

**ОБОБЩЕННАЯ ДИНАМИЧЕСКАЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНАЯ  
ХАРАКТЕРИСТИКА СКОЛЬЗЯЩЕГО КОНТАКТА УГОЛЬНАЯ  
ЩЕТКА — КОЛЛЕКТОР**

Э. К. ДАММ, Л. Я. ЗИННЕР, А. И. СКОРОСПЕШКИН

(Представлена семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

Расчет коммутации и коммутационной устойчивости машин постоянного тока возможен только при наличии исчерпывающей информации о поведении скользящего контакта при различных условиях его работы. Учитывая многообразие факторов, влияющих на электрические свойства скользящего контакта, целесообразно получить его математическую модель экспериментально-статистическим методом.

Кратко напомним сущность метода [1].

На исследуемую систему, механизм явлений внутри которой полностью не изучен (в данном случае это скользящий контакт), воздействуют факторы  $x_i$  (в данном случае это факторы, существенно влияющие на вид вольт-амперной характеристики скользящего контакта). На выходе измеряется величина  $y$ , количественно описывающая вольт-амперную характеристику. Задача сводится к определению функции

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n).$$

Поскольку вид функции неизвестен, ее представляют полиномом вида

$$y = b_0 + \sum b_i x_i + \sum b_{ii} x_i^2 + \sum b_{ij} x_i x_j,$$

где коэффициенты  $b_0, b_i, b_{ii}, b_{ij}$  подлежат определению. Входные факторы  $x_i$  изменяются по определенной программе, коэффициенты  $b_0, b_i, b_{ii}, b_{ij}$  определяются на основе обработки результатов эксперимента методом регрессионного анализа.

Эксперимент ставился на установке, подробно описанной в [2]. Коллектор, две противоположные пластины которого замкнуты, приводится во вращение двигателем постоянного тока, скорость вращения которого может изменяться в пределах от 300 до 2500 об/мин.

В течение времени, когда обе рабочие ламели находятся под щетками, через образовавшуюся цепь пропускается импульс тока от специальной импульсной установки. Амплитуда импульса, его длительность, форма, а также пространственное расположение относительно дуги контактирования ламели со щеткой могут изменяться в достаточных пределах. В течение одного оборота коллектора установка выдает через равные промежутки времени 2 совершенно одинаковых импульса, так что каждая ламель оказывается попеременно анодно- и катодно поляризованной, как это имеет место в реальной машине. Чтобы не вводить дополнительных погрешностей, при всех измерениях использовалась одна и та же щетка, полярность при этом изменялась переключением источника импульсов.

Применение специального щеткодержателя позволяет плавно регулировать нажатие на щетку, подогрев коллектора и щеток осуществляется при

помощи спирали, температура коллектора измеряется при помощи термонары спай которой заложен в отверстие на торце одной из рабочих ламелей.

Так как в данном случае рассматривается влияние различных факторов на вольт-амперную характеристику скользящего контакта, то в качестве входных параметров принимались коэффициенты аппроксимирующих выражений.

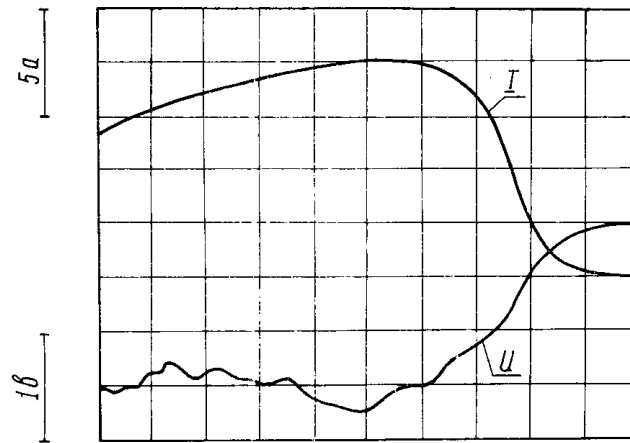


Рис. 1.

Вольт-амперные характеристики мягкой щетки марки ЭГ-4Э аппроксимировались выражением

$$U = A \arctg B j, \quad (1)$$

где  $U$  — переходное падение напряжения в контакте;

$j$  — плотность тока в контакте;

$A$  и  $B$  — постоянные для данной характеристики коэффициенты.

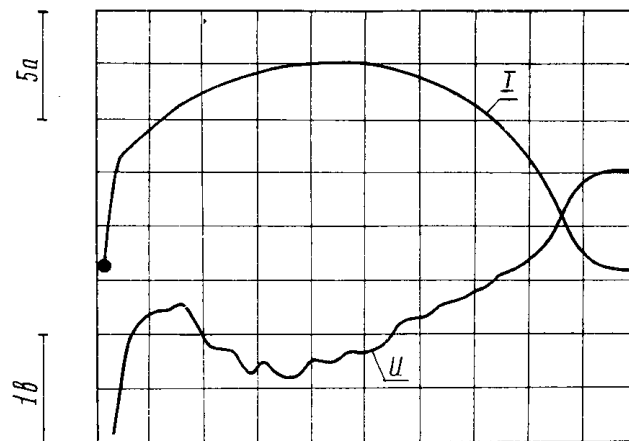


Рис. 2.

Вольт-амперные характеристики твердой щетки марки ЭГ-74 правильнее аппроксимировать выражением

$$U = A \operatorname{arch} B j, \quad (2)$$

не имеющим асимптот, так как падение напряжения под щеткой ЭГ-74 неограниченно возрастает при увеличении плотности тока, в отличие от щетки марки ЭГ-4Э, у которой при больших плотностях тока переходное падение напряжения практически стабилизируется.

Первоначально в качестве входных факторов предполагалось взять следующие:

$x_1$  — средняя плотность тока в течение первого ламельного периода контактирования ламели со щеткой,

$x_2$  — температура щеток и коллектора,

$x_3$  — удельное нажатие на щетку,

$x_4$  — линейная скорость поверхности коллектора.

Но в дальнейшем оказалось, что фактор скорости в данном случае не оказывал существенного однонаправленного влияния на вид вольт-амперной ха-

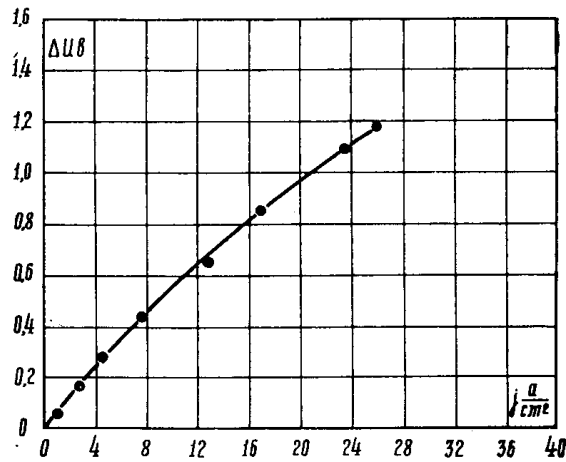


Рис. 3.

рактеристики. На рис. 1 и 2 в качестве примера приведены осциллограммы тока и переходного падения напряжения катодно-поляризованной щетки марки ЭГ-74 для окружных скоростей, соответственно равных 2,09 м/сек и 8,4 м/сек при  $x_1 = 55 \frac{a}{\text{см}^2}$ ,  $Q_k = 70^\circ \text{C}$ ,  $p = 250 \frac{\Gamma}{\text{см}^2}$ . Соответствующие вольт-амперные характеристики приведены на рис. 3 и 4. Сравнение показывает их почти полное совпадение.

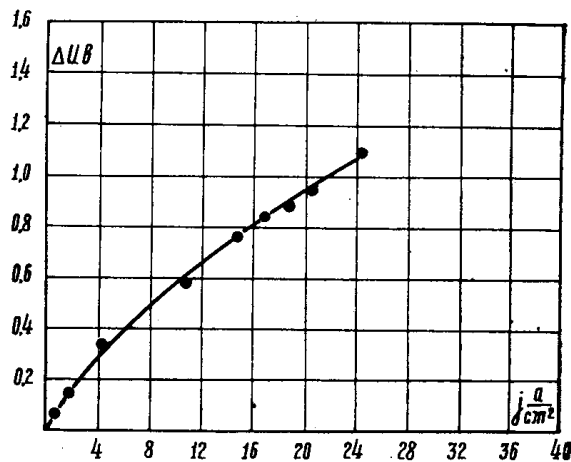


Рис. 4.

Попутно необходимо заметить, что перед проведением эксперимента поверхность коллектора весьма тщательно обрабатывалась абразивным бруском Р30 при одновременном наблюдении за осциллограммой профиля коллектора, полученной с применением измерителя профиля [3]. Общий бой коллектора не превышал 4—5 микрон, перепады между соседними коллекторными пластинами не превышали 1 микрона. Относительная влажность воздуха по возможности поддерживалась постоянной, равной 55%.

Таблица 1

№ опыта	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1^2$	$x_2^2$	$x_3^2$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$A_K$	$A_{K B_K}$	$A_a$	$A_a B_a$
1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	0,7275	0,1207	0,3650	0,0882
2	+1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	0,5660	0,0730	0,5460	0,0717
3	-1	+1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	0,4490	0,0950	0,3000	0,0762
4	+1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	0,5650	0,0646	0,2280	0,0449
5	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	0,3570	0,0844	0,2380	0,0595
6	+1	-1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	0,4140	0,0507	0,3030	0,0438
7	-1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	0,3110	0,0775	0,2490	0,0608
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	0,3230	0,0344	0,2340	0,0361
9	-1,682	0	0	+2,828	0	0	0	0	0	0,3300	0,1310	0,5190	0,0614
10	+1,682	0	0	+2,828	0	0	0	0	0	0,6140	0,0558	0,3060	0,0239
11	0	-1,682	0	0	+2,828	0	0	0	0	0,4660	0,1070	0,4025	0,0624
12	0	+1,682	0	0	+2,828	0	0	0	0	0,2915	0,0435	0,2380	0,0213
13	0	0	-1,682	0	0	+2,828	0	0	0	0,4620	0,1680	0,4570	0,0688
14	0	0	+1,682	0	0	+2,828	0	0	0	0,3370	0,0403	0,4590	0,0262
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,4440	0,082	0,376	0,0525

В соответствии с изложенным был составлен план ротатбельного униформ-планирования второго порядка для трех независимых переменных варьируемых на трех уровнях (табл. 1). Пределы изменения входных параметров выбирались из условий работы реальных машин (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Фактор	Уровни					Размерность
	-1,682	-1	0	+1	+1,682	
$x_1$	21,4	35	55	75	88,5	$\frac{a}{\text{см}^2}$
$x_2$	53	60	70	80	87	°С
$x_3$	166	200	250	300	334	$\frac{z}{\text{см}^2}$

Эксперимент проводился в следующем порядке. После механической обработки поверхности коллектора все ламели замыкались и постоянным током наводилась нормальная коллекторная пленка в течение 100—150 часов. После этого коллектор размыкался, выделялись две рабочие пластины, щетки подключались к импульсной установке. Сначала ставились все эксперименты при одном нажатии на щетку, затем при другом и так далее. После изменения нажатия на щетку последняя в течение 10 часов снова тщательно притиралась к коллектору. При данном нажатии сначала ставился эксперимент для наименьшего значения  $x_1$ , затем для большего и так далее. В каждом опыте кривые ламельного тока и переходного падения напряжения для обеих полярностей щетки фотографировались с экрана двухлучевого осциллографа. После обработки для полученных вольт-амперных характеристик находились коэффициенты аппроксимирующих выражений, которые для щетки марки ЭГ-74 приведены в табл. 1. В качестве выходных параметров были приняты  $A$  и произведение  $AB$ , так как последнее имеет конкретный физический смысл.  $AB$  численно равно удельному переходному сопротивлению контакта при нулевой плотности тока.

Ниже приводятся выражения для обобщенной характеристики щетки марки ЭГ-74, полученные в результате обработки результатов эксперимента, приведенных в табл. 1.

$$U_{\kappa} = A_{\kappa} \operatorname{arsh} \frac{A_{\kappa} B_{\kappa}}{A_{\kappa}} j \quad (3)$$

$$U_{\alpha} = A_{\alpha} \operatorname{arsh} \frac{A_{\alpha} B_{\alpha}}{A_{\alpha}} j, \quad (4)$$

где  $U_{\kappa}$  — переходное падение напряжения между ламелью и щеткой катодной полярности;

$U_{\alpha}$  — переходное падение напряжения между ламелью и щеткой анодной полярности;

$$A_{\kappa} = 0,44 + 0,05563x_1 - 0,052x_2 - 0,08238x_3 + 0,0203x_1^2 - 0,0125x_2^2 - 0,004x_3^2 + 0,029x_1x_2 + 0,014x_1x_3 + 0,01781x_2x_3; \quad (5)$$

$$A_{\kappa} B_{\kappa} = 0,0767 - 0,0207x_1 - 0,01208x_2 - 0,0235x_3 + 0,0039x_1^2 - 0,00589x_2^2 + 0,0043x_3^2 + 0,0008625x_1x_2 + 0,0000375x_1x_3 + 0,00136x_2x_3; \quad (6)$$

$$A_{\alpha} = 0,3755 - 0,01449x_1 - 0,05257x_2 - 0,03016x_3 - 0,0059x_1^2 - 0,0378x_2^2 + 0,0103x_3^2 - 0,0416x_1x_2 - 0,07375x_1x_3 - 0,04062x_2x_3; \quad (7)$$

$$A_{\alpha} B_{\alpha} = 0,0521 - 0,01103x_1 - 0,008439x_2 - 0,00762x_3 - 0,002x_1^2 -$$

$$-0,00031x_2^2 + 0,00167x_3^2 - 0,00297x_1x_2 + 0,000925x_1x_3 + 0,00405x_2x_3. \quad (8)$$

В выражениях (5) — (8)

$$x_1 = \frac{j_{cp}(t_k) - 50}{17,2}; \quad x_2 = \frac{\theta_k - 70}{10}; \quad x_3 = \frac{p - 250}{50},$$

где

$j_{cp}(t_k)$  — средняя плотность тока в контакте в течение первого ла-  
мельного периода контактирования ламели со щеткой  $\frac{a}{cm^2}$ ;

$\theta_k$  — температура коллектора °С;

$p$  — удельное нажатие на щетку  $\frac{\Gamma}{cm^2}$ .

Полученные выражения позволяют получить вольт-амперные характери-  
стики скользящего контакта при изменении условий его работы в пределах,  
определяемых табл. 2.

Чтобы убедиться в том, что при планировании эксперимента были учте-  
ны все факторы, существенно влияющие на вид вольт-амперных характери-  
стик, можно вычислить коэффициенты множественной корреляции для выход-  
ных параметров.

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum (y - \hat{y})^2}{\sum (y - \bar{y})^2}},$$

где  $y$  — среднее значение выходных параметров;

$\hat{y}$  — значения выходных параметров, определяемые из полученного  
уравнения регрессии;

$\bar{y}$  — значения выходных параметров, полученные из эксперимента.

Т а б л и ц а 3

Параметр	$A_k$	$A_k B_k$	$A_a$	$A_a B_a$
$R$	0,911	0,92	0,917	0,91

Значения указанных коэффициентов приведены в табл. 3. Если  $R = 1$ ,  
то это означает, что учтены все факторы, влияющие на выходную величину.  
Значения коэффициентов  $R$ , полученные в данном случае, говорят о том, что  
все существенно влияющие факторы были учтены. На долю неучтенных и не-  
контролируемых факторов приходится не более 9%, что вполне удовлетво-  
рительно для такого объекта, как щеточный контакт.

Рассмотрение уравнений для обобщенных вольт-амперных характери-  
стик показывает, что фактор  $x_1$  оказывает весьма существенное влияние. Вид  
вольт-амперной характеристики контакта в сильной степени зависит от усло-  
вий формирования контактной проводимости в первый ламельный период  
контактирования. На это впервые было указано в работе [4].

На рис. 5 кривая II представляет статическую характеристику анод-  
ной щетки ЭГ-4Э, снятую на короткозамкнутом коллекторе при  $\theta_k = 70^\circ C$ ,  
 $p = 250 \frac{\Gamma}{cm^2}$  при возрастающей плотности тока. Кривая I представляет ди-  
намическую характеристику, снятую на описанной выше экспериментальной  
установке при тех же значениях  $\theta_k$  и  $p$ . Разница состояла лишь в том, что  
плотность тока в контакте составляла в первый момент времени контакти-  
рования ламели со щеткой примерно  $90 \frac{a}{cm^2}$ , снижаясь к концу периода  
контактирования до нуля, как это имеет место при ускоренной коммутации.  
Сравнение кривых I и II показывает их значительное расхождение при отно-  
сительно небольших плотностях тока. Сопротивление контакта при малых

плотностях тока в реальных условиях его работы (кривая I') оказывается значительно меньшим, чем определяемое статической характеристикой (кривая II').

Таким образом, итогом проведенного исследования является разработка методики расчета обобщенной динамической вольт-амперной характеристики щеточного контакта. Эта методика позволяет учитывать основные факторы (температуру, токовую нагрузку и характер коммутации, изменение контактного давления при наличии радиальных колебаний щеток), определяющие

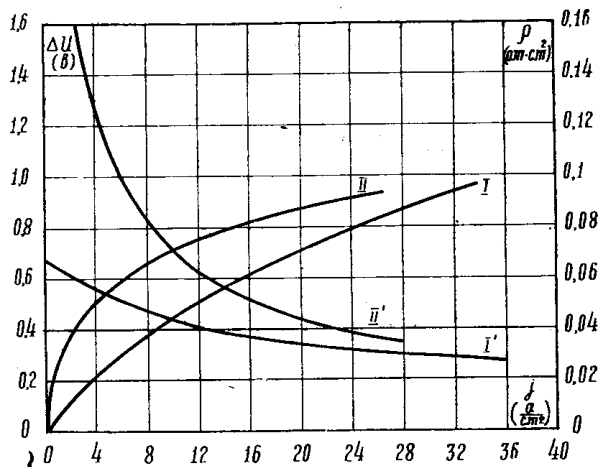


Рис. 5.

щие вольт-амперную характеристику щеточного контакта, и с достаточной достоверностью вводить ее в расчет коммутации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Налимов, Н. А. Чернова. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. Изд. «Наука», Москва, 1966.
2. А. И. Скороспешкин, Л. Я. Зиннер, Э. К. Дамм, В. П. Коротаев. Установка для экспериментального исследования скользящего контакта щетка — коллектор. «Изв. ТПИ», т. 212 (в печати).
3. Л. Я. Зиннер, А. И. Скороспешкин. Прибор для измерения малых перемещений. «Изв. ТПИ», т. 172, 1967.
4. Ю. П. Галишников, А. И. Скороспешкин. Естественные вольт-амперные характеристики скользящего контакта угольная щетка — коллектор. «Изв. ТПИ», т. 172, 1967.