

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

### ДИАГНОСТИКА УЗЛА СКОЛЬЗЯЩЕГО ТОКОСЪЕМА ПО ВОЛЬТАМПЕРНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

*Рассматривается устройство и принцип действия диагностической системы, предназначенной для непрерывного контроля технического состояния узлов скользящего электрического контакта электрических генераторов и двигателей.*

**Ключевые слова:** узел токосъема, вольт-амперная характеристика, скользящий электрический контакт, диагностика, электрическая щетка, переходное напряжение.

Вольтамперная характеристика (ВАХ) многощеточного узла скользящего токосъема (УСТ) определяется суперпозицией частных ВАХ одиночных скользящих контактов. На форму ВАХ многощеточного узла оказывают влияние многие факторы [1–4]. Поэтому, обладая информацией об оптимальной зоне расположения ВАХ и степени воздействия различных факторов на ее отклонение от оптимума, определим характеристические группы причин, вызвавших данное отклонение [5].

Укажем факторы, вызывающие изменение вида ВАХ, а также, характер их влияния на величину переходного падения напряжения и ток УСТ (табл. 1). Влияние указанных факторов содержит детерминированную и случайную составляющие, что связано со стохастическим характером эволюционного развития проводящих кластеров в контактном слое.

Таблица 1

Влияние ряда факторов на вид ВАХ

	<b>Факторы, оказывающие влияние на ВАХ ЩКА</b> (относительно увеличения значения фактора)	<b>Характер влияния на</b>	
		$\Delta U_{ЩКА}$	$I_{ЩКА}$
1.	<b>Удельное нажатие</b>	↓↓	↑↑
2.	Степень загрязнения контактных поверхностей	↑↑	↓↓
3.	Уровень внешних вибраций	↑	↓
4.	Температура скользящего контакта	↓	↑
5.	Степень неравномерности токораспределения	↑	↓
6.	Показатель неравномерности нажатия	↑	↓
7.	Показатели профиля контактной поверхности	↑↑	↓↓
8.	Влажность воздуха	↑	↓
9.	Сопротивление заделки токоведущих канатиков	↑↑	↓↓
10.	Удельное сопротивление материалов	↑	↓
11.	Линейная скорость контактного перемещения	↑↑	↓↓

*Примечание:* характер влияния указанных факторов на ВАХ указан для области номинальных режимов работы УСТ и может иметь другую направленность в области малой нагрузки и в области критических режимов. Степень влияния факторов зависит от конструкции УСТ и от материалов контактных пар. Влияние многих факторов носит нелинейный характер. Двумя стрелками отмечена наиболее значимая степень влияния.

### Способ и устройство

В основу положен принцип непрерывного сравнения рабочей точки ВАХ действующего УСТ с рабочей точкой базовой или «квазиоптимальной» ВАХ (БВАХ). Отклонения рабочей точки не должны выходить за пределы нормы, которую эмпирически определяем в процессе настройки системы. Превышение отклонением допустимой величины говорит о неудовлетворительном качестве работы УСТ. Знак и величина отклонения позволяют локализовать комплекс причин возникновения опасного режима.

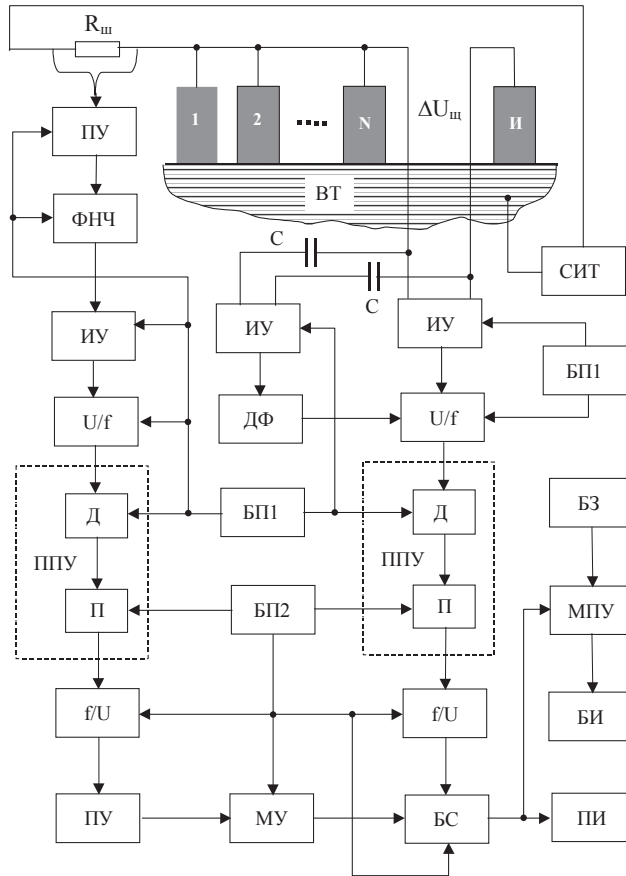
Базовую ВАХ определяем после проведения профилактических мероприятий на УСТ, его всестороннего обследования и констатации хорошего качества работы. БВАХ сохраняется в моделирующем блоке диагностической системы и служит в дальнейшем эталоном нормальной работы УСТ.

На рис. 1 изображена блок-схема СПД «Сигнал», которая реализует описанный способ.

Фрагмент УСТ содержит силовые щетки 1, 2, ..., N и измерительную щетку И, прижатые к контактной поверхности вращающегося токосъемника ВТ. Между ВТ и щетками 1...N через шунт  $R_{ш}$  подключен силовой источник тока СИТ (устройство электропитания электрической машины). К щеткам подключен вход измерительного усилителя ИУ, выход которого связан с блоком сравнения БС через преобразователь «напряжение-частота»  $U/f$ , приемопередающее устройство ППУ и преобразователь «частота-напряжение»  $f/U$ . Шунт подключен через предварительный усилитель ПУ и фильтр низкой частоты ФНЧ на вход ИУ. Усилитель через аналогичные блоки  $U/f$ , ППУ и  $f/U$  связан с ПУ, выход которого подсоединен к моделирующему устройству МУ. Выход МУ подключен к блоку сравнения. Каждое ППУ содержит датчик и приемник, соединенные линией связи. Выход БС связан с промежуточным индикатором ПИ и микропроцессорным устройством МПУ, которое соединено с блоком задания БЗ и блоком индикации БИ. Кроме того, щеткам подключен через разделительные конденсаторы С измерительный усилитель ИУ, который через детектор с активным фильтром ДФ подсоединен к блоку преобразования напряжения в частоту. Для обеспечения гальванической развязки, блоки системы, расположенные до линий связи ППУ, подключены к блоку питания БП1, а расположенные после линий связи — к блоку питания БП2.

В МУ сохраняется базовая ВАХ. Сигнал, пропорциональный силовому току ЩКА, поступает от шунта через ряд линейных преобразователей на вход МУ, которое формирует на выходе напряжение рабочей точки БВАХ. В блоке сравнения БС определяется невязка модельного и измеренного напряжений рабочей точки ВАХ. МПУ предназначено для накопления и статистической обра-

ботки информации, поступающей от БС, определения показателей качества, выделения комплекса причин неудовлетворительной работы.



**Рис. 1.** Блок-схема системы постоянной диагностики

В экспериментальном экземпляре диагностической системы прием линейный вид БВАХ, т. к. в рабочей области нагрузок погрешность линейной аппроксимации не превышает 10%. При малых нагрузках сравнительный анализ ВАХ не производим.

Моделирующее устройство построим в соответствии с математической моделью рабочей области ВАХ:

$$\Delta U_{\text{щка}}^* = b_0 + b_1 \times I'_{\text{щка}}, \quad (1)$$

где  $\Delta U_{\text{щка}}^*$  — имитационное переходное падение напряжения на выходе МУ, смоделированное с учетом сквозного коэффициента передачи;  $I'_{\text{щка}} = k_{\text{П}} I_{\text{щка}}$  — величина, пропорциональная общему току ЩКА ( $I_{\text{щка}}$  — общий ток УСТ;  $k_{\text{П}}$  — сквозной коэффициент передачи от шунта  $R_{\text{ш}}$  до МУ);  $b_0, b_1$  — коэффициенты модели, определяемые в процессе настройки системы.

### Трактовка показаний диагностической системы

Проведены экспериментальные исследования, направленные на определение качественного влияния основных внешних воздействий и параметров на невязку базовой и текущей ВАХ в области рабочих режимов. При этом учтены факторы, наиболее значимые по воздействию на ВАХ. К ним относятся: 1) показатель качества токораспределения  $Q$ , (относительная величина суммы модулей отклонений токов щеток от среднего); 2) средняя величина контактного давления (рис. 2).

Экспериментальный стенд содержит УСТ, изготовленный в виде уменьшенной и упрощенной копии ЩКА турбогенератора (диаметр стальных колец с винтовой нарезкой  $\approx 400$  мм, на каждом кольце по 6 щеток типа ЭГ2АФ и 611ОМ (рис. 3).

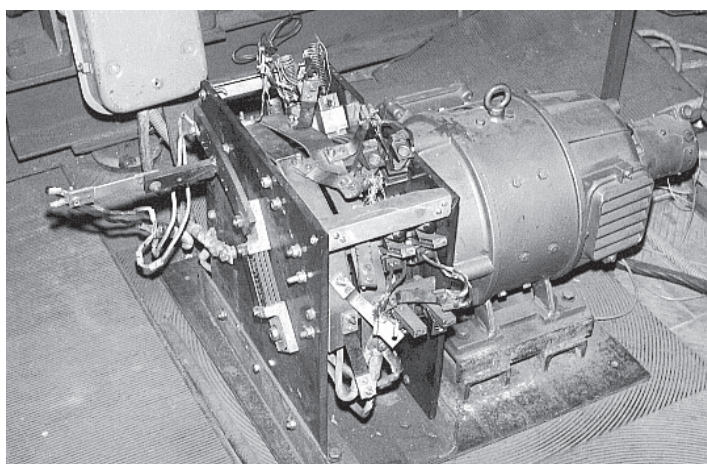


Рис. 3. УСТ экспериментального стенда

Щетки прижаты к контактным поверхностям колец посредством штатных щеткодержателей с равными усилиями  $F$ . В силовой цепи каждой щетки установлен амперметр  $A$ . Между контактными кольцами установлена проводящая безиндуктивная перемычка. Одна из щеток каждого кольца изолирована от остальных и является измерительной. Через УСТ пропускали силовой ток  $I_{\text{щкка}}$  от генератора постоянного тока  $G$ .

Результаты экспериментов (табл. 2 и 3) обработаны с помощью пакета MathCad 8. В качестве показателя  $Q$  принята средняя величина модулей отклонений токов щеток  $I_i$  от математического ожидания генеральной совокупности измерений:

$$Q = \frac{100}{N \times \bar{I}} \times \sum_{i=1}^N |I_i - \bar{I}|, \% \quad (2)$$

Величина среднего контактного давления в опытах составила 18,6 кПа.

Таблица 2

Зависимости формы ВАХ от величины среднего нажатия на щетки

Общие данные			Положительные щетки						Отрицательные щетки					
I <sub>щк</sub>	$\Delta U_+$	$\Delta U_-$	I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>	I <sub>3</sub>	I <sub>4</sub>	I <sub>5</sub>	I <sub>6</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>	I <sub>3</sub>	I <sub>4</sub>	I <sub>5</sub>	I <sub>6</sub>
A	B	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
P <sub>1</sub> , КПа			50,5	52	СИГНАЛЬНАЯ ЩЕТКА	44,5	47,5	50,5	53,4	56	52	СИГНАЛЬНАЯ ЩЕТКА	50,5	52
82,5	0,2	0,4	20	15		17,5	17,5	15	25	15	23,5		18,5	7,5
198	0,5	0,85	47,5	32,5		38,5	45	35	50	37,5	55		36	15
297	0,6	1	70	47,5		65	72,5	47,5	70	70	85		55	20
P <sub>2</sub> , КПа			34	32,5		34	32,5	30	41	36	37		31	31
82,5	0,2	1	25	15		30	25	12,5	32,5	27,5	17,5		27,5	5
198	0,7	1,2	47,5	30		50	47,5	20	55	55	35		42,5	7,5
297	0,8	1,5	72,5	47,5		77,5	70	37,5	77,5	90	60		60	10
P <sub>3</sub> , КПа			24	25		24	25	22	27	24	22		25	25
82,5	0,7	1,1	25	17,5		20	17,5	2,5	32,5	15	17,5		12,5	5
198	0,8	1,8	62,5	42,5		52,5	42,5	7,5	72,5	32,5	50		32,5	22,5
297	1,1	2	90	60		75	65	15	110	40	75		40	20
P <sub>4</sub> , КПа			19	21		19	21	18	19	16	15		18	18
82,5	1	1,4	30	7,5		22,5	12,5	5	45	5	17,5		7,5	7,5
198	2	2	80	20		55	35	7,5	85	15	40		20	25
297	2,3	2,5	105	30		100	40	5	135	25	60		35	40
P <sub>5</sub> , КПа			13	15		13	15	13	12	9	7,5		10	10
82,5	1,9	1,4	12,5	17,5		10	25	7,5	30	15	15		11	11
198	2,4	1,9	52,5	20		35	50	12,5	60	35	30		17,5	20
297	3	2,5	90	25		80	60	5	105	50	55		40	25

Таблица 3

Зависимость формы ВАХ от показателя неравномерности токораспределения

Среднее нажатие F <sub>ср</sub> = 18,35 кПа									
Q = 7,6%		Q = 13,5%		Q = 18,6%		Q = 22%			
$\Delta U_{щ+}$	$\Delta U_{щ-}$	$\Delta U_{щ+}$	$\Delta U_{щ-}$	$\Delta U_{щ+}$	$\Delta U_{щ-}$	$\Delta U_{щ+}$	$\Delta U_{щ-}$	I <sub>щк</sub>	
B	B	B	B	B	B	B	B	A	
0,96	0,58	1,02	0,68	1,2	0,9	1,4	1,0	33	
1,3	1,0	1,46	1,22	1,52	1,24	1,6	1,48	66	
1,52	1,32	1,64	1,5	1,8	1,64	1,88	1,8	99	
1,69	1,62	1,82	1,8	2,0	1,88	2,09	2,0	132	
1,84	1,84	1,98	1,94	2,14	2,01	2,3	2,14	165	
1,94	2,0	2,1	2,1	2,28	2,2	2,42	2,32	198	
2,1	2,12	2,23	2,38	2,46	2,32	2,59	2,4	231	
2,21	2,22	2,4	2,38	2,6	2,4	2,7	2,5	264	
2,32	2,29	2,58	2,4	2,7	2,42	2,79	2,5	297	
2,34	2,3	2,54	2,42	2,71	2,43	2,8	2,52	330	
2,35	2,3	2,54	2,43	2,71	2,44	2,8	2,53	363	

Среднее нажатие $F_{cp} = 18,35$ кПа								
Q = 21%		Q = 30%		Q = 37%		Q = 40%		
$\Delta U_{щ+}$	$\Delta U_{щ-}$	$\Delta U_{щ+}$	$\Delta U_{щ-}$	$\Delta U_{щ+}$	$\Delta U_{щ-}$	$\Delta U_{щ+}$	$\Delta U_{щ-}$	$I_{щка}$
В	В	В	В	В	В	В	В	А
1,1	0,5	1,12	1,0	1,14	1,1	1,18	1,14	33
1,44	0,9	1,64	1,44	1,68	1,54	1,7	1,6	66
1,6	1,1	1,78	1,84	1,8	1,96	1,84	2,0	99
1,92	1,4	1,9	2,24	1,94	1,94	2,0	2,04	132
2,1	1,56	2,21	2,2	2,26	2,25	2,3	2,43	165
2,21	1,76	2,32	2,3	2,35	2,33	2,4	2,4	198
2,24	1,92	2,39	2,4	2,4	2,42	2,47	2,44	231
2,4	2,08	2,44	2,5	2,48	2,5	2,53	2,52	264
2,52	2,2	2,6	2,54	2,62	2,58	2,68	2,58	297
2,66	2,36	2,74	2,58	2,76	2,61	2,78	2,62	330
2,67	2,36	2,75	2,59	2,78	2,61	2,81	2,64	363

Зависимости незначительно отличаются друг от друга и представляют собой семейства статических ВАХ при различных значениях показателя Q. Ухудшение качества токораспределения практически линейно повышает значения  $\Delta U_{щка}$  в области рабочих токов. У разных УСТ количественные показатели представленных зависимостей отличаются, однако качественные характеристики, определяющие тенденции смещения и искажения ВАХ, остаются неизменными.

### Литература

1. Хольм Р. Электрические контакты. М. : Иностранная литература, 1961.
2. Кончиц В. В., Мешков В. В., Мышкин В. В. Триботехника электрических контактов. Минск : Наука и техника, 1986.
3. Механика скользящего контакта / Нэллин В. И., Богатырев Н. Я., Ложкин Л. В. и др. М. : Транспорт, 1966.
4. Лившиц П. С. Справочник по щеткам электрических машин. М. : Энергоатомиздат, 1983.
5. Плохов И. В. Комплексная диагностика и прогнозирование технического состояния узлов скользящего токосъема турбогенераторов. Диссертация доктора технических наук. СПб. : СПбГПУ, 2002.

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

### CONTINUOUS DIAGNOSTICS OF KNOT OF ELECTRIC SLIDING CONTACTS BY MEANS OF VOLT-AMPERES OF DEPENDENCES

*The device and principle of action of the diagnostic system intended for continuous control of a technical fortune of knots of sliding electric contact of electric generators and engines is considered.*

**Keywords:** knots of sliding electric contact, volt-amperes the dependences, sliding electric contact, diagnostics, an electric brush, transitional tension.

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.

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

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.

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

УДК 621.313.322-81

*А. М. Марков, Ю. А. Родионов*

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ СИСТЕМ ТОКОСЪЕМА КРУПНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

*Дан краткий анализ литературы, посвященной вопросу моделирования систем токосъема крупных электрических машин, определен вид математической модели системы токосъема — модель мультипликативного вида, выбраны основные параметры системы токосъема и на основе матрицы планирования эксперимента и опроса экспертов получена математическая модель, доказана ее статистическая значимость.*

**Ключевые слова:** электрическая машина, система токосъема, искрение, токораспределение, экспертная оценка, математическое моделирование, статистическая оценка.

Известно, что система токосъема электрической машины является достаточно часто повреждаемым узлом. При этом авария в системе токосъема таких крупных машин как турбогенераторы ГРЭС, АЭС, ТЭЦ, гидрогенераторы ГЭС или двигатели и генераторы прокатных станов металлургических производств приводит к неплановой остановке машины, что влечет значительные финансовые потери.

В настоящее время состояние систем токосъема оценивается с помощью нескольких важнейших параметров, таких, например, как биение коллектора (контактного кольца), уровень искрения под щетками, равномерность токораспределения по параллельным щеткам. Научно-технические исследования систем токосъема ведутся обычно на специальных исследовательских стендах с применением аппарата математического моделирования.

Анализ литературы, посвященной данному вопросу, показывает, что для математического описания процессов, протекающих в системе токосъема, предлагаются, как правило, однофакторные, реже двухфакторные математические модели.

Так, например, в (Watson, 1961) для описания фрикционных и вольт-амперных характеристик предложены зависимости, соответственно, коэффици-