

На правах рукописи

**Боровиков Юрий Сергеевич**

**ПРОГРАММНО – АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА  
ДЛЯ ОЦЕНКИ КОММУТАЦИОННОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ  
КОЛЛЕКТОРНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН**

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск – 2003

Работа выполнена на кафедре электропривода и электрооборудования  
Томского политехнического университета.

Научный руководитель – доктор технических наук,  
старший научный сотрудник  
Качин С.И.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
старший научный сотрудник  
Селяев А.Н.  
кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник  
Данекер В.А.

Ведущая организация – ОАО «Томский электротехнический завод»  
(г. Томск)

Защита диссертации состоится «    » декабря 2003 года в \_\_\_\_ часов  
на заседании диссертационного совета К 212.269.03 в актовом зале  
Томского политехнического университета по адресу: 634050, г. Томск,  
пр. Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского  
политехнического университета.

Автореферат разослан «    » ноября 2003 года.

Ученый секретарь  
диссертационного Совета,  
к.т.н., доцент

Ю.Н. Дементьев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Возрастающий объем применения коллекторных электрических машин постоянного и переменного тока во всех сферах современной человеческой жизнедеятельности во многом обусловлен их непревзойденными массогабаритными и стоимостными показателями.

Вместе с тем, ключевым вопросом, определяющим основные эксплуатационные характеристики коллекторных электрических машин на современном техническом уровне, остается проблема повышения их коммутационной устойчивости, которая зачастую является основным фактором, препятствующим дальнейшему совершенствованию данного класса электрических машин.

Основными причинами неудовлетворительного протекания коммутационных процессов в современных коллекторных машинах являются, во-первых, ограниченные функциональные возможности применяемых конструкций коллекторно-щеточных узлов и активных элементов коллекторных машин и, во-вторых, недостаток методик и программ для оценки коммутационной напряженности и осуществления оптимального проектирования всего многообразия данного класса электрических машин с учетом влияния различных факторов. Решение указанных проблем является актуальной задачей и представляет научный и практический интерес.

**Цель работы.** Создание программно – аппаратных средств для оценки коммутационной напряженности коллекторных электрических машин малой мощности с учетом механического состояния КЩУ.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи:

- создать универсальную расчетную модель и программное обеспечение для расчета коммутационных процессов в машинах малой мощности с различной электромагнитной архитектурой их активной зоны, позволяющие оценить коммутационную напряженность электрических, как с дополнительными полюсами, так и без них;

- разработать математическую модель и программное обеспечение, дающие возможность учитывать влияние механического состояния КЩУ электрической машины на коммутационный процесс;

разработать диагностический комплекс нового поколения для оценки механического состояния коллекторно-щеточных узлов

- в статических и динамических режимах работы на основе сочетания аналоговой и цифровой электронной техники, а также создания специальных методик и расчетных программ для обработки получаемой информации с целью достижения максимальной точности измерений;

- экспериментально подтвердить предложенные расчетные методики на искусственных аппаратах и опытных образцах электрических машин.

**Методы исследований.** При комплексных исследованиях коллекторно – щеточных узлов использовалась теория планирования эксперимента. При создании универсального программного продукта для расчета коммутационных процессов в обобщенной электрической машине с нетрадиционными конструкциями ее активной зоны широко применялись теория электрических машин, методы математического моделирования, методы расчета магнитных полей, численные методы решения дифференциальных уравнений. Для повышения надежности вычислений и расширения области варьирования параметров исследуемых коммутируемых контуров использовалась модификация численных методов интегрирования дифференциальных уравнений, позволяющая исключить операции деления на ноль при малых значениях индуктивностей секций. В процессе расчетов и анализа математических зависимостей применялись электронные таблицы Excel, а также специализированный пакет программ MathCAD. Разработка оригинальных программных продуктов осуществлялась в средах Visual C<sup>++</sup> 6.0 и LabView 5.0.

Экспериментальные исследования проводились на специально разработанных установках с использованием статистических методов обработки результатов измерений.

**Научная новизна** результатов диссертационной работы заключается в следующем:

- создана универсальная расчетная модель для исследования коммутационных процессов машинах с различной электромагнитной архитектурой активной зоны, позволяющая рассчитывать основные коммутационные показатели коллекторных электрических машин с различными конструкциями обмоток якоря при использовании индукторов с разной степенью анизотропии магнитных свойств в машинах с дополнительными полюсами и без них;

- предложена оригинальная математическая модель расчета коммутационных процессов в коллекторных электрических машинах с учетом влияния механических факторов, позволяющая определять деформации контактного слоя и сопротивления в контакте между щеткой и коллектором с учетом упругих свойств коллекторно-щеточного узла;

- впервые проведен анализ влияния факторов механической природы на процесс коммутации и коммутационную напряженность электрических машин с нетрадиционной электромагнитной архитектурой активной зоны;

- предложены принципы создания высокоточных диагностических средств для динамического контроля профиля коллекторов с применением компьютерной техники и специальных методик обработки получаемой информации, позволяющих значительно повысить точность измерений.

**Практическая ценность работы** определяется следующим:

- создано универсальное программное обеспечение, позволяющее рассчитывать основные коммутационные показатели коллекторных электрических машин с традиционными и нетрадиционными конструктивными решениями элементов их активной зоны, что обуславливает ее практическое применение для решения широкого круга задач при проектировании электрических машин малой мощности;

- разработана диагностическая система для дистанционного контроля профилей коллекторов в статических и динамических режимах их работы, отличающаяся высокой точностью измерений благодаря применению оригинальных конструкций токовихревых датчиков, цифровой обработке измеряемого сигнала на компьютере и использованию метода поламельной базовой коррекции в процессе измерений, что особенно важно при отработке конструкций коллекторов и технологий их изготовления;

- создано программное обеспечение позволяющее рассчитывать коммутационный процесс в электрических машинах малой мощности с различной электромагнитной архитектурой активной зоны с учетом действия механических факторов, что дает возможность точнее оценить коммутационную напряженность коллекторных электрических машин и формулировать требования по оптимизации основных параметров коллекторно-щеточного узла.

**Реализация результатов работы.** Выполнение ряда задач диссертационной работы осуществлялось в соответствии с грантом

Томского политехнического университета, а также с грантом 7.14С /2003 по фундаментальным исследованиям в области энергетики и электротехники Минобразования РФ. Теоретические, конструкторские и технологические проблемы решались применительно к изделиям специальной техники и электроинструмента на следующих предприятиях: ФГУП научно-производственный центр «Полус» (г. Томск); Пермская научно-производственная приборостроительная компания.

Разработанный программный продукт для расчета коммутации электрических машин малой мощности применяется в Пермской научно-производственной приборостроительной компании и на научно-производственном центре «Полус» (г. Томск).

Использование материалов диссертационной работы предприятиями и научно-исследовательскими организациями подтверждено актами о внедрении.

**Апробация работы.** Основные положения диссертации докладывались и получили одобрение на V областной научно-практической конференции «Современные техника и технологии» (Томск, 1999); on the third Russian-Korean International Symposium on Science and Technology (Novosibirsk, 1999); VII международной научно-практической конференции «Современные техника и технологии» (Томск, 2001); на международной научно-технической конференции «Электромеханические преобразователи энергии» (Томск, 2001); on the 5<sup>th</sup> Korean- Russian International Symposium on Science and Technology (TomsK, 2001); on the eight International Scientific and Practical Conference of Students, Post graduates and Young Scientists «Modern Technique and Technologies» (TomsK, 2002); на V международной конференции «Электромеханика, электротехнологии и электроматериаловедение» (Крым, 2003); на VIII всероссийской научно-технической конференции «Современные тенденции в развитии и конструировании коллекторных и других электромеханических преобразователей энергии» (Омск, 2003); на международной научно-технической конференции «Измерение, контроль, информатизация» (Барнаул, 2003); на научных семинарах кафедр «Электропривод и электрооборудование» и «Электрические машины и аппараты» Томского политехнического университета.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 14 печатных работ автора, в том числе получено положительное решение о выдаче патента РФ на изобретение.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех основных разделов, заключения, выполнена на 106 страницах машинописного текста, содержит 49 страниц иллюстраций, 1 таблицу, список используемой литературы из 101 наименования и приложений на 3 страницах. Общий объем диссертации составляет 155 страниц.

### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цели и основные задачи работы, представлена научная новизна, практическая ценность, апробация и реализация выполненных исследований.

**В первом** разделе излагается методология создания и структура универсальной расчетной модели для исследования коммутационных процессов в машинах с традиционными и нетрадиционными конструкциями элементов активной зоны коллекторных машин малой мощности, включая электродвигатели без дополнительных полюсов.

В последнее время, созданы конструкции демпфированных обмоток якоря коллекторных электрических машин, отличающиеся тем, что их секции состоят из отдельных катушек, пространственно распределенных по пазам якоря, а также конструкции индукторов, отличающиеся анизотропией магнитных свойств в области основных полюсов. Многообразие возможных вариантов выполнения демпфированных обмоток якоря и целесообразность их применения потребовали создания математической модели коллекторной электрической машины с произвольной конструкцией обмотки якоря, учитывающей влияние поля основных полюсов на коммутацию и возможную анизотропию магнитных свойств индуктора. На рис. 1 проиллюстрирована схема, с помощью которой основные элементы расчетной модели приводятся к общей системе координат по выражениям (1).

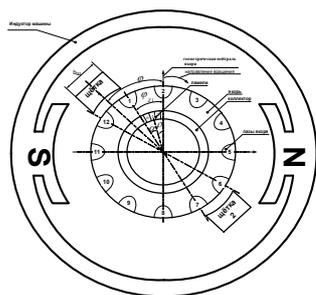


Рис. 1

Привязка основных элементов расчетной модели к общей системе координат:

$$\varphi_{z1} = \rho \pm \alpha, \quad (1)$$

$$\Psi_N = \varphi_{z1} - (N-1) 360/K_{\text{П}},$$

где  $\varphi$  – угол сдвига щёток с геометрической нейтрали;

$\alpha$  – угол между первым пазом и первой ламелью;  $\rho$  – пространственное положение первой ламели

относительно геометрической нейтрали;

$\varphi_{z1}$  – пространственное положение первого паза относительно геометрической нейтрали;

$\Psi_N$  - пространственное положение текущего паза;

$K_{II}$ - количество пазов в якоре;  $N$  – порядковый номер паза, положение которого определяется.

Распределение величины намагничивающей силы реакции якоря вдоль расточки индуктора рассчитывается по уравнению (2), в котором заложена возможность изменения расчетного магнитного сопротивления поперек основных полюсов.

$$F_{ax} = \frac{\pm F_n + F'_{ax}(1 + K_{з.н.})}{(1 + K_{з.н.})}, \quad (2)$$

где  $F'_{ax}$  - распределение НС реакции якоря вдоль расточки индуктора для его изотропной конструкции;  $F_n$  - постоянная составляющая НС реакции якоря, зависящая от величины смещения щеток с геометрической нейтрали;

$K_{з.н.} = \frac{\delta_{з.н.}}{\delta} \left( \frac{0,5b_n + b_{м.н.}}{h_n} \right)$  - коэффициент, определяющий влияние эквивалентного зазора в средней части основных полюсов;  $\delta_{з.н.}$  - эквивалентное значение зазора в средней части основных полюсов;  $\delta$  - зазор под основным полюсом;  $b_n$  - ширина наконечника полюса;  $b_{м.н.}$  - межполюсное расстояние по окружности якоря;  $h_n$  - высота основного полюса.

В расчетной модели индукция в межполюсном пространстве определяется в соответствии с выражением (3).

$$x = \frac{a_0}{\pi} \left( \arctg \frac{a_0}{\delta} \frac{B}{B_m} + \frac{\delta}{a_0} \text{Arth} \frac{B}{B_m} \right), \quad (3)$$

где  $x$  - координата по поверхности якоря от геометрической нейтрали;

$a_0$  – ширина междуполюсного окна по поверхности якоря;  $\delta$  – равномерный воздушный зазор под главным полюсом;  $B$  – индукция магнитного поля в междуполюсном пространстве в точке с координатой  $x$ ;  $B_m = F_v \mu_0 / \delta$  - магнитная индукция

равномерного поля возбуждения под серединой полюса;  $F_v$  – намагничивающая сила основного поля.

С целью повышения устойчивости процесса интегрирования и обеспечения решения дифференциальных уравнений при малых величинах индуктивностей секций использована разновидность численного метода интегрирования, при которой уравнения коммутируемых контуров записываются в виде выражений (4), (5).

$$\begin{cases}
 L_{s1} \frac{di_{1k}}{dt} + \left( i_{1k-1} + \frac{di_{1k}}{dt} \cdot dt \right) (R_{s1} + r_{n1k} + r_{c1k}) = i_a (r_{n1k} - r_{c1k}) - e_{1k} \\
 L_{s1} \frac{di_{1k}}{dt} + M_{12} \frac{di_{2k}}{dt} + \left( i_{1k-1} + \frac{di_{1k}}{dt} \cdot dt \right) (R_{s1} + r_{n1k} + r_{c1k}) = \\
 = \left( i_{2k-1} + \frac{di_{2k}}{dt} \cdot dt \right) \cdot r_{n1k} - i_a r_{c1k} - e_{1k}; \\
 L_{s2} \frac{di_{2k}}{dt} + M_{21} \frac{di_{1k}}{dt} + \left( i_{2k-1} + \frac{di_{2k}}{dt} \cdot dt \right) (R_{s2} + r_{n2k} + r_{c2k}) = \\
 = \left( i_{1k-1} + \frac{di_{1k}}{dt} \cdot dt \right) \cdot r_{n2k} - i_a r_{c2k} - e_{2k}.
 \end{cases} \quad (5)$$

где  $R_{s1}$ ,  $R_{s2}$  – активные сопротивления секций 1, 2;  $L_{s1}$ ,  $L_{s2}$  – индуктивности коммутируемых секций 1, 2;  $M_{12}$  – взаимная индуктивность между секциями 1, 2;  $i_1$ ,  $i_2$  – токи секций 1, 2;  $r_{n1}$ ,  $r_{n2}$  – контактные сопротивления под набегающими краями щетки для секций 1, 2;  $r_{c1}$ ,  $r_{c2}$  – контактные сопротивления под сбегающими краями щетки для секций 1, 2;  $e_1$ ,  $e_2$  – коммутирующие ЭДС секций 1, 2.

При этом приращение тока коммутируемой секции для уравнения (4) на  $k$  – ом шаге интегрирования рассчитываются по выражению (6):

$$\Delta i_{1k} = \frac{[i_a (r_{n1k} - r_{c1k}) - i_{1k-1} (R_{s1} + r_{n1k} + r_{c1k}) - e_{1k}] \cdot \Delta t}{L_{s1} + \Delta t \cdot (R_{s1} + r_{n1k} + r_{c1k})} \quad (6)$$

Расчетные выражения для контактных сопротивлений в модели представлены уравнениями 7.

$$r_H = r_{\max} e^{\frac{-t}{\tau_r}} \quad r_c = r_{\max} e^{\frac{-T_k - t}{\tau_r}} \quad \tau_r = \frac{-T_k}{\ln \frac{r_{\min}}{r_{\max}}}, \quad (7)$$

Где  $r_{\max}$  и  $r_{\min}$  - максимальное и минимальное сопротивления как для сбегающего, так и для набегающего краев щетки;

$\tau_r$  – постоянная, характеризующая изменение контактного сопротивления во времени.

На базе разработанной универсальной расчетной модели коллекторной электрической машины малой мощности создан программный продукт для исследования коммутационных процессов.

Достоинством разработанной программы является удобство пользования данным программным продуктом, что достигается благодаря хорошо организованному интерфейсу программы, основное меню которого приведено на рис. 2.



Рис. 2 Меню «Редактирование данных»

Разработанная программа позволяет производить анализ особенностей коммутационных процессов в машинах без дополнительных полюсов, у которых величина коммутирующей ЭДС существенно изменяется в процессе коммутации. На рис. 3 - 4 приведены расчетные кривые токов коммутации

первой (1) и второй (2) секций паза и соответствующих коммутирующих ЭДС секций серийной машины без дополнительных полюсов в реверсивном режиме работы.

Разработанная программа позволяет производить анализ особенностей коммутационных процессов в машинах без дополнительных полюсов, у которых величина коммутирующей ЭДС существенно изменяется в процессе коммутации. На рис. 3 - 4 приведены расчетные кривые токов коммутации первой (1) и второй (2) секций паза и соответствующих коммутирующих ЭДС секций серийной машины без дополнительных полюсов в реверсивном режиме работы.

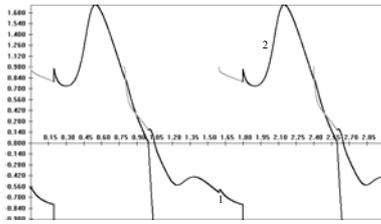


Рис. 3  $i/i_a=f(t/T_k)$

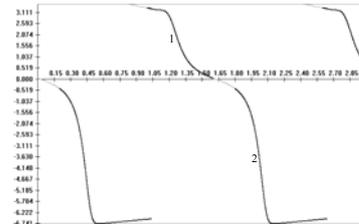


Рис. 4  $e_k(B)=f(t/T_k)$

Аналогичные характеристики для демпфированной обмотки якоря по рис. 5 представлены на рис. 6 и 7. Здесь  $W_{сер}$ - максимальная энергия искрения по якорю для серийного образца электрической машины, а  $W$  – аналогичный показатель для исследуемой конструкции электрической машины.

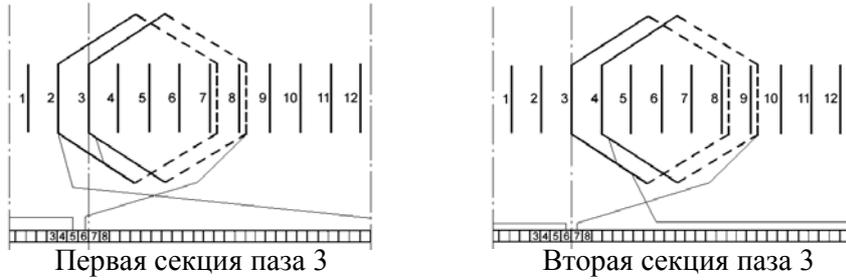


Рис. 5 Демпфированная обмотка якоря  $U_n=2$

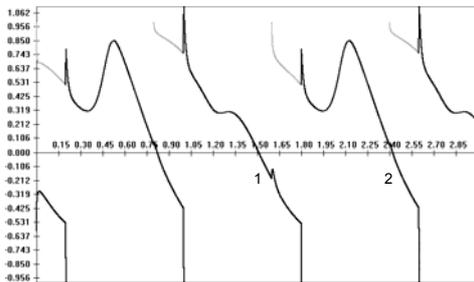


Рис. 6  $i/i_a=f(t/T_k)$   
 $W_{сер}/W=14,3$

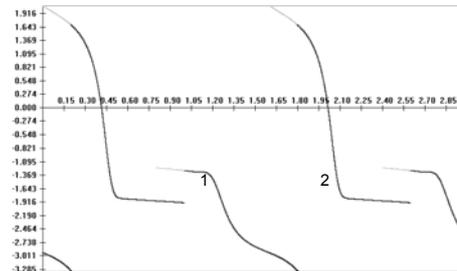


Рис. 7  $e_k(B)=f(t/T_k)$

Из анализа коммутационных процессов следует, что применение рассмотренного варианта демпфированной обмотки позволяет снизить суммарную энергию искрения секций паза якоря на порядок и более. Проведенные ранее исследования показали, что распределение магнитного поля в воздушном зазоре электрических машин без дополнительных полюсов влияет как на величину тока разрыва в каждой отдельно взятой секции паза, так и на величину разброса между указанными токами. Для уменьшения данных показателей целесообразно снижение поперечной реакции якоря. С этой целью в разработанной расчетной модели предусмотрена возможность изменения анизотропии магнитных свойств в области основных полюсов.

В результате увеличения магнитной индукции под сбегающими краями полюсов у анизотропной конструкции индуктора суммарная энергия искрения секций паза якоря снижается в 1,5 – 2 раза в базовом электродвигателе и на несколько порядков у машин с демпфированными обмотками якоря, как это видно из расчетных кривых на рис. 8, 9.

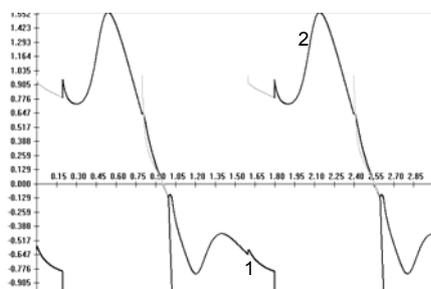


Рис. 8  $i/i_a=f(t/T_k)$   
 $W_{cep}/W=1,73$

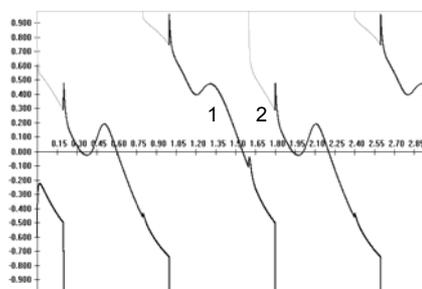


Рис. 9  $i/i_a=f(t/T_k)$   
 $W_{cep}/W=21,2$

**Во втором** разделе излагаются принципы построения диагностического комплекса нового поколения с высокими потребительскими свойствами для дистанционного контроля механического состояния коллекторно-щеточных узлов электрических машин.

С целью оценки механического состояния коллекторно-щеточного узла при участии автора разработана диагностическая система, общий вид и структурная схема которой представлены на рис.10, 11.



Рис. 10 Общий вид диагностической системы

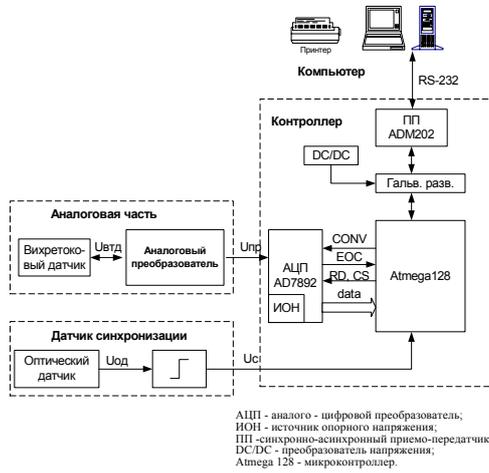


Рис. 11 Функциональная схема диагностической системы

Управление взаимодействием персонального компьютера и контроллера в диагностической системе производится с помощью программы, разработанной в графического программирования LabView 5.0, панель управления которой представлена на рис. 12.

Обработка измеряемой информации в цифровом виде по специальным методикам с использованием метода поламальной базовой коррекции обеспечивает высокую точность измерений в статическом и динамическом режимах работы электрических машин, что особенно важно при отработке конструкций коллекторов и технологий их изготовления.

При измерении профиля коллектора с помощью диагностической системы оценивалось влияние коррекции коэффициента усиления измерительного тракта на измерение расстояния до произвольно взятой ламели.

На рис. 13 приведена кривая изменения коэффициента коррекции в зависимости от ламелей коллектора при частоте

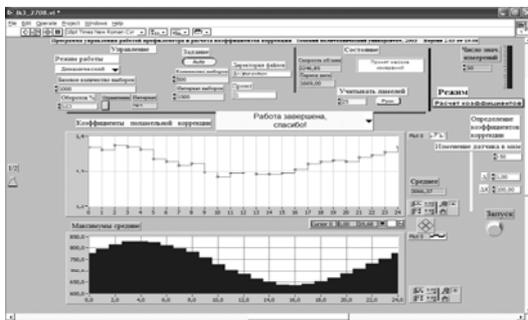


Рис. 12 Панель управления в режиме «Результаты измерений»

вращения 6400 об/мин, а на рис. 14 проиллюстрированы кривые изменения профиля коллектора с без учета корректирующих коэффициентов (1) и с коррекцией коэффициентов усиления измерительного тракта (2) при той же частоте вращения, из которых видно, что помимо корректировки общего уровня исследуемого профиля коллектора, составляющей в среднем 35%, произведена и поламельная коррекция, позволяющая исключить погрешности вызванные неодинаковыми удельными электрическими сопротивлениями ламелей и неточностью ориентации датчика относительно измеряемой поверхности.

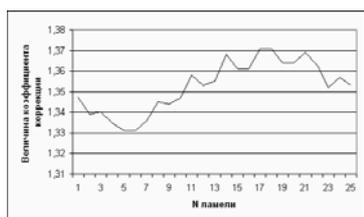


Рис. 13

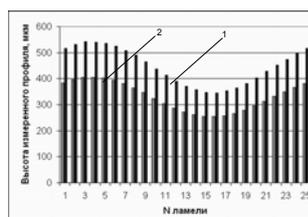
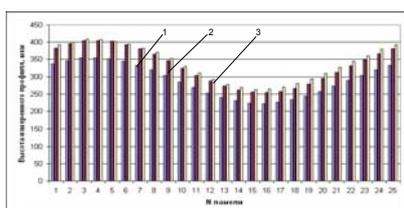


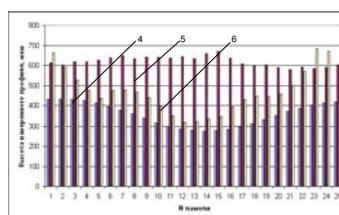
Рис. 14  
1 - без коррекции  
2 - с коррекцией

На рис. 15 и 16 показано изменение профиля коллектора при различных частотах вращения.



- 1 - n=3000 об/мин
- 2 - n=6400 об/мин
- 3 - n=10000 об/мин

Рис. 15



- 4 - n=15200 об/мин
- 5 - n=20400 об/мин
- 6 - n=23600 об/мин

Рис. 16

Сравнение кривых 1 и 3 показало, что при увеличении частоты вращения с 3000 об/мин до 10 000 об/мин уровень профиля коллектора увеличился в среднем на 13 %. Наличие методики поламельной базовой коррекции в созданной диагностической системе позволяет устранить погрешности измерений связанные с изменением частоты вращения, чего нельзя добиться с помощью существующих диагностических систем для измерения профиля коллектора вихретокового типа.

При отсутствии резонансных явлений в КЩУ на частотах вращения до 20 000 об/мин (рис.15) наблюдается хорошая повторяемость изменений характера профиля, что также позволяет говорить о высоких точностных показателях разработанной системы. При этом истинные перепады между ламелями можно получать, производя вычитание из измеренного профиля определенного количества гармоник, полученных при разложении этого профиля в ряд Фурье рис. 17.

Наличие резонанса в системе КЩУ (рис. 16) требует достаточно сложного математического аппарата для обработки измеренного сигнала с целью определения истинного профиля коллектора либо применения измерительной системы двухканального типа.

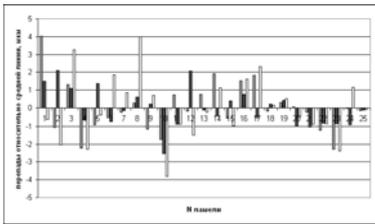


Рис. 17

В третьем разделе разрабатывается математическая модель для расчета процесса коммутации в коллекторных электрических машинах с учетом влияния механических факторов, позволяющая определять деформации контактного слоя в контакте между щеткой и коллектором с учетом упругих свойств КЩУ, а также сопротивления сбегавшего и набегающего краев щетки в каждой точке по окружности коллектора.

В простейшем случае коллекторно-щеточный узел можно представить в виде расчетной модели, показанной на рис. 18.

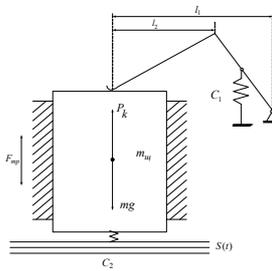


Рис. 18

Значения деформации контактного слоя «щетка – коллектор» находятся из дифференциального уравнения

$$F_{дин}(\Delta_k) = m_p x'' \pm h m_p g + kx' + \mu^2 c_1 x + F_s \quad (8)$$

где  $F_{дин}$  - динамическая сила, создающая давление в контакте;  
 $\Delta_k$  - деформация контактного слоя «щетка - коллектор»;

$$m_p = m_{щ} + \frac{1}{3} m_{кп};$$

$m_{кп}$  - масса курка и пружины;

$h$  - коэффициент, характеризующий положение щетки в пространстве;

$k$ - коэффициент вязкого трения в системе «щетка - держатель»;

$$\mu = \frac{l_1 - l_2}{l_1} .$$

При этом величина динамической силы, действующей со стороны щетки на ламели, определяется из систем уравнений аналогичных (9).

$$\begin{cases} F_1 = \Delta_k^2 a_k t_{щ} (b_{щ} - 2\delta_{из} - b_1 - b_3) \\ F_2 = (\Delta_k \pm \Delta_1)^2 a_k t_{щ} b_l \\ F_3 = (\Delta_k \pm \Delta_1 \pm \Delta_2)^2 a_k t_{щ} b_3' \\ F_0 = F_1 + F_2 + F_3 \end{cases} \quad (9)$$

Давления в переходных слоях между щеткой и ламелями находятся из уравнений (10).

$$\begin{aligned} P_1 &= \Delta_k^2 a_k; \\ P_2 &= (\Delta_k \pm \Delta_1)^2 a_k; \\ P_3 &= (\Delta_k \pm \Delta_1 \pm \Delta_2)^2 a_k. \end{aligned} \quad (10)$$

Проводимости по телу щетки и ламли в процессе коммутации в общем виде определяются по выражениям 11.

$$\gamma_{щ} = \frac{t_{щ}}{K_2 (K_1 \rho_x \rho_y)^2} \cdot t h \left( \frac{b_{щ}}{h_{щ}} \cdot \left( \frac{k_1 \rho_x}{\rho_y} \right)^{0.5} \cdot \frac{t}{T_k} \right); \quad \gamma_l = \frac{t_l \alpha_l}{A \rho_r}, \quad (11)$$

где  $h_{щ}$  – высота щетки;  $\rho_x$  и  $\rho_y$  – удельные электросопротивления щеточного материала в поперечном и продольном направлениях;  $K_2$  – коэффициент, учитывающий эффект стягивания линий тока;  $K_1$  – коэффициент, зависящий от анизотропии электрических свойств материала и действительной площади контакта;  $t$  – текущее значение времени;  $T_k$ - период коммутации;  $A = \ln \frac{r_2}{r_1}$ ;  $r_1$  и  $r_2$  – внутренний и наружный радиусы пакета

ламелей;  $\rho_l$  – удельное сопротивление материала ламелей в радиальном направлении;  $t_l$  – длина ламели;  $\alpha_l$  – угловой размер ламели в тангенциальном направлении.

**Коэффициенты  $K_1$  и  $K_2$  определяются экспериментально.**

Зависимости коэффициента  $K_2$  от основных параметров работы коллекторно-щеточного узла в кодированных значениях ( $x_1$ -давление в контакте;  $x_2$ -температура окружающей среды;  $x_3$ -плотность тока в контакте) для контактной пары ЭГ74-М1 описывается уравнением регрессии (12).

$$K_2 = 8,1278 - 3,24x_1 - 3,4644x_2 - 5,22x_3 + 1,4778x_1x_2 + 2,74x_1x_3 + 2,8889x_2x_3 - 1,2978x_1x_2x_3 \quad (12)$$

Зависимость коэффициента  $K_1$  от  $K_2$  представлена выражением

$$K_1^{0,5} = - 3, 5502 + 5,8939 K_2 \quad (13)$$

С целью уточнения процесса коммутации посредством учета влияния механических факторов при расчете сопротивлений  $r_{нб}$  и  $r_{сб}$ , при непосредственном участии автора разработан программный продукт, представляющий собой подпрограмму к базовой универсальной программе для исследования коммутационных процессов в КЭМ. На рис. 18 представлена основная диалоговая панель подпрограммы «Расчет коммутации с учетом механических факторов». Здесь в всплывающем меню (рис. 19) вводится профиль коллектора, измеренный с помощью диагностической системы рис. 20.

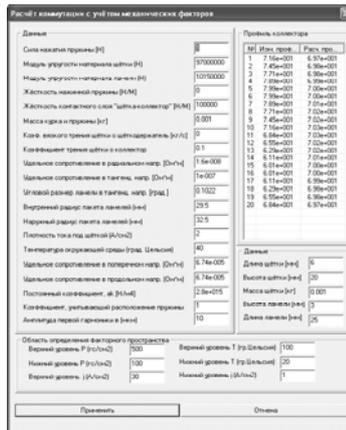


Рис. 19 Меню «Расчет коммутации с учетом механических факторов»

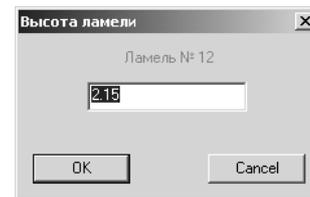


Рис. 20 Меню «Задания профиля коллектора»

На рис. 21 приведена кривая изменения деформации контактного слоя по окружности коллектора. При этом из рис. 22 наглядно видно, что все сопротивления от секции к секции зависят от механического состояния КЩУ.

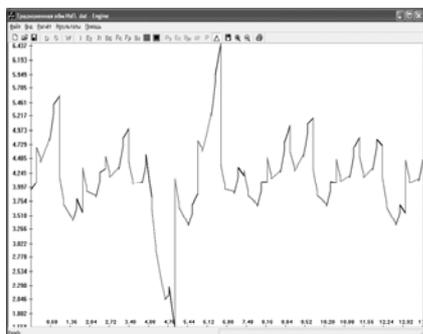


Рис. 21  $\Delta(\text{мкм})=f(t/Tk)$

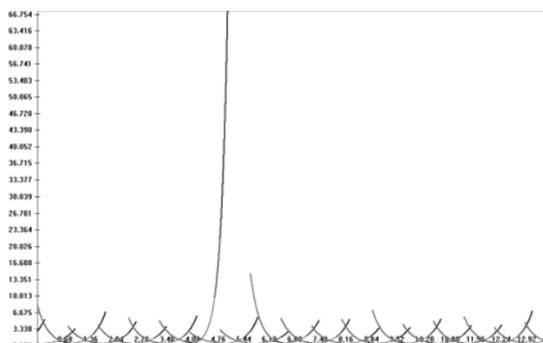


Рис. 22  $r(\text{Ом})=f(t/Tk)$

Для определения влияния основных параметров КЩУ на коммутационный процесс оценивалось влияние перепадов между ламелями, биения коллектора и их совместное действие. Деформация контактного слоя для идеального профиля коллектора (без биений и перепадов между рядом лежащими ламелями) показана на рис. 23.

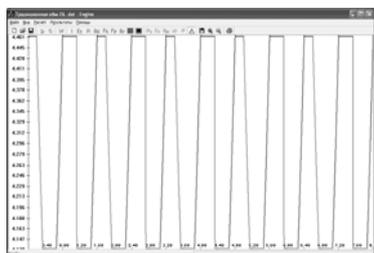


Рис. 23  $\Delta(\text{мкм})=f(t/Tk)$

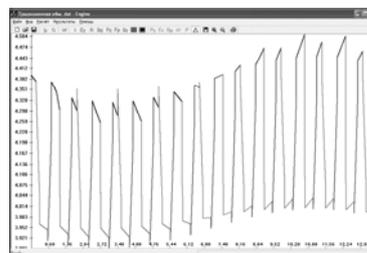


Рис. 24  $\Delta(\text{мкм})=f(t/Tk)$

На рис. 24 представлена кривая изменения деформации контактного слоя при влиянии лишь эксцентриситета (биения) коллектора. Амплитуда биения составляет 10 мкм.

Анализ расчетных данных показал, что своему воздействию на скользящий контакт перепады между ламелями значительно превосходят такой показатель, как биение коллектора, при котором суммарная энергия искрения по якорю в разы меньше, чем при наличии лишь перепадов между ламелями.

Получена комбинация положения пластин коллектора, при которой наблюдается наихудший, с точки зрения коммутации, режим. Данная комбинация заключается в выступании ламели на вершине возрастающей части синусоиды и западании пластины на впадине спадающей ее части.

На рис. 25 приведена кривая изменения деформации контактного слоя для данного случая.

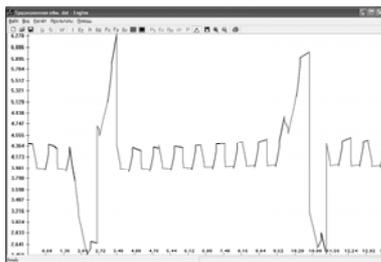


Рис. 25  $\Delta(\text{мкм})=f(t/T_k)$

При описанной комбинации максимальная энергия искрения секции паза имеет наибольший показатель ( $W_{\text{max}}/W_{\text{max}_{\text{сер}}}=21,3$ ), поэтому целесообразно проводить оценку коммутации электрических машин при указанном механическом состоянии коллектора.

Разработанный программный продукт позволяет произвести оценку допустимого, с точки зрения обеспечения устойчивого контактирования, выступания и западания коллекторных пластин, что является немаловажным при проектировании и отработке технологии изготовления коллекторов.

**В четвертом разделе** исследуется влияние механических факторов на коммутационные процессы в электрических машинах с нетрадиционной электромагнитной архитектурой активной зоны.

С целью оценки влияния факторов механической природы на коммутацию КЭМ с нетрадиционной электромагнитной архитектурой активной зоны проводилась оценка влияния наихудшего механического состояния скользящего контакта на электрические машины с демпфированными обмотками якоря рис. 26 и 27.

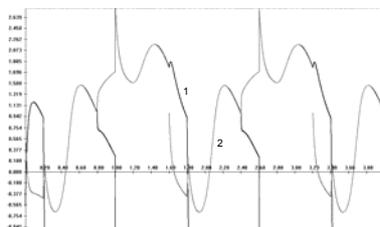


Рис. 26  $i/i_a=f(t/T_k)$   
Реверсивный режим  
 $W_{\text{сер}}/W = 13,3$

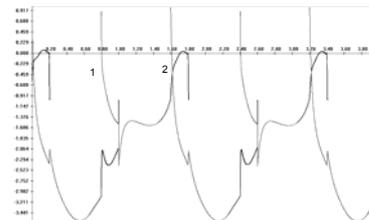


Рис. 27  $i/i_a=f(t/T_k)$   
Нереверсивный режим  
( $\alpha=27$  град)  
 $W_{\text{сер}}/W = 15$

Расчет коммутации электрических машин с демпфированными обмотками якоря с учетом влияния механических факторов показал, что использование данных обмоток сопровождается снижением суммарной энергии искрения секций паза якоря в реверсивном режиме в 13 - 14 раз и максимальной энергии искрения секций в 20 – 30 раз по сравнению с серийным вариантом исполнения электрической машины.

Многokратное снижение энергии искрения под щетками благоприятно отражается на ряде важных эксплуатационных показателей изделий. В первую очередь, это положительно влияет на характеристики изнашивания элементов коллекторно-щеточного узла, поскольку эрозионная составляющая изнашивания у напряженных в коммутационном отношении машин, как правило, преобладает. Следует отметить, что полученные расчетные данные с достаточной степенью соответствуют результатам экспериментальных исследований, полученных при том же механическом состоянии скользящего контакта. Так, например, в модернизированном образце перфоратора БПР 241Е с демпфированной обмоткой на якоре снижение степени искрения позволило уменьшить интенсивность изнашивания щеток в 19,2 раза.

На рис. 28 и 29 проиллюстрированы кривые изменения токов коммутируемых секций коллекторной электрической машины с анизотропным индуктором в реверсивном и нереверсивном режиме работы.

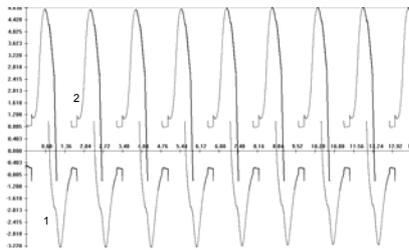


Рис. 28  $i/i_a=f(t/T_k)$   
 Реверсивный режим  
 $W_{ср}/W = 1,5$

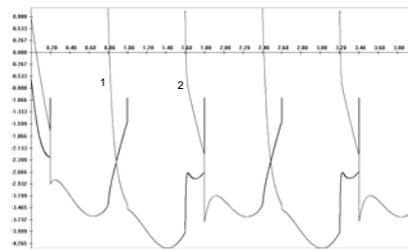


Рис. 29  $i/i_a=f(t/T_k)$   
 Нереверсивный режим  
 ( $\alpha=27$  град)  
 $W_{ср}/W = 1,38$

Коммутация электрических машин с анизотропными индукторами, при наихудшем механическом состоянии скользящего контакта, сопровождается снижением суммарной

энергии искрения секций паза якоря в 1,5 – 1,7 раз и максимальной энергии искрения секций в 1,7 – 2,2 раза по сравнению с базовым вариантом исполнения электрической машины.

При исполнении электрической машины с демпфированной обмоткой якоря и увеличенной анизотропией магнитных свойств индуктора изменение тока в коммутируемых секциях показано на рис. 30 и 31.

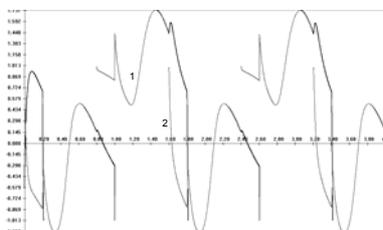


Рис. 30  $i/i_a=f(t/T_k)$   
 Реверсивный режим  
 $W_{\text{ср}}/W = 20$ ;  
 $W_{\text{макср}}/W_{\text{макс}} = 34$

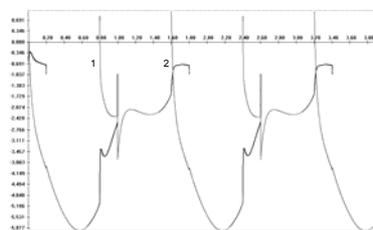


Рис. 31  $i/i_a=f(t/T_k)$   
 Нереверсивный режим  
 $(\alpha=27 \text{ град})$   
 $W_{\text{ср}}/W = 22,3$

Анализ коммутации коллекторных электрических машин с демпфированными обмотками якоря и анизотропными индукторами, при наихудшем механическом состоянии скользящего контакта, показал возможность снижения суммарной энергии искрения по якорю почти в 20 раз и уменьшении максимальной энергии искрения отдельной секции ( $W_{\text{макс}}$ ) в 34 раза. В модернизированном образце перфоратора БПР 241Е с демпфированной обмоткой на якоре и анизотропным индуктором снижение степени искрения позволило уменьшить интенсивность изнашивания щеток в 34,6 раза.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных в диссертационной работе теоретических и экспериментальных исследований направленных на создание программно – аппаратных средств для оценки коммутационной напряженности коллекторных электрических машин малой мощности с учетом механического состояния коллекторно – щеточного узла можно сделать следующие основные выводы:

1. Разработанная математическая модель процесса коммутации коллекторных электрических машин и созданное на ее базе программное обеспечение позволяют рассчитывать коммутационный процесс учитывая коммутирующие ЭДС от результирующего поля,

определять ряд других важных коммутационных показателей, как для традиционных однокатушечных секций обмотки якоря, так и распределенных определенным образом катушек секций, при использовании индукторов с различной степенью анизотропии магнитных свойств в машинах с дополнительными полюсами и без них.

2. Проведенные исследования показали, что учет мгновенных величин коммутирующих ЭДС от результирующего магнитного поля позволяет уменьшить погрешность расчетов коммутационных процессов электрических машин до 40 % в сравнении с методами расчета коммутации, полученными с применением допущения о постоянстве коммутирующих ЭДС.
3. Проведенные исследования показали, что изменение частоты вращения коллектора высокоскоростных коллекторных машин в диапазоне от 3000 до 10000 об/мин может вносить погрешности измерений порядка 10% и более. Разработанная диагностическая система нового поколения для контроля профиля коллекторов в статических и динамических режимах их работы отличается высокой точностью измерений благодаря цифровой обработке измеряемого сигнала на персональном компьютере и использованию метода поламальной базовой коррекции в процессе измерений, который позволяет существенно снизить погрешности измерений, обусловленные изменением частоты вращения, различиями удельных электрических сопротивлений поверхностных слоев контролируемых профилей и неточностью установки измерительных датчиков относительно исследуемых объектов.
4. Создана математическая модель и программное обеспечение для расчета контактных сопротивлений в процессе коммутации коллекторных электрических машин с учетом механического состояния скользящего контакта, позволяющие оценить коммутационную напряженность КЭМ с учетом влияния механических факторов.
5. С помощью разработанного программного обеспечения определено, что западание ламели оказывает большее влияние на ухудшение коммутационного процесса, чем ее выступание, а наихудшим (с точки зрения коммутации) является состояние рабочей поверхности коллектора, при котором ламель на вершине возрастающей части синусоиды, описывающей биение коллектора, выступает, а ламель на

впадине спадающей ее части западает, поэтому наиболее целесообразным является оценка коммутационной напряженности коллекторных электрических машин при указанном механическом состоянии коллектора.

6. Расчет коммутации электрических машин с демпфированными обмотками якоря при наихудшем механическом состоянии скользящего контакта показал, что при использовании данных обмоток достигается снижение суммарной энергии искрения секций паза якоря в реверсивном режиме в 13 - 14 раз и максимальной энергии искрения секций в 20 – 30 раз по сравнению с серийным вариантом исполнения обмотки электрической машины.
7. Коммутация электрических машин с анизотропными индукторами, при наихудшем механическом состоянии скользящего контакта, сопровождается снижением суммарной энергии искрения секций паза якоря в 1,5 – 1,7 раз и максимальной энергии искрения секций в 1,7 – 2,2 раза по сравнению с базовым вариантом исполнения электрической машины.
8. Исследования коммутации коллекторных электрических машин с совместным использованием демпфированных обмоток и анизотропных индукторов, при наихудшем механическом состоянии скользящего контакта, показали возможность достижения синергетического эффекта заключающегося в снижении суммарной энергии искрения по якорю почти в 20 раз и уменьшении максимальной энергии искрения отдельной секции в 34 раза, что подтверждается экспериментальными данными.

#### **Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:**

1. Качин С.И., Боровиков Ю.С., Бекишев Р.Ф. Улучшение эксплуатационных показателей коллекторных электрических машин применением анизотропных конструкций индукторов // Известия вузов. Электромеханика. – 2003. - № 3. – с. 44 - 49.
2. Бекишев Р.Ф., Качин С.И., Боровиков Ю.С. Пути совершенствования коллекторных электрических машин систем электроприводов // Известия Томского политехнического университета. – 2003. - т.3, №3. – с. 107- 113 .
3. Якорь электрической машины: решение о выдаче патента на изобретение от 05.08.2003 по заявке №2002119299/ С.И. Качин, Ю.С. Боровиков.- 3 с.
4. Borovikov Yu. S. Diagnostic system for the estimation of the collector and brush units mechanical state under static and dynamic operating conditions // Modern Technique and Technologies. The VIII International Scientific and

- Practical Conference of Students, Post graduates and Young Scientists. – Tomsk: Tomsk Polytechnic University, 2002. – P. 104.
5. Боровиков Ю.С., Дементьев Ю.Н. Программируемый микроконтроллер для управления универсальным коллекторным двигателем. // «Современные техника и технологии». Труды V областной научно-практической конференции. – Томск: ТПУ, 1999. – с. 329.
  6. Качин С.И., Боровиков Ю.С., Нечаев М.А. Автоматизированный диагностический комплекс для оценки механического состояния коллекторно-щеточных узлов в статических и динамических режимах // «Измерение, контроль, информатизация». Материалы международной научно-практической конференции. – Барнаул: АлГТУ, 2003. – с. 294.
  7. Kachin S.I., Kolosov D.A., Borovikov Y.S., Bekishev R.F. Decrease of Radio Interference Level of Collector Electrical Machines with the Help of Armature Damper Winding. - Proceedings of the 5<sup>th</sup> Korean- Russian International Symposium on Science and Technology. KORUS 2001, Tomsk, 2001, p. 158-161.
  8. Бекишев Р.Ф., Боровиков Ю.С., Качин С.И. Универсальная компьютерная программа для расчета коммутации коллекторных электрических машин малой мощности. - Рукопись представлена Томск. политехн. ин-том. Деп. в ВИНТИ 10 января 2002, № 38-В2002.- 27 с.
  9. Бекишев Р.Ф., Качин С.И., Боровиков Ю.С. Особенности коммутации коллекторных машин с демпфированными обмотками на якоре // «Электромагнитные процессы в электрических машинах». Межвузовский тематический сборник научных трудов. – Омск: ОмГУПС, 2003. – с.14 – 18.
  10. Yu. N. Dementiev, Yu. S. Borovikov Programmable mikrocontroller for controlling a single-phase universal collector motor //The Third Russian – Korean International Symposium on Science and Technology. – Novosibirsk: NSTU, 1999. - P. 804.
  11. Боровиков Ю.С. Влияние механики скользящего контакта на коммутационную устойчивость коллекторных машин малой мощности // «Современные техника и технологии». Труды VII международной научно-практической конференции. – Томск: ТПУ, 2001. – с. 107.
  12. Бекишев Р.Ф., Качин С.И., Боровиков Ю.С. Современные коллекторные двигатели электропривода // «Современные тенденции в развитии и конструировании коллекторных и других электрических преобразователей энергии». Труды 8-ой всероссийской науч.-техн. конференции. – Омск: ОмГУПС, 2003. с. 21 – 25.
  13. Бекишев Р.Ф., Качин С.И., Боровиков Ю.С., Колосов Д.А. Математическая модель коллекторных электрических машин малой мощности с нетрадиционными конструкциями активной зоны // «Электромеханические преобразователи энергии». Материалы международной науч.-техн. конф.. – Томск: ТПУ, 2001, с. 153 – 154.

14. Бекишев Р.Ф., Качин С.И., Боровиков Ю.С., Сипайлов Г.А. Индукторы с анизотропией магнитных свойств для коллекторных электрических машин малой мощности // «Электромеханика, электротехнологии и электроматериаловедение». Труды 5-ой международной конференции. – Крым, Алушта, 2003, с. 264 – 270.