

determinants reduces the amount of calculations for formation free-cancelled expressions. Accounting topological features of circuits leads to a twofold reduction in the number of the HOSC in sensitivity expressions.

Key words: network function, relative sensitivity, the Jacobi identity, higher order summative cofactors, circuit determinant

REFERENCES

1. **Bode G.** *Teoriya tsepei i proyektirovaniya usilitelei s obratnoi svyaz'yu/Per. s angl.* (The theory and design of circuits with feedback amplifiers / Transl. from English). Moscow, State Publ. of Foreign Literature, 1948, 641 p.
2. **Sigorskii V.P., Petrenko A.I.** *Algoritmy analiza elektronnykh skhem* (Algorithms analysis of electronic circuits). Moscow, Publ. «Sovetskoye radio», 1976, 608 p.
3. **Kalnibolotskii Yu. M., Kazandzhan N.N., Nester V.V.** *Raschet chuvstvitel'nosti elektronnykh skhem* (Calculation of sensitivity of the electronic circuits). Kiev, Publ. «Tekhnika», 1982, 176 p.
4. **Hoang S.** The direct topological method in network sensitivity analysis. — *Rozprawy elektrotechniczne*, 1975, т. 21, з. 4, pp. 767–784.
5. **Bondarenko A.V., Kurganov S.A., Filaretov V.V.** *Mezhdunarodnyi sbornik nauchnykh trudov «Sintez, analiz i diagnostika elektronnykh tsepei» — in Russ.* (Intern. collection of scientific papers «Synthesis, analysis and diagnostics of electronic circuits»). Ulyanovsk State Technical University, 2013, iss. 11, pp. 191–212.
6. **Vlakh I., Singkhal K.** *Mashinnye metody analiza i proyektirovaniya elektronnykh skhem/Per. s angl.* (Machine methods of analysis and design of electronic circuits/Transl. from English). Moscow, Publ. «Radio i svyaz'» 988, 560 p.
7. **Asenova I.N.** Calculation of first-, second-order and multiparameter symbolic sensitivity of active circuits by using nullor model and modified Coates flow graph. — *International Journal of microelectronics and computer science*, 2011, vol. 2, No. 4, pp. 129–135.
8. **Filaretov V.V.** *Elektrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 1998, No. 5, pp. 43–52.
9. **Filaretov V.V.** *Mezhdunarodnyi sbornik nauchnykh trudov «Sintez, analiz i diagnostika elektronnykh tsepei» — in Russ.* (Intern. collection of scientific papers «Synthesis, analysis and diagnostics of electronic circuits»). Ulyanovsk State Technical University », 2013, iss. 11, pp. 191–212.

* * *

Электричество, 2017, № 2, с. 50–54.

Снижение износа щеток в коллекторных электрических машинах переменного тока

**ИЗОТОВ А.И., МАМАЕВ Г.А., БЕСПАЛОВ В.Я., ТИМОШЕНКО В.Н.,
ФОМИНЫХ А.А., СОБОЛЕВ Д.В.**

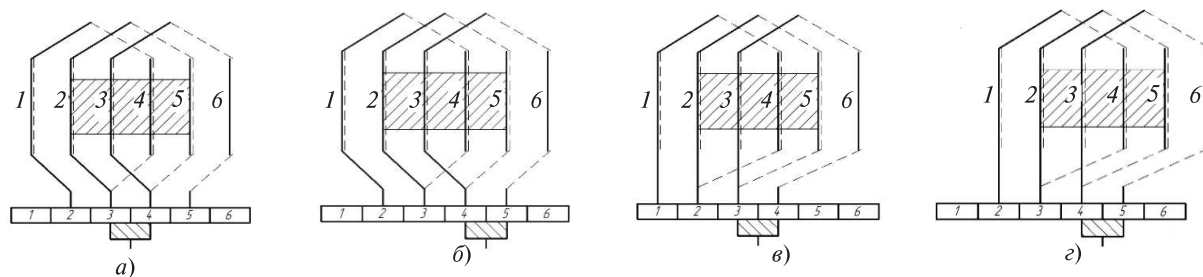
Предложена методика определения оптимального положения щеток в коллекторных машинах переменного тока как способ снижения износа щеток и уровня радиопомех. Проведена оценка эффективности применения данной методики по результатам испытаний коллекторных электродвигателей переменного тока привода угловых шлифовальных машин мощностью 1,8; 2,0 и 2,4 кВт. В электродвигателях мощностью 1,8 кВт смещение щеток на 1 коллекторное деление в направлении вращения позволяет снизить искрение в номинальном режиме на 1 балл, вызывая при этом перегрев машины. Для устранения перегрева рассматривается возможность увеличения частоты вращения электродвигателя за счет уменьшения числа витков обмотки возбуждения. Это позволяет снизить перегрев электродвигателя и восстановить его характеристики. В машинах мощностью 2 кВт при смещении щеток против направления вращения на 1 коллекторное деление искрение снижается на 1 балл по всем режимам.

Ключевые слова: электрические машины переменного тока, электрические щетки, искрение щеток, износ, коллектор, щеткодержатель

Как известно [1], износ щёток зависит от уровня искрения. Одним из способов снижения искрения в машинах постоянного и переменного тока является смещение щёток с геометрической нейтрали. В коллекторных машинах переменного тока этот способ имеет ограниченное применение, так как в большинстве случаев щёткодержатели жёстко установлены в корпусе. Для таких машин авторами разработана методика определения оптимального положения щёток, находящихся в штатном положении.

Задача исследований заключалась в оценке эффективности применения данной методики для уменьшения искрения под сбегающим краем щеток. Искрение снижается за счет смещения магнитной системы коллекторного электродвигателя в оптимальное положение, соответствующее минимальному искрению, а также за счет смещения коллектора.

Для смещения магнитной системы делается расточка корпуса, на котором расположены щётко-



Улучшение коммутации за счет смещения щеток: *a* – щетки в геометрической нейтральной; *б* – смещение щеток в направлении вращения на одно коллекторное деление; *в* – смещение щеток в направлении вращения на одно коллекторное деление за счет переподсоединения секций; *г* – смещение щеток в направлении вращения на одно коллекторное деление за счет сдвига коллектора относительно центра паза якоря против направления вращения

держатели. При этом появляется возможность смещения магнитной системы относительно корпуса в направлении и против направления вращения якоря с фиксацией магнитной системы. При различных положениях магнитной системы снимаются рабочие характеристики и оценивается искрение под сбегающим краем щеток в соответствии с ГОСТ Р51318.14.1-2006.

После определения положения магнитной системы, соответствующего минимальному искрению, проводится смещение коллектора в необходимом направлении за счёт изменения его ориентации относительно центра паза якоря или изменения порядка подсоединения секций к коллекторным пластинам (см. рисунок).

Проверка методики проводилась на коллекторных двигателях переменного тока привода угловых шлифовальных машин мощностью 1,8 кВт (МШУ-1,8-230 с номинальной частотой вращения 14000 об/мин), 2 кВт (МШУ-2-230П, 20000 об/мин), 2,4 кВт (МШУ-2,4-230М, 18000 об/мин). После определения оптимального положения магнитной системы были изготовлены опытные якоря, обеспечивающие смещение щеток в направлении и против направления вращения за счёт переподсоединения секций коллектора. Снимались рабочие характеристики, определялись уровни искрения и радиопомех по мощности и напряжению.

В результате в двигателе мощностью 1,8 кВт минимальное искрение было получено при смещении щеток на одно коллекторное деление в направлении вращения. При этом искрение в номинальном режиме уменьшилось по сравнению со штатным положением щеток на 1 балл.

Однако смещение щеток в направлении вращения привело к уменьшению частоты вращения за счёт подмагничивания магнитной системы продольной составляющей реакции якоря. Это ухудшило охлаждение, и двигатель стал перегреваться. Для устранения перегрева была рассмотрена возможность увеличения частоты вращения за счёт снятия 5 витков с каждого полюса.

Исследовались три угловые шлифовальные машины МШУ-1,8-230, у которых были сняты рабочие характеристики и определен уровень радиопомех (табл. 2–4). Затем были проведены испытания на нагрев, в которых измерялись: перегрев обмотки возбуждения, перегрев обмотки якоря, нагрев коллектора и частота вращения при постоянной потребляемой мощности 2000 Вт (отмечено * в табл. 1). После испытаний на нагрев якоря у штатных двигателей были заменены на якоря со смещением щеток за счёт переподсоединения секций к коллектору (см. рисунок *в*), уменьшено число витков обмотки возбуждения (85 вместо 90), определен уровень радиопомех по напряжению и мощности (табл. 2 и 3), сняты рабочие характеристики (табл. 4) и проведена оценка перегревов (отмечено ** в табл. 1).

Таблица 1

Условия испытаний на нагрев, °С	Положение щеток	
	Серийный двигатель	Смещение на одно коллекторное деление в направлении вращения
Перегрев обмотки возбуждения	74±2*	77±3
	65**	70
Перегрев обмотки якоря	78±4	82±8
	75±3	75±6
Нагрев коллектора	116±4	119±5
	106±6	115±6

Таблица 2

Частота, МГц	Уровень радиопомех, дБ		
	По ГОСТ Р51318.14.1-2006	Серийный двигатель	Смещение щеток по рисунку <i>в</i> , число витков обмотки возбуждения $W_s = 85$
0,16	75,44	47	50
0,24	72,1	51	50
0,55	69	43	45
1,0	69	36	36
1,4	69	39	36

2,0	69	40	38
3,5	69	36	43
6,0	74	42	40
10	74	45	42
22	74	27	30
30	74	27	30

10	52	40	40
22	52	26	26
30	52	12	10

Таблица 3

Частота, МГц	Уровень радиопомех, дБ		
	По ГОСТ Р51318.14.1-2006	Серийный двигатель	Смещение щёток по рисунку θ , число витков обмотки возбуждения $W_s = 85$
30	55	37,4	38÷41
45	55,6	34,4	42
65	56,3	43,4	42
90	57,2	36,4	34..37
150	59,5	33,9	40..43
180	60,6	30,5	36..38
220	62,1	28,1	27..29
300	65	28,8	26

Как показали исследования, применение в двигателе угловой шлифовальной машины МШУ-1,8-230 обмотки возбуждения с числом витков в катушке 85 вместо 90 возможно при смещении щёток в направлении вращения. Это приводит к восстановлению характеристик до исходного значения с некоторым повышением $\cos\varphi$, уровень искрения остаётся без изменения и соответствует случаю, когда щётки установлены на геометрической нейтрали (табл. 4). Уровень радиопомех несколько увеличился (на 6 дБ) при частоте 22 МГц (табл. 2 и 3).

Предложенная в работе методика по снижению износа щеток внедрена в производство на АО «ЛЕПСЕ», г. Киров. Годовой экономический эффект, подтверждённый предприятием, получен за счёт экономии материала обмоточного провода полюсов [2].

Таблица 4

Параметры	Значения параметров					
	670/642	1000/930	1340/1320	1520/1510	1730/1700	1800/1800
P_1 / P_1^* , Вт	670/642	1000/930	1340/1320	1520/1510	1730/1700	1800/1800
I / I^* , А	2,63/2,5	4,75/4,4	6,5/6,5	7,5/7,5	8,7/8,6	9,3/9,1
n / n^* , об/мин	21557/21354	17170/17018	15262/14834	14598/14111	14048/13111	13487/12786
A / A^* (искрение), балл	2/2	2/1,5	2/1,5	2/2	2/2	2/2
$\cos\varphi / \cos\varphi^*$	0,99/0,99	0,96/0,96	0,94/0,92	0,92/0,92	0,90/0,90	0,88/0,90
КПД*/КПД	1,03	1,07	0,99	0,97	0,95	0,95

* Значения при смещении щёток на одно коллекторное деление в направлении вращения, число витков обмотки возбуждения 85.

Таблица 5

Частота, МГц	Уровень радиопомех, дБ		
	По ГОСТ Р51318.14.1-2006	Серийный двигатель	Смещение щёток на одно коллекторное деление против направления вращения
0,16	70	55	53
0,24	66	48	46
0,55	60	45	45
1,0	59	46	46
1,4	58	40	40
2,0	57	34	30
3,5	56	32	32
6,0	52	39	40

Таблица 6

Частота, МГц	Уровень радиопомех, дБ		
	По ГОСТ Р51318.14.1-2006	Серийного двигателя	Смещение щёток на одно коллекторное деление против направления вращения
30	55	39,4	39,4
45	55,6	39,4	39,4
65	56,3	39,4	40,4
90	57,2	28,4	29,4
150	59,5	38,9	40,9
180	60,6	30,5	31,5
220	62,1	27,1	28,1
300	65	28,8	28,8

Таблица 7

Условия опыта	Значения параметров				
	M , кгс·см	I , А	P_1 , кВт	n , об/мин	Уровень искрения, балл
Серийный двигатель	0	4,5	0,96	21000	2
Смещение щёток на одно коллекторное деление против направления вращения		5,3	1,12	22930	1,5
Серийный двигатель	10	6,8	1,4	18930	2
Смещение щёток на одно коллекторное деление против направления вращения		6,9	1,48	20400	1,5
Серийный двигатель	20	8,7	1,8	17480	1,5
Смещение щёток на одно коллекторное деление против направления вращения		9	1,9	18490	1,25
Серийный двигатель	30	10,7	2,2	16210	2
Смещение щёток на одно коллекторное деление против направления вращения		11	2,3	17070	1,5

На двигателе мощностью 2 кВт привода угловой шлифовальной машины МШУ-2-230П (с номинальной частотой вращения двигателя 20000 об/мин) смещение щёток против направления вращения на одно коллекторное деление позволило снизить искрение по всем режимам на 1 балл. Уровень радиопомех по сети и по мощности отличается незначительно и находится в пределах погрешности измерений (табл. 5 и 6); в табл. 7 показаны рабочие характеристики двигателя.

Предлагаемая модернизация внедрена в серийное производство на АО «ЛЕПСЕ», г. Киров [3].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лившиц П.С. Скользящий контакт электрических машин. — М.: Энергия, 1974, 272 с.
2. Изотов А.И., Тимошенко В.Н. Методика настройки коммутации в коллекторных машинах переменного тока. — Сб. материалов Всероссийской научно-техн. конф. «Общество — наука — инновации». — Киров: Вятский государственный университет, 2010, т. 2, с. 277.
3. Изотов А.И., Мамаев Г.А., Кондратьев А.М. и др. Оценка эффективности улучшения коммутации в коллекторных машинах переменного тока за счёт смещения щёток. — Сб. материалов Всероссийской научно-техн. конф. «Наука—производство—технологии—экология». — Киров: ВятГУ, 2008, с. 205–207.

[09.11.2016]

Авторы: **Изотов Анатолий Иванович** окончил электротехнический факультет Омского институ-

та инженеров железнодорожного транспорта в 1962 г. В 1974 г. защитил кандидатскую диссертацию «Определение оптимальных параметров дополнительных полюсов машин, работающих при резкомременных циклических нагрузках». Заведующий кафедрой «Электрические машины и аппараты» (ЭМА) Вятского государственного университета (ВятГУ).

Мамаев Геннадий Александрович окончил электротехнический факультет Вятского политехнического института в 1979 г. В 2004 г. защитил кандидатскую диссертацию «Основы проектирования и организация промышленного производства медицинских озонаторных установок». Доцент кафедры ЭМА ВятГУ, генеральный директор АО «ЛЕПСЕ».

Беспалов Виктор Яковлевич окончил электротехнический факультет Московского энергетического института (МЭИ) в 1960 г. В 1992 г. защитил докторскую диссертацию «Асинхронные машины для динамических режимов работы». Профессор Национального исследовательского университета «МЭИ».

Тимошенко Вячеслав Николаевич окончил ВятГУ в 2003 г. Ассистент кафедры ЭМА ВятГУ.

Фоминых Антон Анатольевич окончил ВятГУ в 2006 г. В 2016 г. защитил кандидатскую диссертацию «Оценка влияния твердой смазки на трибохарактеристики узлов скользящего токосъема». Заместитель заведующего кафедрой ЭМА ВятГУ.

Соболев Данил Владимирович окончил ВятГУ в 2016 г. Магистрант кафедры ЭМА ВятГУ, инженер-конструктор АО «ЛЕПСЕ».

Elektrichestvo (Electricity), 2017, No. 2, pp. 50–54.

Reduced brush wear collector electric machines AC

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

MAMAYEV Gennadii Aleksandrovich (Public Company (PC) «LEPSE», Kirov, Russia) – Director General, Associate Professor of VyatGU, Cand. Sci. (Eng.)

BESPALOV Viktor Yakovlevich (National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia) – Professor, Dr. Sci. (Eng.)

TIMOSHENKO Vyacheslav Nikolayevich (VyatGU, Kirov, Russia) – Assistant in the Department

FOMINYKH Anton Anatol'yevich (VyatGU, Kirov, Russia) – Deputy Head of the Department, Cand. Dci. (Eng.)

SOBOLEV Danil Vladimirovich (PC «LEPSE», Kirov, Russia) – Design Engineer, Master of the Department VyatGU

The technique of determining the optimal position of the brushes in the commutator AC machines, as a way to reduce brush wear and radio interference. An evaluation of the effectiveness of application of this methodology on the results of tests commutator motor AC drive LNA with a capacity of 1.8 kW, 2 kW and 2.4 kW. In motors with a power of 1.8 kW, the offset brushes on collector 1 division in the direction of rotation allows to reduce sparking in the nominal mode by 1 point, thus causing overheating of the machine. To eliminate overheating that occurs when the displacement of the brushes, the possibility of increasing the motor speed, by reducing the number of coils of the excitation winding. The decrease in the number of coils allows to reduce overheating of the motor and restore its performance. In electric machines with power of 2 kW, bias the brushes against the direction of rotation 1 manifold allows the division to reduce sparking to 1 point for all modes.

Key words: AC electric machines, electric brushes, sparking brushes; wear; collector; brush holder

REFERENCES

1. Livshits P.S. *Skol'zyashchii kontakt elektricheskikh mashin* (Sliding contact of electric machines). Moscow, Publ. «Energiya», 1974, 272 p.

2. Izotov A.I., Timoshenko V.N. *Sb. materialov Vserossiiskoi nauchno-tekhn. konf. «Obshchestvo–Nauka–Innovatsii»* (Proc. of the All-Russian scientific and technical conf. «Society–

Science–Innovation». Kirov, Vyatskii gosudarstvennyi universitet (VyatGU), 2010, vol. 2, p. 277.

3. Izotov A.I., Mamayev G.A., Kondrat'yev A.M. et al. *Sb. materialov Vserossiiskoi nauchno-tekhn. konf. «Nauka–Proizvodstvo–Tekhnologii–Ekologiya»* (Proc. of the «Science–Production–Technology–Environment»). Kirov, VyatGU, 2008, pp. 205–207.

* * *

Уважаемые авторы!

Редакция публикует при каждой статье краткие сведения об авторах. В связи с этим просим вас при направлении статьи в редакцию сообщать (желательно и на английском языке):

полные имена и отчества всех авторов;

какой факультет, какого вуза и когда закончил;

когда получил ученую степень, где и по какой тематике (теме) была защита; место работы и должность.

Кроме того, напоминаем, что на каждую статью следует представлять реферат (не менее 100 слов) на русском и английском языках (включая название), а также ключевые слова.