

РАСЧЕТ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЛЬТАМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
СКОЛЬЗЯЩЕГО КОНТАКТА

Р. Ф. Бекишев, Б. И. Костылев, А. И. Скороспешкин

(Рекомендована семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

Как известно, динамические вольтамперные характеристики при нормальных условиях работы коллекторно-щеточного узла электрической машины достаточно полно отражают свойства скользящего щеточного контакта. Поэтому при расчете коммутации необходимо использовать именно динамические вольтамперные характеристики. Основная трудность использования динамических вольтамперных характеристик при расчетах коммутации заключается в том, что последние получались лишь экспериментальным путем при работе электрической машины. Однако для обеспечения высокой надежности коллекторной машины, которая определяется в основном коммутационными факторами, необходимо знание динамических вольтамперных характеристик скользящего контакта электрической машины на стадии ее проектирования.

Таким образом, со всей необходимостью возникает вопрос о разработке методики расчета динамических вольтамперных характеристик с использованием определенных параметров скользящего щеточного контакта, полученных на моделях или искусственных установках.

Как показывает анализ, предложенной в [1], схемы замещения скользящего щеточного контакта коллекторной электрической машины, динамические вольтамперные характеристики могут быть рассчитаны по указанной схеме замещения с использованием параметров, полученных при снятии статических вольтамперных характеристик на короткозамкнутом коллекторе. Методика определения параметров схемы замещения изложена в [1]. По данной методике определены параметры схемы замещения скользящего щеточного контакта для различных марок щеток (ЭГ-4Э, ЭГ-14, ЭГ-8, ЭГ-74), которые приведены в табл. 1.

Таблица 1

| Марка щеток | Параметры                      |                                   |      |      |     |     |                            |                     |
|-------------|--------------------------------|-----------------------------------|------|------|-----|-----|----------------------------|---------------------|
|             | $\rho$<br>ОМСМ <sup>2</sup> /м | $\Gamma_{щ}$<br>ОМСМ <sup>2</sup> | a    | b    | n   | k   | $S_{л}$<br>см <sup>2</sup> | $AS_{л}$<br>Ф       |
| ЭГ-4Э       | 11,3                           | 0,01                              | 50   | 55   | 3,0 | 3,0 | 0,35                       | $3,5 \cdot 10^{-4}$ |
| ЭГ-14       | 33,3                           | 0,02                              | 15,0 | 18,0 | 3,0 | 3,0 | 1,0                        | $10^{-3}$           |
| ЭГ-8        | 44,5                           | 0,07                              | 2,0  | 3,0  | 3,0 | 3,0 | 1,0                        | $10^{-3}$           |
| ЭГ-74       | 61,0                           | 0,09                              | 7,0  | 12,0 | 3,0 | 3,0 | 0,35                       | $3,5 \cdot 10^{-4}$ |



Статические вольтамперные характеристики, необходимые для определения параметров схемы замещения, снимались на короткозамкнутом коллекторе при поддержании постоянной температуры (50°C) на каждой точке характеристики.

На величину среднего значения сопротивления между щеткой и коллекторной пленкой существенное влияние оказывают радиальные и тангенциальные колебания щеток. Используя данные исследований [2], сопротивление  $r_{щ}$  при наличии колебаний можно определить по выражению

$$r_{щ} = r_{щ0}(1 + m \sin \omega t)(1 + m' \sin \xi \omega' t), \quad (1)$$

где

$r_{щ0}$  — сопротивление между щеткой и коллекторной пленкой, соответствующее определенному нажатию при отсутствии колебаний щеток и зависящее от сорта щетки;

$m$  и  $m'$  — глубина модуляции сопротивления соответственно тангенциальными и радиальными колебаниями щеток.

Вольтамперная характеристика нелинейного сопротивления утечки  $R_{ут}$  определяется для исследованных щеток зависимостью вида

$$i_{ут} = f(SU_{сл}) = aSU_{сл}^n, \quad (2)$$

где  $a$  и  $n$  — константы, характеризующие марку щеток,

$S$  — площадь контактирования ламели со щеткой,

$U_{сл}$  — напряжение на запирающем слое.

Вольтамперную характеристику сопротивления полупроводящего запирающего слоя  $R_{ас}$  для щеток ЭГ-4Э, ЭГ-14, ЭГ-8, ЭГ-74 можно представить выражением

$$i_{ас} = \varphi(U_{сл}) = bU_{сл}^k, \quad (3)$$

где  $b$  и  $k$  — постоянные, характеризующие полупроводящие свойства коллекторной пленки.

Зависимость емкости запирающего слоя, образованного между полупроводящей пленкой закиси меди и медью коллектора, от величины и полярности приложенного напряжения может быть представлена выражением (4), характерным для меднозакисных полупроводников

$$C = S_{л} \frac{A}{2 - U_{сл}}, \quad (4)$$

где

$S_{л}$  — полная контактная площадь ламели (см<sup>2</sup>),

$A$  — константа выпрямителя.

Расчет динамических вольтамперных характеристик проводится по методике [1] при заданном токе ламели. Падение напряжения в скользящем контакте для щеток обеих полярностей определяется по выражению

$$U = U_{сл} + U_{щ} = \int_0^T \left[ (i_{л} - aS_{л}U_{сл}^n - bU_{сл}^k) \frac{(2 - \alpha U_{сл})^2}{S_{л}A} \right] dt + \frac{r_{щ}}{S_{л}} \cdot i_{л}, \quad (5)$$

где

$i_{л}$  — мгновенное значение ламельного тока,

$T$  — период ламельного тока,

$S_{л}$  — текущее значение площади контактирования ламели со щеткой.

Так как сопротивление полупроводящего слоя  $R_{ас}$  под катоднополяризованной щеткой может быть принято бесконечно большим, для расчета контактного падения напряжения между щеткой данной поляр-



ности и коллектором в выражении (5) коэффициенты  $b$  и  $a$  положены равными нулю.

Влияние радиальных и тангенциальных колебаний учитывается в среднем через сопротивление  $r_{\text{щ}}$ . Проверка методики расчета динамических вольтамперных характеристик проводилась как на реальных электрических машинах [1], так и на искусственных установках типа короткозамкнутого коллектора.

Так, на искусственной установке, разработанной авторами [3], получены импульсные динамические характеристики щеточного контакта, образованного щетками разной полярности, скользящими по общей дорожке на короткозамкнутом коллекторе. Длительность импульса тока менялась в пределах 100—1750 мксек, а амплитуда от 5 до 30 а. При исследовании осциллографировались одновременно с помощью двухлучевого осциллографа С1-16 импульс тока и кривая контактного падения напряжения между щеткой и выбранной ламелью коллектора, изолированной от остальных пластин.

Импульс ламельного тока, полученный при осциллографировании, использовался для расчета кривой контактного падения напряжения. Падение напряжения между щеткой соответствующей полярности и коллекторной пластиной в процессе контактирования определялось по выражению (5) численным методом. При расчете использовалась кажущаяся площадь контактирования ламели со щеткой, характер изменения которой определяется щеточным перекрытием  $b_{\text{щ}} = 3 b_k$ . Расчет проведен для щеток ЭГ-4Э и ЭГ-74 обеих полярностей.

На рис. 1, 2 представлены импульсы ламельных токов, полученные осциллографированием на экспериментальной установке, а также опыт-

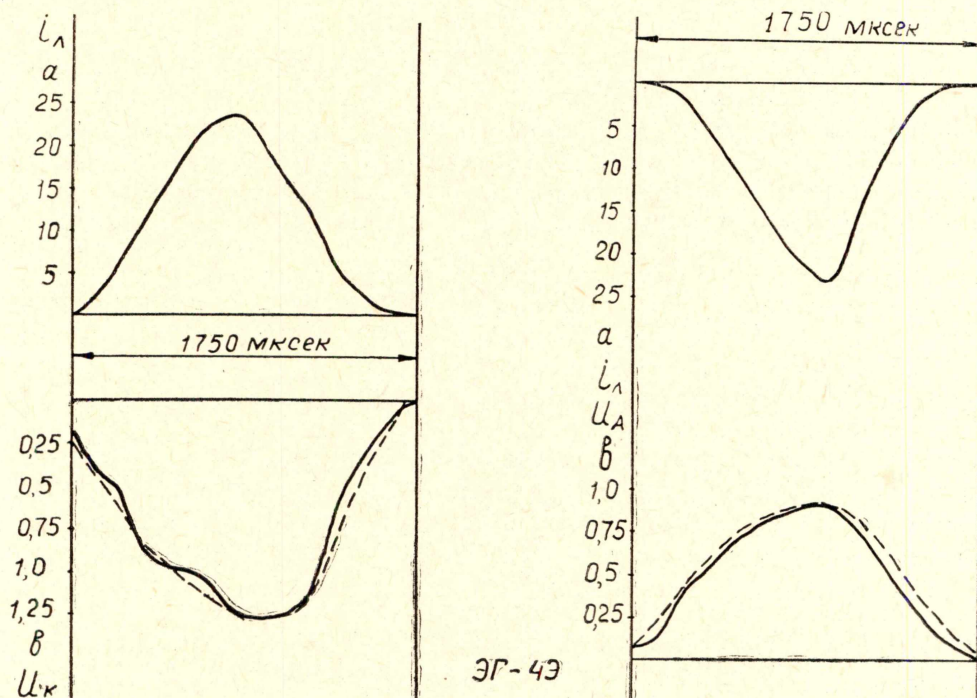


Рис. 1. Сплошные линии — опытные, штриховые линии — расчетные

ные и рассчитанные (штриховые линии) кривые контактного падения напряжения.

Анализ опытных и полученных в результате расчета кривых контактного падения напряжения показывает их достаточную сходимость. Средняя квадратическая ошибка составляет 12%. Обращает внима-



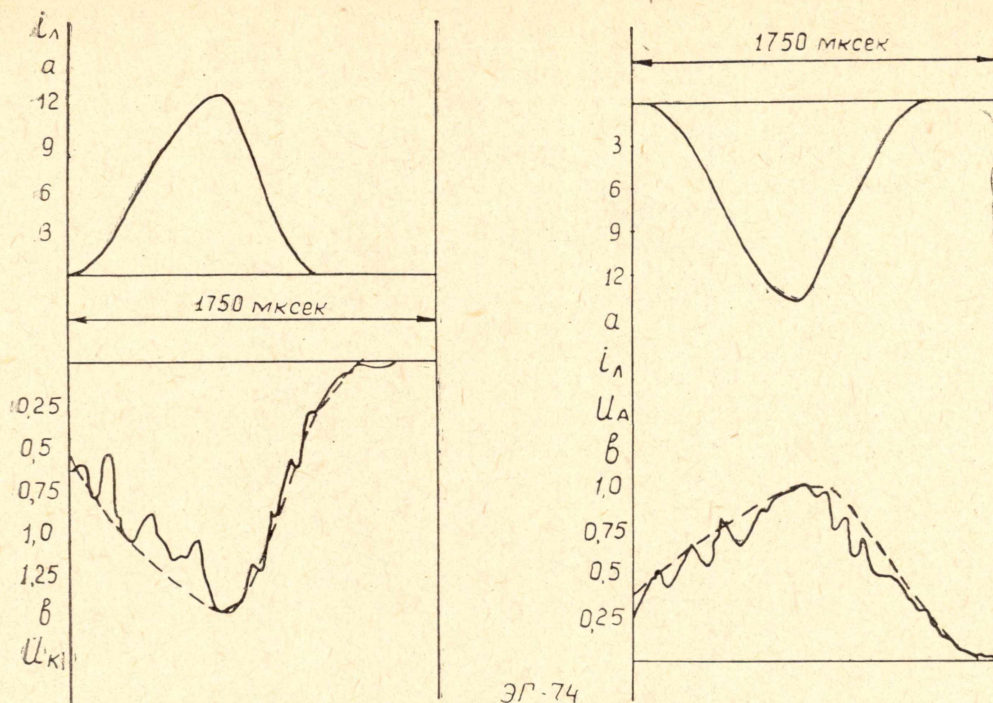


Рис. 2. Сплошные линии — опытные, штриховые линии — расчетные

ние значительная нерегулярность опытных кривых контактного падения напряжения, которая не обнаруживается на расчетных кривых. Это объясняется влиянием механических факторов, которые учитываются сопротивлением  $r_{\text{щ}}$  лишь в среднем по коллектору. Как видно из рис. 2, большим колебаниям подвержено контактное падение напряжения для щеток ЭГ-74. Действительно, как показали исследования [2], при использовании щеток ЭГ-74 тангенциальные и радиальные колебания оказывают значительное влияние на модуляцию контактного падения напряжения. Поэтому при расчете контактного падения напряжения для твердых щеток необходимо учитывать влияние механики коллекторно-щеточного узла по выражению (1).

При использовании мягких щеток (ЭГ-4Э) влияние колебаний щеток сказывается слабее и при удовлетворительном механическом состоянии коллектора в кривых контактного падения напряжения, как показывают осциллограммы (рис. 1), отсутствуют заметные нерегулярности. Поэтому в данном случае механические факторы могут быть учтены средним сопротивлением  $r_{\text{щ}}$  по коллектору, которое определяется по статическим вольтамперным характеристикам.

Кроме того, по указанной методике проведены расчеты динамических вольтамперных характеристик при симметричном треугольном импульсе тока постоянной длительности и различном характере изменения кажущейся площади контактирования ламели со щеткой.

На рис. 3 представлены импульсы тока с амплитудой  $10a$  и длительностью  $600 \text{ мксек}$ , принятые для расчета, а также кривые контактного падения напряжения между щетками обеих полярностей и ламелью коллектора, полученные в результате расчета. Как видно из кривых (рис. 3), контактные падения напряжения  $U_K$  и  $U_A$  значительно превышают величину падения напряжения на сопротивлении  $r_{\text{щ}}$ . Лишь в случае больших плотностей тока на сбегавшем или набегавшем краях щетки падение напряжения на запирающем полупроводящем слое незначи-



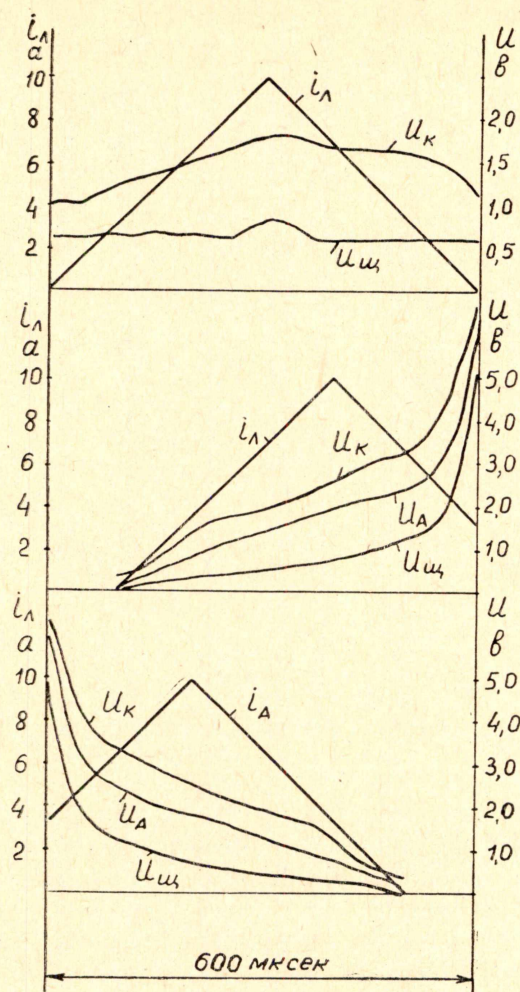


Рис. 3

тельно и контактное падение напряжения определяется в основном величиной  $U_{\text{ш}}$ .

Полученные в результате проведенных расчетов динамические вольт-амперные характеристики  $U_{\text{ш}} = f(i_A)$  при различном характере изменения кажущейся площади контактирования ламели со щеткой представлены на рис. 4.

Анализ показывает, что очертание вольтамперных характеристик определяется величиной и характером изменения плотности тока в контакте. Если импульс ламельного тока соответствует во времени характеру изменения площади контактирования ламели со щеткой, контактное падение напряжения в течение периода ламельного тока постоянно, восходящая и нисходящая ветви характеристики совпадают. Когда импульс тока ламели соответствует во времени нарастанию площади контактирования ламели со щеткой, что характерно для ускоренной коммутации, восходящая ветвь характеристики располагается выше нисходящей (рис. 4, б). Наконец, в случае замедленной коммутации, когда импульс тока ламели соответствует во времени сбеганию коллекторной пластины из-под щетки, нисходящая ветвь вольтамперной характеристики располагается выше восходящей (рис. 4, в).

Сравнение импульсных вольтамперных характеристик, полученных экспериментальным путем [4] и рассчитанных по предлагаемой методике, дает полную качественную сходимость.



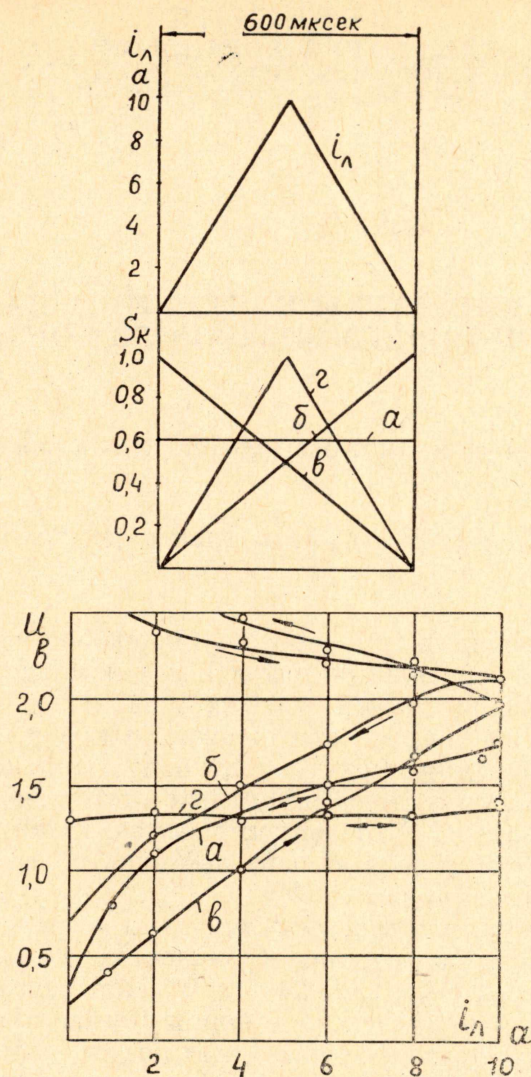


Рис. 4

Таким образом, результаты работы наглядно показывают, что предлагаемая методика позволяет определить параметры скользящего щеточного контакта и рассчитать динамические вольтамперные характеристики на стадии проектирования электрической машины.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Б. И. Костылев, Р. Ф. Бекишев, А. И. Скороспешкин. Вольт-амперные характеристики скользящего контакта в статическом и динамическом режимах работы. Известия ТПИ, т. 190, 1968.
2. Л. Я. Зиннер. Исследование влияния механических факторов на коммутацию коллекторных электрических машин. Диссертация, Томск, 1968.
3. Л. Я. Зиннер, А. И. Скороспешкин, Э. К. Дамм, В. П. Каратаев. Установка для экспериментального исследования скользящего контакта щетка—коллектор. Известия ТПИ, т. 212, 1969.
4. З. Б. Вартанов. Импульсные вольтамперные характеристики щеточного контакта. ВЭП, 1957, № 2.