

*The opportunities of obtaining competitive technologies based on scientific investigations (Diploma № 258, Diploma № 277, Diploma № 289, Diploma № 302) and quantum friction theory are discussed.*

**Keywords:** cold nuclear fusion, helium wear, friction control, carbon and nitrogen cycle, proton-and-proton cycle, helium superfluidity, quantum friction theory, nanotribology.

Ивасышин Генрих Степанович — профессор кафедры «Теория механизмов и машин» ФГБОУ ВПО ПсковГУ, д-р техн. наук, профессор, академик Российской инженерной академии, руководитель учебно-научного центра инновационной нанотрибологии ФГБОУ ВПО ПсковГУ.

УДК 621.313.322-81:621.336

*И. В. Плохов, А. В. Андрусич, А. В. Ильин,  
А. Н. Исаков, И. И. Бандурин, О. И. Козырева*

## **ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СКОЛЬЗЯЩИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ**

*Рассмотрены вопросы создания диагностической системы для исследования скользящих электрических контактов у турбогенераторов и машин постоянного тока большой мощности. Предложено два способа измерения тока, протекающего через узел скользящего токосъема: аналоговый и цифровой. Создана функциональная схема системы измерения с применением ЭВМ, ПК и программного обеспечения. Сформулированы задачи для научных исследований.*

**Ключевые слова:** узел скользящего токосъема, ток, щетка, среднее квадратичное действительное значение, селективный вольтметр, динамика токораспределения.

На протяжении полутора десятилетий на кафедре ЭСА велись работы по исследованию и научному обоснованию физических процессов передачи электрической энергии через скользящий контакт для турбогенераторов и машин постоянного тока большой мощности. Результатом этих работ стало создание прибора постоянной диагностики качества скользящего электрического контакта «Обзор» [1].

Повышение надежности электрических машин непосредственно связано с развитием фундаментальных и прикладных исследований в области диагностики и прогнозирования их технического состояния. В настоящее время данное направление интенсивно развивается. Все большее распространение получают автоматические устройства непрерывного мониторинга физических процессов и управления техническим состоянием отдельных функциональных частей электрических машин, а также системы комплексной диагностики и прогнозирования. Развиваются методы математического компьютерного моделирования динамических процессов в электрических машинах, имеющие целью повыше-

ние эффективности инженерного проектирования функциональных узлов и конструкций.

К одним из наиболее распространенных узлов электрических машин относятся узлы скользящего токосъема (УСТ). Они находят широкое применение в электромашиностроении, несмотря на то, что существует тенденция к переходу на бесконтактные способы передачи электрического тока. Так, например, в ряде случаев применение щеточно-контактных аппаратов является целесообразным в связи с их дешевизной и непрерывностью процесса функционирования. При бесконтактном способе токопередачи выход из строя вентиля может приводить к внезапной остановке и ремонтным работам, что для крупных энергетических машин непрерывного действия означает остановку всего производственного цикла и значительные экономические потери. Кроме того, для турбогенераторов атомных электростанций подобные отказы опасны, т. к. могут привести к потере устойчивости реактора. В подобных случаях щеточно-контактные системы имеют преимущество, особенно, если они оснащены средствами диагностики. Ведущие производители электрических машин широко применяют оба рассмотренных варианта в зависимости от специфики производства и пожеланий заказчика. В особо ответственных случаях находят применение оба способа одновременно с целью осуществления системного резервирования.

Эксплуатационная надежность — весьма важный параметр для крупных электрических машин, т. к. ущерб от вынужденного простоя агрегата в течение 2–3 месяцев соизмерим с его первоначальной стоимостью. Внедрение технической диагностики в практику энергетического производства существенно повышает качество эксплуатации. Результатом обнаружения развивающихся дефектов на ранних стадиях является сокращение числа и длительности вынужденных простоев, экономия средств [2].

Одной из актуальных проблем в данной области является создание современной системы мониторинга электрических параметров скользящего контакта.

Щеточно-контактный аппарат турбогенераторов представляет собой две неподвижных токоведущих траверсы с закрепленными на них щетками в щеткодержателях и два вращающихся кольца, электрически соединенных через ротор. Количество щеток на кольцо, в зависимости от мощности турбогенератора может изменяться от 10 до 60. Как правило, токи, протекающие от траверсы через щетки к кольцу, делятся неравномерно и непрерывно изменяются во времени.

В общем виде ток, протекающий через щетку, имеет постоянную, переменную и случайную составляющую. Такие же составляющие имеет и падение напряжения на переходе щетка — кольцо. Неравномерность и случайность тока через щетку можно рассматривать как наложение на постоянную составляющую импульсных, флуктуационных и гармонических процессов.

Оптимальной интегральной мерой измерения электрических параметров является действующее значение. Измерить величину действующего значения возможно двумя способами — аналоговым и цифровым. Каждый из них имеет

свои преимущества и недостатки и, поэтому в проектируемой системе измерений применены оба способа.

Аналоговый способ измерения действующего значения заключается в применении специализированных RMS-DC преобразователей фирмы Analog Devices (Root Mean Square-Direct Current — Среднеквадратичное действующее значение — Постоянный ток) [3]. RMS-DC преобразователи при постоянном входном сигнале с высокой точностью воспроизводят решение математическо-

го уравнения  $U_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [U(t)]^2 dt}$ , а при резко изменяющимся входном

сигнале — решение уравнения  $U_{RMS} = \sqrt{\text{Avg}[U(t)]^2}$ , где Avg (от average) —

среднее значение. Метод преобразования величины входного сигнала в среднеквадратичное действующее значение заключается в последовательном выделении абсолютного значения сигнала, логарифмировании, удвоении, вычитании логарифмированного сигнала обратной связи, антилогарифмирования и фильтрации, рисунок 1. Внешняя емкость  $C_{AV}$  и встроенный резистор  $R$  являются элементами интегратора выходного фильтра. Любой аналоговый интегратор имеет нижнюю рабочую частоту, определяемую уравнением  $\omega_C = 1/\tau_C = 1/(K_U + 1)RC_{AV}$ , где  $K_U$  — внутренний коэффициент усиления встроенного операционного усилителя. Таким образом, аналоговый RMS/DC преобразователь оказывается работоспособным, начиная с частоты большей, чем  $\omega_C$ , причем с ее ростом погрешности преобразования и время отклика будут уменьшаться. При установленном на входе RMS-DC преобразователя фильтре высоких частот (ФВЧ) с изменяемой частотой среза и связанной с изменением значения емкости  $C_{AV}$  получается селективный вольтметр действующего значения напряжения (СВ), с помощью которого возможно исследование спектрального состава токов щеток и падения на них напряжений (вывод  $U_{RMS}$ ), рис. 2.

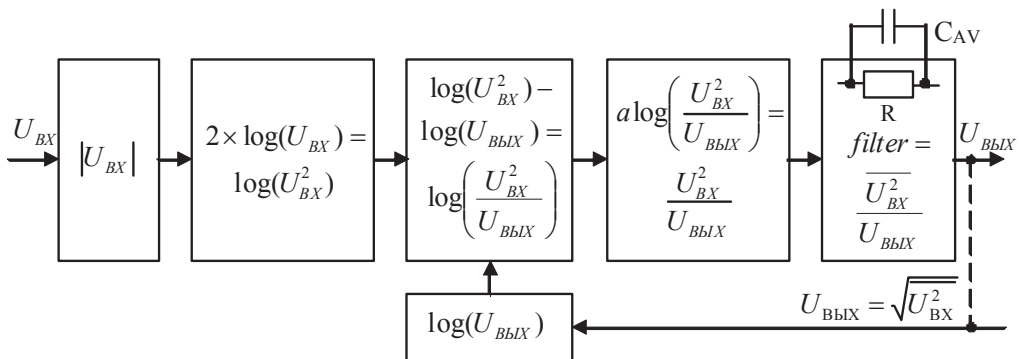
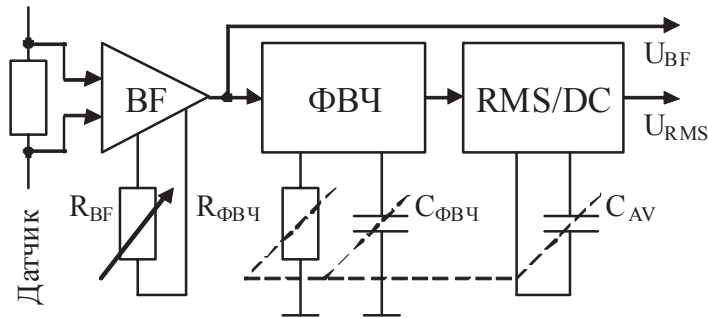


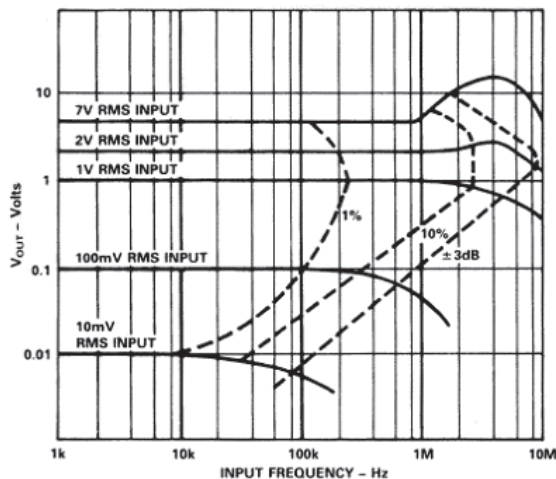
Рис. 1. Функциональная схема RMS/DC преобразователя



**Рис. 2.** Функциональная система селективного вольтметра действующего значения

Для первичного преобразования тока щетки может использоваться резистор с подавленной индуктивностью или преобразователь на основе датчика Холла, а для измерения напряжения — разница потенциалов между рабочей и изолированной щеткой. Между первичным датчиком и СВ установлен буферный усилитель (BF) с переключаемым коэффициентом усиления. Благодаря такому включению появляется возможность оптимизировать работу СВ в выбранной полосе частот. Выходной сигнал с BF может использоваться для непосредственного измерения исследуемого параметра.

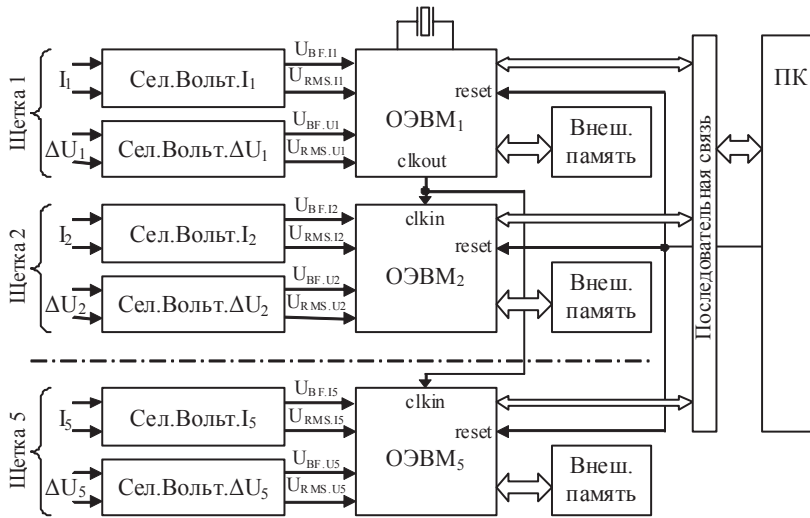
Расчетным и экспериментальным путем [2] было установлено, что спектр частот тока и падения напряжения щетки лежит в диапазоне 0–1÷2 МГц. Для таких измерений подходит быстродействующий RMS-DC преобразователь AD637J имеющий ширину полосы пропускания входного сигнала 8 МГц, и максимальную ошибку преобразования  $\pm 0,15\%$ , рис. 3.



**Рис. 3.** Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика RMS-DS преобразователя AD637J

Экспериментальные исследования непрерывного контроля токораспределения при последовательном опросе величин падений напряжений на токопод-

водящих шинах щеток [1] выявили существенные недостатки подобного метода. Поэтому для небольшого количества щеток, используемых в ЩКА, перспективным является метод параллельного измерения. Современная номенклатура выпускаемых ОЭВМ предусматривает возможность работы для некоторых из них от общего кварцевого резонатора, что гарантирует при объединенном сигнале сброса их постоянную параллельную работу. Блок-схема для параллельного метода измерений приведена на рис. 4.



**Рис. 4.** Блок-схема параллельной системы измерений электрических параметров ЩКА

К каждой ОЭВМ подсоединено по два СВ и модулю внешней памяти. Один из СВ измеряет ток щетки, а другой — падение напряжения между измеряемой и изолированной щеткой. Модуль внешней памяти необходим для сохранения результатов измерений перед их передачей по каналу последовательной связи в ПК. Каждая из ОЭВМ должна иметь минимум по четыре канала аналогового ввода, для соединения СВ со встроенным АЦП и достаточное количество проводников управления (на блок-схеме не показаны) для управления режимами работы СВ и буферного усилителя.

Так как RMS-DC преобразователь имеет на выходе интегрирующее звено, то ожидать от него резких изменений напряжения не приходится. В этом случае частота измерений значения напряжения выбранного канала может быть невысокой, а особое внимание следует уделить устранению гармонической помехи. Гармоническая помеха (наводка от промышленной сети частотой 50 Гц) может быть устранена методом вычисления среднеарифметического значения от измерений, произведенных в интервале времени 20 мс через одинаковые промежутки времени.

Вычисленные значения через выбранные интервалы времени последовательно записываются в модуль внешней памяти или напрямую передаваться в ПК. Для внешнего модуля памяти с последовательным режимом записи подхо-

дят не только микросхемы ОЗУ, но и перепрограммируемые ПЗУ типа Serial EEPROM. Объем внешнего модуля памяти при применении современных микросхем с последовательной записью может достигать 256 килобайт, что дает при 20 миллисекундных интервалах записи более одного часа автономной работы.

Цифровой метод измерений заключается в программном подсоединении к АЦП через встроенный аналоговый коммутатор выхода буферного усилителя  $U_{BF.I}$  (измерение тока) или  $U_{BF.U}$  (измерение падения напряжения) и непрерывном аналого-цифровом преобразовании входной величины с последующей обработкой полученных данных. Подавляющее большинство современных ОЭВМ имеют в своем составе АЦП, работающий по методу последовательных приближений. Время преобразования АЦП подобного типа лежит в диапазоне  $10 \div 100$  микросекунд, что существенно сужает полосу исследуемых частот, по сравнению с аналоговым методом измерения. Однако, цифровой метод измерения, по сравнению с аналоговым методом имеет свои преимущества:

1. При малом коэффициенте усиления буферного усилителя оказывается возможным определение амплитудных значений и длительности импульсов тока и напряжения.

2. При среднем коэффициенте усиления буферного усилителя оказывается возможным определение величин постоянной и переменной составляющей тока и напряжения.

3. При применении методов математического анализа оказывается возможным определение спектрального состава тока и напряжения.

Реализация всех перечисленных возможностей возлагается на прикладное программное обеспечение ПК во-первых из-за специфических требований к самому программному обеспечению, а во-вторых из-за малой вычислительной мощности и объемов памяти ОЭВМ.

Для достижения максимальной полосы пропускания исследуемого сигнала АЦП должен работать без пауз и с минимальным временем преобразования. Большинство встраиваемых в ОЭВМ АЦП обычно имеют десяти (редко двенадцати) разрядный выходной код. Если ограничить количество достоверных цифровых разрядов до восьми (например, в случае измерения амплитуды импульсов), то оказывается возможным повысить быстродействие АЦП приблизительно в два раза по сравнению с рекомендованным производителем. Так, рекомендованное время преобразования АЦП для ОЭВМ семейства ATmega и ATtiny фирмы ATMEL составляет около 60 микросекунд, что соответствует ширине полосы пропускания исследуемого сигнала в 17 кГц, а для ускоренного времени преобразования — 30 микросекунд и 34 кГц.

ОЭВМ за расчетное время работы АЦП должна передать данные предыдущего измерения по каналу последовательной связи. При применении пяти параллельно работающих ОЭВМ время, отводимое на передачу одного байта должно быть не более 6 микросекунд, что соответствует скорости передачи данных 1,6 Мбит/секунду. При отсутствии технической возможности передавать данные с такой скоростью будет происходить накопление результатов измерений в Serial EEPROM. Для объема внешнего модуля памяти в 256 килобайт время полного заполнения составит около 15 секунд.

Сочетая возможности аналогового и цифрового режима работы, запланировано провести следующие исследования:

1. Провести исследования динамических вольтамперных характеристик различных контактных пар.
2. Исследовать динамику токораспределения по параллельным щеткам узла токосъема.
3. Выявить факторы, влияющие на параметры токопередачи и тепловое состояние узла.
4. Построить регрессионные модели для различных параметрических зависимостей электрофрикционного взаимодействия с целью их сравнения с теоретическими.
5. Определить оптимальный состав измерительного комплекса для промышленного внедрения.

### Литература

1. Патент РФ. № 2178609 от 06.10.1999 «Способ контроля токораспределения по комплектам щеток узла токосъема электрической машины и устройство для его осуществления» / И. В. Плохов, И. Е. Савраев, А. В. Андрусич, 2000.
2. Плохов И.В. Комплексная диагностика и прогнозирование технического состояния узлов скользящего токосъема турбогенераторов. Диссертация доктора технических наук. СПб. : СПбГПУ. 2002.
3. RMS to DC Conversion Application Guide. 2<sup>nd</sup> Edition. Charles Kitchin, Lew Counts. Copyright © 1986 by Analog Devices, Inc. Printed in U.S.A. Интернет-ресурс: URL: [http://www.analog.com/.../76206322RMStoDC\\_Cover\\_Section-I\[1\].pdf](http://www.analog.com/.../76206322RMStoDC_Cover_Section-I[1].pdf).

*I. V. Plohov, A. V. Andrusich, A. V. Ilyin, A. N. Isakov, I. I. Bandurin, O. I. Kozyreva*

### DIAGNOSTIC SYSTEM FOR RESEARCH OF SLIDING ELECTRIC CONTACT

*The questions of creating diagnostic system for study sliding electric contacts of turbogenerators and small dc motors high power has been considered. Proposed two methods to measure electric current flowing thru sliding contact: analog and digital. Created functional scheme of measuring system with application of MC, PC and software. Formulated tasks for science researches.*

**Keywords:** sliding contact unit, electric current, brush, root mean square, selective voltmeter, dynamic of electric current allocation.

Плохов Игорь Владимирович — заведующий кафедрой «Электропривод и системы автоматизации» ФГБОУ ВПО ПсковГУ, д-р техн. наук, профессор, +7 (8112) 72-40-37, [ppi-esa@mail.ru](mailto:ppi-esa@mail.ru).

Андрусич Андрей Владимирович — техник управления научно-исследовательской деятельности ФГБОУ ВПО ПсковГУ, +7 (8112) 72-40-37, [ppi-esa@mail.ru](mailto:ppi-esa@mail.ru).

Ильин Александр Викторович — старший преподаватель кафедры «Электропривод и системы автоматизации» ФГБОУ ВПО ПсковГУ.

Исаков Андрей Николаевич — ассистент кафедры «Электропривод и системы автоматизации» ФГБОУ ВПО ПсковГУ.

Бандурин Иван Иванович — ассистент кафедры «Теоретические основы электротехники» ФГБОУ ВПО ПсковГУ, канд. техн. наук.

Козырева Оксана Игоревна — инженер кафедры «Электропривод и системы автоматизации» ФГБОУ ВПО ПсковГУ.