



На правах рукописи

**Демкин Павел Сергеевич**

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ,  
НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ СИСТЕМ ТОКОСЪЕМА  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН**

Специальность 05.09.01 – электромеханика и электрические аппараты

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт – Петербург – 2004 г.

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

Научный руководитель: - доктор технических наук, доцент  
Забойн Валерий Николаевич.

Официальные оппоненты: - доктор технических наук, профессор  
Коськин Юрий Павлович,  
кандидат технических наук  
Марцынковский Олег Александрович.

Ведущая организация: - филиал ОАО «Силовые машины» «Электросила»,  
Санкт-Петербург.

Защита состоится "11" февраля 2005 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета К 212.229.02 при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, С.-Петербург, Политехническая ул. 29, гл. зд., ауд. 325.

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

Автореферат разослан "   " декабря 2004 г.

Ученый секретарь  
Диссертационного Совета  
к.т.н.

Попов М.Г.

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

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Безаварийная и безотказная работа электрических машин различного назначения во многом зависит от безопасности и надежности их твердощеточных систем токосъема (ТСТ) с контактными кольцами. Поэтому проблема обеспечения высокой эффективности и надежности ТСТ является весьма актуальной для эксплуатации, ремонта и модернизации действующих и проектирования вновь создаваемых турбо- и гидрогенераторов, синхронных и асинхронных двигателей мощностью до 10 Мвт и, конечно, ферромагнитных и сверхпроводниковых униполярных машин постоянного тока. Различным аспектам решения указанной проблемы посвящено большое количество публикаций отечественных и зарубежных исследователей. В работах Голубовича А.И., Гольдберга О.Д., Забоина В.Н., Кузнецова Н.Л., Копылов И.П., Попова В.В., Рыженской Б.М., Токарева Б.Ф., Федосова М.И. и др. непосредственно решаются задачи количественной оценки и прогнозирования надежности различных систем токосъема на основе использования математических моделей показателей их работоспособности. Анализ этих публикаций показал, что к настоящему времени предложена лишь научно обоснованная методология прогнозирования технического состояния и надежности ТСТ электрических машин, для практической реализации которой необходимо исследовать статистические законы распределения скорости износа различных электрических щеток, экспериментально определить ее математические модели (функциональные зависимости) от основных факторов воздействия, разработать компьютерные технологии расчета безопасности и надежности ТСТ и ее элементов с учетом кратности и вида резервирования, количества и параметров режимов эксплуатации системы. Решению перечисленных укрупненных задач и посвящена настоящая диссертация, в которой обобщены результаты работы автора в составе группы сотрудников кафедры «Электрические машины» СПбГПУ по научно-технической программе «Повышение надёжности, экономичности и экологичности электроэнергетической системы России» (1993-1995), грантам Минобрразования РФ в области энергетики и электротехники (1995-2001), заказами научно-исследовательских и промышленных предприятий (1994–1997).

### **Цель работы и задачи исследования.**

Целью диссертации являлась разработка и компьютерная реализация методов прогнозирования технического состояния, безопасности и надежности твердощеточных систем токосъема электрических машин на основе использования статистической линеаризации случайной величины высоты щетки  $h$  и мультипликативных математических моделей интенсивности ее износа  $V_h$ .

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие основные задачи:

1. Выполнить анализ существующих методов количественной оценки надежности работы различных резервированных систем с постепенными и внезапными отказами их элементов.

2. Разработать метод расчета надежности элементов твердощеточных систем токосъема, основанный на статистической линеаризации случайной величины высоты щетки  $h$  линейно-веерной функцией времени и учитывающий принципиальную множественность режимов эксплуатации ТСТ.

3. Провести экспериментальные исследования статистических законов распределения скорости износа  $V_h$  различных типов и марок электрических щеток, определить соотношения между критериями возможности использования нормального закона для аппроксимации опытной кривой плотности распределения  $V_h$  по результатам выборки малого объема.

4. Разработать алгоритмы и соответствующие компьютерные программы определения нормированных ортогонально-ротатабельных многоуровневых несимметричных матриц планирования эксперимента для нахождения трехфакторных математических моделей (уравнений регрессий)  $V_h$ .

5. Экспериментально определить мультипликативные математические модели скорости износа  $V_h = C \cdot F_{щ}^\alpha \cdot I_{щ}^\beta \cdot V_{щ}^\gamma$  традиционных и перспективных контактных пар для систем токосъема электрических машин.

6. Разработать и программно реализовать методы прогнозирования технического состояния, надежности и безопасности ТСТ электрических машин.

**Методы исследований.** При решении указанных задач использовались методы математической статистики, теории планирования эксперимента и ма-

тематического моделирования его результатов, количественной оценки надежности работы невосстанавливаемых систем с постепенными отказами.

### **Научная новизна.**

1. Разработан принципиально новый метод расчета вероятности безотказной работы щетки  $P_{щ}(t)$  в системах токосъема электрических машин, основанный на определении текущих значений математического ожидания  $m_{hi}$  высоты щетки  $h$  и среднеквадратичного отклонения  $\sigma_{hi}$  в результате статистической линеаризации случайной величины  $h$  линейной вверной функцией времени с учетом множественности режимов эксплуатации системы.

2. Экспериментально доказано, что интенсивность износа  $V_h$  электрографитированных и металлографитных щеток марок ЭГ2АФ, 611ОМ, ЭГ4, МГСО, МГ, обычно применяемых в сильноточных и многощеточных системах токосъема электрических машин, по критериям согласия Пирсона, Колмогорова-Смирнова, асимметрии  $A$  и эксцесса  $E$  является случайной величиной, распределенной по нормальному закону с уровнем значимости  $\alpha = 0,05$ .

3. Установлены критериальные соотношения для значений асимметрии  $A$  и эксцесса  $E$  опытной кривой плотности распределения  $V_h$  при малом объеме выборки, позволяющие оценить возможность применения нормального закона для ее аппроксимации.

4. Разработан и программно реализован алгоритм получения нормированных ортогонально-ротатабельных многоуровневых и несимметричных планов эксперимента с минимальными значениями критериев оптимальности  $D$ ,  $A$  и  $E$ , позволяющих уменьшить дисперсии определения коэффициентов мультипликативного трехфакторного уравнения регрессии и значений функции отклика.

5. Экспериментально определены мультипликативные математические модели средней скорости износа различных электрических щеток  $V_h = C \cdot F_{щ}^\alpha \cdot I_{щ}^\beta \cdot V_{щ}^\gamma$ , которые по адекватности, наглядности и простоте интерпретации получаемых результатов существенно превосходят обычно используемые в расчетной практике полиномы первой степени или неполные полиномы второй степени от тех же факторов воздействия.

6. Предложен метод оценки ресурса, безопасности  $P_{a\ TCT}(t)$  и безотказности  $P_{TCT\ k, N}(t)$  работы любых систем токосъема, основанный на использовании

принципа практической достоверности и формулы Бернулли для оценки вероятности появления не более  $k$  событий из  $N$ , позволяющий учесть кратность и вид резервирования системы, параметры, количество и последовательность режимов ее эксплуатации.

### **Практическая ценность.**

1. Получены мультипликативные математические модели скорости износа  $V_h = C \cdot F_{щ}^\alpha \cdot I_{щ}^\beta \cdot V_{щ}^\gamma$  различных контактных пар, которые позволяют оценить значения  $V_h$  на стадии проектирования системы токосяема при широком варьировании основных факторов воздействия, определяющих ее режимы работы.

2. Разработана универсальная программа расчета технического состояния, безопасности и надежности систем токосяема электрических машин, позволяющая в простой и наглядной форме оценить ресурс и значения вероятностей безопасной и безотказной работы системы  $P_{aTCT}(t)$  и  $P_{TCT\kappa,N}(t)$ , а также ее элементов  $P_{щmax}(t)$  и  $P_{щdon}(t)$  в любой момент времени  $t$  с учетом кратности и вида резервирования, количества и параметров режимов эксплуатации системы.

3. Результаты работы были использованы при проектировании различных систем токосяема электрических машин в процессе выполнения госбюджетных и хоздоговорных НИР, грантов Минобрнауки РФ, магистерских диссертаций студентов.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Российской научно-практической конференции «Проблемы создания и эксплуатации электрических машин, электрофизической аппаратуры и высоковольтной техники» (С.-Петербург, 2001), Международном Бизнес-Форуме ИВТ-XXI (С.-Петербург, 1999), I Всероссийской научно-технической конференции «Фундаментальные исследования в технических университетах» (С.-Петербург, 1997), на 2-й Санкт-Петербургской Ассамблее молодых ученых и специалистов (С.-Петербург, 1997), на заседании секции № 5 Научного совета Российской академии наук по мощной импульсной технике (С.-Петербург, 1996), Российской научно-технической конференции «Инновационные наукоёмкие технологии для России» (С.-Петербург, 1995).

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 7 печатных работ.



**Структура и объем работы.** Диссертация изложена на 164 страницах текста и содержит 5 разделов, заключение, 2 приложения, 38 рисунков, 14 таблиц и список использованной литературы из 128 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**В первом разделе** (введении) 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, определены цель и основные задачи работы.

**Во втором разделе** выполнен анализ существующих методов констатации уровня надежности систем токосъема электрических машин по данным испытаний и эксплуатации, рассмотрены опубликованные в литературе математические модели надежности этих систем и их элементов, предложен принципиально новый метод оценки вероятности безотказной работы щетки в системе, учитывающий множественность режимов ее эксплуатации.

В инженерно-научной практике для определения вероятности отказа щетки  $Q_{щ}(t)$  обычно используют табулированные значения функции Лапласа  $\Phi(z)$  или функции ошибок  $erf(x)$ , а также непосредственную форму записи интеграла вероятности Лапласа в функции от  $t$ , принимая в качестве математического

ожидания ресурса величину  $\bar{T} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n t_{pi}$ . Если под  $t_{pi}$  понимается реальное,

найденное в результате испытаний или эксплуатации значение времени внезапного отказа щетки по любой причине, то справедливость такого подхода к оценке  $Q_{щ}(t)$  не вызывает сомнений. Однако, если в качестве  $t_{pi}$  принимается отношение допустимой величины износа щетки  $\Delta h_{[дон]}$  к скорости ее износа  $V_{hi}$ , то это неизбежно приводит к существенной ошибке в определении  $Q_{щ}(t)$ , что обусловлено резкой модальной асимметрией кривой плотности распределения  $t_p$  по сравнению с соответствующей кривой  $V_h$ . Предпринимаемая в расчетной практике попытка устранения указанной ошибки за счет использования  $t_{p \max}$  вместо  $\bar{T}$ , дает, естественно, излишне оптимистическую оценку  $P_{щ}(t)$  щетки.

Самым существенным недостатком традиционных методов констатации надежности систем токосъема электрических машин является то, что они не от-

ражают работу щетки 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 учесть принципиальную множественность (разнообразие и последовательность) режимов работы щетки в системе. Однако если в качестве определяющего параметра надежности щетки выбрать переменное значение  $h_i$  вместо постоянных  $\bar{T}$  или  $\bar{T}_p = \Delta h_{don} / \bar{V}_h$ , то задача расчета  $P_{щ}(t)$  в любом из режимов эксплуатации системы может быть решена корректно и просто. Так, в случае нормального закона распределения  $h$ , вероятность того, что в произвольный момент времени  $t_i$  высота щетки  $h_i$  будет меньше ее допустимого значения  $h_{[don]}$  (вероятность отказа щетки при  $t = t_i$ ) может быть определена как:

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

где  $m_{h_i}$  - математическое ожидание  $h$ , а  $\sigma_{h_i}$  – ее среднеквадратичное отклонение.

Идея о возможности расчета вероятности безотказной работы (ВБР) элемента с постепенными отказами на основе использования выражения (1) была впервые высказана Г.В. Дружининым и получила развитие в трудах И.А. Рябина. Сущность этого расчета состоит в том, что, задавая различные

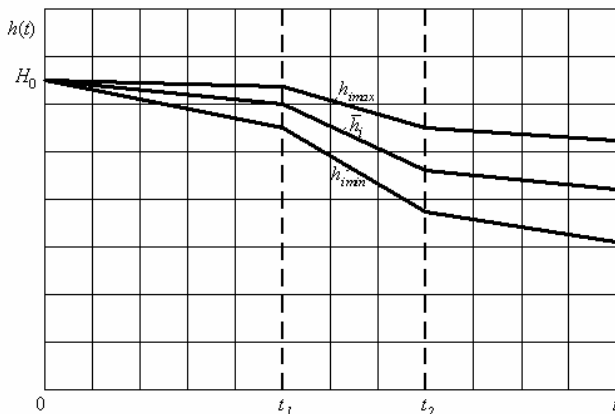


Рис.1. Линеаризации случайных процессов изнашивания элемента системы с постепенными отказами (реализация математического ожидания  $h$  и ограничивающие реализации  $h_{min}$  и  $h_{max}$ ).

значения  $t_i$  и малые приращения  $\Delta t_i$ , можно легко по (1) определить и построить зависимости от времени вероятности отказа щетки  $Q_{щ}(t)$  и ее плотности распределения  $q(t)$ . Следовательно, для расчета ВБР щетки  $P_{щ}(t) = 1 - Q_{щ}(t)$  необходимо и достаточно знать только  $m_{h_i}$  и  $\sigma_{h_i}$  в каждый момент времени  $t_i$ . Для их определения в диссертации предложено использовать статистическую

линеаризацию случайной величины  $h$ , полагая, что она является линейной верной функцией времени с полюсом  $H_0$ , как показано на рис.1.

При линейризации процесса изнашивания  $h$  каждая реализация этого процесса заменяется соответствующей прямой линией. Точки пересечения линейных реализаций с секущими  $t_i = const$  являются выборками  $h_i$  в моменты времени  $t_i$ . Естественно, что при увеличении  $t_i$   $m_{hi}$  уменьшается, а  $\sigma_{hi}$  растет, то есть *мода* нормального распределения уменьшается, а его форма уплощается. Необходимые для расчета  $m_{hi}$  и  $\sigma_{hi}$  в любом из требуемых режимов работы щетки выражения могут быть легко определены. Так, в частности, выражение для математического ожидания  $m_{h2i}$  во втором режиме можно записать в виде:

$$m_{h2i} = H_0 - V_{h1} \cdot t_1 - V_{h2} \cdot (t_i - t_1), \quad (2)$$

где  $V_{h1}$  и  $V_{h2}$  - математические ожидания случайной величины скорости изменения определяющего параметра  $h$ , а  $t_1$  - продолжительность первого режима.

Соответствующее общее выражение для нахождения дисперсии  $h_i$  во втором режиме  $d_{h2i}$  ( $\sigma_{h2i}$ ) в момент времени  $t_i$  можно представить в виде:

$$d_{h2i} = d_{vh1} \cdot t_1^2 + d_{vh2} \cdot (t_i - t_1)^2 + 2 \cdot \rho \cdot t_1 \cdot (t_i - t_1) \cdot \sqrt{d_{vh1} \cdot d_{vh2}}, \quad (3)$$

где  $d_{vh1}$  и  $d_{vh2}$  - дисперсии  $V_{h1}$  и  $V_{h2}$ , а  $\rho$  - коэффициент корреляции между ними.

Поскольку скорости изменения  $h$  являются независимыми случайными величинами ( $\rho = 0$ ), то для определения текущего значения дисперсии  $d_{hni}$  в  $n$ -ом режиме работы при  $t = t_i$  можно с учетом (3) получить выражение:

$$d_{hni} = \sum_{k=1}^{k=n-1} d_{Vhk} \cdot (\Delta t_k)^2 + d_{Vhn} \cdot (t_i - \sum_{k=1}^{k=n-1} \Delta t_k)^2, \quad (4)$$

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

Для  $m_{hni}$  в этом же режиме можно написать:

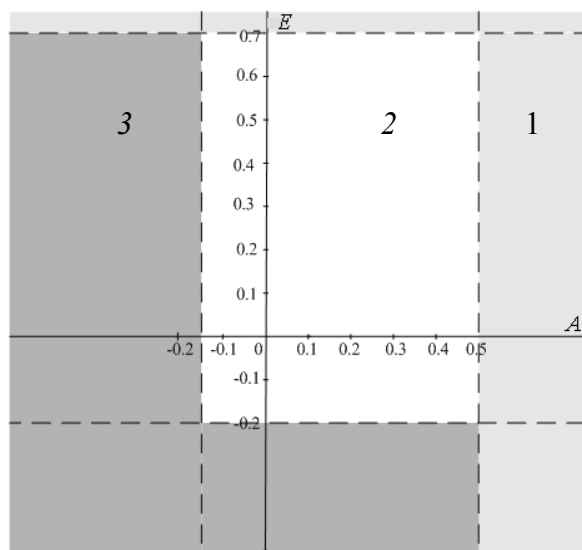
$$m_{hni} = H_0 - \sum_{k=1}^{k=n-1} V_{hk} \cdot \Delta t_k - V_{hn} \cdot (t_i - \sum_{k=1}^{k=n-1} \Delta t_k). \quad (5)$$

Таким образом, для расчета  $m_{hi}$ ,  $\sigma_{hi}$  и, следовательно,  $Q_{ui}(t)$  необходимо и достаточно знать только значения математического ожидания скорости износа щетки  $V_h$  и ее дисперсии  $\sigma_{vh}$  в каждом из требуемых режимов работы системы. Поэтому практическая реализация предложенного метода расчета  $P_{ui}(t)$  возможна лишь на основе экспериментального исследования законов распределения случайной величины  $V_h$  и определения ее функциональной зависимости от

факторов воздействия  $I_{щ}$ ,  $F_{щ}$  и  $V_{щ}$ , характеризующих режим работы щетки.

**В третьем разделе** изложены результаты расчетно-экспериментальных исследований характера распределения случайной величины  $V_h$  различных марок щеток, определены критериальные соотношения для значений асимметрии  $A$  и эксцесса  $E$  опытной кривой плотности распределения  $V_h$  при малом объеме выборки, позволяющие оценить корректность применения нормального закона для ее аппроксимации, даны рекомендации по численному интегрированию, в случае необходимости, плотности распределения  $q_e(V_h)$ .

Исходные для расчетно-теоретического анализа опытные значения  $V_{hi}$  были получены на специальных стендах и установках, в монтаже, наладке и эксплуатации которых автор принимал непосредственное участие.



По результатам пятикратных ( $\kappa=5$ ) выборок объемом от 5 до 24 ( $i = 5 \div 24$ ) значений  $V_{h\kappa,i}$  из конечных генеральных совокупностей значений  $V_h$  щеток марок ЭГ2АФ, 611ОМ, ЭГ4, МГСО, МГ, применяемых в системах токосъема электрических машин, было установлено, что  $V_h$  по критериям согласия Пирсона, Колмогорова-

Смирнова, асимметрии  $A$  и эксцесса  $E$  является случайной величиной, распределенной по нормальному закону с уровнем значимости  $\alpha = 0.05$  (с  $P_D = 95\%$ ). Показано также, что при объеме выборки  $i > 15$  параметры опытного распределения  $V_h$  отличаются от параметров распределения конечной генеральной совокупности значений  $V_h$  не более чем на 10%. Расчетно-теоретически доказано, что при малом объеме выборки и значениях асимметрии и эксцесса, лежащих в диапазонах:  $-0.15 \cdot |A_e|_{кр} < A_e < 0.5 \cdot |A_e|_{кр}$  и  $-0.2 \cdot |E_e|_{кр} < E_e < 0.7 \cdot |E_e|_{кр}$  (область 2 на рис.2) использование нормального закона для аппроксимации опытной кривой плотности распределения  $V_h$  вполне правомерно. В противном случае, его применение будет давать либо излишне пессимистичные (при  $A_e > 0.5 \cdot |A_e|_{кр}$  и  $E_e > 0.7 \cdot |E_e|_{кр}$ , область 1),

либо оптимистичные (при  $A_\varepsilon < -0.15 \cdot |A_\varepsilon|_{кр}$  и  $E_\varepsilon < -0.2 \cdot |E_\varepsilon|_{кр}$ , область 3) прогнозы ВБР щетки  $P_{щ}(t)$ . Причем критические значения  $|A_\varepsilon|_{кр}$  и  $|E_\varepsilon|_{кр}$  приблизительно равны соответственно 1.1 и 1.5 при уровне значимости  $\alpha = 0.05$  и объеме выборки  $i < 10-15$ .

При необходимости численного интегрирования  $q_\varepsilon(V_h)$  следует выбирать количество интервалов (классов) разбиения диапазона изменения  $V_h$ , равным увеличенному на единицу для исключения «пограничных конфликтов» отношению этого диапазона (размаха) к погрешности измерения  $V_h$ .

Экспериментально и расчетно-теоретически доказанная в диссертации возможность аппроксимации реальной кривой  $q_\varepsilon(V_h)$  нормальным законом позволяет существенно упростить алгоритм практической реализации предложенного во втором разделе метода оценки ВБР щетки  $P_{щ}(t)$  в результате непосредственного использования (1). Поэтому задача расчета  $P_{щ}(t)$  сводится, по существу, лишь к определению функциональных зависимостей (математических моделей)  $V_h$  от основных факторов воздействия  $I_{щ}$ ,  $F_{щ}$  и  $V_{щ}$ .

**В четвертом разделе** диссертации изложена методика трехфакторного мультипликативного моделирования скорости износа щеток  $V_h$  на основе использования полученных автором ортогонально-ротатабельных нормированных несимметричных матриц планирования эксперимента. Определены мультипликативные математические модели  $V_h = C \cdot I_{щ}^\alpha \cdot F_{щ}^\beta \cdot V_{щ}^\gamma$  для различных контактных пар, применяемых в сильноточных ТСТ электрических машин.

При матричной форме записи исходной переопределенной системы линейных уравнений в виде  $\mathbf{X} \cdot \mathbf{V} = \mathbf{Y}$  задача моделирования сводится к нахождению вектора-столбца  $\mathbf{V}$  коэффициентов модели по формуле  $\mathbf{V} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \cdot \mathbf{Y}$ . Соответствующая 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.

Для нахождения трехфакторных математических моделей наиболее часто используют полнофакторные двухуровневые планы  $\mathbf{X1}$  типа  $2^3$  или дробнофак-

торные планы **X2** (реплики) типа  $3^{3-1}$  первого порядка, являющиеся симметричными равномерными регулярными планами главных эффектов – ортогональными

$$\begin{aligned}
 \mathbf{X1} &= \begin{pmatrix} 1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 \end{pmatrix} \quad \mathbf{X2} = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & -1 & 1 \end{pmatrix} \quad \mathbf{X3} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \quad \mathbf{X4} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & -1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & 0 \end{pmatrix} \\
 \mathbf{C1} &= \begin{pmatrix} 0.125 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.125 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.125 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.125 \end{pmatrix} \quad \mathbf{C2} = \begin{pmatrix} 0.111 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.167 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.167 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.167 \end{pmatrix} \\
 \mathbf{C3} &= \begin{pmatrix} 0.167 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5 \end{pmatrix} \quad \mathbf{C4} = \begin{pmatrix} 0.083 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.125 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.125 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.125 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

ми таблицами мощности  $d = 2$  (9, 3, 3, 2). Иногда в исследовательской практике используется матрицы планирования **X3** и **X4** соответственно по вершинам октаэдра ( $N=6$ ) и кубоктаэдра ( $N=12$ ).

Из рассмотрения 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. Кроме того, с логической точки зрения, недостатком всех матриц **X1-X4** является наличие в них точек однофакторного эксперимента, а матрицы **X1** еще и двухуровневая. Все эти недостатки можно избежать, если вести планирование по точкам на сферической поверхности факторного пространства, удовлетворяющим условиям ортогональности и нормировки. Поэтому в диссертации был разработан и программно реализован соответствующий алгоритм получения ортогонально-ротатабельных многоуровневых несимметричных матриц планирования трехфакторного физического эксперимента. Одной из них является матрица **X**. Она не содержит точек однофакторного эксперимента, а присущая ей несимметрия позволяет

полнее учесть априорную нелинейность  $V_h$  от двух из трех факторов воздействия. По всем критериям оптимальности **X** превосходит применяемые на практике матрицы

$$\begin{aligned}
 \mathbf{X} &= \begin{pmatrix} 1 & 0.866 & 0.866 & 1.225 \\ 1 & -1.183 & 0.317 & 1.225 \\ 1 & 0.317 & -1.183 & 1.225 \\ 1 & 0.151 & 1.725 & 0 \\ 1 & -1.570 & -0.732 & 0 \\ 1 & 1.419 & -0.993 & 0 \\ 1 & -0.702 & 1.003 & -1.225 \\ 1 & -0.518 & -1.110 & -1.225 \\ 1 & 1.220 & 0.107 & -1.225 \end{pmatrix} \\
 \mathbf{C} &= \begin{pmatrix} 0.111 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.111 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.111 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.111 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

Таблица 1

Сопоставление планов эксперимента по критериям оптимальности

	Полно-факторный	<b>X2</b>	<b>X1</b>	<b>X3</b>	<b>X4</b>	<b>X</b>
Число опытов $N$	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

критериям оптимальности **X** превосходит применяемые на практике матрицы

планирования **X1-X4** (см. табл.1). Рассматривая значения матрицы **X** как значения логарифмов факторов воздействия по требуемому исследователю основанию *a*, можно составить рабочий план эксперимента, реализация которого и позволит определить искомую модель. Используя значение дисперсии воспроизводимости опытных данных можно по *t*<sub>0,05</sub> - распределению Стьюдента оценить статистическую значимость коэффициентов модели *b<sub>i</sub>*, по *F*- критерию Фишера – ее адекватность и по  $\chi^2$ - распределению Пирсона – ее точность. В частности, статистический анализ полученного в работе логарифмического уравнения линейной регрессии *V<sub>hp</sub>* одной из 16 щеток ЭГ2АФ:

$$\log_{1.55} V_{hp} = 13.722 + 0.241 \cdot \log_{1.55} I_{щ} + 0.788 \cdot \log_{1.55} F_{щ} + 0.478 \cdot \log_{1.55} V_{щ} \quad (7)$$

показал, что дисперсии адекватности *d<sub>ад</sub>* = 0.0054 и воспроизводимости *d<sub>в</sub>* = 0.05 однородны по *F*- критерию (*F*=0.11 < *F*<sup>*T*</sup><sub>0.05(5.15)</sub>=2.9), коэффициенты модели статистически значимы по *t* -критерию ( $|b_i| > t_{0.05} \cdot s(b_i) = 0.159$ ), генеральный стандарт по  $\chi^2$  - критерию  $\sigma_{0.05} < 0.321$ , а абсолютная погрешность расчета по уравнению регрессии не превосходит  $\pm 0.629$  с *P*= 95%. После потенцирования (7) эта погрешность становится относительной с доверительными интервалами +0.32 и – 0.24, а искомая модель интенсивности износа щетки в мкм/20 ч от факторов воздействия в относительных единицах принимает вид:

$$V_{hp} = 409 \cdot I_{щ}^{0.24} \cdot F_{щ}^{0.79} \cdot V_{щ}^{0.48} \quad (8)$$

С практической точки зрения достаточно, конечно, использовать лишь верхнюю доверительную границу *V<sub>h</sub>* и соответствующее неравенство для любой из 16 щеток партии записывать как:

$$V_h \leq 1.32 \cdot V_{hp} = 1.32 \cdot 409 \cdot I_{щ}^{0.24} \cdot F_{щ}^{0.79} \cdot V_{щ}^{0.48} = 540 \cdot I_{щ}^{0.24} \cdot F_{щ}^{0.79} \cdot V_{щ}^{0.48}, \quad \text{с } P_D = 95\%.$$

Таблица 2

Математические модели средней скорости износа щеток <i>V<sub>hcr</sub></i> различных контактных пар.			
№	Контактная пара	Вид нарезки рабочей поверхности КК	Мультипликативная математическая модель
1	ЭГ2АФ - нерж. сталь	встречно - винтовая	$V_{h-} = 4.17 \cdot I_{щ}^{0.31} \cdot F_{щ}^{0.71} \cdot V_{щ}^{0.62}$ , [мм/1000 ч]
2	ЭГ2АФ - нерж. сталь	коллекторно-винтовая	$V_{h-} = 4.62 \cdot I_{щ}^{0.41} \cdot F_{щ}^{1.0} \cdot V_{щ}^{0.82}$ , [мм/1000 ч]
3	611ОМ - нерж. сталь	коллекторно-винтовая	$V_{h+} = 4.34 \cdot I_{щ}^{0.46} \cdot F_{щ}^{1.0} \cdot V_{щ}^{0.78}$ , [мм/1000 ч]
4	МГСО - Cu + Mg + Cr + Zr	нет	$V_{h-} = 0.52 \cdot I_{щ}^{1.47} \cdot F_{щ}^{0.77} \cdot V_{щ}^{2.1}$ , [мм/10 ч]
5	МГСО - Cu + Mg + Cr	нет	$V_{h+} = 1.25 \cdot I_{щ}^{0.72} \cdot F_{щ}^{0.5} \cdot V_{щ}^{0.8}$ , [мм/10 ч]
6	МГСО - Cu + Mg + Cr	нет	$V_{h-} = 0.67 \cdot I_{щ}^{1.29} \cdot F_{щ}^{0.72} \cdot V_{щ}^{1.65}$ , [мм/10ч]

Изложенная методика была использована и для определения моделей *V<sub>hcr</sub>* параллельно работающих щеток, применяемых в ТСТ электрических машин. Некоторые из них представлены в табл. 2. (где базовые значения:

$I_{щ\bar{o}} = 100$  А,  $F_{щ\bar{o}} = 10$  Н и  $V_{щ\bar{o}} = 50$  м/с). Модели справедливы, естественно, лишь в определенном диапазоне изменения факторов воздействия:  $I_{щ} = 50 \div 500$  А,  $F_{щ} = 2 \div 20$  Н и  $V_{щ} = 25 \div 100$  м/с. Погрешность расчета  $V_{hcr}$  (ошибка регрессии) по ним не превосходит  $\pm 1\%$ , а доверительный интервал для генерального среднего  $V_{hcr}$  составляет  $\pm 9\%$  при уровне значимости  $\alpha = 0.05$ .

Разработанная и практически реализованная методика экспериментального определения мультипликативных математических моделей  $V_{hcr}$  от основных факторов воздействия  $I_{щ}$ ,  $F_{щ}$  и  $V_{щ}$  позволяет в сочетании с предложенным методом оценки ВБР щетки  $P_{щ}(t)$  решить основную задачу диссертационной работы – оценить техническое состояние, надежность и безопасность систем токосъема электрических машин в различных режимах их эксплуатации.

**В пятом разделе** предложен метод оценки ресурса  $t_p$ , безопасности  $P_{aTCT}(t)$  и безотказности  $P_{TCT\kappa,N}(t)$  любых систем токосъема по соответствующим значениям  $P_{щ\max}(t)$  и  $P_{щ\text{дон}}(t)$  их элементов. Разработана компьютерная технология реализации предложенного метода, позволяющая определить  $P_{aTCT}(t)$  и  $P_{TCT\kappa,N}(t)$  с учетом кратности и вида резервирования системы, параметров, количества и последовательности режимов ее эксплуатации. Приведены конкретные примеры прогнозирования  $t_p$ ,  $P_{aTCT}(t)$  и  $P_{TCT\kappa,N}(t)$  нерезервированных и резервированных систем токосъема с постоянной и перераспределяемой токовой нагрузкой.

Сущность предложенного метода оценки  $P_{aTCT}(t)$  и  $P_{TCT\kappa,N}(t)$  состоит в определении по формуле Бернулли:

$$P_{TCT\kappa,N}(t_i) = \sum_k Q_{щ\kappa,N} = \sum_k C_N^k \cdot P_{щ}(t_i)^{N-k} \cdot Q_{щ}(t_i)^k$$

и значениям  $P_{щ\max}(t)$  и  $P_{щ\text{дон}}(t)$  вероятностей того, что к моменту времени  $t_i$  ни одна щетка системы не достигнет своего предельного состояния (аварийного) по износу и что не более  $\kappa$  щеток из  $N$  достигнут своего допустимого состояния по износу. Причем расчет вероятности  $P_{TCT\kappa,N}(t)$  имеет смысл лишь до момента времени  $t_{\max} = t_p$ , при котором, исходя из принципа практической достоверности, вероятность аварийного отказа щетки  $P_{щ\max}(t) = 0.95$ .

В диссертации был составлен и программно реализован алгоритм оценки  $t_p$ ,  $P_{aTCT}(t)$  и  $P_{TCT\kappa,N}(t)$  любых систем токосъема электрических машин с учетом



вида и кратности резервирования, количества и параметров режимов их эксплуатации. Разработанная программа была использована при проектировании

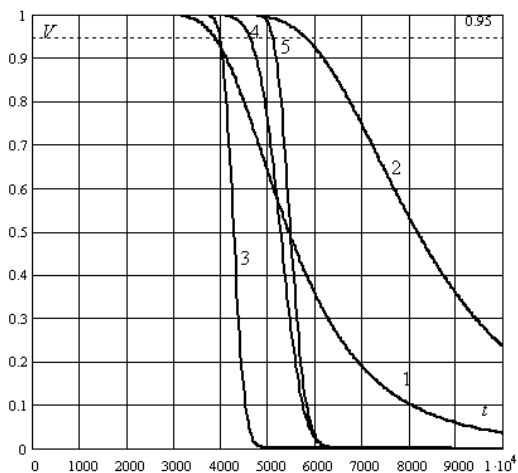


Рис3. Оценка ресурса, надежности и безопасности ТСТ ТГ ТВВ-320-2 (1- $P_{щ\ don}(t)$ , 2- $P_{щ\ max}(t)$ , 3- $P_{TCT\ 6,48}(t)$ , 4- $P_{a\ TCT}(t)$  и 5 - $P_{TCT\ 24,48}(t)$ ).

систем токосъема турбогенераторов и униполярных генераторов постоянного тока. В частности, из рассмотрения соответствующих зависимостей на рис.3 следует, что с  $P_{a\ TCT}(t) = 100\%$  возможна безопасная (безаварийная) работа системы токосъема ТГ ТВВ 320-2 в течение 3900 часов, а, исходя из принципа практической достоверности, ее ресурсом следует считать  $t_{max} = 5800$  часов, при котором  $P_{щ\ max}(t)$  составляет 95%. Кроме того, в диапазоне изменения

$t_i$  от нуля до  $t_{max}$  справедливы любые частные оценки ВБР  $P_{TCT\ k,N}(t)$  нерезервированной системы в качестве резервированной с дробной кратностью при  $k=1,2,\dots,n_p$  (на рис.3 показаны кривые  $P_{TCT\ 6,48}(t)$  и  $P_{TCT\ 24,48}(t)$  для  $k_p=1,14$  и  $k_p=2$  соответственно). Однако, наиболее важной частной оценкой БВР системы  $P_{TCT\ k,N}(t)$  является, конечно, ее величина при  $k$ , равном числу щеток на пальце траверсы или в кассете (в рассматриваемой системе  $P_{TCT\ 6,48}(t)$ ). Очевидно, что в момент времени  $t_i = 4000$  часов, при котором  $P_{TCT\ 6,48}(t) = 95\%$ , необходимо начинать последовательную замену всех 6 щеток на каждом из 8 пальцев траверсы через  $\Delta t \approx 250$  часов. Точные значения  $\Delta t$  можно определить по значениям  $P_{TCT\ 6,42}(t)$ ,  $P_{TCT\ 6,36}(t)$  и т.д.

Обобщая результаты расчета различных систем токосъема, в работе показано, что любую нерезервированную систему токосъема можно, исходя из принципа практической достоверности, рассматривать как «горячую» резервированную систему с дробной кратностью  $k_p \leq 2$  до момента времени  $t_{max}$ . Кроме того, нерезервированную систему токосъема турбогенератора, допускающую замену щеток в процессе ее эксплуатации, можно до момента времени  $t_{max}$  рассматривать не только как резервированную систему с дробной крат-

ностью, но и как систему с постоянной токовой нагрузкой и полным «холодным» резервированием ее элементов.

Для резервированных систем токосъема с перераспределяемой токовой нагрузкой, допускающих полный физический износ щетки, возможна, конечно, эксплуатация и при  $t_i > t_{max}$ . Причем ее продолжительность и моменты времени переключения тока на остающиеся в работе щетки определяются уже вероятностью аварийного отказа  $P_{a\ TCT\ kN}(t)$  не более  $k = 1, 2 \dots n_p$  щеток, которая сравнивается с принятым уровнем достоверности  $\alpha$ .

Важно отметить, что требуемые показатели работоспособности, безопасности и надежности можно получить, варьируя усилие нажатия на щетки  $F_{щ}$ , их число  $N(I_{щ})$  и скорость скольжения контактных пар  $V_{щ}$ . Следовательно, разработанная программа позволяет в простой и наглядной форме оценить не только ресурс, безопасность и надежность системы токосъема, но и повысить эффективность и качество их проектирования.

### **Заключение.**

Из рассмотрения и анализа представленных в диссертации материалов следует, что решен комплекс логически связанных и частично самостоятельных задач экспериментальных исследований статистических законов распределения и мультипликативного математического моделирования скорости износа различных типов и марок электрических щеток, разработки и компьютерной реализации методов прогнозирования технического состояния, надежности и безопасности систем токосъема электрических машин. Основными обобщающими результатами решения указанных задач являются следующие:

1. Разработан принципиально новый метод расчета ВБР щетки  $P_{щ}(t)$ , основанный на определении текущих значений математического ожидания  $m_{hi}$  высоты щетки  $h$  и соответствующего среднеквадратичного отклонения  $\sigma_{hi}$  в результате статистической линеаризации случайной величины  $h$  линейной веерной функцией времени с полюсом  $H_o$ , позволяющий корректно и просто оценить показатели работоспособности, надежности и безопасности элементов системы токосъема с учетом множественности режимов ее эксплуатации.

2. Экспериментально доказано, что интенсивность износа  $V_h$  электрографитированных и металлографитных щеток марок ЭГ2АФ, 611ОМ, ЭГ4, МГСО, МГ, обычно применяемых в сильноточных многощеточных системах токосъема электрических машин, по критериям согласия Пирсона, Колмогорова-Смирнова, асимметрии  $A$  и эксцесса  $E$  является случайной величиной, распределенной по нормальному закону с уровнем значимости  $\alpha = 0,05$  (с доверительной вероятностью 95%).

3. Установлены критериальные соотношения для значений асимметрии  $A$  и эксцесса  $E$  опытной кривой плотности распределения  $V_h$  при малом объеме выборки, позволяющие оценить корректность применения нормального закона для ее аппроксимации.

4. Разработан и программно реализован алгоритм получения нормированных ортогонально-ротатабельных многоуровневых и несимметричных планов эксперимента с минимальными значениями критериев оптимальности  $D$ ,  $A$  и  $E$ , позволяющих уменьшить дисперсии определения коэффициентов уравнения регрессии и значений функции отклика  $V_h$ .

5. Реализация разработанных планов эксперимента для различных контактных пар, применяемых в системах токосъема электрических машин, позволила получить мультипликативные математические модели средней скорости износа щеток  $V_h = C \cdot F_{щ}^\alpha \cdot I_{щ}^\beta \cdot V_{щ}^\gamma$ , которые по адекватности, наглядности и простоте интерпретации получаемых результатов существенно превосходят полиномы первой степени или неполные полиномы второй степени от тех же факторов воздействия.

6. Разработана универсальная программа компьютерной реализации алгоритма расчета технического состояния, безопасности и надежности систем токосъема электрических машин, позволяющая в простой и наглядной форме оценить ресурс  $t_p$ , безопасность  $P_{a\ TCT}(t)$  и безотказность  $P_{TCT\ \kappa,N}(t)$  работы системы, а также ее элементов  $P_{щ\ max}(t)$  и  $P_{щ\ don}(t)$  в любой момент времени  $t_i$  с учетом кратности и вида резервирования, количества и параметров режимов эксплуатации системы.

В целом выполненная диссертация является законченной научной работой, в которой решена сложная научно-техническая задача, имеющая важное прак-

тическое значение для расчета и проектирования многощеточных и сильноточечных систем токосъема электрических машин различного назначения.

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

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

2. Демкин П.С., Забоин В.Н., Забоина Л.Н. Исследование законов распределения интенсивности износа электрощеток при малых объемах выборки /Деп. в ВИНТИ 30.01.98, № 256-В98 - 9 с.

3. Демкин П.С., Забоин В.Н. Расчет надежности работы твердощеточных систем токосъема электроэнергетических машин /Материалы I Всероссийской научно-технической конференции «Фундаментальные исследования в технических университетах», С.- Петербург, 1997. – 2 с.

4. Горюнов Ю.Е., Демкин П.С., Забоин В.Н. Оптимизация параметров и прогнозирование надежности твердощеточных систем токосъема электро-энергетических машин //Материалы Международного Бизнес-Форума ИВТ-XXI, Санкт-Петербург, 22-27 ноября, 1999. 2 с.

5. Демкин П.С., Забоин В.Н. Оптимизация параметров и прогнозирование надежности работы систем токосъема электрических машин. /Материалы Российской научно-практической конференции «Проблемы создания и эксплуатации электрических машин, электрофизической аппаратуры и высоковольтной техники», Санкт-Петербург, 2001.- с. 7-13.

6. Демкин П.С., Демкина Е.В. Прогнозирование технического состояния и надежности систем токосъема в электрических машинах объектов энергетического комплекса// Тез. докл. на 2-й Санкт-Петербургской Ассамблее молодых ученых и специалистов. – СПб.: 8 декабря 1997. – с. 30 - 31.

7. Демкин П.С., Забоин В.Н. Математическое моделирование надежности работы твердощеточных систем токосъема электроэнергетических машин: // Сб. РАН «Проблемы создания и эксплуатации новых типов электроэнергетического оборудования». Тез. докл. – С.–Петербург. –1999. –вып.1.– с.196.