079	-6.47304e-006	1.30562
14	-0.42079	-6.47279e-006	1.30560
15	-0.42067	-6.46781e-006	1.30533
16	-0.42063	-6.46625e-006	1.30523
17	-0.42062	-6.46587e-006	1.30521
18	-0.42056	-6.46308e-006	1.30504
19	-0.42056	-6.46308e-006	1.30504

Суммарная энергия разрыва по якорю, Дж: **1.42446e-004**

OK

Рис. 4.9. Суммарная энергия искрения за один оборот якоря для варианта электрической машины LG VCE280E02 с предложенной демпфиированной обмоткой якоря

Результаты расчетов показывают, что значения токов разрыва, при применении предложенного варианта демпфиированной обмотки, практически не отличаются от значений токов при стандартной обмотке (0,412 и 0,421 А соответственно), однако, за счет снижения индуктивностей секций и повышения их взаимных индуктивностей в демпфиированной обмотке, суммарная энергия искрения по якорю за один оборот уменьшается на 41% (с $2,419 \cdot 10^{-4}$ до $1,424 \cdot 10^{-4}$ Дж). Аналогичное уменьшение энергии искрения по якорю наблюдается и при работе двигателя с предложенным вариантом демпфиированной обмотки на переменном токе – суммарная энергия искрения по якорю за один оборот уменьшается на 46%.

Представленные данные показывают, что низкая величина индуктивностей секций предложенной обмотки обеспечивает снижение количества энергии, запасенной ими к моменту их размыкания щеткой, а повышенная магнитная связь соседних секций позволяет снизить долю запасенной энергии секций, выделяемую под щеткой в виде искрения. Поэтому результирующая величина

энергии, реализуемая в воздушном зазоре под щеткой в предложенной обмотке существенно ниже, чем в стандартной петлевой обмотке.

С помощью разработанного программного обеспечения автором были проведены вычислительные эксперименты по наработке на ресурс электродвигателя LG VCE280E02 с рассмотренной конструкцией демпфированной обмотки якоря. Ресурс КЩУ электродвигателя в стандартном исполнении был принят за базовую величину. Результаты исследований показали увеличение ресурса на 9,54% при применении рассмотренной конструкции демпфированной обмотки якоря.

С использованием разработанного программного продукта также было проведено исследование влияния предложенной конструкции демпфированной обмотки якоря на ресурсные характеристики универсального электродвигателя ПК 58.03-01 с числом секций, приходящихся на один паз, равным двум ($Up=2$), Результаты проведенных расчетов на постоянном токе представлены на рисунках 4.10 и 4.11.

Данные завершающего (искрового) этапа коммутации секций			
№ секции	Ток разрыва, А	Энергия разрыва W, Дж	Коэффициент демпфирования
1	-0.37374	-8.56719e-006	1.46030
2	-0.93906	-1.00341e-004	2.70921
3	-0.37374	-8.56723e-006	1.46030
4	-0.93905	-1.00343e-004	2.70930
5	-0.37356	-8.55608e-006	1.45987
6	-0.93901	-1.00358e-004	2.70998
7	-0.37348	-8.55161e-006	1.45968
8	-0.93822	-1.00300e-004	2.71298
9	-0.37329	-8.54047e-006	1.45925
10	-0.93818	-1.00315e-004	2.71358
11	-0.37329	-8.54047e-006	1.45925
12	-0.93818	-1.00315e-004	2.71358
13	-0.37329	-8.54047e-006	1.45925
14	-0.93817	-1.00317e-004	2.71367
15	-0.37311	-8.52938e-006	1.45883
16	-0.93814	-1.00331e-004	2.71427
17	-0.37311	-8.52938e-006	1.45883
18	-0.93813	-1.00332e-004	2.71434
19	-0.37303	-8.52494e-006	1.45863

Суммарная энергия разрыва по якорю, Дж 1.19746e-003

OK

Рис. 4.10. Суммарная энергия искрения за один оборот якоря для варианта электродвигателя ПК 58.03-01 со стандартной петлевой обмоткой якоря

Данные завершающего (искрового) этапа коммутации секций			
№ секции	Ток разрыва, А	Энергия разрыва W, Дж	Коэффициент демпфирования
1	-0.53081	-7.47345e-006	1.21449
2	-0.33314	-2.27761e-006	0.93969
3	-0.53074	-7.47061e-006	1.21432
4	-0.33298	-2.21914e-006	0.91641
5	-0.53070	-7.46858e-006	1.21419
6	-0.33293	-2.21834e-006	0.91634
7	-0.53069	-7.46828e-006	1.21417
8	-0.33271	-2.21449e-006	0.91599
9	-0.53063	-7.46528e-006	1.21399
10	-0.33251	-2.21108e-006	0.91569
11	-0.53059	-7.46342e-006	1.21387
12	-0.33238	-2.20885e-006	0.91548
13	-0.53061	-7.46441e-006	1.21394
14	-0.33251	-2.21109e-006	0.91569
15	-0.53050	-7.45941e-006	1.21363
16	-0.33231	-2.20770e-006	0.91539
17	-0.53045	-7.45724e-006	1.21349
18	-0.33208	-2.20389e-006	0.91504
19	-0.53039	-7.45455e-006	1.21333

Суммарная энергия разрыва по якорю, Дж: **1.06480e-004**

OK

Рис. 4.11. Суммарная энергия искрения за один оборот якоря для варианта электродвигателя ПК 58.03-01 с предложенной демпфицированной обмоткой якоря

Результаты расчетов показывают, что при применении предложенной конструкции демпфицированной обмотки якоря, суммарная энергия искрения по якорю за один оборот существенно снизилась – на 91% (с $1,197 \cdot 10^{-3}$ до $0,106 \cdot 10^{-3}$ Дж). Аналогичное уменьшение энергии искрения по якорю наблюдается и при работе двигателя ПК 58.03-01 с предложенным вариантом демпфицированной обмотки на переменном токе.

Также автором были проведены вычислительные эксперименты по наработке электродвигателя ПК 58.03-01 с предложенной демпфицированной обмоткой якоря на ресурс. Результаты исследований при применении рассмотренной конструкции демпфицированной обмотки якоря для двигателя с $U_{\text{пп}}=2$ показали увеличение ресурса на 32,9% в сравнении со стандартным исполнением электродвигателя.

Обобщая изложенные в представленном разделе данные, можно сделать вывод, что применение предложенной конструкции демпфицированной обмотки позволяет добиться снижения энергии коммутационного искрения, и, тем

самым повысить время наработки комплекта электрощеток. Особенно эффективно применение данной конструкции демпфированной обмотки для электродвигателей с числом секций, приходящихся на один паз, большим единицы ($Un>1$), так как в данном случае происходит выравнивание коммутирующих ЭДС секций, что уменьшает энергию, выделяемую под щеткой в виде искрения. Примером этому может служить анализ результатов, полученных при исследовании электродвигателя ПК 58.03-01 с $Un=2$. Применение предложенной демпфированной обмотки якоря позволяет добиться увеличения времени наработки на ресурс электродвигателя ПК 58.03-01 на 32,9% что, по мнению автора, является существенным результатом.

Таким образом, предложенная конструкция демпфированной обмотки позволяет значительно снизить коммутационную напряженность электрических машин (особенно с $Un>1$), повысить ресурс и надежность работы КЩУ.

4.3. Исследование влияния анизотропии индуктора на ресурсные характеристики универсального коллекторного электродвигателя

Распределение магнитного поля в индукторе и воздушном зазоре электрических машин без дополнительных полюсов существенно влияет как на ток разрыва в секции, так и на величину разброса между указанными токами секций паза якоря. Для уменьшения данных показателей целесообразно снижение поперечной реакции якоря.

С этой целью необходимо увеличивать магнитное сопротивление индуктора для поперечного магнитного потока с помощью тех или иных конструктивных мер, в частности, выполнением сужений в тех участках магнитной цепи, которые оказывают наибольшее воздействие на поперечный магнитный поток и наименьшее воздействие на основной магнитный поток. Наиболее приемлемыми с этой точки зрения являются средние части полюсов индуктора.

Сердечник статора серийной коллекторной электрической машины обычно либо не имеет сужений нормального продольного сечения в средней части полюса, либо имеет незначительные сужения, например, выполненные по типу, представленному на рис. 4.12.

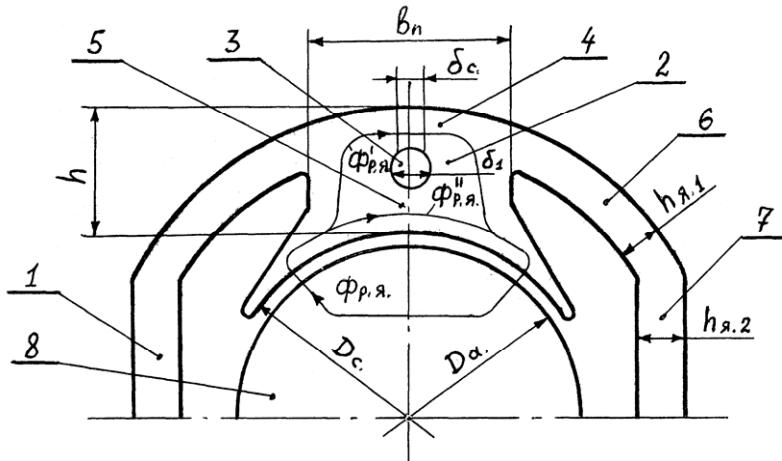


Рис. 4.12. Сердечник статора серийной коллекторной электрической машины, имеющий незначительные сужения нормального продольного сечения в средней части полюса

В данной конструкции сердечник статора 1 в средней части основного полюса 2 имеет технологическое отверстие 3 по всей длине сердечника статора 1. Средняя длина воздушного зазора отверстия 3 в средней части полюса 2 составляет величину δ_1 . Данное отверстие 3 разделяет полюс 2 на наружную часть 4 и внутреннюю часть 5, представляющие собой сужения с длиной δ_c . Геометрическая высота полюса 2 в средней его части равна величине h , а ширина сердечника полюса равна величине b_n . Яремные части 6, 7 сердечника статора 1 выполнены с высотами $h_{y.1}$ и $h_{y.2}$ соответственно. Максимальный диаметр окружности, вписанной в расточку сердечника статора 1, равен величине D_c , которая превышает диаметр D_a якоря 8.

Вследствие наличия отверстия 3 в полюсе 2 сердечника статора 1 магнитный поток реакции якоря $\Phi_{p.y.}$ (поперечный магнитный поток) в средней

части полюса 2 разветвляется на две составляющие $\Phi_{\text{р.я.}}'$ и $\Phi_{\text{р.я.}}''$, проходящие по наружной части 4 и внутренней части 5 полюса 2. Поскольку нормальные продольные сечения в средней части полюса 2 для потоков $\Phi_{\text{р.я.}}'$ и $\Phi_{\text{р.я.}}''$ достаточно велики и соизмеримы с сечениями яремных частей 6, 7 сердечника статора 1, то величина магнитной проводимости сужения в средней части полюса 2 в этом случае близка к магнитной проводимости яремных частей. Это означает, что величина поперечного магнитного потока $\Phi_{\text{р.я.}}$ в статоре под действием намагничивающей силы реакции якоря может быть соизмеримой с потоком основных полюсов. В результате наиболее сильно проявляется, так называемое, размагничивающее действие реакции якоря, следствием которого является ослабление основного магнитного потока.

Кроме того, при этом наблюдается значительное искажение равномерного распределения магнитного поля под основными полюсами, что в машинах без добавочных полюсов, особенно в реверсивных, приводит к ухудшению условий коммутации секций якоря. В коллекторных машинах переменного тока в этом случае повышается индуктивное сопротивление якоря, что ухудшает рабочие характеристики машин. Это является недостатком рассмотренной и аналогичных ей конструкций индукторов.

В Томском политехническом университете активно ведется разработка различных конструкций индукторов для электрических машин без дополнительных полюсов с целью снижения поперечной реакции якоря.

Рассмотрим конструкцию индуктора с анизотропией магнитных свойств, разработанную с участием автора и защищенную патентом РФ №2313879 [84] (рис. 4.13). Данная конструкция позволяет добиваться снижения магнитного поля реакции якоря в сердечниках статоров коллекторных ЭМ.

Сердечник статора коллекторной электрической машины предложенной конструкции содержит яремные части и основные полюса, имеющие в средних частях сужения нормальных продольных сечений, и отличается тем, что

величина площади нормальных продольных сечений сужений основных полюсов выбрана из условия:

$$\frac{S_c}{S_{я.ср.}} \leq \left[0,8988 - \frac{0,02657}{(0,02955 + \delta_c^*)} \right] e^{-\left(\frac{1}{5512,8 \cdot D_c^{2,5}} \right)}, \quad (4.2)$$

где S_c – площадь нормальных продольных сечений сужений в средних частях основных полюсов, см^2 ;

$S_{я.ср.}$ – средняя площадь нормальных продольных сечений яремных частей статора, см^2 ;

$\delta_c^* = \delta_c / \delta_{c,\max}$ – относительная длина сужений в средних частях основных полюсов;

δ_c – длина сужений в средних частях основных полюсов, см;

$\delta_{c,\max} = (b_n - 2 \cdot h_{я.ср})$ – максимальная длина сужений в средних частях основных полюсов, см;

b_n – ширина сердечника полюса, см;

$h_{я.ср}$ – средняя высота яремных частей статора, см;

D_c – макс. диаметр окружности, вписанной в расточку статора, м.

Данная зависимость установлена на основе расчетов магнитных цепей ряда серийных универсальных электродвигателей мощностью от 60 до 2000 Вт.

Выявленная зависимость площади нормального продольного сечения сужений в средних частях основных полюсов сердечника статора от средней площади нормальных продольных сечений яремных частей, диаметра расточки статора и длины сужений, обеспечивает существенное снижение магнитного поля реакции якоря за счет увеличения магнитного сопротивления поперек основных полюсов.

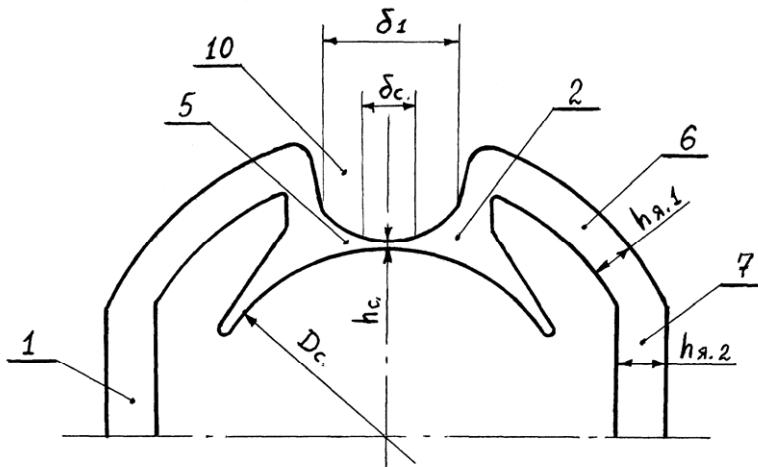


Рис. 4.13. Сердечник статора коллекторной электрической машины с сужением нормального продольного сечения в средней части полюса, выполненного в виде узкой перемычки с внутренней стороны полюса.

В данной конструкции сердечник статора 1 в средней части основного полюса 2 имеет продольный паз 10 по всей длине сердечника статора 1. Средняя длина воздушного продольного паза 10 в средней части полюса 2 составляет величину δ_1 .

Сущность изобретения состоит в создании сужений нормальных продольных сечений в средних частях основных полюсов сердечника статора такой величины, которая при данных геометрических размерах сердечника статора и выбранной (из технологических и конструктивных соображений) длины сужений обеспечивает снижение поперечного магнитного потока приблизительно в два раза, что эквивалентно его снижению при увеличении воздушного зазора между полюсом и якорем ориентировано в полтора раза. Компьютерное моделирование и экспериментальные исследования показали, что именно при таком снижении поперечного магнитного потока становится заметен технический эффект от его снижения, сказывающийся в улучшении коммутации секций якоря и в увеличении основного магнитного потока полюсов, а также электромагнитного момента ЭМ [58]. В качестве примера на

на рисунках 4.14 и 4.15 представлено распределение магнитной индукции в воздушном зазоре стандартного и анизотропного индукторов.

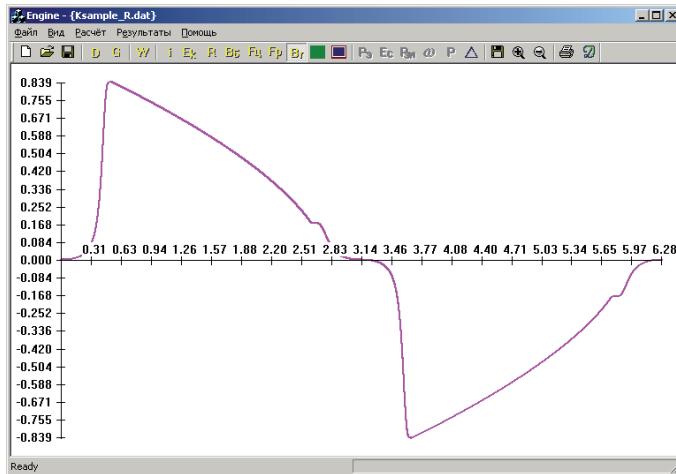


Рис. 4.14. Распределение магнитной индукции в воздушном зазоре стандартного индуктора (по оси ОХ – угол поворота якоря, рад; по оси ОY – магнитная индукция, Тл)

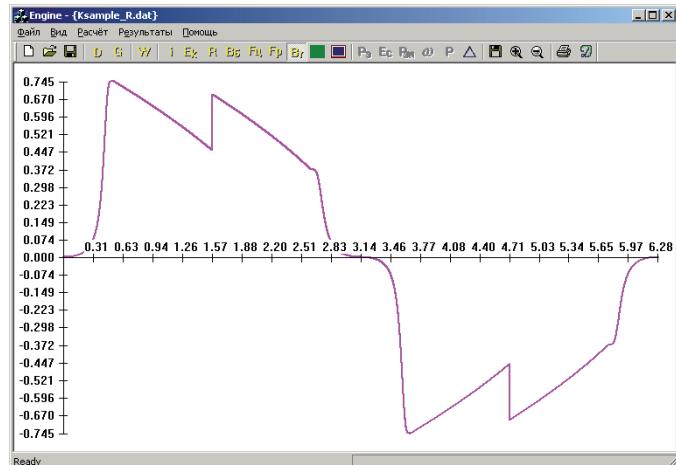


Рис. 4.15. Распределение магнитной индукции в воздушном зазоре анизотропного индуктора (по оси ОХ – угол поворота якоря, рад; по оси ОY – магнитная индукция, Тл)

С помощью разработанного ПО автором были проведены исследования влияния анизотропии индуктора на ресурсные характеристики универсального

электродвигателя LG VCE280E02. В качестве индуктора с анизотропией магнитных свойств была выбрана конструкция, представленная на рис. 4.13. Результаты расчета суммарной энергии искрения по якорю за один оборот при использовании предложенной конструкции индуктора представлены на рис. 4.16.

№ секции	Ток разрыва, А	Энергия разрыва W , Дж	Коэффициент демпфирования
1	-0.20899	-2.14714e-006	1.17052
2	-0.20894	-2.14606e-006	1.17046
3	-0.20893	-2.14583e-006	1.17045
4	-0.20881	-2.14292e-006	1.17013
5	-0.20880	-2.14248e-006	1.17011
6	-0.20877	-2.14192e-006	1.17007
7	-0.20877	-2.14192e-006	1.17007
8	-0.20876	-2.14169e-006	1.17005
9	-0.20865	-2.13885e-006	1.16974
10	-0.20863	-2.13842e-006	1.16972
11	-0.20863	-2.13829e-006	1.16970
12	-0.20865	-2.13885e-006	1.16974
13	-0.20865	-2.13885e-006	1.16974
14	-0.20864	-2.13863e-006	1.16973
15	-0.20853	-2.13587e-006	1.16942
16	-0.20852	-2.13543e-006	1.16940
17	-0.20849	-2.13487e-006	1.16936
18	-0.20849	-2.13487e-006	1.16936
19	-0.20848	-2.13465e-006	1.16934
4			
Суммарная энергия разрыва по якорю, Дж			
-4.70600e-006			
<input type="button" value="OK"/>			

Рис. 4.16. Суммарная энергия искрения за один оборот якоря для электродвигателя LG VCE280E02 с предложенной конструкцией анизотропного индуктора

Результаты, представленные на рисунках 4.8 и 4.16 показывают, что при применении предложенной конструкции анизотропного индуктора суммарная энергия искрения по якорю за один оборот уменьшается на 80,5% (с $2,419 \cdot 10^{-4}$ до $0,4706 \cdot 10^{-4}$ Дж).

Автором были выполнены вычислительные эксперименты по наработке на ресурс электродвигателя LG VCE280E02 с рассмотренной в данном разделе анизотропной конструкцией индуктора как отдельно, так и в различных комбинациях с нажимным устройством с постоянной характеристикой нажатия или с демпфированными обмотками якоря. Результаты проведенных исследований, а также результаты исследований ресурсных характеристик данного электродвигателя при других изменениях в его конструкции (разделы

4.1 и 4.2), представлены в таблице 4.1. Ресурс КЩУ электродвигателя в стандартном исполнении составил 709 часов и был принят за базовую величину.

Таблица 4.1

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

Проведя анализ представленных в таблице результатов, автор приходит к выводу, что наиболее целесообразными вариантами увеличения ресурса рассмотренной модели электродвигателя являются варианты 5-7 позволяющие достичь увеличения ресурса КЩУ более чем на 40%.

Следует отметить, что у других моделей электродвигателей полученные результаты могут быть иными, поэтому следует анализировать все предполагаемые изменения в конструкции электрической машины как отдельно, так и в совокупности с другими предполагаемыми изменениями.

По результатам проведенных исследований, можно сделать вывод о том, что предложенная конструкция индуктора с анизотропией магнитных свойств отдельно, либо в сочетании с другими изменениями в конструкции, позволяет значительно снизить коммутационную напряженность электрической машины и тем самым повысить ресурс и надежность ее работы.

Выводы

9. Проведенные виртуальные ресурсные испытания электродвигателя LG VCE280E02 с учетом изменения механического состояния КЩУ в процессе наработки на ресурс показали, что применение нажимного устройства с постоянной характеристикой нажатия на щетку и правильно подобранный его

величиной обеспечивает увеличение ресурса щеток электродвигателя более чем на 10% в сравнении со штатным нажимным устройством со спадающей характеристикой нажатия. Это обеспечивается благодаря уменьшению величины электроэрозионного изнашивания щеток вследствие лучших условий контактирования щетки с коллектором в условиях прогрессирующего ухудшения механического состояния коллектора и ПУ.

10. Расчеты показывают, что предложенные конструкции демпфированных обмоток якоря позволяют снизить суммарную энергию искрения под щеткой электродвигателя LG VCE280E02 ($Un=1$) на 41%, что обеспечивает увеличение ресурса щеток более чем на 9% .

11. Проведенные вычислительные исследования с использованием разработанного ПО показали, что применение предложенных конструкций демпфированных обмоток якоря особенно эффективно для ЭМ с $Un>1$, так как в данном случае происходит выравнивание коммутирующих ЭДС секций паза якоря, что уменьшает энергию, выделяемую под щеткой в виде искрения. Примером этому может служить анализ результатов, полученных при виртуальных исследованиях электродвигателя ПК 58.03-01 ($Un=2$) с предложенной конструкцией демпфированной обмотки якоря, позволившей снизить суммарную энергию искрения под щеткой на 91%.

12. Проведенные виртуальные исследования электрической машины LG VCE280E02 показали, что предложенная конструкция индуктора с увеличенным магнитным сопротивлением в поперечном направлении позволяет добиться увеличения ресурса щеток рассмотренного электродвигателя более чем на 26% вследствие улучшенных условий коммутации секций якоря.

13. Проведенные виртуальные исследования по наработке электродвигателя LG VCE280E02 на ресурс показали, что при совместном использовании предложенных технических решений (анизотропный индуктор, демпфированные обмотки якоря и нажимное устройство с постоянным нажатием величиной 3,1 Н) возможно увеличение ресурса щеток данного электродвигателя более чем на 40%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенных исследований получены следующие основные результаты:

1. Создана математическая модель изнашивания щеток универсальных коллекторных электрических машин, учитывающая электрофизические параметры контактных материалов, основные факторы, характеризующие работу СК, коммутационную напряженность СК, определяемую электромагнитными параметрами коммутируемых секций якоря, а также состояние профиля коллектора и подшипниковых узлов в процессе эксплуатации, которая позволяет прогнозировать ресурс щеток на стадиях проектирования электрических машин и создания различных модификаций серийных изделий.
2. Предложена методика прогнозирования динамики механического состояния профиля коллектора и подшипниковых узлов в процессе наработки электрической машины на ресурс, основанная на регрессии результатов гармонического анализа полученных экспериментальных данных полиномом, позволяющая определять профиль коллектора и параметры вибраций якоря в подшипниках, для любого момента времени в процессе виртуальных ресурсных испытаний ЭМ.
3. Разработан метод определения поправочных коэффициентов к фрикционной, электрокоррозионной и электроэррозионной составляющим изнашивания щеток для различных модификаций базовой ЭМ на основе сочетания метода планирования виртуальных экспериментов и реальных ресурсных испытаний 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 электроэррозионной 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, действующих на щетки, позволяющие повысить точность измерений (погрешности измерений снижаются на десятки процентов) и расширить функциональных 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 скользящего контакта подобных электрических машин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авилов, В. Д. Коммутационная напряженность и неидентичность коммутационных циклов в машинах постоянного тока / В. Д. Авилов // Вопросы повышения коммутационной способности машин постоянного тока: Сб. науч. тр. / Всесоюзный научно-исследовательский институт электромашиностроения. – Л. 1982. – с. 60-68.
2. Авилов, В. Д. Методы анализа и настройки коммутации машин постоянного тока / В. Д. Авилов. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 237 с.
3. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 278 с.
4. Адлер, Ю. П. Введение в планирование эксперимента. – М.: Металлургия, 1969. – 155 с.
5. Антипов, В. Н. Результаты стендовых и эксплуатационных испытаний щеткодержателей с рулонной пружиной постоянного давления / В. Н. Антипов, В. И. Мельник // Вопросы повышения коммутационной способности машин постоянного тока: Сб. науч. тр. / Всесоюзный научно-исследовательский институт электромашиностроения. – Л. 1982. – с. 113-122.
6. Арсентьев, О. В. Коллекторно-щеточные узлы с повышенной механической стабильностью контактирования / О. В. Арсентьев, Р. Ф. Бекишев, С. И. Качин // Тезисы докладов региональной научно-технической конференции “Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири”.–Иркутск, ГТУ, 1995.–с. 25.
7. Арсентьев, О. В. Влияние механики контакта на коммутационную устойчивость широкорегулируемых машин постоянного тока / О. В. Арсентьев, С. И. Качин // Тезисы докладов V Всесоюзной научно-технической конференции “Динамические режимы работы электрических машин и электроприводов”. – Каунас. 1988. – ч.2, с. 117.
8. Арсентьев, О. В. Оптимизация работы скользящего контакта коллекторной электрической машины / О. В. Арсентьев, С. И. Качин //

- Тезисы докладов краев. научно-технической конференции “Автоматизация электроприводов и оптимизация режимов электропотребления”. – Красноярск, 1988, с. 94-95.
9. Арсентьев, О. В. Расчет сопротивлений коллекторно-щеточного узла с учетом упругих свойств скользящего контакта / О. В. Арсентьев, С. И. Качин // Рукопись представлена Томск. политехн. ин-том. Деп. в Информэлектро 9 июля 1986, № 405-эт. – 13 с.
 10. А.С. 1228174 (СССР). Способ измерения износа коллекторов и контактных колец электрических машин./ Бекишев Р.Ф., Данекер В.А., Качин С.И. Опуб. в Б.И. № 16, 1986.
 11. Барков, А. В. Диагностика и прогнозирование технического состояния подшипников качения по их вибраакустическим характеристикам / А. В. Барков // Судостроение. – 1985. – № 3. – С. 21-23.
 12. Бег, Э. И. Исследование работоспособности щеточно-коллекторного узла электрических машин методами планирования эксперимента / Э.И. Бег, М. В. Брандт, М. П. Никушина // Материалы V всесоюзной конференции по коммутации электрических машин. Ч.1. Омск, 1976. – с.12.
 13. Бекишев, Р. Ф. Повышение энергоэффективности коллекторных электрических машин на стадии проектирования / Р. Ф. Бекишев, **О. С. Качин** // Материалы всероссийской научно-технической конференции. «Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования». – Томск, 2006. – с. 143–145.
 14. Бекишев, Р. Ф. Моделирование электрических характеристик скользящего контакта щетка-коллектор в процессе наработки на ресурс с учетом механических факторов / Р. Ф. Бекишев, С. И. Качин, **О. С. Качин** // Материалы международной научно-технической конференции «Электро-механические преобразователи энергии». – Томск, 2007. – с. 43–46.
 15. Бекишев, Р. Ф. Демпфированные обмотки коллекторных электрических машин с повышенными коммутиирующими свойствами / Р. Ф. Бекишев, С. И. Качин, В. Г. Кошкин // Тезисы докладов научно-технической (подотраслевой) конференции “Проблемы электромашиностроения”. Л.:

- ВНИИэлектромаш, 1991, с. 172.
16. Бекишев, Р. Ф. Методика расчета магнитного поля машин с демпфированными обмотками на якоре / Р. Ф. Бекишев, С. И. Качин, Т. М. Рузайкина // Тезисы докладов XV научно-технической конференции “Электронные и электромеханические системы и устройства”. Томск, ГНПП “Полюс”, 1996, с. 118-119.
 17. Бекишев, Р. Ф. Исследование физических свойств скользящего контакта коллекторных электрических машин. Дис. на соиск. учен. степени канд.техн.наук. Томск, ТПИ, 1969. 197 с.
 18. Бекишев, Р. Ф., Качин, С. И. Электрические свойства скользящего контакта из углеродных материалов и их влияние на коммутацию. – В сб. Исследование специальных электрических машин и машинновентильных систем. Томск, 1984, с. 109-114.
 19. Боровиков, Ю. С. Программно-аппаратные средства для оценки коммутационной напряженности коллекторных электрических машин : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : Спец. 05.09.01 / Ю. С. Боровиков ; Томский политехнический университет; Научный руководитель С. И. Качин. – Защищена 26.12.2003. – Томск, 2003. — 158 л. : ил.
 20. Биргер, И. А. Техническая диагностика / И. А. Биргер. – М.: Машиностроение, 1978. – 239 с.
 21. Болотин, В. В. Прогнозирование ресурсов машин и конструкций / В. В. Болотин. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.
 22. Бромберг, Э. М. Тестовые методы повышения точности измерений / Э. М. Бромберг, К. Л. Куликовский. – М.: Энергия, 1978, 176 с.
 23. Вегнер, О. Г. Теория и практика машин постоянного тока / О. Г. Вегнер. – М.: Госэнергоиздат, 1961. 272 с.
 24. Вегнер, О. Г. Расчет процесса коммутации машин постоянного тока при помощи ЭЦВМ // Изв. вузов. Электромеханика, 1966, № 4, с. 400-409.
 25. Герасимов, В. Г. Методы и приборы электромагнитного контроля промышленных изделий / В. Г. Герасимов. – М.: Энергия, 1983. - 272 с.
 26. Гемке, Р. Г. Неисправности электрических машин / Р. Г. Гемке. – Л.:

Энергия, 1969. – 272 с.

27. Гольдин, А. С. Вибрация роторных машин / А. С. Гольдин. – М.: Машиностроение, 2000. – 344 с.
28. Григорьев, А. В. Диагностика в технике. Понятия, цели, задачи / А. В. Григорьев, В. Н. Осотов // Электротехника. – 2003. – № 4. – С. 46–51.
29. Дайерд, Стюарт Р. Обнаружение повреждений подшипников качения путем статистического анализа вибраций : Конструирование и технология машиностроения / Пер. с англ. – М.: Мир, 1978, – Т. 100. – №2. – С. 23–31.
30. Данекер, В. А. Коммутирующие свойства контакта и коммутационная напряженность электрических машин малой мощности с углеродными коллекторами. Дисс. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. Томск, 1981 (ТПИ). — 218 л. : ил.
31. Данекер, В. А. Высокотехнологичные токопроводящие композиционные материалы в электромашиностроении / В. А. Данекер, С. И. Качин // Тезисы докладов первой Международной конференции по электромеханике и электротехнологии. Сузdalь, 1994, с. 15.
32. Денисов, В. А. Устройства для контроля механических факторов коммутации коллекторных электрических машин / В. А. Денисов, В. Е. Шатерников // Электротехника. – 1971. – № 5. – С. 29–32.
33. Дридзо, М. Л. Исследование радиальных механических колебаний щеток электрических машин / М. Л. Дридзо, И. Ю. Глебова // Электротехника. – 1984. – № 8. – С. 11–13.
34. Дридзо, М. Л. Исследование трения при радиальных колебаниях щеток электрических машин / М. Л. Дридзо, О. С. Темиш, И. Ю. Глебова // Трение и Износ. – 1983. – № 1. – С. 164–166.
35. Ермолин, Н. П. Электрические машины. М.: Высшая школа, 1975. 296 с.
36. Ермолин, Н. П. Надежность электрических машин / Н. П. Ермолин, И. П. Жерихин. – Л.: Энергия, 1976. – 248 с.
37. Зиннер, Л. Я. Исследование влияния механических факторов на коммутацию коллекторных электрических машин / Л. Я. Зиннер, А. И. Скороспешкин, Э. К. Дамм // Известия ТПИ. – 1968. – Т. 190. – С. 247–256.

38. Изоботенко, Б. А. Планирование эксперимента в электромеханике / Б. А. Изоботенко, Н. Ф. Ильинский, И. П. Копылов. – М.: Энергия, 1975. 184 с.
39. Калинин, М. С. Расчет и наладка коммутации машин постоянного тока на основе новых инструментальных средств моделирования и управления: Автoref. дис... канд. техн. наук. Воронеж. гос. техн. ун-т, Воронеж, 2004. 18 с.
40. Карасев, М. Ф. Основная причина искрения щеток машин постоянного тока / М. Ф. Карасев, В. Н. Козлов, В. И. Тимошина // Коммутация машин постоянного тока: Науч. тр. / Омский ин-т инж. ж.-д. трансп. Омск, 1970. Т. 112. Выпуск 1. С. 5-12.
41. Карасев, М. Ф. Влияние щеточного контакта на процесс коммутации в машинах постоянного тока / М. Ф. Карасев, Н. Ф. Коцарев // Материалы V всесоюзной конференции по коммутации электрических машин / Омский ин-т инж. ж.-д. трансп. Омск, 1976г. С. 5-8.
42. Карасев, М. Ф. К вопросу об искрении на набегающем крае щеток / М. Ф. Карасев, Н. Ф. Коцарев, А. М. Трушков // Коммутация коллекторных электрических машин (теория и практика): Науч. тр. / Омский ин-т инж. ж.-д. трансп. Омск, 1972. Т. 133. С. 123-127.
43. Карасев, М. Ф. Влияние температуры на величину падения напряжения в щеточном контакте и на условия коммутации / М.Ф. Карасев, В.А. Серегин, Б.М. Туркин // Научные труды ОмНИИТа. Т.88. Омск, 1968, вып.2, с.54-64.
44. Карасев, М. Ф. Исследование влияния влажности окружающего воздуха на вольт-амперные характеристики электрощеток. Коммутация машин постоянного тока / М.Ф. Карасев, В.Н. Козлов, Л.В. Ложкин и др. // Научные труды ОмНИИТа. Т.112. Омск, 1970, вып.2, с.53-56.
45. Копылов, И. П. Электрические машины / И. П. Копылов. – М.: Логос, 2000. 607 с.
46. Костенко, М. П. Электрические машины: Т. 1 / М. П. Костенко, Л. М. Пиотровский. – Л.: Энергия, 1972. 544 с.
47. **Качин, О. С.** Диагностирование механического состояния коллекторно-

- щеточного узла высокоскоростной электрической машины в процессе ресурсных испытаний / О. С. Качин // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 311. – № 4. – С. 118–122.
48. **Качин, О. С.** Методика определения вибрационных параметров работы подшипниковых узлов для бесконтактных измерительных систем / О. С. Качин // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312. – № 2. – С. 349–352.
49. **Качин, О. С.** Методика определения профиля коллектора в динамических режимах работы электрических машин / О. С. Качин // Материалы науч.-практ. конф. «Инновации в атомной отрасли: проблемы и решения». – Северск, 2007. – С. 33.
50. **Качин, О. С.** Методика экспериментального определения вибрационных параметров работы подшипниковых узлов электрических машин / О. С. Качин // Материалы международной науч.-техн. конф. «Электромеханические преобразователи энергии». – Томск, 2007. – С. 46–49.
51. **Качин, О. С.** Прогнозирование ресурса щеток коллекторных электрических машин / О. С. Качин // Тезисы докладов XVII науч.-техн. конф. «Электронные и электромеханические системы и устройства», ФГУП НПЦ «Полюс». – Томск, 2006. – С. 158–160.
52. **Качин, О. С.** Программно-аппаратный комплекс для бесконтактного контроля микроперемещений элементов машин и механизмов и измерения электрических, тепловых и прочностных характеристик электропроводящих материалов, керамики, наноматериалов и тонкопленочных структур // XIV международная науч.-практ. конф. «Современные Техника и Технологии». – Томск, 2008. – С. 373–375.
53. **Качин, О. С.** Экспериментальные исследования механического состояния коллекторно-щеточного узла высокоскоростной электрической машины в процессе ресурсных испытаний / О. С. Качин // Труды XIII международной науч.-практ. конф. «Современные Техника и Технологии». – Томск, 2007. – Т. 1. – С. 430–432.
54. **Качин, О. С.** Комплекс дистанционного контроля механического состояния формы и размеров ответственных элементов машин и

- механизмов / О. С. Качин, Ю. С. Боровиков, В. Ю. Саблуков // Оборудование. Регион. – 2005. – № 2 (10). – С. 16–17.
55. **Качин, О. С.** Микропроцессорная система управления коллекторным двигателем / О. С. Качин, М. А. Нечаев // Труды VI Всероссийской науч.-практ. конф. «Системы автоматизации в образовании, науке и производстве». – Новокузнецк: СибГИУ, 2007. – С. 228 - 229.
 56. **Качин, О. С.** Разработка высокоточного многофункционального измерительного комплекса для бесконтактного контроля механического состояния элементов машин / О. С. Качин, В. Ю. Саблуков // Труды XIII международной науч.-практ. конф. «Современные Техника и Технологии». – Томск, 2007. – Т. 1. – С. 428–430.
 57. Качин, С. И. Высокоиспользованные коллекторные электрические машины малой мощности : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук : 05.09.01 / С. И. Качин ; Томский политехнический университет; науч. рук. Г. А. Сипайлова. – Защищена 03.06.2002. – Томск, 2002. – 430 л.
 58. Качин, С. И. Разработка и исследование электрических машин малой мощности с коллекторами из углеродных волокнистых материалов : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : Спец. 05.09.01. / С. И. Качин ; Томский политехнический институт; Науч. рук.: Г. А. Сипайлова. – Томск : Б.и., 1982. – 214 л. : ил.
 59. Качин, С. И., Боровиков Ю.С., Качин О.С. 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.
 60. 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.
 61. 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.
62. Качин, С. И. Применение расчетных и измерительных комплексов для обеспечения качества электродвигателей для электроинструмента / С. И. Качин, Ю. С. Боровиков, **О. С. Качин**, В. Ю. Саблуков, Е. Н. Клыжко // Материалы международной науч.-техн. конф. «Электромеханические преобразователи энергии». – Томск, 2005. – С. 78–81.
 63. 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.
 64. Качин, С. И. Расчет изнашивания щеток коллекторных электрических машин / С. И. Качин, **О. С. Качин** // Материалы международной науч.-техн. конф. «Электромеханические преобразователи энергии». – Томск, 2005. – С. 74–77.
 65. Качин, С. И. Ресурсные характеристики скользящего контакта электрических машин с нетрадиционными конструкциями элементов активной зоны / С. И. Качин, Ю. С. Боровиков, **О. С. Качин** // Труды XI Международной науч.-техн. конф. «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты». Крым, Алушта, 2006. – С. 285–286.
 66. Кончиц, В. В. Триботехника электрических контактов / В. В. Кончиц, В. В. Мешков, Н. К. Мышкин. – Минск: Наука и техника, 1986. – 256 с.
 67. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин : учебник / И. П. Копылов. — 3-е изд., перераб. и доп. — М. : Высшая школа, 2001. — 327 с.
 68. Крагельский, И. В. Трение и износ. –М.:Машиностроение, 1968. – 480с.
 69. Крагельский, И. В. Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
 70. Крагельский, И. В. Площадь касания шероховатых поверхностей. В кн.:

- Электрические контакты. М.-Л.: ГЭИ, 1958, с.7-24.
71. Крючков, Ю. С. Влияние зазора на вибрацию и шум подшипников качения // Вестник машиностроения. – 1989. – №8. – С. 30-39.
 72. Ланцош, К. Практические методы прикладного анализа / К. Ланцош. – М.: Физматгиз, 1961. – 524 с.
 73. Лившиц, П. С. Скользящий контакт электрических машин / П. С. Лившиц. – М: Энергия, 1974. – 271 с.
 74. Лившиц, П. С. Вольт-амперные характеристики и трение скольжения материалов / П. С. Лившиц // Вестник электропромышленности, 1958, № 2, с. 43-46.
 75. Мамхегов, М. А. Трение и износ электрических контактов / М. А. Мамхегов, А. В. Чичинадзе // Справочник. Инженерный журнал. – М. – 2003. – № 9. – С. 53-61.
 76. Налимов, В. В. Теория эксперимента. – М.: Наука, 1971. 207 с.
 77. Налимов, В. В. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов / В. В. Налимов, Н. А. Чернова. – М.: Наука, 1965. 340 с.
 78. Намитоков, К. Е. Электроэррозионные явления / К. Е. Намитоков. – М.: Энергия, 1978. – 456 с.
 79. Нэллин, В. И. Механика скользящего контакта / В. И. Нэллин. – М.: Транспорт, 1966. – 126 с.
 80. Омельченко, В. Т. Теория процессов на контактах / В. Т. Омельченко. – Харьков, Высшая школа, 1979. 129 с.
 81. 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; Опубл. 10.08.2004, Бюл. № 22. – 13 с.: ил.
 82. Пат. 2269192 РФ, МПК H02K 3/12. Якорь коллекторной электрической машины / С. И. Качин, Ю. С. Боровиков, О. С. Качин. Заявлено 05.05.2004; Опубл. 27.01.2006, Бюл. № 03.–8 с.: ил.
 83. Пат. 2277282 РФ, МПК H02K 3/12. Обмотка якоря электрической машины / С. И. Качин, Ю. С. Боровиков, О. С. Качин. Заявлено 16.03.2005; Опубл. 27.05.2006, Бюл. № 15. – 10 с.: ил.

84. 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; Опубл. 27.12.2007, Бюл. № 36. – 15 с.: ил.
85. 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; Опубл. 20.06.2008, Бюл. № 17. – 12 с.: ил.
86. 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; Опубл. 10.08.2008, Бюл. № 22. – 10 с.: ил.
87. Положительное решение по заявке на изобретение №2007117290/28. Способ бесконтактного измерения вибраций контролируемой поверхности / С. И. Качин, О. С. Качин. Заявлено 08.05.2007.
88. Приборные шариковые подшипники: Справочник / Под ред. К. Н. Явленского; В. Н. Нарышкина; Е. Е. Чаадаевой. – М.: Машиностроение, 1981. – 351 с.
89. Рейтт, Е. К. Электрические контакты / Е. К. Рейтт, И. Н. Саксонов. – М.: Воениздат, 1971. – 160 с.
90. Руссов, В. А. Спектральная вибродиагностика. – Пермь: 1996. – 173 с.
91. 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.
92. 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.
93. 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.

94. Скороспешкин, А. И. О коммутации машин постоянного тока малой мощности // Изв. вузов. Электромеханика, 1959, № 2, с. 73-75.
95. Скороспешкин, А. И. Метод моделирования профиля коллектора для исследования влияния состояния поверхности коллектора на электрические и механические характеристики щеточного контакта / А. И. Скороспешкин, Л. Я. Зиннер, Э. К. Дамм // Известия ТПИ. – 1968. – Т. 190. – С. 292–294.
96. Скороспешкин, А. И. Прибор для исследования динамического состояния поверхности коллекторов и вибрации щеток / А. И. Скороспешкин Л. Я. Зиннер, А. А. Козлов // Известия вузов. Электромеханика. – 1970. – № 9. – С. 983–987.
97. Спиридонов, А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.
98. Стукач, В. С. Исследование влияния коммутационного искрения на долговечность коллекторно-щеточного узла машин постоянного тока малой мощности. Дисс. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. Томск, 1972 (ТПИ).
99. Тейлор, Д. И. Идентификация дефектов подшипников с помощью спектрального анализа. – М.: Мир, 1986. – Т. 102. – №2. – С. 1-8.
100. Толкунов, В. П. Теория и практика коммутации машин постоянного тока / В. П. Толкунов. – М.: Энергия, 1979. – 224 с.
101. Толкунов, В. П. О критерии коммутационной напряженности машин постоянного тока / В. П. Толкунов, Н. Ф. Озерной, Ж. А. Киреева // Вопросы электротехники: Вестник Харьковского политехнического института. 1976. Выпуск 1. №116. С. 3-6.
102. Толкунов, В. П. Теория и практика коммутации машин постоянного тока. – М.: Энергия, 1979. – 224 с.
103. Фиш, А. Я. Коллекторы электрических машин на пластмассе / А. Я. Фиш, Ю. М. Тарнопольский, К. А. Акунц, А. В. Петров. – М.: Государственное энергетическое издательство, 1963. – 192 с.
104. Харди, Г. Х. Ряды Фурье / Г. Х. Харди. – М.: Физматгиз, 1965. – 156 с.
105. Харламов, В. В. Выбор диагностических параметров для оценки

- качества работы коллекторно-щеточного узла / В. В. Харламов, Ю. Я. Безбородов, В. Н. Козлов // Повышение коммутационной надежности тяговых и других коллекторных машин: Межвуз. темат. сб. науч. тр. / Омский ин-т инж. ж.-д. трансп. Омск, 1988. С. 42-48.
106. Харламов, В. В. Диагностика состояния коллекторно-щеточного узла машин постоянного тока / В. В. Харламов, Ю. Я. Безбородов, В. Н. Козлов // Коммутация в тяговых электродвигателях и других коллекторных машинах: Межвуз. темат. сб. науч. тр. / Омский ин-т инж. ж.-д. трансп. Омск, 1985. С. 44-47.
107. Харламов, В. В. Оценка влияния механических факторов на процесс коммутации машин постоянного тока в условиях эксплуатации / В. В. Харламов, Р. В. Сергеев, П. К. Шкодун, А. В. Проненко // Электромагнитные процессы в электромеханических преобразователях энергии. – Омск : Изд-во ОмГУПСа, 2006. – С. 28–34.
108. Харламов, В. В. Методы и средства диагностирования технического состояния коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей и других коллекторных машин постоянного тока. – Омск: ОмГУПС, 2002. – 233 с.
109. Хольм, Р. Электрические контакты / Р. Хольм. – М.: Издательство иностранной литературы, 1961. – 464 с.
110. Чичинадзе, А. В. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А. В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2003. – 575 с.
111. Чичинадзе, А. В. Трение и износ электрических контактов. Т. 2. Трение, изнашивание и смазка.: Справочник / А. В. Чичинадзе, Н. К. Мышкин; Под ред. И. В. Крагельского, В. В. Алисина. – М.: Машиностроение, 1979. – С. 334-350.
112. Hall, S. Product quality monitoring in a process industry / S. Hall, D. F. Pearce // 4th International Conference on Advanced Factory Automation, York, UK, 1994, pp. 79–84.
113. Hudson, B. HV motor condition monitoring - the end user's view // IEE Colloquium Design, Operation and Maintenance of High Voltage (3.3kV to 11kV) Electric Motors for Process Plant, Glasgow, UK, 1999, pp. 7.

114. **Kachin, O. S.** Elaboration of mathematical models and calculation methods of estimation of resource characteristics of electromechanical collector converters // XI International Scientific and Practical Conference «Modern Techniques and Technologies». – Tomsk, 2005. – P. 85–87.
115. **Kachin, O. S.** Non-contact inspection of rotating machine parts / O. S. Kachin, S. I. Kachin // European Journal Of Natural History. – 2008. – № 2. – P. 85.
116. Ramasamy, P. Finite-element modeling of eddy current nondestructive testing phenomena: Dissertation Abstracts International. – 1981.
117. Ross, W. H. Condition monitoring of electrical machines in ScottishPower // IEE Colloquium on Condition, London, UK, 1995, pp. 3.
118. Samuels, U. Automated surface measurement via laser tomography / U. Samuels, R. Parkin, and H. Kreitlow // IEE Colloquium on 'Innovations in Manufacturing Control Through Mechatronics, Newport, UK, 1995, pp. 8.
119. Sikora, R. A new probe for eddy current testing of low conductivity materials / Ryszard Sikora, Mieczyslaw Komorowski, Tomasz Chady // The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering. – 1998. – № 3. – P. 393–397.
120. Stegemann, D. Monitoring and vibrational diagnostic of rotating machinery in power plants / D. Stegemann, W. Reimche, U. Sudmersen, O. Pietsch // First IEE/IMechE International Conference on Power Station Maintenance - Profitability Through Reliability, Edinburgh, UK, 1998, pp. 39–44
121. Swinnerton, B. R. Phenomena encountered in graphite-copper sliding systems / B. R. Swinnerton // 4th Internat. Research Sympisium on Electrical Contact Phenomena. (Swansea, 1968), p. 67-70.
122. Thorsen, O. Condition monitoring methods, failure identification and analysis for high voltage motors in petrochemical industry / O. Thorsen, M. Dalva // Eighth International Conference on Electrical Machines and Drives, Cambridge, UK, 1997, pp. 109–113
123. Mamkhegov, M. A. Electrodynamic Wear-out in Electromechanical Systems / M. A. Mamkhegov, A. V. Chichinadze // World International Congress on Tribology «Worldtrib – 2001». – Wienna: 2001. – Vol. 2. P. – 214-218.



MoreBooks!
publishing



yes i want morebooks!

Покупайте Ваши книги быстро и без посредников он-лайн – в одном из самых быстрорастущих книжных он-лайн магазинов! окружающей среде благодаря технологии Печати-на-Заказ.

Покупайте Ваши книги на
www.more-books.ru

Buy your books fast and straightforward online - at one of world's fastest growing online book stores! Environmentally sound due to Print-on-Demand technologies.

Buy your books online at
www.get-morebooks.com



VDM Verlagsservicegesellschaft mbH

Heinrich-Böcking-Str. 6-8
D - 66121 Saarbrücken

Telefon: +49 681 3720 174
Telefax: +49 681 3720 1749

info@vdm-vsg.de
www.vdm-vsg.de

