

## Способ повышения ресурса и стабильности работы щеточно-контактного аппарата турбогенератора

ИЗОТОВ А.И., БЕСПАЛОВ В.Я., ФОМИНЫХ А.А., МАМАЕВ Г.А.

*Предлагается способ повышения ресурса работы щеточно-контактного аппарата турбогенератора за счет использования смазывающих нетокопроводящих щеток, выполненных на основе дисульфида молибдена. Установка смазывающих щеток позволяет при оптимальных условиях их эксплуатации значительно снизить износ штатных электрических щеток, уменьшить неравномерность токораспределения многощеточной системы, а также тепловую напряженность щеточно-контактного аппарата как следствие снижения коэффициента трения щёток. Оценена эффективность применения смазывающих щеток по результатам испытаний щеточно-контактного аппарата турбогенератора ТВВ 320-2У3 при использовании электрических щеток марок 6110М<sup>+М</sup> и ЭГ2А<sup>+М</sup>. Рассмотрены варианты конструкций щеткодержателей при установке смазывающих щеток. Установлено, что смазка формирует более стабильную дугу контактирования, обеспечивающую постоянство сопротивления переходного слоя «щетка—контактное кольцо».*

Ключевые слова: турбогенератор, смазывающие щетки, электрические щетки, токораспределение, износ, контактные кольца

В турбогенераторах широко применяются многощёточные узлы скользящего токосъёма. Как показывает опыт эксплуатации, работа таких узлов характеризуется неравномерным распределением тока по параллельно работающим щёткам, что приводит к перегрузке отдельных щёток, их нагреву и возможному разрушению. Более четверти от общего числа отказов турбогенераторов приходится на щёточно-контактный узел [1].

Кафедрой «Электрические машины и аппараты» Вятского государственного университета совместно с АО «ЭФ-КОНТЭЛ» (г. Москва) разработан способ уменьшения неравномерности распределения тока по параллельно работающим щёткам. Уменьшение их износа происходит за счёт установки на контактные кольца смазывающих щёток, выполненных на основе дисульфида молибдена [2, 3].

**Методика проведения испытаний.** Задача исследований заключалась в оценке эффективности применения на токосъемных кольцах турбогенератора смазывающих щеток, предназначенных для уменьшения износа электрических щеток и контактных колец, а также для снижения неравномерности распределения тока по параллельно работающим щеткам.

Эксперимент проводился на турбогенераторе типа ТВВ-320-2У3, на контактных кольцах щеточно-контактного аппарата которого используются электрощетки типа ЭГ2А<sup>+М</sup> (кольцо отрицательной полярности) и 6110М<sup>+М</sup> (кольцо положительной полярности). Щеточный аппарат генератора ТВВ-320-2У3 оснащен двумя четырехдорожечными

токосъемными кольцами, каждая дорожка оборудована 14 щеткодержателями типа ДБУ (рис. 1).

Использование электрощеток с индексом +М [4] обеспечивает возможность работы контактного узла с половинным рабочим комплектом (28 штук на кольцо) за счет оригинальной конструкции токоподвода к угольному телу щетки с использованием латунной скобы. При этом число рабочих электрических щеток размером 20×32×64 мм на дорожке составляет 7 штук вместо 14 ординарной конструкции. Это позволило при проведении исследования использовать 4 щеткодержателя для установки смазывающих щеток.

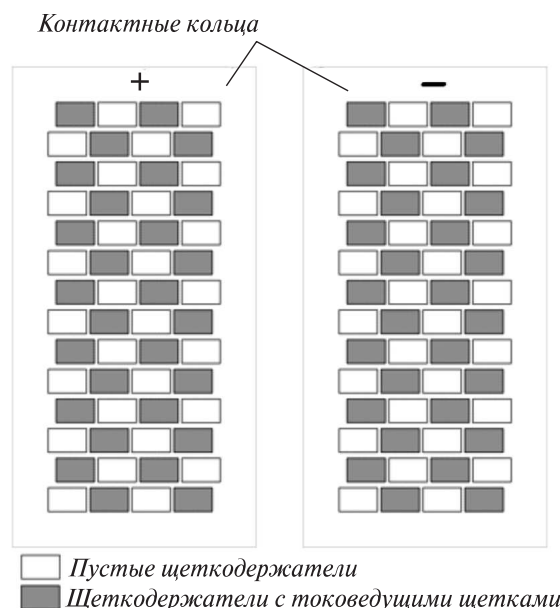


Рис. 1. Схема расположения электрических щеток по дорожкам

Для оценки возможности использования смазывающих щеток в щеточно-контактном аппарате испытуемого генератора были рассчитаны микротемпературы в зоне контакта «электрощетка – контактное кольцо» с помощью программы моделирования подвижного электрического контакта «CONTACT» [5]. Для использования данного программного комплекса были проведены натурные испытания по определению средней температуры контактного узла и на основании полученных данных сделана оценка микротемпературы в зоне непосредственного контакта «щетка–кольцо». Результаты моделирования показали, что температура в зоне микроконтакта не превышает 300 °С, что делает возможным использование смазывающих щеток, выполненных на основе дисульфида молибдена (при температуре, превышающей 400 °С, смазка теряет свои свойства и переходит в оксид – абразив).

В дальнейшем были разработаны два варианта конструкции щеткодержателя под установку смазывающих щеток, обеспечивающих оптимальную толщину смазки в зоне контакта. По первому варианту в штатный щеткодержатель 1 (рис. 2) устанавливается дополнительный 2, выполненный из изоляционного материала, на торцевой поверхности которого имеются упоры для защиты от провисания. В обойму дополнительного щеткодержателя устанавливается смазывающая щетка, выполненная составной в виде несущей 4 и контактной 3 частей; две спиральные пружины 5 обеспечивают регулирование усилия в широком диапазоне (50–300 г). Крышка 6 создает нажатие на пружины 5 и, в свою очередь, взаимодействует со штатной пружиной щеткодержателя ДБУ. Основным достоинством

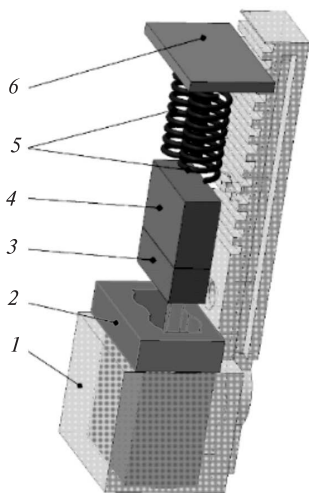


Рис. 2. Конструкция дополнительного щеткодержателя под установку смазывающей щетки на турбогенератор мощностью 320 МВт: 1 – штатный щеткодержатель; 2 – дополнительный щеткодержатель; 3 – контактная часть смазывающей щетки; 4 – несущая часть смазывающей щетки; 5 – спиральные пружины; 6 – крышка

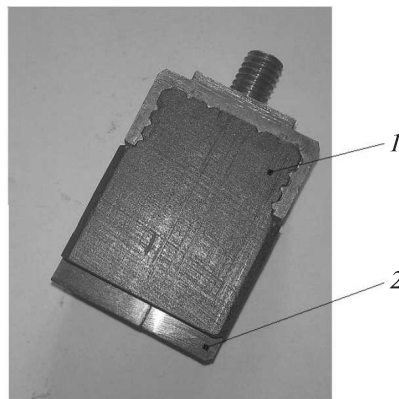


Рис. 3. Вариант конструкции установки смазывающих щеток: 1 – смазывающая щетка; 2 – тело штатной электрощетки

данной конструкции является широкий диапазон регулирования силы нажатия на смазывающую щетку, а также изоляция дополнительной щетки от токопроводящего щеткодержателя. К недостаткам можно отнести сложность и трудоемкость изготовления.

По второму варианту (рис. 3) в штатной щетке фрезеруется канал под установку контактной части смазывающей щетки, для стандартного щеткодержателя подбираются пружины, обеспечивающие оптимальную подачу смазки в зону контакта. Данная конструкция характеризуется простотой изготовления и поэтому в дальнейшем использовалась для проведения испытаний.

Генератор, оснащенный комплектом щеток (по 28 на положительном и отрицательном кольцах), работал в течение 4 ч с 100%-й нагрузкой (ток возбуждения  $I_B = 2200$  А). Затем на две дорожки отрицательного кольца были установлены смазывающие щетки (рис. 4) (на две токовые – одна смазы-

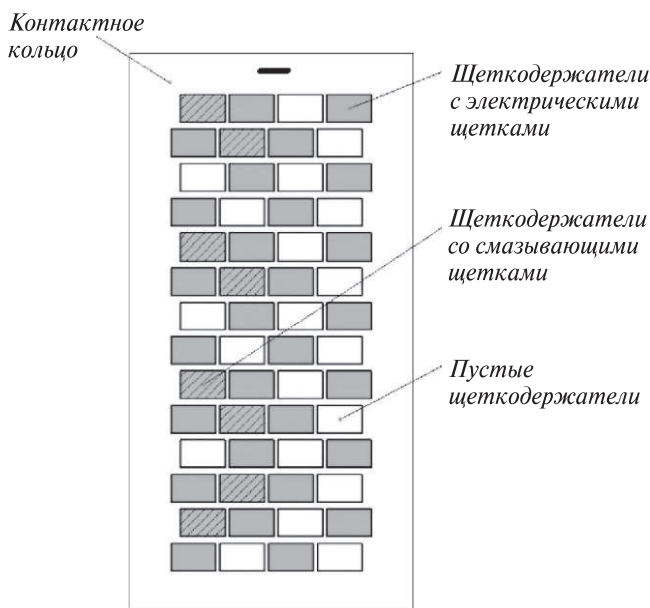


Рис. 4. Схема расположения смазывающих щеток

вающая) и в течение 5 ч проведены испытания по оценке влияния смазывающих щеток на стабилизацию токораспределения параллельно работающих щеток при 100%-й нагрузке.

Поскольку электрощетки на контактных кольцах располагались в шахматном порядке, смазка незначительно наносилась и на соседние дорожки.

**Результаты испытаний.** Анализ распределения тока ротора по электрощеткам отрицательного кольца при отсутствии смазывающих щеток показал, что токовая нагрузка имеет значительную неравномерность (табл. 1).

Результаты испытаний щеточно-контактного аппарата генератора после установки смазывающих щеток спустя 2 и 5 ч даны, соответственно, в табл. 2 и 3: распределение тока ротора, мгновенные значения токов  $I_{hi}$  под щетками 1-й и 2-й дорожек отрицательного кольца, суммарный ток обмотки возбуждения  $\sum I_B$ , средний ток щеток  $I_{AV}$  (рассчитан в соответствии с рекомендациями руководства по эксплуатации щеточно-контактного аппарата). Кроме того, приведены абсолютные отклонения тока всех щеток от среднего значения, рассчитанного по формуле

$$\delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |I_{hi} - I_{AV}|, \quad (1)$$

где  $n$  – число щеток;

$$I_{AV} = \frac{\sum I_B}{n}. \quad (2)$$

Во время испытаний щеточного аппарата до установки смазывающих щеток максимальная токовая нагрузка под отдельными щетками достигала 120 – 140 А (щетками № 2, 6, 9), основная часть щеток работала с токовой нагрузкой 83 А. Три электрощетки нагружены не более чем на 50 А (№ 18, 21, 25, табл. 1), среднее абсолютное отклонение в случае отсутствия смазывающих щеток 29,5 А.

Установка смазывающих щеток позволила уменьшить неравномерность токораспределения. Спустя 2 ч работы щеточно-контактного аппарата (табл. 2) максимальная токовая нагрузка составила 130 А (щетка № 9), основная часть щеток работала с токовой нагрузкой 75 – 80 А, среднее абсолютное отклонение 22 А.

По мере увеличения длительности работы смазывающих щеток (до 5 ч) наблюдалась дальнейшая стабилизация токораспределения (табл. 3). По окончании эксперимента максимальная токовая нагрузка составляла 110 – 120 А (№ 6, 9, 22, 26), основная токовая нагрузка 70 – 75 А, среднее абсолютное отклонение 18 А.

Таблица 1

№ дорожки	$\sum I_B$ , А	№ щетки	$I_{hi}$ , А	$I_{AV}$ , А	$\delta$ , А
1,2	2044	1	78	73	29,5
		2	140		
		5	106		
		6	120		
		9	140		
		10	90		
		13	87		
		17	60		
		18	41		
		21	40		
		22	80		
		25	50		
		26	80		
28	25				

Таблица 2

№ дорожки	$\sum I_B$ , А	№ щетки	$I_{hi}$ , А	$I_{AV}$ , А	$\delta$ , А
1,2	2044	1	77	73	22,0
		2	111		
		5	90		
		6	111		
		9	130		
		10	48		
		13	96		
		17	50		
		18	40		
		21	81		
		22	80		
		25	73		
		26	100		
28	50				

Из анализа приведенных данных можно сделать заключение, что установка смазывающих щеток, выполненных на основе дисульфида молибдена, приводит к более равномерному распределению тока между параллельно работающими щетками. Это объясняется тем, что смазка формирует более стабильную дугу контактирования, обеспечивающую постоянство сопротивления переходного слоя

«щетка—контактное кольцо» 5 (рис. 5). Оно значительно больше (в 3–4 раза) суммарного сопротивления, которое включает в себя переходное сопротивление между клеммой и поводком щетки 1, сопротивление контакта между клеммой щетки и траверсой щеткодержателя 2, сопротивление между поводком и телом щетки 3, сопротивление углеродного материала (тела щетки) 4. Известно, что контактная дуга при работе претерпевает значительные изменения, уменьшаясь в некоторые моменты времени до 1/1000 от теоретической дуги контактирования [6, 7].

Таблица 3

№ дорожки	$\sum I_{в}, А$	№ щетки	$I_{hi}, А$	$I_{AV}, А$	$\delta, А$
1,2	2200	1	86	78,6	17,8
		2	106		
		5	82		
1,2	2200	6	100	78,6	17,8
		9	120		
		10	60		
		13	90		
		17	69		
		18	50		
		21	85		
		22	111		
		25	75		
		26	100		
		28	63		

Были получены результаты тепловизионной съемки поверхности электрических щеток при от-

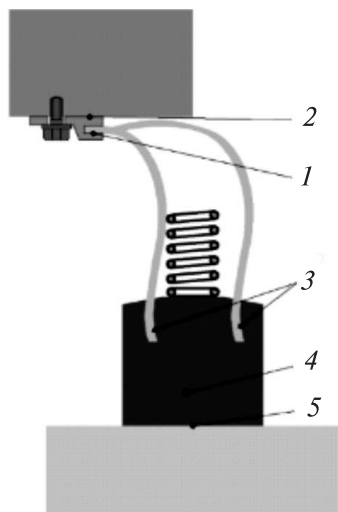


Рис. 5. Переходное сопротивление электрическая щетка—контактное кольцо

сутствии смазывающих и суммарном токе ротора 2044 А. Температура наиболее нагретой щетки составила 140 °С, средняя температура всех щеток дорожек № 1, 2 — 92 °С. Установка смазывающих щеток позволила спустя 2 ч наработки снизить среднюю температуру электрических щеток до 89,1 °С, максимальную температуру до 110 °С при возросшем токе ротора, равном 2150 А. При более длительной работе смазывающих щеток (4 ч) и более высоком значении суммарного тока ротора (2200 А) также наблюдалась положительная динамика уменьшения температуры: средняя температура всех щеток составила 88,8 °С, максимальная температура наиболее нагретой щетки — 110 °С. Таким образом, при установке смазывающих щеток, выполненных на основе дисульфида молибдена, средняя температура щеточно-контактного аппарата снизилась за счет уменьшения коэффициента трения щеток.

Аналогичные данные по снижению температуры узла токосъема были получены на коллекторных двигателях переменного тока мощностью 2,4 кВт с материалом меди коллектора марки ПКМС (медь с добавкой серебра). Установка смазывающих щеток позволила снизить температуру коллектора в режиме холостого хода на 28 °С, при работе под нагрузкой на 15 °С.

**Выводы.** Установка смазывающих щеток на основе дисульфида молибдена в щеточно-контактный узел турбогенератора типа ТВВ-320-2У3 позволяет:

уменьшить неравномерность распределения тока по параллельно работающим щеткам за счет стабилизации дуги контактирования токоведущих щеток;

снизить температуру щеточно-контактного аппарата за счет уменьшения коэффициента трения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самородов Ю.Н. Причины и следствия аварий турбогенераторов. — Энергия единой сети, 2014, № 2 (13), с. 70–80.
2. Izotov I.A. et. al. The influence of mechanical factors in alternating-current machines on level of radio noise. — Russian Electrical Engineering, 2013, 84 (8), pp. 463–465.
3. Патент РФ № 112513. Узел скользящего токосъема (варианты)/ И.А. Изотов. — БИ, № 1, 2012.
4. Патент (РФ) № 2007132129/22. Электрощетка/ООО «Фирма «КОНТЭЛ». — БИ, 2007, № 33.
5. Плохов И.В. Комплексная диагностика и прогнозирование технического состояния узлов скользящего токосъема турбогенераторов: Автореф. дис.... докт. техн. наук. — С.-Петербургский государственный технический университет, 2002, 36 с.
6. Лившиц П.С. Скользящий контакт электрических машин. — М.: Энергия, 1974, 321 с.
7. Деева В.С., Слободян М.С., Слободян С.М. «Живучесть» щеточного контакта электрических машин. — Электричество, 2013, № 4, с. 45–49.

*Авторы:* **Изотов Анатолий Иванович** окончил Омский институт инженеров железнодорожного транспорта в 1962 г. В 1974 г. защитил кандидатскую диссертацию «Определение оптимальных параметров дополнительных полюсов машин, работающих при резкопеременных циклических нагрузках». Заведующий кафедрой «Электрические машины и аппараты» Вятского государственного университета (ВятГУ).

**Беспалов Виктор Яковлевич** окончил электротехнический факультет Московского энергетического института (МЭИ) в 1960 г. Докторскую диссертацию «Асинхронные машины для динамических режи-

мов работы» защитил в МЭИ в 1992 г. Профессор кафедры электромеханики МЭИ.

**Фоминых Антон Анатольевич** окончил ВятГУ в 2009 г. Ассистент кафедры «Электрические машины и аппараты» ВятГУ.

**Мамаев Геннадий Александрович** окончил Вятский политехнический институт в 1979 г. Кандидатскую диссертацию «Основы проектирования и организации промышленного производства медицинских озонаторных установок» защитил в 2004 г. Доцент кафедры «Электрические машины и аппараты» ВятГУ.

*Elektrichestvo (Electricity), 2016, No. 8, pp. 63–67.*

## A Method for Increasing the Service Life and Achieving More Stable Operation of the Turbine Generator Brush-and-Contact Gear

**IZOTOV Anatolii Ivanovich** (Vyatka State University (VyatSU), Kirov, Russia) – Head of the Department, Cand. Sci. (Eng.)

**BESPALOV Viktor Yakovlevich** (Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia) – Professor, Dr. Sci (Eng.)

**FOMINYKH Anton Anatol'yevich** (VyatSU, Kirov, Russia) – Assistant in the Department

**MAMAYEV Gennadii Aleksandrovich** (VyatSU, Kirov, Russia) – Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

*A method for increasing the turbine generator brush-and-contact gear service life is proposed. The suggested method involves the use of lubricating nonconducting brushes made on the basis of molybdenum disulfide. With the optimally arranged operation of the lubricating brushes, it becomes possible to decrease the wear of the standard electric brushes by as much as a factor of 2, to achieve more uniform distribution of current in a multibrush system by stabilizing the arcs and contacts, and to achieve less intense thermal load of the brush-and-contact gear owing to a lower brush friction coefficient. The lubricating brush application efficiency is evaluated based on the results obtained from testing the TVV-320-2U3 turbine generator brush-and-contact gear fitted with 6110M+M and EG2A+M electric brushes. Possible design versions of brush holders for lubricating brushes are considered. It is found that the lubrication produces a more stable contacting arc, which results in securing constant resistance of the brush–slip ring transition layer.*

*Key words:* lubricating brushes, electric brushes, current distribution, wear, slip rings, rubbing varnish film

### REFERENCES

1. **Samorodov Yu.N.** *Energiya edinoi seti – in Russ. (Unified Energy Network)*, 2004, No. 2(13), pp. 70–80.
2. **Izotov I.A. et. al.** The influence of mechanical factors in alternating-current machines on level of radio noise. – *Russian Electrical Engineering*, 2013, 84 (8), pp. 463–465.
3. **Patent RF No. 112513.** *Uzel skol'zyashchego tokos'yema (variant)* (Node of sliding collector ring) (versions)/I.A. Izotov. *Bulletin of inventions*, 2012, No. 1.
4. **Patent RF No. 2007132129/22.** *Elektroshchetka* (Electrowiper)/Public Company «Firm «KONTEL». *Bulletin of inventions*, 2007, No. 33.

5. **Plokhov I.V.** *Kompleksnaya diagnostika i prognozirovaniye tekhnicheskogo sostoyaniya uzlov skol'zyashchego tokos'yema turbogeneratorov: Avtoref. dis.... Dokt. tekhn. nauk* (Complex diagnostics and forecasting technical condition of the silding collector ring turbogenerators units. Abstract of the thesis.... Dr. Sci. (Eng.)). St. Petersburg State Technical University, 2002, 36 p.

6. **Livshits P.S.** *Skol'zyashchii kontakt elektricheskikh mashin* (Sliding contact of electric machines). Moscow, Publ. «Energiya», 1974, 321 p.

7. **Deyeva V.S., Slobodyan M.S., Slobodyan S.M.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2013, No. 4, pp. 45–49.

