На правах рукописи

Саблуков Виталий Юрьевич

МОДЕЛИ, МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ДЛЯ ОЦЕНКИ МЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СКОЛЬЗЯЩЕГО КОНТАКТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Специальности 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты
05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2008

Работа выполнена на кафедре электропривода и электрооборудования
Томского политехнического университета

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор Качин С. И.

Научный консультант: кандидат технических наук,
доцент Боровиков Ю. С.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Плохов И. В.

кандидат технических наук,
доцент Орлов Ю. А.

Ведущая организация: ООО Научно-производственное предприятие
«Томская электронная компания», г. Томск

Защита диссертации состоится «26» декабря 2008 года в 15-00 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.11 при Томском политехническом университете в ауд. 217 8-го учебного корпуса по адресу: 634034, г. Томск, ул. Усова, 7.

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

Автореферат разослан «25» ноября 2008 года.

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

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Актуальность темы. Коллекторные электродвигатели являются широкорегулируемыми машинами и используются современной промышленностью там, где необходимы большая перегрузочная способность и регулирование частоты вращения. Основной проблемой эксплуатации этого типа машин является проблема обеспечения коммутационной устойчивости.

Существенное влияние на процесс коммутации и на коммутационную устойчивость оказывает механическое состояние скользящего контакта (СК). Однако существующим методам и приборам для оценки этого параметра присущ ряд недостатков, которые значительно искажают действительные данные.

Более 30 % отказов в эксплуатации машин постоянного тока общепромышленного применения происходят из-за неисправностей коллекторно-щеточного узла (КЩУ), а в крупных прокатных двигателях 44…46 %. В малых коллекторных машинах выходы из строя КЩУ составляют 34…48 % от общего числа отказов машин. На долю щеточно-контактного аппарата турбогенераторов от 200 до 800 МВт приходится до 20% отказов, а применение бесщеточных систем возбуждения не позволяет снять остроту проблемы, поскольку частота отказов у них не меньше.

Мониторинг и диагностика состояния узла токосъема электрической машины (ЭМ) позволяют проводить ремонт исходя из текущего состояния объекта контроля, что существенно снижает эксплуатационные расходы и повышает надежность работы.

По проблеме диагностики СК и надежности ЭМ выполнено множество экспериментальных и теоретических исследований. Большой вклад в изучение данных проблем внесен рядом ведущих специалистов и научных коллективов: В. Д. Авиловым, Р. Ф. Бекишевым, М. Л. Дридзо, В. Н. Забоиным, Л. Я. Зиннером, С. И. Качиным, А. А. Козловым, В.И. Нэллиным, И.В. Плоховым, А. И. Скороспешкиным, И.И. Туктаевым, В. В. Харламовым и многими другими.

Разработка новых конструкций коллекторных ЭМ, высокие скорости их вращения, воздействие внешних механических факторов и работа машин при критических параметрах ставят задачу объективной оценки механических факторов, обуславливающих качество коммутации.

Поддержание требуемого уровня функционирования электрических машин в процессе эксплуатации возможно путем совершенствования систем технического обслуживания на основе проведения мероприятий по контролю текущего состояния ответственных узлов, прежде всего – КЩУ.

Таким образом, разработка более совершенных методов, приборов контроля и диагностики механического состояния СК ЭМ является актуальной проблемой.

Цель и задачи исследования. Целью работы является разработка комплекса расчетных моделей и практических устройств для оценки механического состояния СК ЭМ.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи:

- разработать метод восстановления профиля коллектора по перемещениям щетки в колодце щеткодержателя;
- разработать метод выделения из измеренного сигнала истинного профиля коллектора и вибрации вала двигателя в радиальном направлении;
- разработать метод оценки состояния СК ЭМ в неустановившихся режимах работы, основанный на анализе нестационарных сигналов;
- разработать автоматизированный двухканальный диагностический комплекс нового поколения для оценки механического состояния СК и подшипниковых узлов ЭМ в динамических режимах работы;
- разработать регулируемый электропривод разгонной установки диагностического комплекса с адаптивным регулятором;
- провести экспериментальные исследования с целью подтверждения предложенных методов и математических моделей на модельных установках и реальных ЭМ.

Методы исследования. Поставленные задачи решались с применением методов математического и компьютерного моделирования, регрессионного и спектрального анализов, вейвлет преобразования, дифференциального и интегрального исчислений. В процессе расчетов, имитационного моделирования и анализа математических зависимостей применялись специализированные пакеты программ MATLAB/Simulink, MathCAD 14, электронные таблицы Excel. Разработка оригинальных программных продуктов осуществлялась в средах Atmel AVR Studio 4 и Borland Delphi 7.0. Экспериментальные исследования проводились на специально разработанных установках и реальных ЭМ.

Научная новизна.

- предложен метод восстановления профиля коллектора по перемещениям щетки в колодце щеткодержателя и определения механических параметров узла скользящего токосъема на основе интегрального уравнения Вольтера;
- предложен метод разделения сигнала бесконтактного профилометра на профиль коллектора и паразитные вибрации, основанный на спектральном анализе измеренного сигнала и последующей идентификации составляющих по их частотам в спектре;
- разработаны структура и модель регулируемого электропривода разгонной установки диагностического комплекса с адаптивным регулятором, реализующие обратную связь по скорости на основе сигнала профилометра;
- получен специальный вейвлет, позволяющий с наибольшей эффективностью анализировать состояние СК на основе профилометрических данных в различных режимах работы ЭМ.

Практическая значимость.

- разработаны алгоритмы и созданы компьютерные программы аналого-цифрового преобразования и обработки результатов измерений аппарат-

но-программного комплекса для диагностирования механического состояния СК ЭМ в различных режимах работы;

- разработан регулируемый электропривод разгонной установки диагностического комплекса с адаптивным регулятором, позволяющий расширить функциональные возможности комплекса в части передачи данных в режиме реального времени;
- создан автоматизированный двухканальный диагностический комплекс с расширенными функциональными возможностями для оценки механического состояния СК ЭМ;
- разработана компьютерная программа, позволяющая восстанавливать профиль коллектора по перемещениям щетки в колодце щеткодержателя;
- разработаны алгоритмы и создана компьютерная программа, позволяющая проводить идентификацию компонент спектрограммы по их частотам.

Основные положения, выносимые на защиту.

- математическая модель для восстановления профиля коллектора по перемещениям щетки в колодце щеткодержателя и определения механических параметров узла скользящего токосъема;
- метод разделения сигнала бесконтактного профилометра на профиль коллектора и паразитные вибрации, основанный на спектральном анализе измеренного сигнала и последующей идентификации составляющих по их частотам в спектре;
- специально синтезированный вейвлет, позволяющий анализировать колебания СК на основе профилометрических данных в различных режимах работы ЭМ;
- автоматизированный двухканальный диагностический комплекс с расширенными функциональными возможностями для оценки механического состояния СК ЭМ.

Реализация результатов работы. Выполнение ряда задач диссертационной работы осуществлялось в соответствии с государственным контрактом № 02.442.11.7107 от 26 октября 2005 г. в рамках ФЦНТП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям науки и техники» на 2002-2006 годы».

Диагностический комплекс для бесконтактного контроля профиля вращающихся частей машин в статических и динамических режимах их работы внедрен в АО «Устькаменогорская ТЭЦ» (г. Усть-Каменогорск, Казахстан) и прошел испытания в ОАО «Бурейская ГЭС» (п. Талакан, Амурская область).

Двухканальный аппаратно-программный диагностический комплекс «Микрокон М» внедрен на Автозаводской ТЭЦ (г. Нижний Новгород), имеющей установленную мощность 580 МВт.

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

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и получили одобрение на международном научном симпозиуме «The 8th Korea-Russia International Symposium on Science and Technology» (Tomsk, 2004); на XI, XIII и XIV международных научно-практических конференциях «Современные

техника и технологии» (Томск, 2005, 2007 и 2008); на второй научно-технической конференции с международным участием «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» (Новосибирск, 2005); на международных научно-технических конференциях «Электромеханические преобразователи энергии» (Томск, 2005, 2007); на V международной конференции «Автоматизированный электропривод» (Санкт-Петербург, 2007); на XVII научно-технической конференции «Электронные и электромеханические системы и устройства» (Томск, 2006); на научных семинарах кафедр «Электропривода и электрооборудования» и «Электрические машины и аппараты» Томского политехнического университета.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 печатных работ, в том числе 3 статьи в журналах по списку ВАК, 1 свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ и 1 отчет по НИР.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех основных разделов, заключения, выполнена на 135 страницах машинописного текста, содержит 63 страницы иллюстраций, список литературы из 144 наименований на 18 страницах и приложений на 3 страницах. Общий объем диссертации составляет 159 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель работы, основные задачи, научная новизна и практическая ценность исследований.

В первой главе проведен обзор современного состояния работ в области оценки механического состояния СК.

Для динамического контроля профиля коллекторов применимы оптический, радиолокационный, емкостный, электростатический и вихретоковый методы бесконтактного измерения перемещений. Наиболее широкое признание получил метод вихретокового контроля, который характеризуется высокой стабильностью результатов измерений, помехоустойчивостью к магнитным и электрическим полям машины, простотой реализации, надежностью и сравнительно низкой стоимостью аппаратуры.

Основным недостатком вихретокового датчика является зависимость его показаний от температурных изменений электропроводности материала коллектора и недостаточная разрешающая способность. В целях улучшения разрешающей способности датчика, повышения его чувствительности к зазору, уменьшения чувствительности к колебаниям электропроводности материала коллектора необходимо использовать термостабильные марки ферритов и увеличивать рабочую частоту до 5 МГц и выше.

Помимо указанных погрешностей существуют температурная погрешность, погрешности, обусловленные неидентичностью установки датчика и различием удельных сопротивлений коллекторных пластин, которые могут быть устранены при использовании метода базовой коррекции результатов измерений, основанного на допущении линейности выходной характеристики

профилометра в заданном диапазоне изменений температуры окружающей среды и удельного электрического сопротивления контролируемых поверхностей.

К недостаткам рассмотренных диагностических комплексов для оценки механического состояния СК можно отнести: наличие лишь одного измерительного канала, в связи с чем в сигнале присутствуют погрешности, обусловленные вибрациями в направлении коллектора; отсутствие возможности передавать результаты измерений в режиме реального времени; невозможность хранить в памяти профилограммы за несколько оборотов; необходимость размещения на исследуемой электрической машине датчика синхронизации для реализации методики базовой коррекции измерений, что усложняет применение диагностической системы.

Главным образом механические условия контактирования щетки с коллекторными пластинами определяют радиальные и тангенциальные колебания щетки. Радиальные колебания щеток описываются дифференциальным уравнением, с различными способами учета профиля коллектора, силы трения, контактной жесткости и др. Общим недостатком рассмотренных математических моделей является то, что описание КЩУ имеет допущение в виде единичного щеточного перекрытия.

До настоящего времени не проводились теоретические исследования, в которых по перемещениям щеток производится оценка профиля коллектора и качества работы КЩУ в целом, позволяющие подтвердить использование колебаний щеток, как диагностического сигнала для оценки качества работы КЩУ и определения уровня искрения щеток машины.

Одной из главных причин вибраций вала в направлении коллектора являются дефекты подшипников качения. Для оценки состояния подшипникового узла применяют различные методы, наиболее широкое применение получили спектральные методы анализа, позволяющие определять тип дефекта подшипника и этап его развития.

На основе проведенного анализа поставлены задачи диссертационных исследований.

Вторая глава посвящена разработке модели, описывающей колебательный процесс КЩУ с любым щеточным перекрытием; созданию метода выделения из измеренного сигнала профиля коллектора и вибраций в его направлении, основанного на спектральном анализе, а также синтезу оптимального вейвлета для анализа колебаний СК в различных режимах работы, включая нестационарные, на основе профилометрических данных.

В колебательной системе КЩУ (рис. 1) источниками возбуждения колебаний являются вибрация коллектора вместе с якорем, вибрации корпуса электрической машины и внешние возмущения со стороны объекта носителя.

Система описывается нелинейным дифференциальным уравнением:

$$m\ddot{y} + H\operatorname{sign}\left(\dot{y}\right) + \left(k_1 + k_2\right) y = k_2 s(t), \quad (1)$$

где m – масса электрощетки; k_1 – жесткость пружины; k_2 – жесткость контактного слоя; $H\mathrm{sign}\left(\dot{y}\right)$ – сила трения; y – смещение электрощетки, $s(t)$ – профиль коллектора.

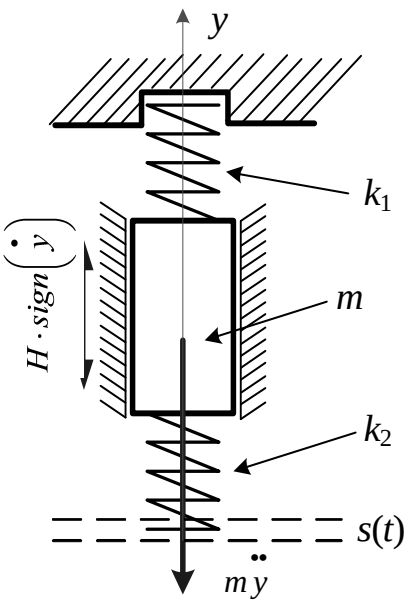


Рис. 1. Колебательная система КЩУ

Решение нелинейного уравнения (1) наиболее часто используемой модели (рис. 1), как правило, находят в линейном приближении

$$m\ddot{y}+C_H\dot{y}+\left(k_1+k_2\right)y=k_2 s(t), \qquad (2)$$

где C_H – коэффициент, определяемый по функции распределения полигармонического процесса.

Уравнение (2) позволяет решить «прямую» (определение смещения щетки y) и «обратную» (определение профиля коллектора $s(t)$) задачи при единичном щеточном перекрытии. Однако при определении $\dot{y}$ и $\ddot{y}$ возникают трудности, связанные с присутствием в экспериментально определяемом профиле коллектора $s(t)$ шумов. Автором предложен способ решения уравнения (2), который позволяет избавиться от данного недостатка.

Используя принцип Дюамеля дифференциальное уравнение (2) можно записать в виде интегрального уравнения Вольтера при любой форме внешнего воздействия $s(t)$ на динамическую систему:

$$y(t)=\int_0^t s(\tau)\frac{d}{d\tau}h(t-\tau)d\tau, \qquad (3)$$

где $h(t)$ – переходная функция, определяемая при единичном внешнем воздействии $s(t)=1$. В переходной функции $h(t)$ содержится вся информация о коэффициентах m, C_H, k_1, k_2 уравнения (2). Величины $y(t)$ или $s(t)$ всегда можно измерить экспериментально с определенной степенью точности. Следовательно, интегральное уравнение позволяет решить несколько задач:

- определить переходную функцию $h(t)$ при известных функциях $y(t)$ и $s(t)$, с последующим определением коэффициентов m, C_H, k_1, k_2;
- определить функцию колебания щеток $y(t)$ при известных функции профиля коллектора $s(t)$ и переходной функции $h(t)$ – «прямая» задача.
- определить профиль коллектора $s(t)$ при известных функции колебания щетки $y(t)$ и переходной функции $h(t)$ – «обратная» задача;

Алгоритм решения включает следующие этапы:

1) Запишем интегральное уравнение (3) относительно переходной функции $h(t)$, считая, что функции $y(t)$ и $s(t)$ известны из эксперимента:

$$y(t)=\int_0^t s(t-\tau)\frac{d}{d\tau}h(\tau)d\tau\,.$$

2) Определим аналитический вид переходной функции $h(t)$ системы и ее производной $\frac{dh(t)}{dt}$, а также соотношения, связывающие переходную функцию и коэффициенты $m,\ C_H,\ k_1,\ k_2$

$$h(t)=A_1\exp(\lambda_1 t)+A_2\exp(\lambda_2 t)+B\,,$$

где A_1, A_2, λ_1, λ_2, B – коэффициенты уравнения регрессии.

3) Из функциональной зависимости $Dh(t)=\frac{dh(t)}{dt}$ определяем λ_1,λ_2,B, используя уравнения нелинейной регрессии на дискретном множестве точек.

4) Решение системы нелинейных уравнений регрессии дает величины $\lambda_1,\ \lambda_2,\ A_1,\ A_2$, с помощью которых определяются коэффициенты $m,\ C_H,\ k_1,\ k_2$.

Для определения *s(t)* и *y* при известном щеточном перекрытии $\beta_Щ>1$, автором предложен следующий алгоритм. При решении «прямой» задачи в статическом режиме: положение щетки в данный конкретный момент определяется, как значение профиля коллектора максимально выступающей ламели, из находящихся под щеткой (рис. 2, *а*). Допуская, что жесткость контактного слоя постоянна, в динамическом режиме определяем *y* из уравнения (3), принимая в качестве *s(t)*, полученную при помощи алгоритма характеристику *2* (рис. 2, *а*).

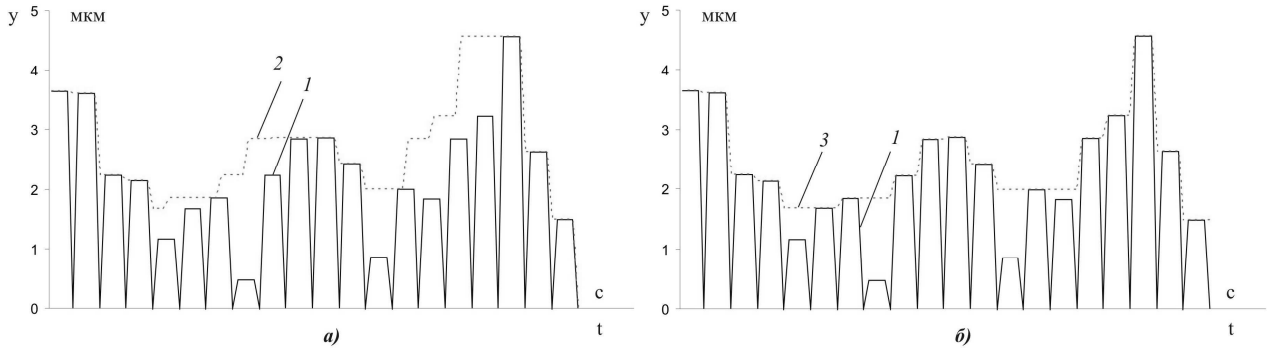


Рис. 2. Определение *s(t)* и *y* при известном щеточном перекрытии $\beta_Щ>1$: а) решение «прямой» задачи; б) решение «обратной» задачи; 1 – профиль коллектора; 2 – возмущение на щетку; 3 – восстановленный профиль коллектора

При решении «обратной» задачи в статическом режиме, подъем щетки будем интерпретировать, как подъем передней грани щетки на ламель, а опускание щетки как сход её заднего края с ламели (рис. 2, *б*). В динамическом режиме после определения *s(t)* из уравнения (3), восстанавливаем профиль коллектора согласно предложенному алгоритму.

Автором предложен метод разделения сигнала бесконтактного профилометра на профиль коллектора и паразитные вибрации. Метод основан на спектральном анализе измеренного сигнала и последующей идентификации составляющих по их частотам в спектре.

На первом этапе получаем сигнал профилометра и определяем вершины коллекторных пластин в соответствии с заданными параметрами: количество оборотов, количество точек, частота дискретизации, частота вращения.

Для получения сигнала профилометра необходимо определить параметры измерения – частоту дискретизации $f_Д$ и количество выборок N. Частота дискретизации определяется по выражению: $f_Д = N_0 f_0$, где N_0 – количество выборок, приходящееся на один оборот коллектора, f_0 – частота вращения. Количество выборок определяется по выражению: $N = N_0 N_{ОБ}$, где $N_{ОБ}$ – количество оборотов. В свою очередь N_0 вычисляется, как $N_0 = N_Л n_Л$, где $N_Л$ – количество ламелей коллектора, $n_Л$ – количество точек необходимое для определения вершины ламели.

На втором этапе, воспользовавшись прямым преобразованием Фурье, получаем матрицу коэффициентов Фурье $c_k = \frac{\alpha_k - i\beta_k}{2}$, при записи ряда в комплексной форме или при записи в простой форме: a_k, b_k – коэффициенты косинуса и синуса соответственно, где k – номер коэффициента. Для получения спектрограммы необходимо воспользоваться соотношениями, связывающими относительные единицы коэффициентов с амплитудами A_k и частотами f_k:

$$A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} = 2\sqrt{\frac{\alpha_k^2 + \beta_k^2}{N}}; \qquad f_k = \frac{k}{N_0} f_0$$

На рис. 3 представлен пример спектра.

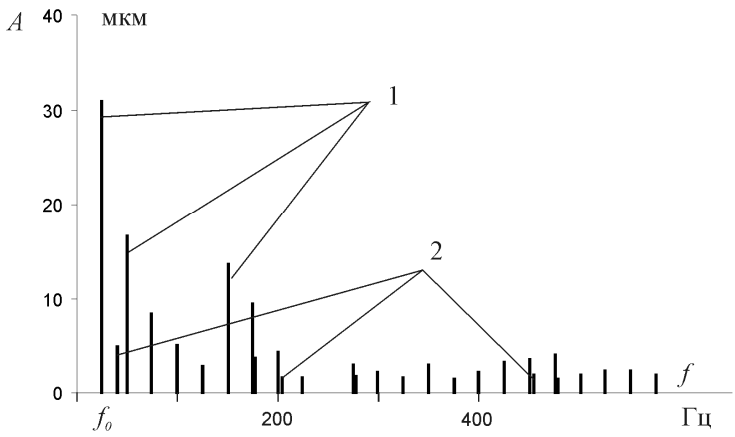


Рис. 3. Спектр измеренного сигнала

На третьем этапе проводим идентификацию составляющих сигнала по их частоте. Как видно из рис. 3 в спектре присутствуют компоненты сигнала *1* на частотах, кратных оборотной частоте: $f_{кол} = kf_0$. Амплитуды этих частот характеризуют геометрию коллектора: $k = 1$ – эксцентриситет, $k = 2$ – овальность, $k = 3$ – трехгранность и т.д.

Составляющие *2* появляются в спектре вследствие вибраций в направлении коллектора. Если из измеренного сигнала убрать эти компоненты спектра, то получится сигнал, соответствующий реальному профилю коллектора. Для этого необходимо воспользоваться обратным преобразованием Фурье, предварительно исключив из спектра паразитные частоты. Некоторые из частот *2* составляющих спектра соответствуют подшипниковым частотам.

На последнем этапе профилограмму коллектора получаем восстанавливая сигнал по всем компонентам с частотами $f_{кол}$. Биение коллектора вычисляется как разность между максимальной и минимальной высотами ламелей.

При определении перепадов между соседними ламелями из такой профилограммы возникает погрешность, связанная с геометрией коллектора, которая может в несколько раз превышать реальные перепады. Поэтому вычисление разности высот коллекторных пластин следует проводить по профилограмме,

полученной путем восстановления из спектра по составляющим с частотами $f_{кол}$, при $k \geq 3$, тем самым устраняя влияние эксцентриситета и овальности.

Таким образом, разработанный метод позволяет:

- сепарировать измеренный сигнал на профиль коллектора и паразитные вибрации;
- проводить оценку того, как меняется относительный вклад той или иной гармоники при изменении условий измерений (скорости вращения, температуры и т.п.);
- определять тип дефекта подшипникового узла, а также этап его развития, на основе существующих статистических данных о дефектах.

В динамических режимах работы ЭМ существуют моменты неустановившейся работы, связанные с изменением частоты вращения или внешнего воздействия (например, временные вибрации, или моменты сверления дрели и ударов перфоратора). Оценка механического состояния СК в этих режимах существующими методами спектрального анализа невозможна, т.к. сигнал является нестационарным.

Для анализа нестационарных сигналов, в отличие от традиционно применяемого преобразования Фурье, предпочтительным является использование вейвлет-разложения. Локальные свойства вейвлет-разложения обеспечивают двумерную развертку исследуемого сигнала и позволяют увидеть динамику изменения частоты и амплитуды во времени.

Интегральное вейвлет-преобразование:

$$W(s,p) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{s}} \psi_{sp}(t) f(t) dt, \qquad (4)$$

где $W(s,p)$ – коэффициенты вейвлет-преобразования, $\psi_{sp}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-p}{s}\right)$ – вейвлет, $\psi(t)$ – функция-прототип, s – масштабный коэффициент, p – параметр сдвига, *f(t)* – раскладываемая функция.

Для разложения сигнала в вейвлет-базис необходимо синтезировать оптимальный вейвлет. При этом воспользуемся двумя критериями:

1. Критерий локализации, который отражает сосредоточенность вейвлета в частотно-временном пространстве:

$$\Delta x \Delta k \geq \frac{1}{2}, \ \Delta x = \frac{\int |\psi(x)|^2 (x - x_0)^2 dx}{\int |\psi(x)|^2 dx}, \ \Delta k = \frac{\int |\widetilde{\psi}(k)|^2 (k - k_0)^2 dk}{\int |\widetilde{\psi}(k)|^2 dk} \qquad (5)$$

2. Энтропийный критерий, который отражает некий принцип «похожести» приближаемой и приближающей функций.

$$E = -\sum_{k=0}^{N} |a_k|^2 \log(|a_k|^2), \ E \to \min \qquad (6)$$

Для анализа сигнала удобнее конструировать биортогональный вейвлет, т. к. ортогональные вейвлеты обладают меньшей гладкостью и являются не симметричными. Воспользовавшись одной из технологий синтеза вейвлетов автором была получена группа биортогональных вейвлетов. Из полученной группы, был выбран вейвлет (рис. 4), который наилучшим образом подходит для

анализа профилей коллекторов ЭМ, полученных в ходе экспериментов и удовлетворяет критериям (5) и (6).

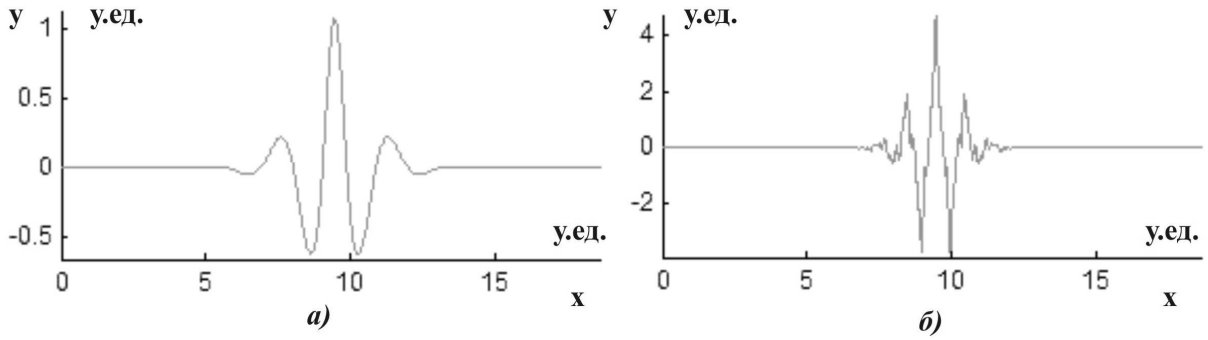


Рис. 4. Синтезированный биортогональный вейвлет:
а) вейвлет разложения сигнала; б) вейвлет восстановления сигнала

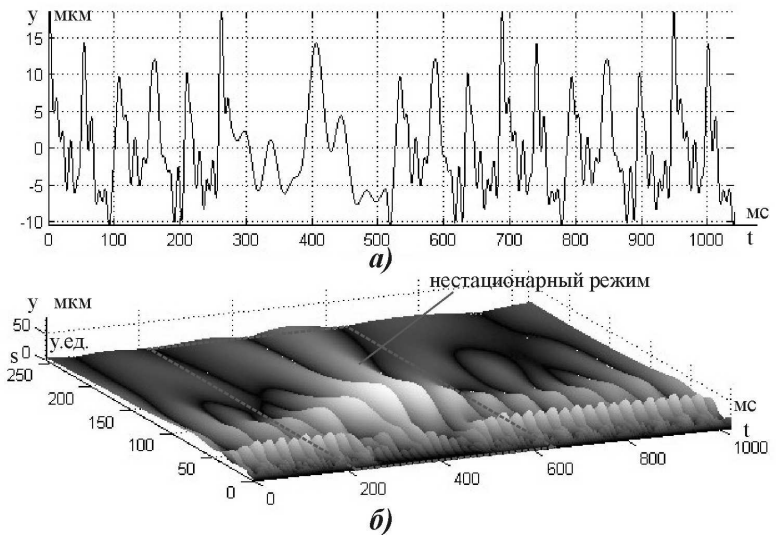


Рис. 5. Профиль коллектора ЭМ:
а) изменение во времени; б) вейвлет-разложение

На рис. 5, *б* приведена частотно-временная картина распределения абсолютных значений коэффициентов вейвлет-разложения для профиля коллектора, снятого за несколько оборотов (рис. 5, *а*), на которой виден нестационарный режим работы коллектора.

Представленные характеристики позволяют оценить не только то, как изменилась скорость вращения, но и проследить относительный вклад (амплитуду) той или иной частоты в любой момент времени, что невозможно при оценке с помощью спектрального анализа, дающего усредненные характеристики на рассматриваемом временном интервале.

Основным ограничением при реализации предложенных методов является невозможность существующих диагностических систем, предназначенных для контроля состояния профиля коллектора, получать профилограмму непрерывно на заданном временном интервале. В связи с этим, является актуальной разработка аппаратно-программного комплекса, позволяющего проводить измерения за заданное оператором количество оборотов.

В третьей главе рассматриваются принципы проектирования аппаратно-программного комплекса с учетом требований, предъявляемых для реализации разработанных моделей и методов, а также вспомогательного оборудования и способов для тестирования метрологических характеристик измерительных устройств. Описаны разработанные бесконтактный профилометр, микропроцессорный модуль для оцифровки измеренного сигнала и коммуникации, а

также программное обеспечение для управления процессом измерения и обработки данных.

В состав современных аппаратно-программных комплексов для оценки механического состояния СК ЭМ, как правило, входят:

- один или несколько бесконтактных профилометров;
- устройства, позволяющие оцифровывать сигналы и передавать данные в персональный компьютер (ПК);
- ПК для хранения и анализа измеренных данных.

В случае испытательного комплекса, система должна быть дополнена разгонной установкой для проверки диагностируемого объекта в динамических режимах. Кроме того, необходимо наличие электроприводов (ЭП) перемещения измерительного датчика и регулируемого ЭП разгонной установки.

На рис. 6 представлен внешний вид одноканального аппаратно-программного комплекса, разработанного при участии автора.

Проверка метрологических характеристик профилометра является неотъемлемым этапом перед его использованием. Тестирование прибора можно разделить на несколько этапов:

- проверка линейности выходной характеристики при различных температурах контролируемого объекта;
- проверка показаний в статическом режиме (сравнение с данными, полученными при помощи микрометрических головок или других средств измерений);
- проверка диаграммы направленности (локальности электромагнитного поля);
- проверка прибора в динамическом режиме работы.

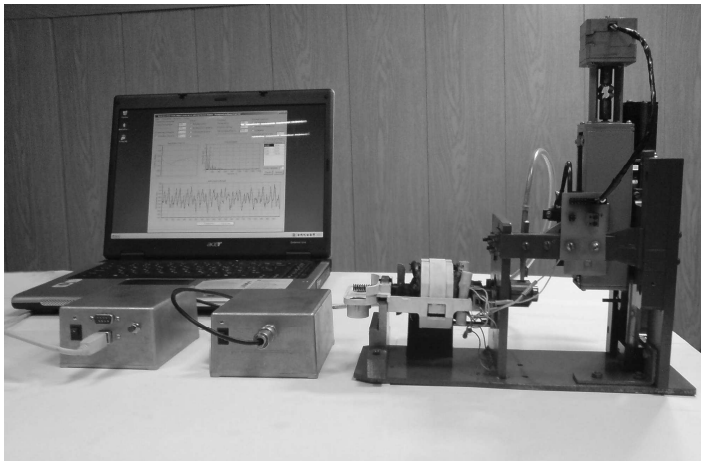


Рис. 6. Общий вид диагностического комплекса

Представленный комплекс позволяет проводить проверку метрологических характеристик профилометра – снимать выходную характеристику всего за несколько секунд, т.к. датчик перемещается при помощи шагового двигателя (ШД). Такой способ является хорошей альтернативой использования тарировочной установки и позволяет сэкономить время при настройке прибора.

На рис. 7 представлена функциональная схема бесконтактного профилометра, где Г – генератор импульсов, Б – буфер, ИД – измерительный датчик, АД – амплитудный детектор, УС1, УС2 – усилители сигнала.

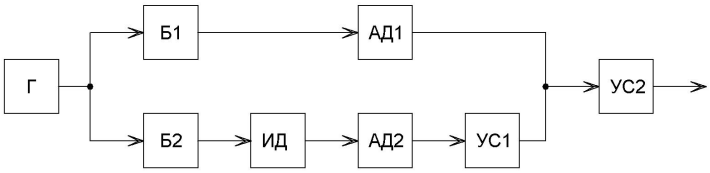
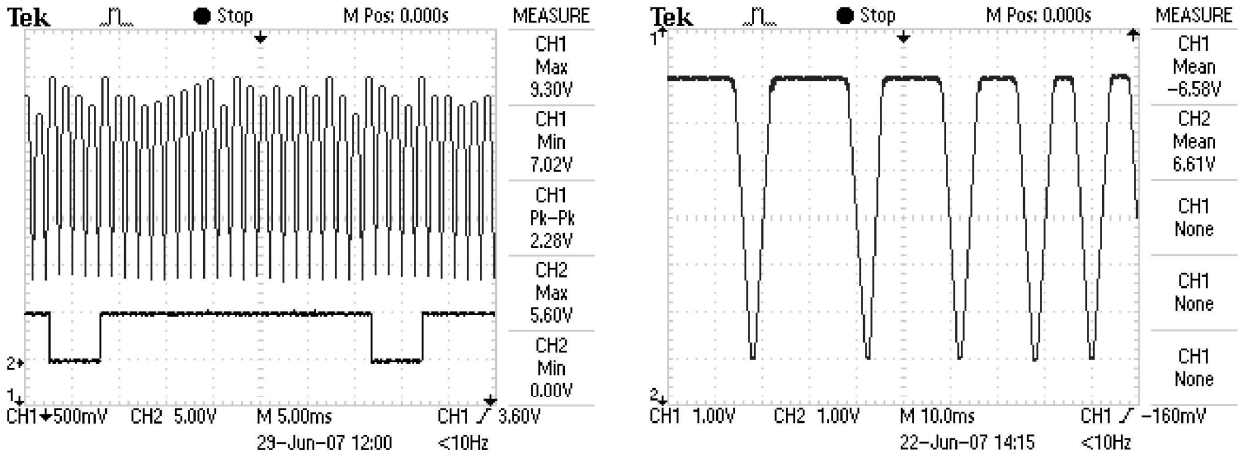


Рис. 7. Функциональная схема профилометра

ИД представляет собой щелевой вихретоковый датчик с узколокальным полем и магнитопроводом из термостабильного, высокочастотного феррита. Данный датчик относится к

трансформаторному типу, вторичной обмоткой которого является контролируемая поверхность из электропроводящего материала.

Исследование динамических характеристик бесконтактного профилометра проводилось на разгонной установке. В качестве объекта исследования использовались тестовые медные кольца с заданным профилем. На рис. 8, *а* приведены осциллограммы профиля кольца с заданной высотой пластин. Для проверки диаграммы направленности (рис. 8, *б*) было изготовлено кольцо с пластинами одинаковой высоты и различной ширины (от 2 мм до 5 мм).



а) *б)*

Рис. 8. Осциллограммы тестовых колец: а) кольцо с заданной высотой пластин; б) кольцо с пластинами различной ширины

Представленные диаграммы подтверждают метрологические характеристики профилометра. Исходя из диаграммы на рис. 8, *б* бесконтактный профилометр применим для контроля поверхности коллекторов с шириной ламели не менее 2 мм.

Рис. 9. Функциональная схема микропроцессорного модуля

Одной из ответственных частей аппаратно-программного комплекса является микропроцессорный модуль (рис. 9), который обеспечивает организацию измерений по заданным параметрам и передает экспериментальные данные в ПК для последующей обработки.

Основные технические и функциональные характеристики диагностического комплекса:

- прием и передача данных по интерфейсу RS-232 со скоростью до 120 Кбит/с, по интерфейсу USB со скоростью до 6 Мбит/с;
- 14-разрядное аналогово-цифровое преобразование с частотой дискретизации до 1 МГц;
- хранение в ОЗУ до 15000 значений выборок;
- определение частоты вращения по сигналу синхронизации и по сигналу профилометра;

- измерения за заданное количество оборотов и количество выборок (автоматическая развертка сигнала);
- непрерывная оцифровка сигнала (данные с АЦП пересылаются по USB интерфейсу в режиме реального времени на расстоянии до 5 метров);
- возможность работы со сторонними микропроцессорными устройствами посредством интерфейсов USART, SPI, TWI;
- возможность организации параллельной работы двух и более модулей.

Рассмотрим основные режимы измерений и работы модуля.

Основным является динамический режим измерений. В разработанном алгоритме микропрограммы есть несколько отличительных особенностей.

Первой из них является автоматическая развертка сигнала, когда измерения проводятся при заданном количестве выборок и за определенное количество оборотов. Частота дискретизации $f_Д$ определяется следующим выражением: $f_Д = \frac{N_B}{N_O} f_O$, где N_B – количество выборок; N_O – количество оборотов; f_O – частота вращения.

Автором был предложен алгоритм определения скорости вращения коллектора по сигналу с профилометра. Суть алгоритма заключается в следующем. Сначала производится измерение профиля коллектора с заданной частотой дискретизации $f_Э$ и определенным количеством выборок. Далее выполняется подпрограмма определения вершин ламелей, причем определяется и номер выборки x_i, являющейся вершиной.

Ламельная частота $f_Л$ определяется следующим выражением:

$$f_Л = \frac{f_Э}{\frac{1}{k-1}\sum_{i=1}^{k-1}\left(x_{i+1} - x_i\right)}$$, где k – количество вершин ламелей.

С этой целью был предложен способ определения вершин коллекторных пластин, не требующий сложных вычислений. Сначала массив выборок усредняется при помощи скользящего среднего так, чтобы для любых четырех подряд идущих значений (y_i, y_{i+1}, y_{i+2}, y_{i+3}), выполнялось условие – наличие только вершины или впадины.

Вершина точка y_{i+1} : $\begin{matrix} y_i < y_{i+3} < y_{i+2} < y_{i+1} \\ y_{i+3} < y_i < y_{i+2} < y_{i+1} \\ y_{i+3} < y_{i+2} < y_i < y_{i+1} \end{matrix}$; вершина y_{i+2}, : $\begin{matrix} y_i < y_{i+1} < y_{i+3} < y_{i+2} \\ y_i < y_{i+3} < y_{i+1} < y_{i+2} \\ y_{i+3} < y_i < y_{i+1} < y_{i+2} \end{matrix}$

Следующей особенностью является алгоритм реализации аналогово-цифрового преобразования. Обычно работа микроконтроллера с АЦП происходит следующим образом: частота дискретизации задается таймером, а сохранение значений в памяти и проверка на завершение в обработчике прерывания для используемого таймера. В качестве условия завершения измерений используется проверка количества сохраненных в памяти выборок. Рассмотренный алгоритм в микроконтроллере ATmega 128 выполняется за 17 тактов и более для сохранения одного значения. Автором предложен алгоритм, который выполняется за 11 тактов. Для реализации этого алгоритма необходимо задействовать два таймер-счетчика: один для формирования сигнала ШИМ для АЦП, второй

для остановки измерений. Обработка по прерыванию была заменена последовательным опросом линии ШИМ в цикле. Таким образом, примененное оригинальное программное решение позволило повысить максимальную частоту дискретизации более чем в 1,5 раза, что улучшает точность измерения профиля коллектора на высоких скоростях вращения.

Одной из главных особенностей микропроцессорного модуля является возможность организации измерений в 2-х канальном режиме. В этом случае для синхронизации измерений первого и второго модулей используется одна из линий ввода-вывода микроконтроллера.

Персональный компьютер в аппаратно-программном комплексе предназначен для управления работой микропроцессорного модуля, приема результатов измерений и их математической обработки. Обменивается ПК с контроллером по интерфейсам RS-232 и USB посредством программы «Диагностирование скользящего контакта электрических машин» реализованной в среде разработки Borland Delphi 7.0.

Для реализации ранее предложенного [1] метода базовой коррекции результатов измерений необходимо в процессе измерений выполнить эталонное перемещение датчика. В связи с тем, что перемещение необходимо осуществлять каждый раз при изменении факторов, влияющих на выходную характеристику (температура, скорость вращения и др.), целесообразно применять перемещение при помощи позиционного ЭП.

Для перемещения измерительного преобразователя бесконтактного профилометра наиболее подходящими являются ЭП на основе ШД и электромагнитный привод, благодаря невысокому рабочему напряжению, простоте управления, высокой точности и разрешающей способности. В разработанной при участии автора разгонной установке для перемещения датчика используется микрометрический винт, вал которого приводится в движение при помощи ШД ПБМГ–200–265. Линейное перемещение за один шаг составляет 2,5 мкм при шаговом режиме работы ШД и 1,25 мкм при полушаговом режиме работы. При этом точностью позиционирования ± 5 % или 0,125 мкм.

Проведенные исследования показали необходимость при имеющихся в диагностическом комплексе ограничениях (дискретность сигнала скорости, получаемого с профилометра) разработки регулируемого коллекторного ЭП с адаптивным регулятором. Функциональная схема адаптивного ЭП представлена на рис. 10.

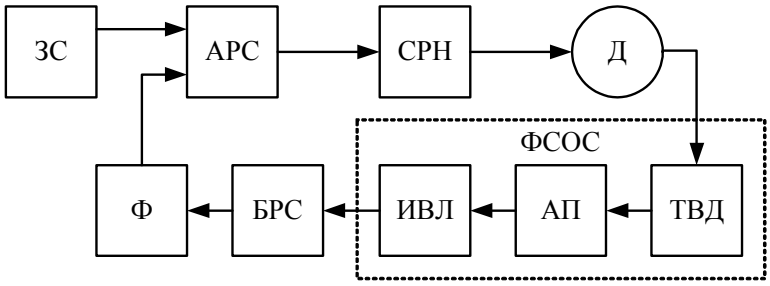


Рис. 10. Функциональная схема адаптивного ЭП

Приняты следующие обозначения: ЗС – задатчик скорости; АРС – адаптивный регулятор скорости; СРН – симисторный регулятор напряжения; Д – коллекторный двигатель; ТВД – токовихревой датчик; АП – аналоговый преобразователь; ИВЛ – индикатор вершин ламелей; БРС

– блок расчета скорости; Ф – фильтр сигнала обратной связи; ФСОС – формирователь сигнала обратной связи.

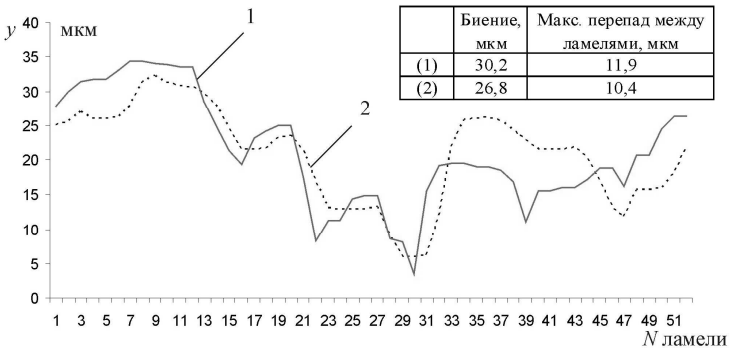
Созданный регулируемый ЭП разгонной установки позволяет стабилизировать частоту вращения ЭД в широком диапазоне скоростей, что значительно расширяет функциональные возможности диагностического комплекса:

- уменьшается объем передаваемых данных в десятки раз, в связи с уменьшением частоты дискретизации аналого-цифрового преобразования сигнала профилометра (одно измерение на одну коллекторную пластину);
- за счет уменьшения загрузки микроконтроллера микропроцессорного модуля (рис. 9) появляется возможность передачи данных в режиме реального времени по интерфейсу RS-232;
- позволяет удалить автоматизированное рабочее место оператора от исследуемого объекта на расстояние до 100 м (при передаче данных по RS-232), что является одним из требований при работе в производственных условиях.

В четвертой главе в целях подтверждения созданных математических моделей и методов обработки измеряемой информации проведены экспериментальные исследования при помощи разработанного аппаратно-программного комплекса, включающего в себя два бесконтактных профилометра, два модуля оцифровки сигналов, ПК и программное обеспечение для обработки измеряемой информации, разработанное в MATLAB R2007a и Mathcad 14.

Для проверки адекватности математической модели КЩУ был проведен следующий эксперимент. Датчик первого профилометра установлен над коллектором, датчик второго профилометра расположен над одной из щеток таким образом, чтобы фиксировать ее радиальные перемещения. В качестве объекта исследования использовался преобразователь ПО-550АФ.

Измерения производились в двухканальном режиме с запуском измерений по фронту сигнала модуля синхронизации и последующей передачей одновременно оцифрованных сигналов с бесконтактных профилометров в ПК (рис. 11). Проведенный эксперимент показал, что микроперемещения щетки могут использоваться в качестве диагностического сигнала для оценки состояния профиля коллектора в случае безотрывного движения. Причем такой сигнал может быть получен контактным способом, например, при помощи акселерометров, что в некоторых случаях значительно упрощает процесс измерений.



	Биение, мкм	Макс. перепад между ламелями, мкм
(1)	30,2	11,9
(2)	26,8	10,4

Рис. 11. Профиль коллектора ПО-550АФ: 1 – измеренный; 2 – восстановленный из перемещений щетки

В связи с тем, что подшипниковые дефекты существенно проявляются на высоких скоростях вращения, были проведены экспериментальные исследования профиля коллектора двигателя LG Electronics VCE280E02 на скоростях вра-

щения до 30000 об/мин. По спектру измеренного сигнала (рис. 12, *а*) видно, что для данного двигателя амплитуда вибраций в направлении коллектора, возникающих из-за дефекта подшипника (частота 230 Гц), соизмерима с эксцентриситетом коллектора (частота 500 Гц). Если из измеренного сигнала не убрать подшипниковую составляющую, истинный профиль коллектора будет искажен, что в последующем скажется на выводе о состоянии КЩУ. На рис. 12, *б* показаны измеренные профили коллектора: на частоте вращения 500 Гц, с вычетом подшипниковой составляющей (1) и в статическом режиме (2).

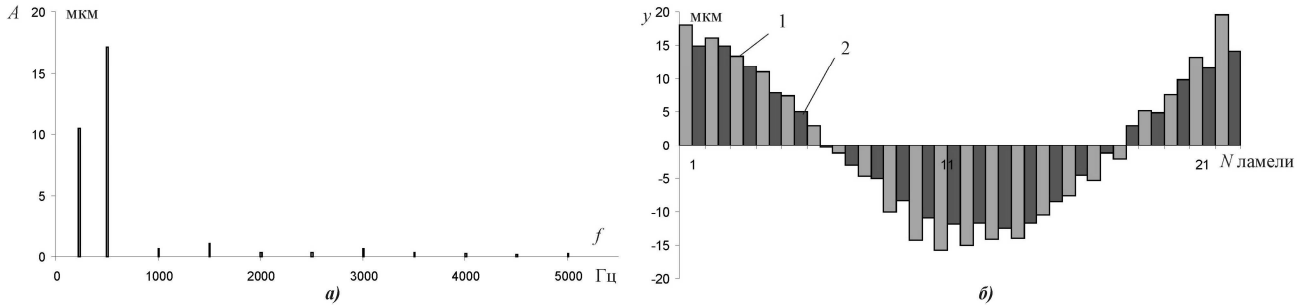


Рис. 12. Двигатель VCE280E02: а) спектрограмма профиля коллектора; б) профиль коллектора; 1 – на частоте вращения 500 Гц, с вычетом подшипниковой составляющей; 2 – измеренный в статическом режиме;

В динамических режимах работы электрической машины существуют моменты неустановившейся работы связанные с изменением частоты вращения или внешнего воздействия. Оценка механического состояния СК в этих режимах существующими методами спектрального анализа невозможна, т.к. сигнал является нестационарным. В связи с этим проведены экспериментальные исследования работы ЭД в нестационарных режимах: изменение скорости, сверление и удар перфоратора. На рис. 13 представлено вейвлет-разложение сигнала, снятого с коллектора перфоратора.

Увеличение скорости вращения электродвигателя перфоратора сопровождается постепенным уменьшением амплитуды на всех частотах до перехода в установившийся (стационарный) режим работы.

При работе перфоратора в режиме удара более чем в 2 раза возрастает амплитуда биения, в то время как амплитуда высокочастотных составляющих увеличивается более чем в 5 раз.

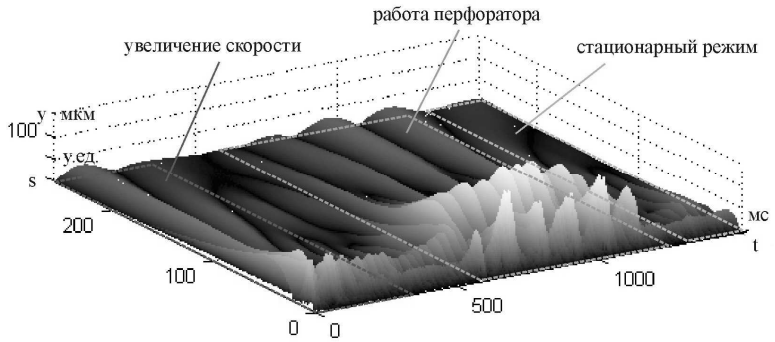


Рис. 13. Вейвлет-разложение профиля коллектора перфоратора

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования показали адекватность разработанного математического аппарата. По перемещениям щетки в колодце щеткодержателя можно оценивать механическое состояние СК в случае безотрывного движения. По спектрам измеренного сигна-

ла можно оценить относительный вклад той или иной составляющей при изменении условий работы ЭМ. Оценка состояния СК в неустановившихся режимах работы ЭМ может проводиться по картинам коэффициентов разложения, полученных при помощи синтезированного вейвлета.

Заключение

В работе получены следующие результаты:

1. Предложен метод определения перемещения щетки по механическому состоянию профиля коллектора и восстановления профиля коллектора ЭМ по микроперемещениям щетки. На основе интегрального уравнения Вольтера получен алгоритм, позволяющий определить переходную функцию динамической системы – КЩУ, содержащую информацию о механических параметрах СК – m, k_1, k_2, H.

2. Разработан и изготовлен автоматизированный двухканальный диагностический комплекс для дистанционного контроля механического состояния КЩУ, отличающийся высокой точностью измерений благодаря применению оригинальных конструкций токовихревых датчиков, цифровой обработке измеряемых сигналов и использованию метода поламельной базовой коррекции.

3. Разработаны структура, модель и опытный образец регулируемого электропривода разгонной установки диагностического комплекса с адаптивным регулятором и обратной связью по скорости на основе сигнала профилометра, позволяющие расширить функциональные возможности комплекса в части передачи данных в режиме реального времени.

4. Предложен метод разделения сигнала бесконтактного профилометра на профиль коллектора и паразитные вибрации, основанный на спектральном анализе измеренного сигнала и последующей идентификации составляющих по их частотам в спектре, позволяющий по наличию и уровню подшипниковых частот в спектре измеренного сигнала проводить оценку технического состояния подшипниковых узлов ЭМ.

5. Разработана методика и на ее основе синтезирован вейвлет, позволяющий по вейвлет-разложению оценить состояние СК в различных режимах работы ЭМ.

6. Проведены экспериментальные исследования, доказавшие правомерность использования микроперемещений щетки в качестве диагностического сигнала для оценки состояния профиля коллектора, а также состоятельность предложенного метода сепарирования сигнала бесконтактного профилометра на основе спектрального анализа.

Основное результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Боровиков, Ю. С. Методика базовой коррекции измерений профилей коллекторов электрических машин / Ю. С. Боровиков, С. И. Качин, **В. Ю. Саблуков** // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 310. – № 3. – С. 99–102.
2. **Саблуков, В. Ю.** Определение параметров электрощетки колебательной системы коллекторно-щеточного узла электрической машины / В.Ю. Саблуков, Ю.С. Боровиков, Ю.Н. Исаев // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2008. – №7-8/1. – С. 24–28.
3. Исаев, Ю. Н. Вейвлет обработка и интерпретация измерений профиля коллектора электрической машины / Ю.Н. Исаев, Ю.С. Боровиков, **В.Ю. Саблуков** // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2008. – №9-10/2. – С. 34–39.
4. **Саблуков, В. Ю.** Диагностирование механического состояния скользящего контакта электрических машин / **В. Ю. Саблуков** // Современные техника и технологии СТТ'2005: Труды XI международной науч.-практ. конф.. – Томск, 2005. – С. 89–91.
5. **Саблуков, В. Ю.** Методика оценки технического состояния скользящих контактов и подшипниковых узлов электрических машин / **В. Ю. Саблуков** // Электромеханические преобразователи энергии: Труды международной науч.-технич. конф.. – Томск, 2007. – С. 82–84.
6. Качин, С. И. Программа управления бесконтактным профилометром / С. И. Качин, Ю. С. Боровиков, М. А. Нечаев, **В. Ю. Саблуков** // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2006610838.
7. **Саблуков, В. Ю.** Исследование вибраций коллекторно-щеточного узла электрических машин с применением средств микропроцессорной техники / **В. Ю. Саблуков**, Ю. С. Боровиков, С. И. Качин // Электротехника, электромеханика и электротехнологии: Труды второй науч.-техн. конф.. с международным участием. – Новосибирск, 2005. – С. 10–13.
8. Боровиков, Ю. С. Комплекс дистанционного контроля механического состояния формы и размеров ответственных элементов машин и механизмов / Ю. С. Боровиков, **В. Ю. Саблуков**, О. С. Качин // Оборудование. Регион. – 2005. – № 2 (10). – С. 16–17.
9. **Саблуков, В.Ю.** Анализ методик расчета виброакустических характеристик профилей коллекторов, подшипниковых и щеточных узлов электрических машин в процессе эксплуатации / **В. Ю. Саблуков**, Ю. С. Боровиков, С. И. Качин // Электромеханические преобразователи энергии: Труды международной науч.-техн. конф.. – Томск, 2005. – С. 104–105.
10. Боровиков, Ю. С. Технические и программные средства для контроля и диагностирования скользящего контакта электрических машин электроприводов / Ю. С. Боровиков, **В. Ю. Саблуков** // Автоматизированный

электропривод: Труды V международной конференции – СПб. – 2007. – С. 493–495

11. Колесников, С. В. Электропривод перемещения преобразователя измерительной системы / С. В. Колесников, **В. Ю. Саблуков** // Электромеханические преобразователи энергии: Труды международной науч.-технич. конф.. – Томск: 2007 г. – С. 65–67.
12. Боровиков, Ю. С. Многофункциональный измерительный комплекс для оценки механического состояния элементов электрических машин / Ю. С. Боровиков, **В. Ю. Саблуков,** Д. П. Упадышев, А. С. Васильев // Электромеханические преобразователи энергии: Труды международной науч.-технич. конф.. – Томск: 2007 г. – С. 84–87.
13. Разработка интеллектуального измерительного комплекса для дистанционного контроля микроперемещений элементов машин и механизмов, их теплового состояния и электрических свойств: отчет о НИР (заключ.): 06-02/ Томский политехнический университет; рук. Ю. С. Боровиков – Томск, 2005. – 43 с. – Исполн.: С. И. Качин, М. А. Нечаев, **В. Ю. Саблуков**, О. С. Качин, Е. Н. Клыжко – Библиогр.: с. 40–42. – № ГР 01200511676. – Инв. № 04534333842.
14. Качин, О. С. Разработка высокоточного многофункционального измерительного комплекса для бесконтактного контроля механического состояния элементов машин / О. С. Качин, **В. Ю. Саблуков** // Современные техника и технологии: Труды XIII международной науч.-практ. конф.. – Томск: ТПУ, 2007. – Т. 1. – С. 428–430.
15. Васильев, А. С. Рекомендации по совершенствованию электропривода разгонной установки диагностического комплекса «МИКРОКОН» / А. С. Васильев, **В. Ю. Саблуков** // Современные техника и технологии: Труды XIV международной науч.-практич. конф.. – Томск, 2008. – С. 124–126.

Личный вклад автора.

Две работы написаны автором единолично. В работах, написанных в соавторстве, автору принадлежит: разработка блоков управления профилометром и обработки измеренных данных [1, 7, 14]; разработка математической модели для определения параметров узла скользящего токосъема [2, 6, 8]; синтез вейвлета для анализа состояния СК [3]; разработка алгоритмов и микропрограммы для модуля оцифровки и коммуникации [9, 10, 12]; разработка алгоритма определения максимумов и минимумов измеренного сигнала с повышенным быстродействием [10]; оценка погрешности, возникающей вследствие неточности перемещения измерительного преобразователя [11]; разработка структур и алгоритмов управления ЭП [11, 15]; разработка метода автоматизированного тестирования выходной характеристики бесконтактного профилометра [13].