

На правах рукописи

**ЗАБОИН Валерий Николаевич**

**НАУЧНО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСЧЕТА  
И ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ ТОКОСЪЕМА  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН**

Специальность 05.09.01 – электромеханика и электрические аппараты

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук

Санкт – Петербург 2003 г.

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Официальные оппоненты: - доктор технических наук, профессор  
Коськин Юрий Павлович,  
доктор технических наук, профессор  
Филиппов Юрий Александрович,  
доктор технических наук, профессор  
Рябинин Игорь Алексеевич.

Ведущая организация: - ОАО «Электросила», Санкт-Петербург

Защита диссертации состоится 17 октября 2003 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.11 при государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, С.-Петербург, Политехническая ул. 29, гл. зд., ауд. 251

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан 10 сентября 2003 г.

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

Попков Е.Н.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Твердощеточные системы токосъема с контактными кольцами (ТСТ) являются одним из важнейших элементов конструкции мощных электрических машин различного назначения, включая турбо- и гидрогенераторы, а также сверхпроводниковые и ферромагнитные униполярные электрические машины. От надежности работы этих систем во многом зависит эксплуатационная надежность машин в целом. Достаточно отметить, что на долю щеточно-контактного аппарата турбогенераторов от 200 до 800 МВт приходится до 20% отказов и до 30% часов простоя генераторов на ремонт. Применение бесщеточных систем возбуждения не позволяет снять остроту проблемы, поскольку частота отказов бесщеточной системы равна частоте отказов ТСТ, а соответствующее время простоя на ремонт даже больше. Кроме того, использование двойного «горячего» или «холодного» резервирования статического тиристорного преобразователя, а также применение приборов мониторинга и диагностики позволяют существенно повысить эксплуатационную надежность ТСТ по сравнению с бесщеточными системами. Особо важно подчеркнуть, что создание многих машин нового поколения, в частности униполярных, просто невозможно без разработки для них ТСТ на токи до 100-120 кА и скорости скольжения контактных пар до 100-150 м/с. Поэтому поиск путей повышения эффективности и надежности как существующих, так и вновь создаваемых сильноточных и многощеточных систем токосъема является актуальным и представляет собой сложную научно-техническую проблему, требующую комплексного рассмотрения целого ряда расчетно-теоретических, исследовательских и проектно-конструкторских задач. Значительный вклад в решение этих задач внесли зарубежные и отечественные исследователи Mayeur R, Neukirchen J., Holm R., McNab I.R., Johnson J.L, Bryant M.D., Everett J.E., Castevens J.M, Lee P.K., Reichner P, Аврух В.Ю., Бекишев Р.Ф., Белый В.А., Брауде Л.И., Бородинец Б.В., Брон О.Б., Глушкин А.Я., Григорьев А.В., Давидович Я.Г., Дридзе М.Л., Дружинин Г.В., Зайчиков В.Г., Зиннер Л.Я., Калашников В.К., Козлов А.А., Кончиц В.В., Копылов И.П., Коськин Ю.П., Круглин В.А., Кузнецов Н.Л., Лирин В.Н., Лифшиц П.С., Маслов В.В., Мешков В.В., Мышкин Н.К., Нэллин

В.И., Новицкий В.Г., Платов В.С., Плохов И.В., Понамарева А.А., Родионов Ю.А., Ростик Г.В., Рубинраут А.М., Рябинин И. А., Савкин В.Г., Скороспешкин А.И., Токарев Б.Ф., Туктаев И.И., Фиалков А.С., Филиппов Ю.А., Харитонов В.В., Хлыстов М.Ф., Хуторецкий Г.М., Цветков В.А., Шабаев Р.К., Юков Э.М. и др.

Однако, несмотря на большое число опубликованных в печати работ, до настоящего времени отсутствуют научно обоснованные подходы к расчету и оптимизации параметров систем токосъема, прогнозированию их технического состояния и надежности. Не решены задачи оценки тепловой напряженности элементов неоднородного и несимметричного скользящего электрического контакта, расчета электродинамических усилий, действующих на эти элементы при наличии сильного магнитного поля в зоне токосъема. Практически не ведутся работы по математическому моделированию электрических, тепловых, физико-химических и триботехнических процессов в скользящем контакте (СК). Нуждаются в уточнении и даже пересмотре некоторые положения современной теории СК.

Решение указанных задач позволит значительно улучшить качество проектирования систем токосъема для электрических машин различного назначения и, в конечном итоге, повысить их эксплуатационную надежность и снизить соответствующие затраты на обслуживание и ремонт. Поэтому тема настоящей диссертационной работы является актуальной. В ней обобщены результаты многолетней деятельности группы сотрудников кафедры «Электрические машины» под руководством и при непосредственном участии автора, проводимой по целевой комплексной программе «Электрооборудование» (п.01.05 и п. 02.03) и программе 0.14.02 «Создать новые виды электротехнического оборудования с использованием явления сверхпроводимости» (приказ Минэлектротехпрома СССР и Минвуза РСФСР №726/671 от 17.11.83), направлению 8.2 научно-технической программы «Повышение надёжности, экономичности и экологичности электроэнергетической системы России» (1993-1995), грантам Минобразования РФ в области энергетики и электротехники (1993-2003), заказами научно-исследовательских и промышленных предприятий (1980–1997).

**Цель работы и задачи исследования.** Основной целью диссертационной работы является разработка научно-методологических основ расчета и проектирования многощеточных и сильноточных систем токосъема электрических машин различного назначения на базе использования многофакторных мультипликативных математических моделей падения напряжения в системах и скорости износа их элементов.

Для достижения поставленной цели были решены следующие логически связанные и частично самостоятельные научно-технические задачи, которые и определяют укрупненную структуру работы:

1. Выполнен анализ режимов и условий работы ТСТ в электроэнергетических и в униполярных сверхпроводниковых и ферромагнитных электрических машинах.

2. Решены теоретические задачи определения сопротивления стягивания тока в электрическом контакте, расчета электродинамических сил, действующих на его элементы в сильном магнитном поле, оценки тепловой напряженности элементов неоднородного и несимметричного скользящего контакта.

3. Проведено расчетно-теоретическое исследование электрических, тепловых, физико-химических и триботехнических процессов в СК.

4. Разработаны и изготовлены физические модели, лабораторные стенды и установки для комплексных исследований характеристик СК и ТСТ в различных режимах и условиях их эксплуатации.

5. Проведены экспериментальные исследования электрических, тепловых и механических характеристик СК и ТСТ в экстремальных режимах их работы по току и скорости скольжения контактных пар.

6. Выполнен анализ статистической значимости влияния влажности, температуры и химического состава различных газовых сред на характеристики СК и ТСТ.

7. Исследовано влияние вида профилирования («нарезки») рабочей поверхности контактных колец на соответствующие коэффициенты теплоотдачи, токораспределение по щеткам, падение напряжения и скорость износа элементов турбогенераторных контактных пар.

8. Разработана методология многофакторного мультипликативного математического моделирования падения напряжения в системе токосяема  $\Delta U$  и скорости износа ее элементов  $\Delta h$ .

9. Определены мультипликативные математические модели вида  $\Delta U(\Delta h) = C \cdot I_{щ}^\alpha \cdot F_{щ}^\beta \cdot V_\kappa^\gamma$  для различных контактных пар, применяемых в силовых и многощеточных системах токосяема электрических машин.

10. Предложена методология расчета и оптимизации параметров ТСТ по минимуму суммарных потерь в системе и (или) требуемому ресурсу ее эксплуатации.

11. Разработана методология оценки технического состояния и прогнозирования надежности систем токосяема электрических машин с учетом принципиальной множественности сменяющих друг друга режимов их эксплуатации.

**Методы исследований.** При решении указанных задач использовались аналитические и численные методы расчета взаимосвязанных трех- и двухмерных стационарных электрических и тепловых полей, методы математической статистики, теории планирования эксперимента и математического моделирования его результатов, векторной оптимизации параметров и количественной оценки надежности работы невосстанавливаемых элементов систем с постепенными отказами.

**Научная новизна.** Научной новизной обладают:

1. Общее аналитическое выражение для определения сопротивления стягивания тока в электрическом контакте с учетом реальной геометрии его элементов и размеров, формы и вероятностного характера положения  $\alpha$ -пятна проводимости на расчетной поверхности контактирования.

2. Расчетно-теоретический анализ и экспериментальные исследования электродинамических сил, действующих на элементы скользящего контакта в магнитном поле, и выражения для определения максимальных значений составляющих этих сил.

3. Обобщающие выражения для оценки тепловой напряженности элементов неоднородного по электрическим и теплофизическим параметрам электрическо-

го контакта, позволяющие рассчитать максимальную температуру внутри элемента с меньшей теплопроводностью и температуру его контактной поверхности с учетом соотношения суммарных электрических и механических потерь в контакте.

4. Тепловые схемы замещения неоднородного СК для оценки на стадии проектирования систем токосъема тепловой напряженности элементов контактной пары при любом характере распределения в них тепловых источников и различных условиях теплообмена на поверхностях охлаждения.

5. Методология трехфакторного мультипликативного математического моделирования падения напряжения в системе токосъема и интенсивности износа ее элементов на основе применения разработанных ортогонально-ротативных нормированных несимметричных матриц планирования эксперимента по точкам на сферической поверхности факторного пространства независимых переменных.

6. Методология векторной оптимизации числа щеток  $N_{щ}$  и усилия нажатия на них  $F_{щ}$  в системе токосъема по минимуму суммарных потерь в ней и (или) требуемому ресурсу ее эксплуатации на базе использования полученных в работе мультипликативных математических моделей  $\Delta U(\Delta h) = C \cdot I_{щ}^{\alpha} \cdot F_{щ}^{\beta} \cdot V_{к}^{\gamma}$ .

7. Методология оценки технического состояния и прогнозирования надежности работы системы токосъема и ее элементов с учетом принципиальной множественности режимов их эксплуатации, основанная на статистической линеаризации высоты щетки  $h$  линейной веерной функцией времени и использовании принципа практической достоверности случайного события.

**Практическая ценность.** Практическую ценность представляют:

1. Разработанные научно-методологические основы расчета и проектирования многощеточных и сильноточных систем токосъема электрических машин различного назначения, компьютерная реализация которых позволяет эффективно и с наименьшими затратами времени оптимизировать параметры и прогнозировать эксплуатационную надежность любых систем на стадии их проектирования.

2. Экспериментально определенные мультипликативные математические модели  $\Delta U(\Delta h) = C \cdot I_{щ}^\alpha \cdot F_{щ}^\beta \cdot V_k^\gamma$  для турбогенераторных контактных пар с учетом вида профилирования рабочей поверхности контактных колец, а также для ряда принципиально новых контактных пар, перспективных для применения в сильноточных и многощеточных системах токосъема электрических машин нового поколения.

3. Разработанные и защищенные авторскими свидетельствами элементы конструкции сильноточных систем токосъема, а также устройства, обеспечивающие стабильную и надежную их работу.

4. Практические рекомендации по повышению эффективности и надежности работы вновь создаваемых и модернизируемых систем токосъема различных электрических машин, позволяющие, в конечном итоге, повысить эксплуатационную надежность машин в целом и сократить затраты на их обслуживание и ремонт.

Материалы диссертационной работы были использованы рядом научно-исследовательских, проектно-конструкторских и промышленных предприятий (ВНИИ Электромашиностроения, «Электросила», «Ленэнергоремонт» и др.) при модернизации существующих и проектировании новых систем токосъема электрических машин различного назначения.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на International Scientific Conference Power and electrical engineering (Riga, 2002), Российской научно-практической конференции «Проблемы создания и эксплуатации электрических машин, электрофизической аппаратуры и высоковольтной техники» (С.-Петербург, 2001), Международном Бизнес-Форуме IBТ-XXI (С.-Петербург, 1999), Fourth Internatioal Conference on Unconventional Electromechanical and Electrical Systems (St. Petersburg, 1999), I Всероссийской научно-технической конференции «Фундаментальные исследования в технических университетах» (С.-Петербург, 1997), Российской научно-технической конференции «Инновационные наукоемкие технологии для России» (С. Петербург, 1995).



**Публикации.** По материалам диссертации получено 4 авторских свидетельства и опубликовано 27 печатных работ (из них 6 без соавторов) и 26 отчетов о НИР и грантах Минобразования РФ.

**Структура и объем работы.** Диссертация изложена на 316 страницах текста и содержит 5 разделов, заключение, 54 рисунка, 23 таблицы, список использованной литературы из 300 наименований и 2 приложения (акты об использовании результатов работы).

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**В первом разделе** обоснована актуальность работы, рассмотрены режимы и условия эксплуатации систем токосъема в различных электрических машинах, а также требования, предъявляемые к этим системам, выполнен анализ публикаций по теме диссертации, дана общая характеристика научно-технической проблемы, определены цель и основные задачи работы.

**Во втором разделе** диссертации решаются спорные или ранее не рассматриваемые задачи общей теории скользящего электрического контакта. Представлены результаты расчетно-теоретических исследований электрических, тепловых, физико-химических и триботехнических процессов в СК.

Так, на основе решения трехмерного стационарного электрического поля растекания тока в проводящем параллелепипеде с геометрическими размерами  $a \times t \times h$  получено выражение для определения его полного сопротивления в виде:

$$\begin{aligned}
 R_a = & \frac{\rho h}{at} + \frac{\rho t}{\varepsilon_1 \pi^2 a} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \cdot th\left(n \frac{\pi}{t} h\right) \cdot \sin\left(n \frac{\pi}{t} \frac{\varepsilon_1}{2}\right) \cdot \cos\left(n \frac{\pi}{t} x_\varepsilon\right) + \\
 & + \frac{\rho a}{\varepsilon_1 \pi^2 t} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^m}{m^2} \cdot th\left(m \frac{\pi}{a} h\right) \cdot \sin\left(m \frac{\pi}{a} \frac{\varepsilon_2}{2}\right) \cdot \cos\left(m \frac{\pi}{a} y_\varepsilon\right) + \\
 & + \frac{2\rho at}{\varepsilon_1 \varepsilon_2 \pi^3} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{m+n}}{mn \sqrt{n^2 a^2 + m^2 t^2}} \cdot th\left[\sqrt{\left(n \frac{\pi}{t}\right)^2 + \left(m \frac{\pi}{a}\right)^2} \cdot h\right] \times \\
 & \times \sin\left(n \frac{\pi}{t} \frac{\varepsilon_1}{2}\right) \cdot \cos\left(n \frac{\pi}{t} x_\varepsilon\right) \cdot \sin\left(m \frac{\pi}{a} \frac{\varepsilon_2}{2}\right) \cdot \cos\left(m \frac{\pi}{a} y_\varepsilon\right), \quad (1)
 \end{aligned}$$

где сумма всех слагаемых в правой части, кроме первого, представляет собой наиболее общее аналитическое выражение для расчета сопротивления стягивания электрического контакта  $R_c$  – добавочного сопротивления, обусловленного

искривлением (стягиванием) линий тока в элементах контактной пары к прямоугольному  $\alpha$ -пятну проводимости с размерами  $\varepsilon_1 \times \varepsilon_2$  и координатами его центра  $x_\varepsilon$  и  $y_\varepsilon$  на расчетной («кажущейся») поверхности контактирования  $A_a$ . В инженерной практике для расчета  $R_c$  широко используется выражение Р.Хольма  $R_{cX} = \rho/4a$  для определения сопротивления длинной области стягивания в одном из двух симметричных, полубесконечных контактных элементов при наличии круглого  $\alpha$ -пятна проводимости радиуса  $a$  на контактной поверхности, то есть полученное без учета геометрии контактных элементов и расположения  $\alpha$ -пятна проводимости на поверхности  $A_a$ . Для оценки возможной при этом погрешности достаточно из (1) найти выражение для  $R_{c1}$  единичного куба ( $a = t = h = 1$  м,  $\rho = 1$  Ом·м), у которого квадратное пятно проводимости ( $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon$ ) расположено в центре нижней (рабочей) грани ( $x_\varepsilon = y_\varepsilon = 0.5$ ). Это выражение в отнесенных единицах имеет вид:

$$\underline{R}_{c1} = \frac{2}{\underline{\varepsilon}\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin n\pi\underline{\varepsilon}}{n^2} + \frac{2}{\underline{\varepsilon}^2\pi^3} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin m\pi\underline{\varepsilon} \cdot \sin n\pi\underline{\varepsilon}}{mn\sqrt{n^2 + m^2}}. \quad (2)$$

Расчетно-теоретический анализ (1) и (2) с использованием современных компьютерных технологий показал, что в случае действительно длинного стягивания при  $\underline{\varepsilon} < 0.01$   $\underline{R}_{c1} = 1/\sqrt{\pi S}$ , а расхождение между  $\underline{R}_{cX}$  и  $\underline{R}_{c1}$  стремится к пределу, равному  $4/\pi$ . Кроме того, при перемещении пятна проводимости по контактной поверхности  $\underline{R}_{c1}$  может возрасти еще почти на 80%. Поэтому, вводя в рассмотрение координатный коэффициент увеличения  $R_c - k_k = R_{c1} / R_{c1min}$  и учитывая его вероятностный характер, можно вместо формулы Р.Хольма рекомендовать использовать выражение

$$R_c = k_{кр} \cdot \frac{\rho}{\sqrt{\pi S}} \approx 0.7 \frac{\rho}{\sqrt{S}}, \quad (3)$$

где среднее значение  $k_{кр}$  принято равным его верхней доверительной границе 1.23 при уровне значимости 0.05 ( $P_D = 95\%$ ), а  $S$  – площадь пятна проводимости произвольной формы.

Выражение (3) было использовано в работе для оценки средних контактных давлений  $p$ , числа  $n$  и размеров  $\varepsilon_n$  пятен проводимости на поверхности  $A_a$

по опытным значениям сопротивления стягивания щеточного контакта  $R_{c\text{ щк}}$  и усилия нажатия на щетку  $F_{щ}$  для различных контактных пар. Эта оценка показала, что  $p$  растет пропорционально  $n$ , деформация эквивалентного микровыступа на  $A_a$  является упругой, а реальных – упруго-пластической. Максимальное значение  $n$  у турбогенераторных контактных пар не превосходит 6-8, их эквивалентный геометрический размер  $\varepsilon_n = \sqrt{S_n}$  составляет 100 – 150 мкм, а суммарная площадь контактирования  $S_b = n \cdot S_n$  в несколько тысяч раз меньше площади «зеркала» щетки  $S_a = a \times t$  и не зависит от нее. Сделанная оценка является приближенной, так как  $S_b$  и соответствующая величина сопротивления стягивания  $R_{c\text{ щк}}$  зависят не только от  $F_{щ}$ , но и от других, аналитически трудно учитываемых факторов – тока через щетку  $I_{щ}$ , скорости скольжения контактных пар  $V_k$ , механических возмущений различной природы, влажности  $\phi_0$ , температуры  $T_0$ , давления  $p_0$  и химического состава окружающей газовой среды.

К небольшому числу аналитически решаемых задач относится расчет электродинамические взаимодействия между элементами конструкции скользящего электрического контакта. Пренебрегая силами Двайта и пинч-эффекта и используя концепцию бесконечно тонкой токовой нити, в работе было получено, что условием утраты радиальной степени свободы щетки является неравенство

$$F_{щ} \leq I_{щ} B_Z \frac{t}{2} + \mu_1 I_{щ} \left( B_Z r + B_R \frac{a+t}{2} \right), \quad (4)$$

а максимально значение силы трения может быть рассчитано по выражению –

$$F_{TP} = \frac{\mu}{1 + \mu_1 \mu} \cdot \left[ F_{щ} + I_{щ} B_Z \frac{t}{2} - \mu_1 I_{щ} \left( B_Z r + B_R \frac{a+t}{2} \right) \right], \quad (5)$$

где  $\mu$  и  $\mu_1$  – коэффициенты трения щетки по поверхностям контактного кольца и обоймы щеткодержателя, а  $B_Z$  и  $B_R$  – составляющие магнитной индукции.

В разделе также получены выражения для оценки тепловой напряженности элементов неоднородного и несимметричного СК, необходимость которой обусловлена возможностью превышения температуры контактной поверхности  $\vartheta_\alpha$  и температуры внутри щетки  $\vartheta_{max}$  значения температуры размягчения щеточного материала. При этом электрические и механические характеристики контак-

та, как известно, могут кардинально измениться.

В неоднородном симметричном скользящем электрическом контакте изотермическая поверхность с  $\vartheta_{max}$  находится внутри элемента с меньшей теплопроводностью, и для определения характера распределения температуры в области стягивания тока необходимо, как показано в работе, интегрировать дифференциальное уравнение теплового баланса для локальных объемов  $V_n$ , ограниченных двумя, отстоящими друг от друга на  $dn$ , изотермическими поверхностями. При определении же только  $\vartheta_{max}$ , можно, полагая, что изотермическая поверхность  $S_0$  с  $\vartheta_{max}$  делит объем области стягивания тока в щетке на два объема с тепловыми сопротивлениями  $W'_{cщ} = c \cdot W_{cщ}$  и  $W''_{cщ} = (1 - c) \cdot W_{cщ}$ , проинтегрировать граничное условие К.Неймана лишь на поверхности  $S_n$  –

$$-\lambda_{щ} S_n \frac{d\vartheta}{dn} = I_{щ}^2 \cdot \Delta R'_{cщ} + Q_{щ,мех}, \quad (6)$$

где  $\Delta R'_{cщ} = \Delta W'_{cщ} \cdot \rho_{щ} \lambda_{щ}$  – электрическое сопротивление рассматриваемого объема. В результате можно получить следующие выражения:

$$\vartheta_{max} = W_{cщ} \left( \frac{(1 + k_{\lambda\rho})^2}{1 + k_\rho} \cdot \frac{Q_{эл}}{8} + \frac{1 + k_{\lambda\rho}}{1 + k_\lambda} \cdot \frac{Q_{мех}}{2} \right) + \vartheta_\infty, \quad (7)$$

$$\vartheta_\alpha = \frac{W_{cщ}}{1 + k_\lambda} \left( \frac{Q_{эл}}{2} + Q_{мех} \right) + \vartheta_\infty = W_{ск} \frac{k_\lambda}{1 + k_\lambda} \left( \frac{Q_{эл}}{2} + Q_{мех} \right) + \vartheta_\infty \quad (8)$$

где  $k_\lambda = \lambda_\kappa / \lambda_{щ}$  и  $k_\rho = \rho_\kappa / \rho_{щ}$  – соответственно коэффициенты тепловой и электрической неоднородности, а  $k_{\lambda\rho} = (1 + k_\rho) / (1 + k_\lambda)$  – коэффициент электро-теплонеоднородности контактной пары.

Выражения (7) и (8) представляют собой обобщенные уравнения для оценки тепловой напряженности элементов любого неоднородного по электрическим и теплофизическим параметрам электрического контакта. В работе выполнен расчетно-теоретический анализ (7) и (8) для различных видов контакта при варьировании  $k_\lambda$  и  $k_\rho$  с использованием профессиональной версии пакета прикладных программ решения задач матфизики ELCUT 4.2. Одновременно показано, что и уравнение Кольрауша – Хольма для определения  $\vartheta_{max}$  в одно-

родном неподвижном электрическом контакте, и уравнение Егера для расчета  $\vartheta_{max}$  на поверхности источника тепла, движущегося по полубесконечной поверхности, являются частными случаями (7).

Если вместо тепловых сопротивлений ввести соответствующие электрические сопротивления и учесть, что  $R_c = U^2 / Q_{эл}$ , то можно (7) и (8) представить в виде:

$$\vartheta_{max} = \frac{k_v \cdot U^2}{8 \cdot \lambda_{щ} \rho_{щ}} \cdot \frac{(1 + k_{\lambda\rho})^2}{(1 + k_\rho)^2} + \frac{k_v \cdot U^2}{2 \cdot \lambda_{щ} \rho_{щ} (1 + k_\rho)} \cdot \frac{1 + k_{\lambda\rho}}{1 + k_\lambda} \cdot k_Q, \quad (9)$$

$$\vartheta_\alpha = \frac{k_v \cdot U^2}{2 \cdot \lambda_{щ} \rho_{щ}} \cdot \frac{1 + 2 \cdot k_Q}{(1 + k_\rho) \cdot (1 + k_\lambda)}, \quad (10)$$

где  $k_Q = Q_{мех} / Q_{эл}$  – коэффициент соотношения потерь в контакте, а  $k_v$  (значение  $f(z_v)$  по Р. Хольму) может быть принят, как показали расчетные и экспериментальные исследования автора, равным для металлографитных и электро-

Таблица 1

		ЭГ2АФ стальные КК	ЭГ2АФ медные КК	МГСО стальные КК	МГСО медные КК
$Q_{эл}$	Вт	150	150	26	26
$Q_{мех}$	Вт	120	120	120	120
$Q_\Sigma$	Вт	270	270	146	146
$\vartheta_{max}$	°С	462	189	226	57
$\vartheta_\alpha$	°С	513	122	300	72
$Q_{щ}$	%	70	55	69	54
$Q_{щ}$	%	40	10	40	10
$Q_{щ\Sigma}$	%	57	35	45	18
$Q_{эл}$	Вт	150	150	26	26
$Q_{мех}$	Вт	–	–	–	–
$Q_\Sigma$	Вт	150	150	26	26
$\vartheta_{max}$	°С	269	164	40	24
$\vartheta_\alpha$	°С	220	52	33	8
$Q_{эл}$	Вт	–	–	–	–
$Q_{мех}$	Вт	120	120	120	120
$Q_\Sigma$	Вт	120	120	120	120
$\vartheta_{max}$	°С	–	–	–	–
$\vartheta_\alpha$	°С	315	75	270	65

графитированных щеток 0.8÷0.9, а для контактных колец – 0.5÷0.7. Наглядное представление о распределении температур и потерь по элементам различных контактных пар дают представленные в табл. 1 результаты расчетов по (9) и (10), полученные с использованием реальных значений  $Q_{эл}=150$  Вт и  $Q_{мех}=120$  Вт в контактной паре системы токосъема турбогенератора ТВВ-320-2. Как видно из табл. 1, наиболее напряженными в тепловом от-

ношении являются турбогенераторные контактные пары, что обусловлено низкой теплопроводностью стальных контактных колец  $\lambda_k = 50 \div 70$  Вт/м·К, соизмеримой с теплопроводностью щеток (ЭГ2АФ и 611ОМ)  $\lambda_{щ} = 30 \div 50$  Вт/м·К. Доля отводимых при этом с боковой поверхности щетки потерь составляет (см. табл. 1) 57% от суммарных потерь в контакте, включая 70% электрических и 40% механических потерь. Уменьшить тепловую напряженность турбогенераторных контактных пар можно, как показано в работе, нанесением на стальную поверхность контактных колец тонкого слоя меди.

При выводе и анализе выражений (7)-(10) для расчета  $\vartheta_\alpha$  и  $\vartheta_{max}$  полагалось, что температура за областью стягивания тока  $\vartheta_\infty$  и сопротивления теплоотдачи с поверхностей охлаждения щетки  $W_{\alphaщ}$  и контактного кольца  $W_{\alphaк}$  равны нулю. Чтобы оценить допускаемую при этом погрешность, были выполнены расчетно-теоретические и экспериментальные исследования коэффициентов теплоотдачи  $\alpha_{щ}$  и  $\alpha_k$  с указанных поверхностей при варьировании условий их охлаждения и отводимой мощности. Получены эмпирические зависимости  $\alpha_{щ}$  и  $\alpha_k$  от скорости скольжения контактных пар  $V_k$  и формулы для определения превышения температуры поверхностей охлаждения щетки  $\vartheta_{\alphaщ}$  и КК  $\vartheta_{\alphaк}$  над температурой окружающей среды  $\vartheta_o$  –

$$\Delta\vartheta_{\alphaщ} = \vartheta_{\alphaщ} - \vartheta_o = \frac{(1 + k_{\lambda\rho}) \cdot (1 + k_\lambda) \cdot Q_{эл} + 2 \cdot Q_{мех} \cdot (1 + k_\rho)}{96 \cdot (1 + 0.7\sqrt{V_k}) \cdot (a + t) \cdot h \cdot (1 + k_\rho) \cdot (1 + k_\lambda)}, \quad (11)$$

$$\Delta\vartheta_{\alphaк} = \vartheta_{\alphaк} - \vartheta_o = \frac{Q_{эл} + Q_{мех}}{110 \cdot (1 + 0.09 \cdot V_k^{0.75}) \cdot \pi D_k \cdot b_k}. \quad (12)$$

Используя (9) - (12), было рассчитано распределение температур по элементам отрицательной группы из 48 щеток ЭГ2АФ системы токосъема турбогенератора ТВВ-320-2 при изменении  $V_k$ , представленное на рис.1. Видно, что температура наружных поверхностей элементов системы не отражает их внутреннюю тепловую напряженность, то есть ни  $\vartheta_{\alphaщ}$ , ни  $\vartheta_{\alphaк}$  не имеют диагностического значения для оценки  $\vartheta_{max}$  и  $\vartheta_\alpha$ . Вместе с тем,  $\vartheta_{\alphaщ}$  и  $\vartheta_{\alphaк}$  соизмеримы с  $\vartheta_{max}$  и  $\vartheta_\alpha$ , а поэтому пренебрегать  $W_{\alphaщ}$  и  $W_{\alphaк}$  при определении  $\vartheta_{max}$  и  $\vartheta_\alpha$  нельзя. Наиболее просто учесть  $W_{\alphaщ}$  и  $W_{\alphaк}$  при расчете  $\vartheta_{max}$  и  $\vartheta_\alpha$  можно по тепловой схеме замеще-

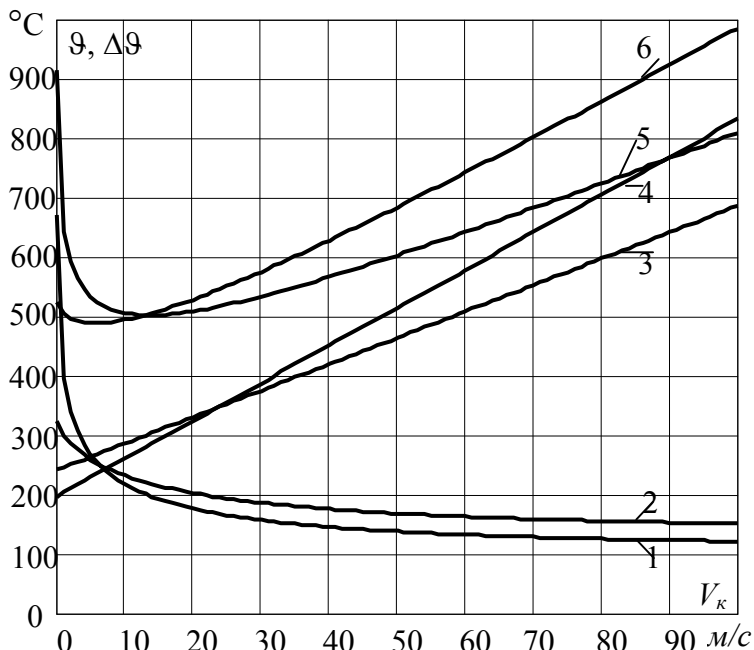


Рис. 1. Распределение температур по элементам системы токосъема при  $V_k(Q_{мех}) = var$  и  $Q_{эл} = const$  (1 -  $\vartheta_{ащ}$ , 2 -  $\vartheta_{ак}$ , 3 -  $\Delta\vartheta_{max}$ , 4 -  $\Delta\vartheta_{\alpha}$ , 5 -  $\vartheta_{max}$ , 6 -  $\vartheta_{\alpha}$ ).

ния СК. В работе предложены тепловые схемы замещения (рис.2,а) и (рис.2,б) контактного элемента с «плавающим узлом»  $\Theta_{max}$  и несимметричным охлаждением, а также тепловая схема замещения (рис.2,в) скользящей контактной пары для расчета температур поверхностей охлаждения ее элементов  $\vartheta_{\alpha}$ ,  $\vartheta_{\alpha 1}$  и  $\vartheta_{\alpha 2}$ . Определив  $\vartheta_{\alpha}$  и  $\vartheta_{\alpha 1}$ , можно затем рассчитать  $\Theta_{max}$ .

Действительно, из схемы рис.2,в следует, что тепловой поток, рассеиваемый с

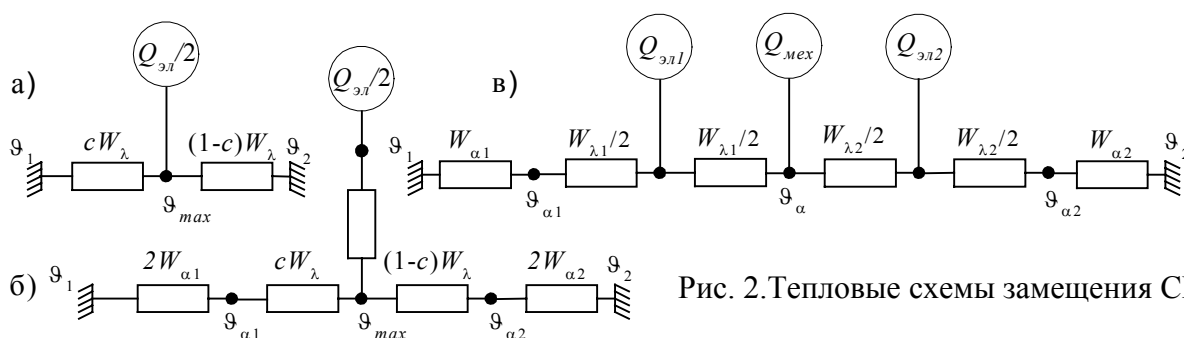


Рис. 2. Тепловые схемы замещения СК

поверхности щетки,

$$Q_{щ\alpha} = \frac{Q_{щ\text{эл}}}{2} \cdot \frac{W_{\lambda щ} + W_{\lambda к}}{W_{\Sigma}} + \frac{Q_{эл} + 2 \cdot Q_{мех}}{2} \cdot \frac{W_{\lambda к}}{W_{\Sigma}} + Q_{\Sigma} \cdot \frac{W_{\alpha к}}{W_{\Sigma}} + \frac{\vartheta_2 - \vartheta_1}{W_{\Sigma}}, \quad (13)$$

а температура поверхности контактирования

$$\vartheta_{\alpha} = \left( Q_{щ\alpha} - \frac{Q_{щ\text{эл}}}{2} \right) \cdot W_{\lambda щ} + Q_{щ\alpha} \cdot W_{\alpha щ} + \vartheta_1, \quad (14)$$

где  $W_{\Sigma}$  – суммарное (продольное) тепловое сопротивление контакта. Температуры поверхностей охлаждения щетки и контактного кольца будут соответственно равны:  $\vartheta_{ащ} = Q_{щ\alpha} \cdot W_{\alpha щ} + \vartheta_1$ ,  $\vartheta_{ак} = Q_{ка} \cdot W_{\alpha к} + \vartheta_2$ , где  $Q_{ка} = Q_{\Sigma} - Q_{щ\alpha}$  – потери, отводимые с поверхности контактного кольца. Зная температуры поверхностей каждого из контактных элементов, нетрудно из схемы рис.2,а определить максимальную температуру внутри щетки  $\Theta_{max}$  –

$$\Theta_{max} = \frac{Q_{эл} \cdot W_{\lambda}}{2} \cdot c_m^2 + \vartheta_1 = \frac{U^2}{2\lambda\rho} \cdot c_m^2 + \vartheta_1, \quad c_m = \frac{1}{2} - \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{Q_{эл} \cdot W_{\lambda}} = \frac{1}{2} - \frac{\lambda\rho \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2)}{U^2}. \quad (15)$$

Выполненные расчеты показали, что учет  $W_{оцц}$  и  $W_{оак}$  вызывает увеличение температуры поверхности контактирования  $\vartheta_{\alpha}$  приблизительно на 5÷10%. Причем максимально возможная температура в теле щетки  $\Theta_{max}$  практически не отличается от  $\vartheta_{\alpha}$ , но на 25÷40% превосходит максимальную температуру  $\vartheta_{max}$ , рассчитанную по (7) или (9). Поэтому для сопоставительного анализа вариантов систем токосъема на стадии их проектирования достаточно просто использовать выражения (9) и (10) для оценки  $\vartheta_{max}$  и  $\vartheta_{\alpha}$ , принимая в качестве  $\Theta_{max}$  большую из них. При необходимости значение  $\Theta_{max}$  следует уточнить по (15), полагая  $\vartheta_1$  ( $\vartheta_{оцц}$ ) =  $\vartheta_0$ , а  $\vartheta_2 = \vartheta_{\alpha}$ . Соответствующая величина  $\Theta_{max}$ , как показали расчеты реальных контактных пар, всего лишь на 10-12% ниже величины  $\Theta_{max}$ , определенной с учетом сопротивлений теплоотдачи  $W_{оцц}$  и  $W_{оак}$ . Достоверность полученных данных подтверждена результатами численного расчета взаимосвязанных электрических и тепловых полей с использованием программного пакета ELCUT 4.2 и результатами непосредственного измерения  $\Theta_{max}$  в теле щетки.

Температура  $\vartheta_{\alpha}$ , величина и полярность  $I_{щ}$  оказывают существенное влияние на направленность и интенсивность протекания физико-химических процессов на контактных поверхностях. На основе подробного анализа этих процессов в диссертации предложены структурная физическая модель переходных слоев на поверхности медного КК и полупроводниковая пленочная структура медной контактной пары. Они отличаются от известных моделей и схем замещения СК Кончица В.В. и Савкина В.Г. учетом слоя адсорбированного газа и воды (гетерогенного кислородно-водяного слоя) и слоя окиси меди, а также другим типом полупроводниковой проводимости контакта – вместо проводимости  $p - n$  типа проводимостью  $n - p - n$  типа. В работе также показано, что из многообразия гипотез И. Нейкирхена, Р. Хольма, Р. Мейера, Нэллина В.И., Кончица В.В., Савкина В.Г., Скороспешкина А.И., Плохова И.А. и других исследователей о видах проводимости СК наиболее достоверной представляется гипотеза И. Нейкирхена, лежащая в основе последующих работ Кончица В.В. и



Савкина В.Г. В настоящей диссертации экспериментально доказано, что основными и объективно существующими видами проводимости СК являются проводимость через  $\alpha$ -пятна непосредственного механического контакта, образованные в результате фриттинга, теплового пробоя и механического разрушения (истирания) оксидных (окисных) пленок на контактных поверхностях (80% от суммарной проводимости СК), и проводимость через пылевидные продукты износа щетки (ПЩМ), заполняющие микровпадины на поверхности КК, не покрытые окисными пленками (18-20%). Гипотеза о возможности проводимости через полупроводниковые пленочные структуры имеет лишь качественное, но не количественное экспериментальное подтверждение. Это, в частности, справедливо и для предложенной в работе гипотезы, объясняющей неравенство  $\Delta U$  и  $\Delta U_+$  состоянием (профилем) поверхности дорожек скольжения. И, наконец, объективно существующие проводимость через воздушные промежутки посредством газового разряда и ионную проводимость в результате электролиза водяных пленок следует относить к факторам второго порядка значимости, так как они практически не влияют на суммарную проводимость СК – не превышают, как показал специально организованный эксперимент, 1-2% от нее. Однако нужно иметь в виду, что электролиз водяных пленок, являясь важнейшим фактором формирования поверхности контактных колец, может оказывать опосредованное и весьма существенное влияние на  $\Delta U$  и  $\Delta U_+$ .

Из выполненного в работе анализа триботехнических процессов в СК следует, что между  $\alpha$ -пятнами непосредственного механического контакта существуют лишь упруго-пластические и молекулярные фрикционные связи, вследствие чего коэффициент трения  $\mu$  должен зависеть и от усилия нажатия на щетку  $F_{щ}$ , и от скорости скольжения  $V_k$ . При возрастании  $F_{щ}$   $\mu$  может только уменьшаться. Кроме того, величина и полярность тока в щетке  $I_{щ}$  влияют лишь на размеры и шероховатость единичных фактических поверхностей касания, изменяя тем самым характер и соотношение чисто механических, в основном, молекулярных взаимодействий между ними.

Важнейшим интегральным показателем фрикционных качеств СК является интенсивность (скорость) линейного износа щетки  $\Delta h$ , которая непосредственно определяет ресурс и надежность работы не только щетки, но и всей системы токосъема в целом. Интенсивность износа щетки  $\Delta h$ , так же, как и  $\Delta U$ , нелинейно зависит не только от  $V_{\kappa}$ ,  $F_{щ}$  и  $I_{щ}$ , но и от температуры, давления, влажности и химического состава окружающей газовой среды и т.п. Аналитический учет совместного и даже отдельного влияния всех этих факторов просто не возможен, а поэтому необходимо многофакторное математическое моделирование  $\Delta U$  и  $\Delta h$  – поиск различного вида уравнений регрессии (математических моделей), линейно связывающих с требуемой точностью и адекватностью значения функций отклика  $\Delta U$  и  $\Delta h$  с  $n$ -мерным факторным пространством независимых переменных  $I_{щ}$ ,  $F_{щ}$ ,  $V_{\kappa}$ ,  $T_0$ ,  $\varphi_0$ ,  $p_0$  и др. Для выбора основных факторов воздействия и вида уравнения регрессии необходимо проведение «классических» однофакторных экспериментальных исследований, а для определения его коэффициентов – специально организованных (спланированных) многофакторных экспериментов. Изложению результатов этих исследований и разработке методологии многофакторного мультипликативного математического моделирования  $\Delta U$  и  $\Delta h$  посвящены 3 и 4 разделы диссертации.

**В третьем разделе** приведены нетривиальные результаты однофакторных экспериментальных исследований электрических и механических характеристик СК и систем токосъема в экстремальных режимах их эксплуатации по току и скорости скольжения в условиях регулируемых влажности, температуры и химического состава окружающей газовой среды. Выполнен анализ статистической значимости влияния различных факторов воздействия на  $\Delta U$  и  $\Delta h$ .

Для решения экспериментальных задач диссертации были разработаны и с помощью «Электросилы», ВНИИ Электромашиностроения и «Ленэнергоремонта» изготовлены специальные лабораторные стенды и установки, фотографии которых представлены на рис. 3 – 6.

Целью однофакторных исследований характеристик СК являлся выбор основных факторов воздействия на  $\Delta U$  и  $\Delta h$  в результате определения их функ-

циональных зависимостей от регулируемых факторов воздействия и статистической оценки значимости влияния на  $\Delta U$  и  $\Delta h$  нерегулируемых факторов.



Рис.3. Общий вид автоматизированного электротехнического комплекса (АЭК) для исследования характеристик систем токо-съемы турбогенераторов большой мощности в различных газовых средах.



Рис.4. Полномасштабная физическая модель узла контактных колец системы токо-съемы турбогенератора мощностью 500 МВт.



Рис.5. Лабораторная установка для исследования характеристик принципиально новых высоковольтных и низковольтных контактных пар.

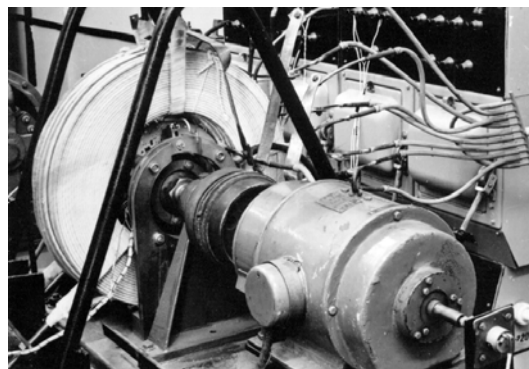


Рис.6. Лабораторная установка для исследования электродинамических сил, действующих на элементы контактной пары в сильном магнитном поле.

В результате исследования вольтамперных характеристик  $\Delta U_{щ} = f(I_{щ})$  была доказана возможность длительной и стабильной работы без искрения различных

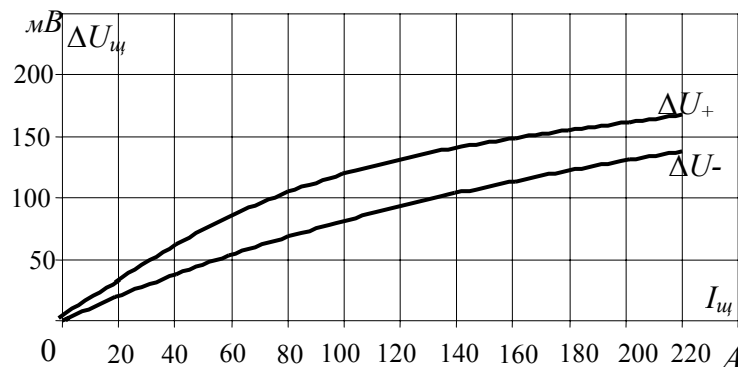


Рис.7. Вольтамперные характеристики металло-графитных щеток МГСО ( $S_{щ} = 2.88 \text{ см}^2$ ) при  $F_{щ} = 6 \text{ Н}$  и  $V_{к} = 20.2 \text{ м/с}$ .

контактных пар при расчетной плотности тока в них от 100 до 500 А/см<sup>2</sup> (см. рис. 7-8), что в десятки раз превышает допустимое, рекомендуемое ГОСТ значение. Причем  $\Delta U_{щ}$  определяется непосредственно величиной тока в щетке и прак-

тически не зависит от ее сечения (см. рис. 9). В равной степени это относится

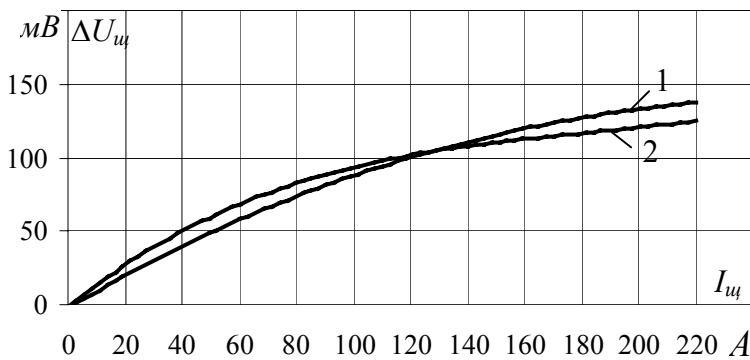


Рис. 8 Вольтамперные характеристики металлографитных щеток МГСО ( $S_{щ}=0.48\text{см}^2$ ), работающих на одной дорожке при  $V_k=20.2\text{м/с}$  и  $F_{щ}=6\text{Н}$ .

и к усилию нажатия на щетку  $F_{щ}$ . Следовательно, ни расчетная величина плотности тока в щетке  $j_{щ}$ , ни расчетное значение давления на нее  $p_{щ}$  не отражают и, тем более, не определяют сущность и характер протекающих в контакте физических процессов и явлений. Поэтому общепринятая практика расчета систем токоъема электрических машин по допустимым (рекомендуемым) значениям  $j_{щ[дон]}$  и  $p_{щ[дон]}$  является необоснованной.

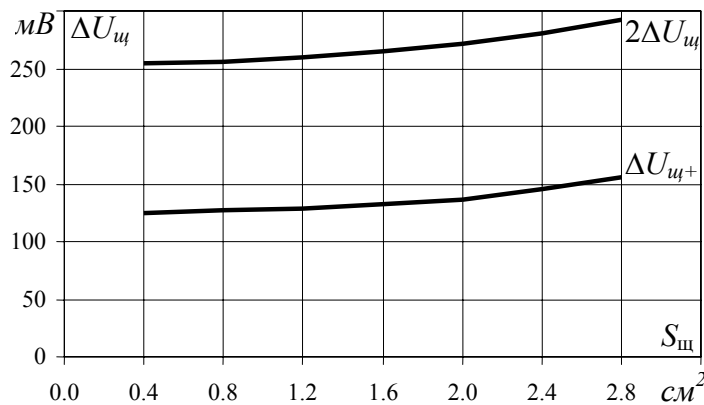


Рис.9 Зависимости  $\Delta U_{щ} = f(S_{щ})$  для меднографитной щетки МГСО при  $I_{щ} = 200\text{ А}$ ,  $F_{щ} = 6\text{ Н}$  и  $V_k = 20.2\text{ м/с}$ .

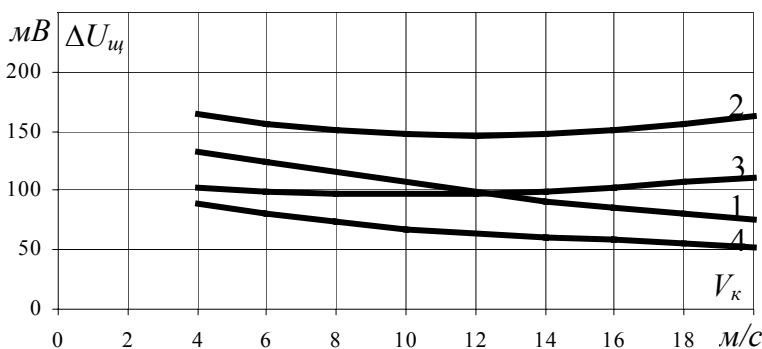


Рис.10. Скоростные электрические характеристики  $\Delta U_{щ+} = f(V_k)$  металлографитных щеток МГСО сечением  $2.44\text{ см}^2$  (1 -  $F_{щ} = 6\text{Н}$  и  $I_{щ} = 50\text{А}$ , 2 -  $F_{щ} = 6\text{Н}$  и  $I_{щ} = 200\text{А}$ ) и  $0,4\text{ см}^2$  (3 -  $F_{щ} = 6\text{Н}$  и  $I_{щ} = 50\text{А}$ , 4 -  $F_{щ} = 12\text{Н}$  и  $I_{щ} = 50\text{А}$ ).

Третьим по значимости фактором воздействия на  $\Delta U$ , после  $I_{щ}$  и  $F_{щ}$ , является скорость скольжения контактных пар  $V_k$ . Характер соответствующей зависимости (см. рис.10) определяется соотношением электрических и механических потерь в контакте.

Общей закономерностью для различных типов щеток является уменьшение  $\Delta U_{щ}$  в диапазоне изменения влажности  $\phi_0$  от 30 до 60 – 80% из-за возрастания, главным образом, проводимости через смоченные водой продукты

износа щетки. Наиболее резко (до 25-30%) эта зависимость выражена у «черных» щеток и отчасти у металлографитных щеток с большим содержанием графита.

При возрастании  $I_{щ}$  проводимость через  $\alpha$ -пятна непосредственного механического контакта становится преобладающей, и уменьшение  $\Delta U_{щ}$  сказывается в меньшей степени – не превосходит в среднем 5-10%. Влияние влажности  $\phi_0$  на  $\Delta U_{щ}$  контактных пар с содержанием меди > 75-80% является статистически незначимым с  $\alpha = 0.05$  ( $P_D = 95\%$ ).

Замена воздушной среды средой азота или углекислого газа не оказывает статистически значимого (при  $P_D = 95\%$ ) влияния на  $\Delta U$  системы токосъема из «черных щеток», а незначительное, но все же статистически значимое уменьшение на 5÷8%  $\Delta U$  у «цветных» щеток в среде азота свидетельствует о недоста-

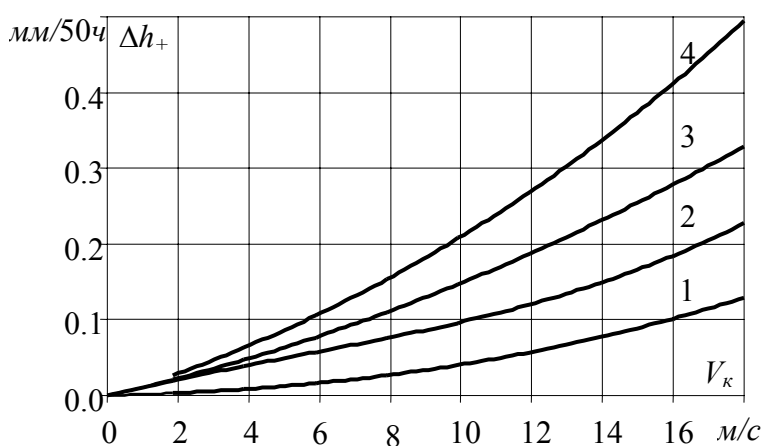


Рис. 11. Зависимости интенсивности износа анодной щетки МГСО  $\Delta h_+$  от скорости скольжения  $V_k$  (1 –  $F_{щ} = 6$  Н,  $I_{щ} = 0$ , 2 –  $F_{щ} = 6$  Н,  $I_{щ} = 50$  А, 3 –  $F_{щ} = 6$  Н,  $I_{щ} = 100$  А, 4 –  $F_{щ} = 12$  Н,  $I_{щ} = 100$  А).

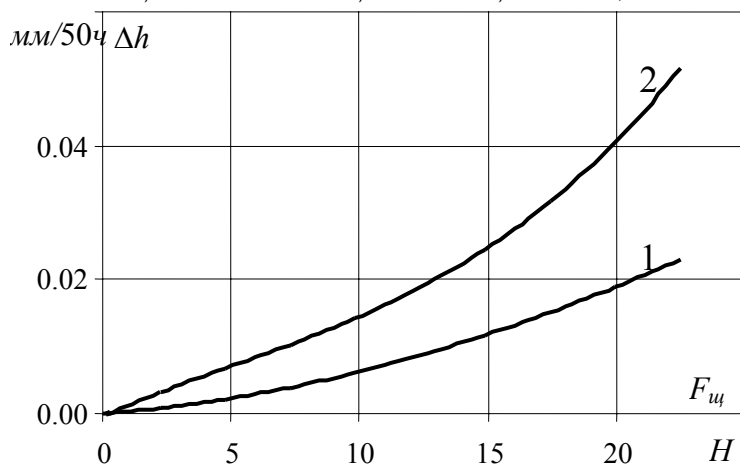


Рис. 12. Зависимость интенсивности механического износа турбогенераторных щеток 6110М (кривая 1) и ЭГ2АФ (кривая 2) при  $V_k = 25$  м/с и  $I_{щ} = 0$ .

точной эффективности его применения для улучшения электрических характеристик металлографитных щеток с большим содержанием меди.

Важнейшими факторами воздействия на интенсивность износа щетки (невосстанавливаемого элемента системы

токосъема) являются  $F_{щ}$ ,  $V_k$  и  $I_{щ}$ . Соответствующие зависимости (см. рис.11-12) имеют нелинейный характер, обусловленный совместным влиянием нестабильности контактирования щетки и температуры контактной поверхности. При характерных для сильноточных

систем токосъема  $I_{щср} = 300 - 1000$  А увеличение тока неизменно вызывает возрастание в той или иной степени скорости износа щеток. Обусловлено это

влияние, в основном, тепловым воздействием тока, приводящим к размягчению щеточного материала, и, как следствие, к увеличению молекулярной и абразивных составляющих износа.

Общей закономерностью для различных щеток является уменьшение  $\Delta h$  в диапазоне изменения влажности  $\varphi$  от 30 до 80 – 90%. Однако, как показал дисперсионный анализ опытных данных, даже самое существенное уменьшения  $\Delta h_{cp}$  не является статистически значимым в системе параллельно работающих щеток, так как дисперсия воспроизводимости  $\Delta h$  весьма велика ( $\sigma_{\Delta h} \approx 0.3$ ). В равной степени этот вывод справедлив и в отношении влияния химического состава газовой среды.

Важнейшим обобщающим результатом однофакторных исследований электрических и механических характеристик СК и систем токосъема является экспериментально доказанная необходимость использования при математическом моделировании  $\Delta U$  и  $\Delta h$  в качестве основных факторов воздействия  $I_{щ}$ ,  $F_{щ}$  и  $V_k$ . Именно эти факторы полностью характеризуют режим работы системы токосъема и определяют, в конечном итоге, уровень электрических и механических потерь в ней, ее ресурс и эксплуатационную надежность. Все остальные возможные факторы, характеризующие условия работы системы токосъема, либо статистически незначимы, либо коррелированы с основными. Поэтому важнейшей научно-практической задачей общей теории СК является трехфакторное математическое моделирование его интегральных характеристик  $\Delta U$  ( $\Delta h$ ) =  $f(I_{щ}, F_{щ}, V_k)$ . Разработке методологии такого моделирования и посвящен 4 раздел диссертации.

**В четвертом разделе** диссертации изложена методология трехфакторного мультипликативного моделирования падения напряжения в системе токосъема и скорости износа ее элементов на основе использования разработанных ортогонально-ротатбельных нормированных несимметричных матриц планирования эксперимента по точкам на сферической поверхности факторного пространства независимых переменных. Экспериментально определены мультип-

ликативные математические модели вида  $\Delta U(\Delta h) = C \cdot I_{щ}^\alpha \cdot F_{щ}^\beta \cdot V_\kappa^\gamma$  для различных контактных пар, применяемых в сильноточных ТСТ электрических машин.

Нахождение стохастических связей между  $\Delta U(\Delta h)$  и факторами воздействия является, конечно, эвристической задачей, имеющей бесконечное число решений, а поэтому выбор вида математической модели (уравнения линейной регрессии) зависит от глубины анализа априорной информации и результатов однофакторных («классических») экспериментов. Очевидно, что модель должна быть простой, наглядной и не содержать элементов взаимодействия независимых факторов, что существенно затрудняет интерпретацию получаемых расчетных результатов и, главное, неизбежно ухудшает статистические свойства модели. Такой моделью может быть только полиномиальная аддитивная модель первого порядка. Именно поэтому в диссертации и разработана методология трехфакторного мультипликативного моделирования  $\Delta U$  и  $\Delta h$ .

При матричной форме записи исходной системы линейных уравнений в виде  $\mathbf{X} \cdot \mathbf{V} = \mathbf{Y}$  задача моделирования сводится к нахождению вектора-столбца  $\mathbf{V}$  коэффициентов (параметров) модели по формуле  $\mathbf{V} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \cdot \mathbf{Y}$ , совпадающей с линейной оценкой  $\mathbf{V}$  методом наименьших квадратов, позволяющим минимизировать дисперсии определения  $\mathbf{V}$  и точек поверхности отклика  $\mathbf{Y}$  по сравнению с другими возможными методами. Ковариационная матрица (матрица ошибок)  $\mathbf{C} = (\mathbf{X}^T \cdot \mathbf{X})^{-1}$  является основой анализа плана эксперимента (матрицы планирования)  $\mathbf{X}$ , так как позволяет однозначно судить о качестве и точности линейных оценок коэффициентов (параметров)  $b_i$  разрабатываемой математической модели.

$$\mathbf{X1} = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \end{pmatrix} \quad \mathbf{X2} = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & -1 & 1 \end{pmatrix} \quad \mathbf{X3} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \quad \mathbf{X4} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & -1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & -1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & 0 \end{pmatrix}$$

Для нахождения трехфакторных математических моделей наиболее часто используют полнофакторные двухуровневые планы **X1** типа  $2^3$  (число опытов  $N=8$ ), основанные на использовании квадратной ( $8 \times 8$ ) матрицы Адамара, или дробнофакторные планы **X2** (реплики) типа  $3^{3-1}$  ( $N=9$ ) первого порядка, являющиеся, как правило, симметричными равномерными регулярными планами главных эффектов – ортогональными таблицами мощности  $d = 2$  (9, 3, 3, 2). Иногда в исследовательской практике применяют матрицы планирования по

$$C1 = \begin{pmatrix} 0.125 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.125 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.125 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.125 \end{pmatrix} \quad C2 = \begin{pmatrix} 0.111 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.167 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.167 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.167 \end{pmatrix}$$

вершинам октаэдра **X3** ( $N=6$ ) и кубоктаэдра **X4** ( $N=12$ ).

$$C3 = \begin{pmatrix} 0.167 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5 \end{pmatrix} \quad C4 = \begin{pmatrix} 0.083 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.125 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.125 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.125 \end{pmatrix}$$

Из рассмотрения со-

ответствующих ковариационных матриц (матриц ошибок) **C1-C4** следует, что только матрица **X1** оптимальна по  $D$ -,  $A$ -,  $E$ - и  $G$ -критериям, то есть она является ортогональной, ротатабельной и нормированной. Матрицы **X2-X4** не нормированы и не ротатабельны. Недостатком всех матриц **X1-X4** является наличие в них точек однофакторного эксперимента. Всех этих недостатков можно избежать, если вести планирование по соответствующим образом выбранным точкам на сферической поверхности факторного пространства (см. рис. 13). В результате искомую матрицу планирования трехфакторного эксперимента можно получить в виде

$$X = \begin{pmatrix} 1 & 0.866 & 0.866 & 1.225 \\ 1 & -1.183 & 0.317 & 1.225 \\ 1 & 0.317 & -1.183 & 1.225 \\ 1 & 0.151 & 1.725 & 0 \\ 1 & -1.570 & -0.732 & 0 \\ 1 & 1.419 & -0.993 & 0 \\ 1 & -0.702 & 1.003 & -1.225 \\ 1 & -0.518 & -1.110 & -1.225 \\ 1 & 1.220 & 0.107 & -1.225 \end{pmatrix}$$

матрицы **X**, которая является многоуровневой ортогонально - ротатабельной нормированной и несимметричной.

$$C = \begin{pmatrix} 0.111 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.111 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.111 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.111 \end{pmatrix}$$

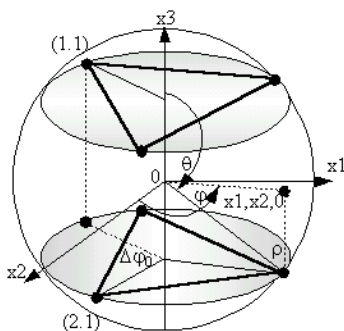


Рис. 13. Размещение точек плана эксперимента на сферической поверхности факторного пространства.

По всем критериям оптимальности она превосходит применяемые на практике матрицы планирования **X1-X4** (см. табл.2). Рассматривая значения матрицы **X** как значения логарифмов факторов воздействия по



требуемому основанию  $a$ , можно составить рабочий план эксперимента, реа-

Таблица 2.

Сопоставление планов эксперимента по критериям оптимальности						
	План полнофакторный	X2	X1	X3	X4	X
Число опытов №	27	9	8	6	12	9
D-критерий	$6.351 \cdot 10^{-6}$	$5.144 \cdot 10^{-4}$	$2.441 \cdot 10^{-4}$	0.021	$1.628 \cdot 10^{-4}$	$1.518 \cdot 10^{-4}$
A-критерий	0.204	0.611	0.500	1.667	0.458	0.444
E-критерий	0.056	0.167	0.125	0.500	0.125	0.111

лизация которого позволит определить искомую модель. Используя значение дисперсии воспроизводимости опытных данных можно по  $t$  - распределению Стьюдента оценить статистическую значимость коэффициентов модели  $b_i$ , по  $F$ - критерию Фишера – ее адекватность, а по  $u$ - и  $\chi^2$  – распределениям – ее точность. Изложенная методика была применена для определения представленных в табл. 3 мультипликативных моделей  $\Delta U(\Delta h) = C \cdot I_{щ}^\alpha \cdot F_{щ}^\beta \cdot V_\kappa^\gamma$  различных

Таблица 3.

Математические модели механических и электрических характеристик различных контактных пар.			
№	Контактная пара	Вид нарезки рабочей поверхности КК	Мультипликативная математическая модель
1	ЭГ2АФ - нерж. сталь	встречно - винтовая	$\Delta h_- = 4.17 \cdot I_{щ}^{0.31} \cdot F_{щ}^{0.71} \cdot V_\kappa^{0.62}$ [мм/1000ч] $\Delta u_- = 1.95 \cdot I_{щ}^{0.25} \cdot F_{щ}^{-0.1} \cdot V_\kappa^{0.34}$ [Вт]
2	ЭГ2АФ - нерж. сталь	коллекторно-винтовая	$\Delta h_- = 4.62 \cdot I_{щ}^{0.41} \cdot F_{щ}^{1.0} \cdot V_\kappa^{0.82}$ [мм/1000ч] $\Delta u_- = 1.84 \cdot I_{щ}^{0.23} \cdot F_{щ}^{-0.36} \cdot V_\kappa^{0.26}$ [Вт]
3	611ОМ - нерж. сталь	коллекторно-винтовая	$\Delta h_+ = 4.34 \cdot I_{щ}^{0.46} \cdot F_{щ}^{1.0} \cdot V_\kappa^{0.78}$ [мм/1000ч] $\Delta u_+ = 1.55 \cdot I_{щ}^{0.46} \cdot F_{щ}^{-0.27} \cdot V_\kappa^{0.36}$ [Вт]
4	МГСО - Cu + Mg + Cr + Zr	нет	$\Delta h_- = 0.52 \cdot I_{щ}^{1.47} \cdot F_{щ}^{0.77} \cdot V_\kappa^{2.1}$ [мм/10ч]
5	МГСО - Cu + Mg + Cr	нет	$\Delta h_+ = 1.25 \cdot I_{щ}^{0.72} \cdot F_{щ}^{0.5} \cdot V_\kappa^{0.8}$ [мм/10ч] $\Delta u_+ = 0.06 \cdot I_{щ}^{0.96} \cdot F_{щ}^{-0.7} \cdot V_\kappa^{0.04}$ [Вт]
6	МГСО - Cu + Mg + Cr	нет	$\Delta h_- = 0.67 \cdot I_{щ}^{1.29} \cdot F_{щ}^{0.72} \cdot V_\kappa^{1.65}$ [мм/10ч] $\Delta u_- = 0.12 \cdot I_{щ}^{0.5} \cdot F_{щ}^{-0.14} \cdot V_\kappa^{0.1}$ [Вт]

систем токосъема. Модели табл. 3 справедливы в диапазоне изменения факто-

ров воздействия  $I_{щ} = 50 - 500$  А,  $F_{щ} = 2 - 20$  Н и  $V_{к} = 25 - 100$  м/с, которые нужно выражать в относительных единицах, принимая за базисные  $I_{щб} = 100$  А,  $F_{щб} = 10$  Н и  $V_{щб} = 50$  м/с. Соответствующий дисперсионный анализ показал, что все модели адекватны результатам опыта и имеют высокую инженерную точность – погрешность расчета среднего значения  $\Delta h_{ср}$  системы (ошибка регрессии) не превосходит  $\pm 2$  %, а доверительный интервал для генерального среднего  $\Delta h$  составляет  $\pm 10-12$  % при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  ( $P_{д} = 95\%$ ). Поэтому полученные в работе модели могут быть использованы для решения практических задач расчета и проектирования систем токосъема электрических машин. Рассмотрению этих возможностей и посвящен последний раздел диссертации.

**В пятом разделе** диссертации изложены методологические основы практического использования мультипликативных математических моделей падения напряжения в системе токосъема и скорости износа ее элементов. Разработаны методы расчета и оптимизации параметров многощеточных и сильноточных систем токосъема, прогнозирования их технического состояния и надежности с учетом принципиальной множественности сменяющих друг друга режимов эксплуатации системы.

Важнейшей задачей проектирования сильноточных и многощеточных ТСТ является определение числа  $N_{щ}$  и геометрических размеров щеток  $a \times t$ , а также усилий нажатия на них из условий обеспечения задаваемого минимума разности допустимых и расчетных значений суммарных потерь в системе  $p_{\Sigma}$  и ресурса ее работы  $T_p$  ( $\Delta h$ ). Так как  $a \times t$  зависят от  $N_{щ}$ , диаметра  $D_{к}$  и ширины  $b_{к}$  КК, то на стадии проектирования ТСТ следует решать двухкритериальную задачу оптимизации  $N_{щ}$  и  $F_{щ}$  для двух целевых функций  $\varepsilon_p = |p_{\Sigma[дон]} - p_{\Sigma}|$  и  $\varepsilon_h = |\Delta h_{[дон]} - \Delta h|$ . Причем область изменения оптимизируемых параметров  $D = |N_{щ} \times F_{щ}|$  ограничена  $D_{к}$  и  $b_{к}$  КК, температурой внутри объема щетки и условиями стабильного (без искрения) ее функционирования. Очевидно, что алгоритм однокритериальной (скалярной) оптимизации всего двух параметров  $N_{щ}$  и  $F_{щ}$  должен предусматривать простой пассивный поиск множества локальных

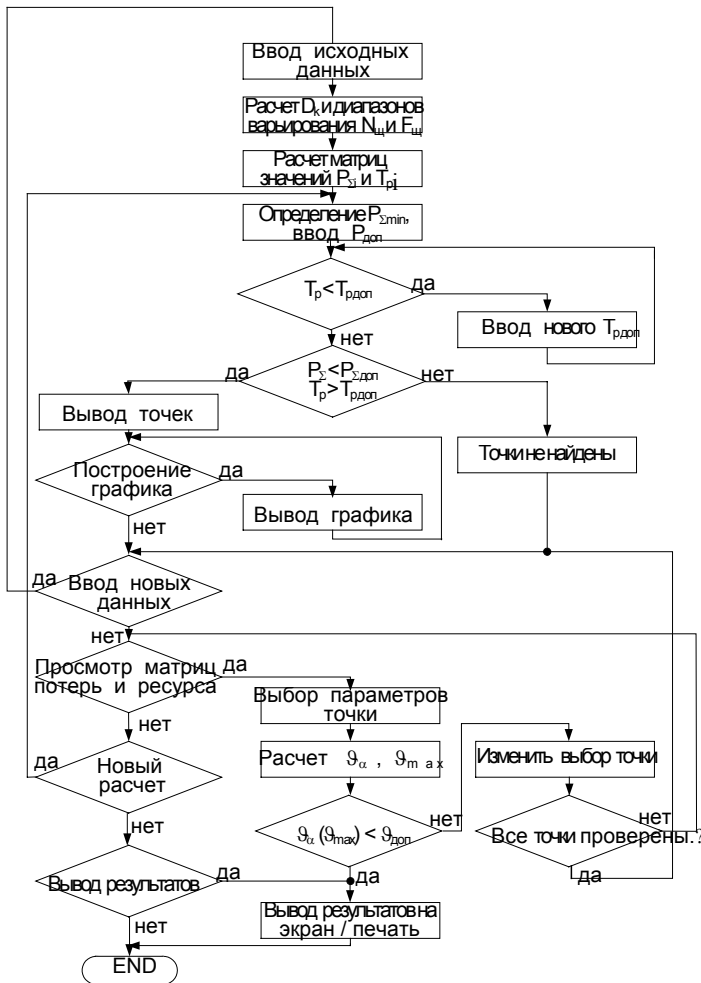


Рис. 14. Алгоритм векторной оптимизации параметров систем токобъема электрических машин

практических машин различного назначения показал, что компьютерная реализации разработанного алгоритма векторной оптимизации  $N_{щк}$ , и  $F_{щ}$  позволяет эффективно и с минимальными затратами времени находить матрицу рациональных значений энергетических, габаритных и ресурсных параметров ТСТ.

Общим, наиболее существенным недостатком всех традиционных подходов к оценке вероятности безотказной работы (ВБР) щетки является то, что они не отражают ее работу как невосстанавливаемого элемента системы с постепенными отказами, то есть не отражают результат физического процесса изнашивания щетки – уменьшение ее высоты  $h$ . Именно поэтому они не позволяют корректно и просто учесть принципиальную множественность режимов работы щетки. Однако эта задача легко решается, если вероятность отказа щетки в любой момент времени  $t_i$  определять путем непосредственного интегрирования реальной кривой плотности распределения  $h_i$ . При аппроксимации ее нормаль-

минимумов  $\varepsilon_p$  и  $\varepsilon_h$  путем сканирования по узлам матриц  $D_p$  и  $D_h$ , заполненным расчетными значениями  $\varepsilon_p$  и  $\varepsilon_h$  (или  $p_\Sigma$  и  $\Delta h$ ), а алгоритм многокритериальной (векторной) оптимизации необходимо разрабатывать на основе обмена между  $D_p$  и  $D_h$  методом последовательных уступок в задаваемых значениях  $p_{\Sigma[дон]}$  и  $\Delta h_{[дон]}$ . Соответствующий алгоритм представлен на рис. 14. Практический опыт проектирования многощеточных систем токобъема с  $I_\Sigma = 10, 23, 37, 87$  и  $110$  кА для электроэнергети-

ным законом распределения (значения асимметрии  $A_\theta$  и эксцесса  $E_\theta$ , как правило, существенно меньше критических) вероятность того, что высота щетки  $h_i$  будет меньше ее допустимого значения  $h_{[\text{don}]}$  (вероятность отказа щетки при  $t = t_i$ ) может быть определена как

$$P\{h_i < h_{[\text{don}]}\} = Q_i = \int_0^{h_{[\text{don}]}} q_i(h) dh = \frac{1}{\sigma_{hi} \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{h_{[\text{don}]}} \exp\left[-\frac{(h - m_{hi})^2}{2 \cdot \sigma_{hi}^2}\right] dh. \quad (17)$$

Входящие в (17) переменные математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение можно рассчитать, как показано в работах Дружинина Г.В. и Рябина И.А., если применить статистическую линеаризацию случайной величины  $h$  в виде линейной веерной функцией времени с полюсом  $H_0$ .

В диссертации получены выражения для расчета переменных математических ожиданий и соответствующих дисперсий в любых последовательно сменяющихся друг друга режимах работы щетки –

$$m_{hni} = H_0 - \sum_{k=1}^{k=n-1} V_{hk} \cdot \Delta t_k - V_{hn} \cdot (t_i - \sum_{k=1}^{k=n-1} \Delta t_k), \quad (18)$$

$$d_{hni} = \sum_{k=1}^{k=n-1} d_{Vhk} \cdot (\Delta t_k)^2 + d_{Vhn} \cdot (t_i - \sum_{k=1}^{k=n-1} \Delta t_k)^2, \quad (19)$$

где  $d_{V_{hn}}$  - дисперсия скорости износа щетки  $V_{hn}$  в  $n$ -ом режиме,  $\Delta t_k = t_k - t_{k-1}$  - длительность  $k$ -го ( $n-1$ ) режима работы, а  $t_i$  - текущее время в  $n$ -ом режиме.

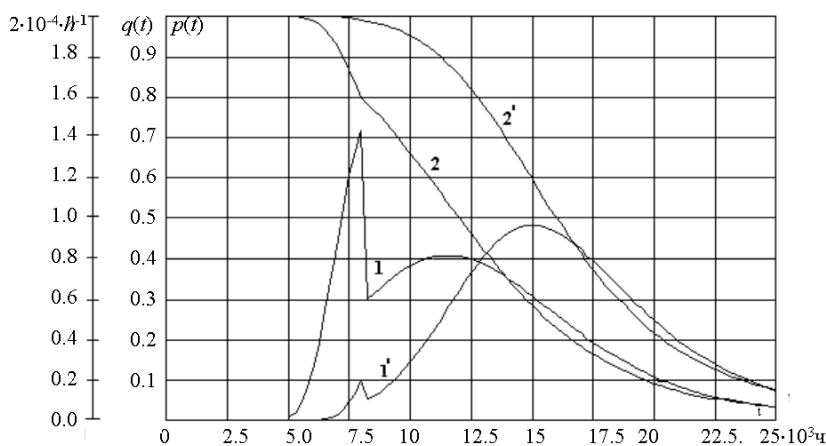


Рис.15. Зависимости  $q(t)$  и  $P(t)$  щетки, работающей в 2-х последовательных режимах ее эксплуатации: 1 и 1' -  $q(t)$ , 2 и 2' -  $P(t)$  до и после изменения параметров 1-го режима.

Используя выражения (18) и (19) совместно с (17) можно рассчитать и построить, как показано на рис. 15, плотность распределения вероятности отказа  $q(t)$  и соответственно ВБР щетки  $P_{щ}(t)$ .

Зная  $P_{щ}(t)$ , можно оценить ВБР всей системы

токосяема в целом. Для этого ее обычно рассматривают как некую резервиро-

ванную систему с дробной кратностью (дробным коэффициентом резервирования)  $k_p = N_{щ} / (N_{щ} - k)$ , где  $k$  - допустимое число отказов щеток, не приводящее к отказу системы, и определяют ее ВБР по формуле Бернулли

$$P_{TCT_{k,N}}(t_i) = \sum_k Q_{щ_{k,N}} = \sum_k C_N^k \cdot P_{щ}(t_i)^{N-k} \cdot Q_{щ}(t_i)^k. \quad (20)$$

В работе показано, что, варьируя  $k$ , можно получить сколь угодно высокую ВБР системы  $P_{TCT_{k,N}}(t_i)$  при низкой ВБР самой щетки  $P_{щ}(t_i)$ . Конечно,  $P_{TCT_{k,N}}(t_i)$  не является ВБР системы, а есть лишь вероятность достижения задаваемым числом щеток  $k$  «предельного» состояния по износу. Неопределенность самого понятия «предельного» состояния по износу и порождает указанные парадоксальные оценки  $P_{TCT_{k,N}}(t_i)$ . В работе предложено предельным

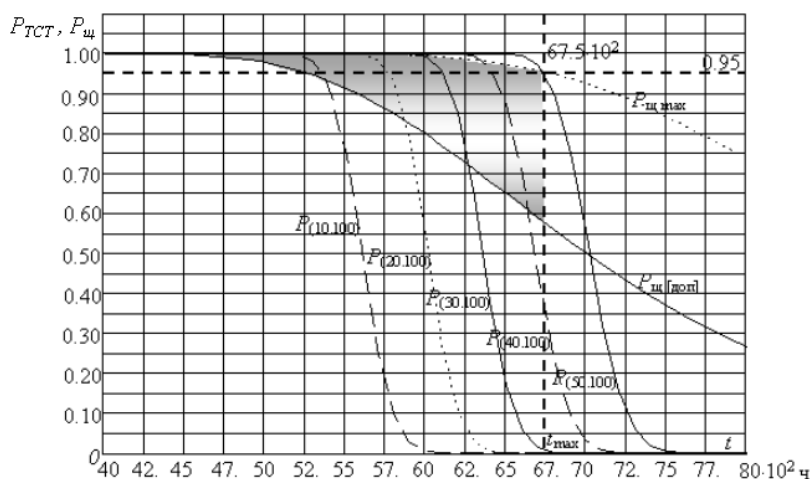


Рис.16. Частные оценки  $P_{TCT_{k,N}}(t_i)$  нерезервированной системы токосъема и ВБР ее элемента  $P_{щ \text{ [доп]}}(t_i)$  и  $P_{щ \text{ max}}(t_i)$ .

(аварийным) состоянием по износу считать износ щетки до места заделки токоподводящего жгута. Кроме того, исходя из принципа практической достоверности, предлагается считать вероятность аварийного отказа щетки  $Q_{щ \text{ max}} = 0.05$  критерием возможности рассмотре-

ния нерезервированной системы в качестве резервированной системы с любой кратностью меньшей двух (соответствующая область на рис. 16 затенена), все частные оценки вероятности которой  $P_{TCT_{k,N}}(t_i)$ , обычно принимаемые за вероятность безотказной работы системы токосъема, не будут противоречить физическому смыслу.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации на новой методологической основе решен комплекс задач общей теории скользящего электрического контакта, включая глубокие экспериментальные исследования характеристик СК и ТСТ в экстремальных режимах и условиях их эксплуатации, методики расчета и оптимизации параметров, оценки технического состояния и прогнозирования надежности работы многощеточных и сильноточных систем токосъема различных электрических машин. Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Получены общие аналитические выражения для расчета сопротивления стягивания тока в электрическом контакте, электродинамических сил, действующих на его элементы в магнитном поле и температур внутри и на поверхностях элементов контактной пары, наиболее полно учитывающие их структуру и геометрию. Эти выражения могут быть положены в основу вычислительных блоков и блоков температурного контроля алгоритма векторной оптимизации параметров различных систем токосъема электрических машин.

2. Теоретически обосновано и экспериментально доказано, что при неизменных значениях  $I_{щ}$ ,  $F_{щ}$  и  $\vartheta_{\alpha}$  падение напряжения  $\Delta U$  в контакте и скорость линейного износа его элементов  $\Delta h$  не зависят от сечения щетки, а, следовательно, ни расчетная величина плотности тока в щетке  $j_{щ}$ , ни расчетное значение давления на нее  $p_{щ}$  не определяют сущность и характер протекающих в контакте физических процессов и явлений. Поэтому общепринятая практика расчета систем токосъема электрических машин по допустимым (рекомендуемым) значениям  $j_{щ[дон]}$  и  $p_{щ[дон]}$  является не обоснованной.

3. Установлено, что основными факторами воздействия на  $\Delta U$  и  $\Delta h$  системы токосъема являются  $I_{щ}$ ,  $F_{щ}$  и  $V_{к}$ , которые полностью характеризуют режим работы системы токосъема и определяют, в конечном итоге, уровень электрических и механических потерь в ней, ее ресурс и эксплуатационную надежность. Все остальные физические факторы, характеризующие условия работы системы токосъема, либо статистически незначимы, либо коррелированы с основными.

4. Предложена и реализована методология трехфакторного мультипликативного математического моделирования  $\Delta U$  и  $\Delta h$  системы токосъема на основе

использования разработанных в диссертации ортогонально-ротатбельных нормированных несимметричных матриц планирования эксперимента, позволяющая минимизировать дисперсии определения коэффициентов модели и значений функции отклика.

5. Разработана и реализована методология векторной оптимизации числа щеток  $N_{щ}$  и усилия нажатия на них  $F_{щ}$  в системе токосъема по минимуму суммарных потерь в ней и (или) требуемому ресурсу ее эксплуатации на базе применения полученных в работе мультипликативных математических моделей  $\Delta U(\Delta h) = C \cdot I_{щ}^{\alpha} \cdot F_{щ}^{\beta} \cdot V_{к}^{\gamma}$ , позволяющая эффективно и с наименьшими затратами времени определять матрицу рациональных значений энергетических и ресурсных показателей системы с учетом геометрии и тепловой напряженности ее элементов.

6. Предложена методология и разработаны методы оценки технического состояния и прогнозирования надежности систем токосъема и их элементов, основанные на статистической линеаризации случайной величины высоты щетки  $h$  линейной вверной функцией времени и использовании принципа практической достоверности, позволяющие рассчитать ВБР системы  $P_{ТСТ}(t_i)$  по величине ВБР ее элемента  $P_{щ}(t_i)$  с учетом принципиальной множественности режимов ее эксплуатации и принимаемой структурной схемы надежности системы.

В целом выполненная диссертация является законченной научной работой, в которой решена крупная научно-техническая проблема системных исследований, оптимальности проектирования и обеспечения высокой эксплуатационной надежности ТСТ, имеющая важное практическое значение для расчета и проектирования многощеточных и сильноточных систем токосъема электрических машин различного назначения.

#### **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Забоин В.Н. Определение сопротивления стягивания неоднородного скользящего электрического контакта. // Scientific proceedings of Riga technical university. Power and electrical engineering. - 2002. - С. 77-82.

2. Забоин В.Н. Методология оптимизации параметров систем токосъема электрических машин. // Электричество. – 1999. – №1. – С.28–32.

3. Забоин В.Н. Математическое моделирование электрических и механических характеристик систем токосъема электроэнергетических машин. // Энергетика. Изв. РАН. – 1999. – № 3. – С. 90-96.

4. Горюнов Ю.Е., Забоин В.Н. Алгоритм многокритериальной оптимизации параметров многощеточных систем токосъема электроэнергетических машин. // Fourth Internatioal Conference on Unconventional Electromechanical and Electrical Systems. – St. Petersburg. – June 21–24. – 1999. – Vol. 2. – p.375–380.

5. Демкин П.С., Забоин В.Н. Прогнозирование технического состояния и надежности систем токосъема электроэнергетических машин. // Научно-технические ведомости СПбГТУ. – 1997. - № 4. - С.38-41.

6. Забоин В.Н., Попов В.В., Федосов М.И. Научно-технические основы проектирования и создания сверхпроводниковых униполярных электрических машин для систем электродвижения судов. // Научно-технические ведомости СПбГТУ. - 1996. - № 2. - С. 64-69.

7. Забоин В.Н., Иванов С.Н., Кулаков В.А., Романов В.В. Электродинамические характеристики ТСТ для сверхпроводящих униполярных электрических машин // Электромеханика. - 1984. - № 3. - С. 43-51.

8. Забоин В.Н., Иванов С.Н., Кулаков В.А., Романов В.В. Электродинамические характеристики твердощеточных систем токосъема. // Сб. Сверхпроводниковые электрические машины. Л.: ВНИИЭлектромаш. – 1983. – 10 с.

9. Забоин В.Н., Иванов С.Н., Кулаков В.А. Анализ работы твердощеточных систем токосъема в экстремальных условиях / СПб., Деп. в Информэлектро, – 1982. – № 1. – 9с.

10. Забоин В.Н. Иванов С.Н. Кулаков В.А. Новые виды конструкции перспективных твердощеточных систем токосъема для униполярных электрических машин /СПб., Деп. в Информэлектро, 1982. – № 1. –12с.



11. Забоин В.Н. Квач И.Е. Родионов Ю.А. Исследование влияния нарезки на теплоотдачу с рабочей поверхности контактных колец турбогенераторов / Л., Деп. в Информэлектро, 1990. – № 96–ЭТ 90. –5 с.
12. Забоин В.Н. Квач И.Е. Родионов Ю.А. Исследование токораспределения по параллельно включенным щеткам, работающим на контактных кольцах турбогенераторов с различными видами нарезки. / Деп. в Информэлектро, 1990. – № 97–ЭТ 90. –5 с.
13. Исследование законов распределения интенсивности износа электрощеток при малых объемах выборки / Демкин П.С., Забоин В.Н., Забоина Л.Н., С.-Петерб. гос. техн. ун-т. – СПб, 1998. – 9 с. – Деп. в ВИНТИ 30.01.98, №256–В98.
14. А.С. № 1064826 Щеточный узел для электрической машины / Забоин В.Н., Иванов С.Н., Кулаков В.А., Прусс–Жуковский В.В. – № 3383492, Заявлено 18.01.82, Опубл. 1.09.83. –5с.
15. А.с. №1367078 Электромагнитный щеткодержатель / Забоин В.Н., Ширкин М.Л. №4048830, Заявлено 8.04.1986, Опубл. 18.09.1987. –2с.
16. А.с. № 1399840 Устройство для контроля искрения в скользящем контакте электрической машины / Забоин В.Н. Ширкин М.Л. – №4097620, Заявлено 8.08.1986, Опубл. 1.02.1988. –4с.
17. А.с. № 1485340 Способ выравнивания токораспределения по параллельно включенным щеткам и устройство для его осуществления / Забоин В.Н., Ширкин М.Л. – №4293432, Заявлено 3.08.1987, Опубл. 8.02.1989.– 4с.
18. Забоин В.Н., Иванов С.Н., Кулаков В.А. Система автоматического сбора и обработки информации о работе ТСТ // ЛенЦНТИ, 1987. – № 954-8. –4 с.
19. Забоин В.Н., Квач И.Е., Родионов Ю.А. Автоматизированный электротехнический комплекс для исследований контактных колец с различными видами нарезок // ЛенЦНТИ, 1990. – № 90–221. – 2 с.
20. Забоин В.Н. Исследование основных характеристик металлографитных контактных пар для униполярных электрических машин /Реф.сб. Итоги научно–исследовательских работ. –СПбГТУ, 1995.

21. Забоин В.Н, Федосов М.И. Разработка методик расчёта и оценки надёжности систем токосъёма сверхпроводниковых электрических машин / Реф.сб. Итоги научно–исследовательских работ. – СПбГТУ. – 1996.
22. Забоин В.Н. Исследование основных видов проводимости скользящего электрического контакта // Труды Российской науч. тех. конф. “Инновационные наукоёмкие технологии для России”. – СПб. – 1995.
23. Забоин В.Н. Новый метод расчета твердощеточных систем токосъёма энергетических электрических машин // Труды Российской науч. тех. конф. “Инновационные наукоёмкие технологии для России”. – СПб. – 1995.
24. Забоин В.Н. Родионов Ю.А. Федосов М.И. Разработка и исследование способов профилирования поверхности контактных колец турбогенераторов // Материалы Российской научно-технической конференции «Инновационные наукоёмкие технологии для России», С.-Петербург, 1995.
25. Демкин П.С., Забоин В.Н. Расчет надёжности работы твердощеточных систем токосъёма электроэнергетических машин // Труды I Всероссийской научно–технической конференции «Фундаментальные исследования в технических университетах». – С.–Петербург. – 1997.
26. Горюнов Ю.Е., Демкин П.С., Забоин В.Н. Оптимизация параметров и прогнозирование надёжности твердощеточных систем токосъёма электроэнергетических машин // Сб. тез. докл. Международного Бизнес–Форума ИВТ–XXI. – Санкт–Петербург. –22–27 ноября. –1999.
27. Демкин П.С., Забоин В.Н. Оптимизация параметров и прогнозирование надёжности работы систем токосъёма электрических машин. // Сб. докл. Российской НПК «Проблемы создания и эксплуатации электрических машин, электрофизической аппаратуры и высоковольтной техники». С.–Петербург. –2001. – С.7– 13.

Лицензия ЛР №020593 от 07.08.97

---

Подписано в печать  
Тираж 100

объем в п.л.  
Заказ №

---

Отпечатано с готового оригинал макета,  
предоставленного автором,  
в типографии ГОУ ВПО «СПбГПУ»  
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29