

ЕСТЕСТВЕННЫЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СКОЛЬЗЯЩЕГО КОНТАКТА УГОЛЬНАЯ ЩЕТКА—КОЛЛЕКТОР

Ю. П. ГАЛИШНИКОВ, А. И. СКОРОСПЕШКИН

(Рекомендована семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

Ранее [1, 2] авторы, используя физическую модель скользящего контакта для простейшего случая $b_k = b_{щ}$, показали, что вольт-амперная характеристика щетки тесным образом связана с условиями формирования контактной проводимости, а именно с временем формирования контакта и плотностью тока, при которой оно происходит. Из приведенного ниже экспериментального материала видно, что этот принципиальный вывод справедлив и для более сложных случаев коммутации. Если рассматривать вопрос с позиции теории электрических цепей, скользящий контакт представляет собой нелинейный элемент, характеристика которого зависит от протекающего через него тока. Динамическая характеристика, обнаруживаемая скользящим контактом в каждом конкретном случае коммутации, названа авторами частной естественной вольт-амперной характеристикой контакта. В [2] отмечалось также, что частная характеристика не описывает контакта в целом в отношении его электрических свойств.

Совершенно ясно, что этим далеко не исчерпывается проблема зависимости вольт-амперных характеристик скользящего контакта от его рабочих условий. Однако авторы на данном этапе работы не ставили перед собой цель исследовать влияние таких факторов, как относительная влажность окружающей среды, атмосферное давление, естественный разброс физико-химических свойств материала щеток и т. д. Это завело бы их слишком далеко. Задача состояла в том, чтобы разработать, экспериментально проверить и апробировать качественно новый способ интерпретации и учета электрических характеристик скользящего контакта применительно к машинам постоянного тока, поскольку имеющиеся методы, по мнению авторов, далеко не удовлетворительны. Именно этому вопросу посвящены ранее опубликованные работы [1, 2], а также работы авторов, публикуемые в настоящем сборнике.

Ниже излагаются некоторые результаты экспериментального исследования естественных вольт-амперных характеристик контакта щеток—коллектор. Исследование проводилось на 2-полюсном двигателе постоянного тока серии П 3-го габарита, препарированном для этой цели. Испытательная установка достаточно подробно описана в [3]. Мощность двигателя 2,4 квт при напряжении питания 175 в. Номинальная плотность тока в щеточном контакте равна при этом 12 а/см². Удельное механическое нажатие на щетку стандартное, около 200 г/см². Щеткодержатель — радиального типа с цилиндрической пружиной. Число одновременно перекрываемых щеткой коллекторных пластин равно 3. Обмотка

якоря — простая петлевая с диаметральной шагом. До описываемых исследований двигатель прошел обкатку в течение примерно 3000 час., после чего был шлифован коллектор и сменены подшипники. Профилограмма поверхности коллектора, снятая при рабочей скорости вращения 2200 об/мин, показывает, что перепады между соседними пластинами не превышают 1 мк, а амплитуда биений равна 20 мк. Таким образом, механические влияния на скользящий контакт минимальны.

Методика снятия вольт-амперных характеристик сводится к осциллографированию кривых тока коммутации двух смежных секций якоря и падения напряжения между общей для этих секций коллекторной пластиной и щеткой соответствующей полярности в период коммутации. Затем простыми построениями определяются ламельный ток и плотность этого тока для всего времени пребывания данной пластины под щеткой. Далее путем сопоставления совпадающих во времени точек кривых плотности тока и контактного падения напряжения производится построение искомой характеристики. Подобный метод применялся и другими исследователями [4, 5]. Однако авторами настоящей работы в порядке усовершенствования метода для измерения контактного напряжения применена схема на опорном диоде, которая позволяет снизить подводимое ко входу осциллографа полное напряжение якоря до величины 9 В при сохранении полезного сигнала. Точность измерения при этом существенно повышается, так как в противном случае предусилитель осциллографа забивается напряжением, на 2 порядка превышающим измеряемое.

Кроме того, в отличие от упомянутых работ на исследуемой машине было установлено всего по одной щетке на каждом бракете, что позволяет определять истинные значения мгновенных плотностей тока в контакте. В том случае, когда щеток на одном бракете несколько, при определении плотности тока легко впасть в грубую ошибку из-за неравномерности распределения тока по отдельным щеткам.

Для измерений использован осциллограф СИ-8, имеющий полосу пропускания от постоянного тока до 25 мГц.

Все испытания проводились после тщательной притирки щеток и с хорошо развитой политуры на коллекторе, для чего сразу после установки щеток данной марки производилась их приработка в течение примерно 300 час. при номинальной нагрузке.

Осциллографирование кривых осуществлялось следующим образом. Предварительно обеспечивается 2-часовой прогрев машины при номинальной нагрузке и оптимальном возбуждении дополнительных полюсов. Далее устанавливается ток подпитки, соответствующий нижней границе зоны безыскровой работы. После достижения контактом определенного динамического равновесия (выдержка 1 час) в возможно короткое время производится поочередное осциллографирование кривых тока и контактного падения напряжения. Затем ток подпитки изменяется и после соответствующей выдержки времени снимается следующая серия осциллограмм. В таком порядке фиксируются интересные кривые для ряда токов подпитки, так чтобы была охвачена вся зона безыскровой работы машины.

Во всех случаях относительная влажность окружающего воздуха поддерживалась равной $40 \pm 5\%$.

Основные результаты исследования вольт-амперных характеристик рассмотрим на примере щеток ЭГ-4Э. На рис. 1 (а, б) представлены кривые тока и контактного падения напряжения для анодно-поляризованной щетки, полученные при номинальной плотности тока в контакте 12 а/см^2 и токе подпитки дополнительных полюсов $+10\%$ от I_n , что соответствует примерно середине зоны безыскровой работы.

Как показывают приведенные осциллограммы, реверс тока успевает произойти в основном за первый коллекторный период, равный в данном

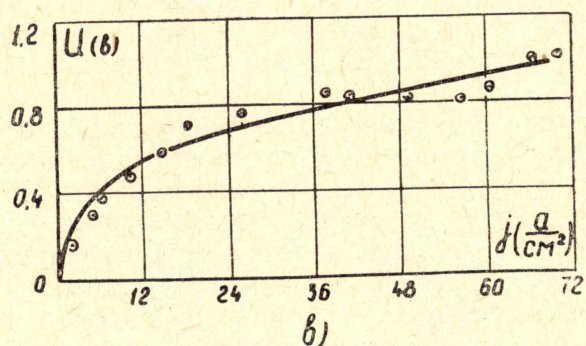
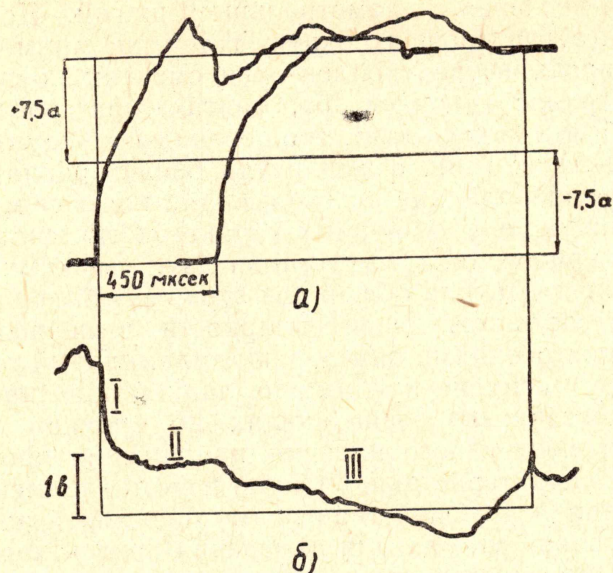


Рис. 1. Анодно-поляризованная щетка ЭГ-4Э.

- а) кривые тока коммутации двух смежных секций якоря,
- б) кривая контактного падения напряжения,
- в) частная естественная вольт-амперная характеристика при $j_H = 12$ а/см².

случае 450 мксек, а дальнейшее изменение тока за оставшееся время коммутации происходит значительно более медленно. Отмеченная особенность в большей или меньшей степени присуща всем полученным осциллограммам тока. Возможно, она не имеет общего значения, но ясно, что чем ниже удельное сопротивление материала щетки, тем быстрее происходит изменение тока в начале коммутации. В соответствии с этим вхождение пластины под щетку характеризуется высокой плотностью тока. В зависимости от степени ускорения коммутации плотность тока под щеткой в начале контактирования колеблется от 90 до 500 а/см². По мере вхождения пластины под щетку плотность тока от наибольшей начальной плавно снижается, достигая к концу первого коллекторного периода значений 30—60 а/см². В следующий за этим весьма короткий промежуток времени, когда вступает в коммутацию смежная секция, плотность тока в контакте резко снижается до 15—20 а/см². Далее контактная плотность тока изменяется более медленно в соответствии с ламельным током.

Осциллограмма контактного падения напряжения (рис. 1, б) может быть разделена на несколько характерных участков. В начальной части

кривой I всегда имеется кратковременный пик сверхнапряжения, достигающего 3—4 в и связанного с высокой плотностью тока. Следующий участок кривой II длительностью около t_k характеризуется значительно меньшими напряжениями (1,2—1,5 в), несмотря на то, что плотность тока продолжает оставаться сравнительно высокой. Снижение контактного напряжения на этом участке связано, вероятно, с интенсивным образованием или расширением проводящих пятен посредством многократных фриттингов. Заметная нерегулярность кривой напряжения в этой части также указывает на фриттинги. На участке III кривая более гладкая, и напряжения здесь ниже, чем ранее. Это означает, что образование контактных пятен на участке III уже не происходит, за исключением того случая, когда вследствие некоторой недокоммутации второй смежной секции при выходе пластины из-под щетки плотность тока резко возрастает, вызывая увеличение контактного напряжения до 3—4 в. В этот весьма кратковременный период также происходит определенное снижение удельного контактного сопротивления. Отметим, кстати, что напряжение около 4 в на сбегавшем крае щетки вызывает искрение 1 1/4—1 1/2 балла.

Таким образом, с полным основанием можно считать, что время формирования контактной проводимости в данном конкретном случае неизменно и равно t_k и что решающее влияние на вольт-амперную характеристику в этот период времени оказывает плотность тока, которая изменяется в широких пределах в зависимости от характера коммутации. В качестве показателя условий формирования контакта в общем случае с успехом может быть принята величина

$$\frac{j_0 + j_{t_k}}{2} \cdot t_k \frac{a}{\text{см}^2} \cdot \text{мк/сек}, \quad (1)$$

где j_0 — плотность тока в начале контактирования,
 j_{t_k} — плотность тока через t_k мксек после начала контактирования,
 t_k — коллекторный период.

Интересно поведение щеточного контакта при перекоммутации. Изменение направления тока вызывает появление контактного потенциала обратного знака 0,5—0,7 в, который весьма активно способствует безыскровому завершению коммутации. Соответствующие осциллограммы показывают, что токи противоположного знака как под положительной, так и под отрицательной щетками успешно приводятся до нуля от 10 а и выше (плотность тока в сбегавшей пластине достигает 45—60 а/см²).

Напротив, при некотором замедлении плотность тока от значений 6—12 а/см² в конце коммутации резко возрастает к моменту разрыва коммутируемого контура и достигает при искрении 1 1/4—1 1/2 балла порядка 60—90 а/см². Этим, по-видимому, объясняется тот факт, что практически всей зоне безыскровой работы соответствует перекоммутация большей или меньшей степени.

На рис. 2 (а, б) представлены кривые, аналогичные рассмотренным, для катодно-поляризованной щетки ЭГ-4Э, которые получены при том же токе подпитки дополнительных полюсов. Вид их в целом сходен с рассмотренными, но уровень контактного напряжения выше вследствие эффекта полярности. Меньшая относительная величина сверхнапряжения в начале контактирования свидетельствует о том, что, как отмечалось ранее [2], под катодно-поляризованной щеткой имеется некоторая начальная проводимость, обусловленная, вероятно, отлагающимися на поверхности щетки частицами меди вследствие переноса положительных ионов через контактный промежуток.

Вид полученных экспериментально частных вольт-амперных характеристик (рис. 1, в и 2, в) весьма показателен. Каждая из них имеет

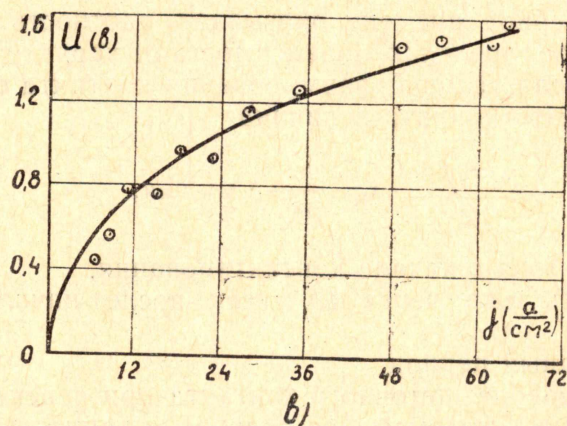
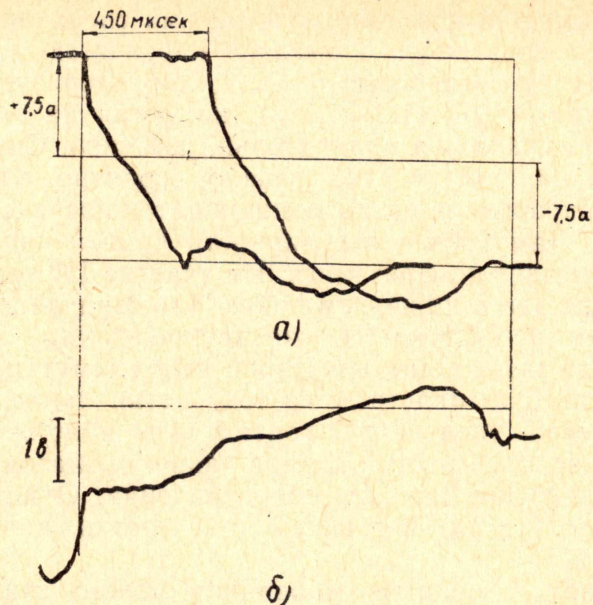


Рис. 2. Катодно-поляризованная щетка ЭГ-4Э.
 а) кривые тока коммутации двух смежных секций якоря,
 б) кривая контактного падения напряжения,
 в) частная естественная вольт-амперная характеристика при $j_n = 12$ а/см²

явно выраженный изгиб в направлении оси абсцисс. Ранее было отмечено [2], что вольт-амперная характеристика тем более изогнута, чем ниже удельное сопротивление материала щетки. Не приводимые здесь характеристики для щетки ЭГ-74, имеющей повышенное удельное сопротивление, отличаются значительно меньшим изгибом.

Необходимо отметить, однако, определенное спрямление характеристики щетки ЭГ-4Э в ее начальной части, которое тем существеннее, чем выше плотность тока в период формирования контакта. К сожалению, этот факт не удастся отразить при выбранном способе аппроксимации опытных кривых.

Обработка полученных вольт-амперных характеристик произведена методом разных площадей для последовательности точек. Эмпирическое выражение для частной характеристики имеет вид:

$$U = U_0 \cdot j^m, \quad (2)$$

где U_0 — контактное падение напряжения при единичной плотности тока ($j=1\text{ а/см}^2$),

m — величина, зависящая от общего вида характеристики.

Аппроксимация производилась при условии $m=\text{const}$ для всех характеристик, полученных при неизменной полярности щетки. В противном случае весьма затруднительно обобщение экспериментальных данных. Наибольшие невязки для кривых анодно-поляризованной щетки составляют:

средняя линейная

$$\Delta^{(1)} = \frac{\sum \Delta}{n} = 0,09,$$

средняя квадратичная

$$\Delta^{(2)} = \sqrt{\frac{\sum \Delta^2}{n}} = 0,109.$$

Для характеристик катодно-поляризованной щетки невязки несколько выше в силу большей нерегулярности кривых.

Эмпирическая зависимость U_0 от особенностей формирования контакта выражается следующим образом:

$$U_0 = \frac{C}{\left(\frac{j_0 + j_{тк}}{2} \cdot t_{тк}\right)^n}, \quad (3)$$

где C и $n < 1$ — постоянные величины. Соответствующие графики для номинальной плотности тока в контакте 12 а/см^2 приведены на рис. 3 а, б (кривые 1). Эти кривые, имеющие вид параболы, наглядно показывают зависимость частных естественных вольт-амперных характеристик от условий формирования контактной проводимости. Действительно, при малых значениях $\frac{j_0 + j_{тк}}{2}$ проводящие пятна под щеткой образу-

ются сравнительно вяло, и относительная величина контактного падения напряжения, как показывают кривые на рис. 3, при этом заметно увеличивается. Напротив, когда $\frac{j_0 + j_{тк}}{2}$ растет с увеличением степени ускорения коммутации, образуется большее количество проводящих пятен или увеличиваются их размеры, и в результате контактное напряжение уменьшается.

Приведенные графики показывают, что скользящий контакт имеет тенденцию стабилизироваться по достижении достаточно больших значений $\frac{j_0 + j_{тк}}{2} t_{тк}$. Это предельное состояние достигается, когда все возможные контактные точки уже реализованы.

Кривые 2 на рис. 3 получены при номинальной плотности тока в контакте 6 а/см^2 . Как видно, эти кривые по общему характеру сходны с рассмотренными выше.

Области, заключенные между кривыми 1 и 2, описывают вольт-амперные характеристики для номинальных плотностей тока от 6 до 12 а/см^2 при сравнительно широком диапазоне изменения условий формирования контакта. При желании можно без особого труда получить семейство естественных вольт-амперных характеристик для любой промежуточной плотности тока.

На основании всего рассмотренного обобщенная вольт-амперная характеристика скользящего контакта для какой-либо номинальной плотности тока представляется выражением:

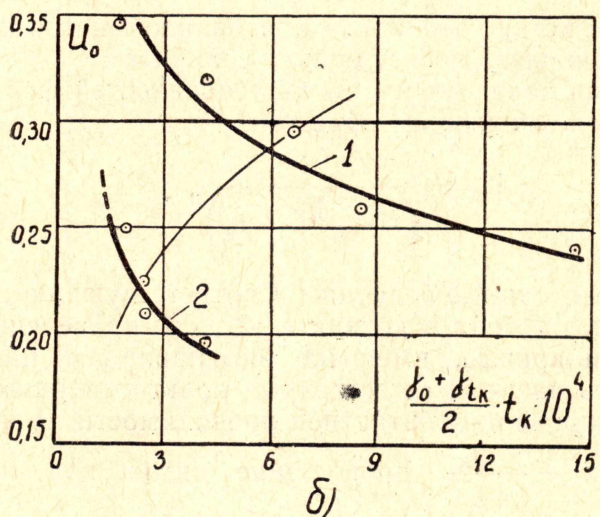
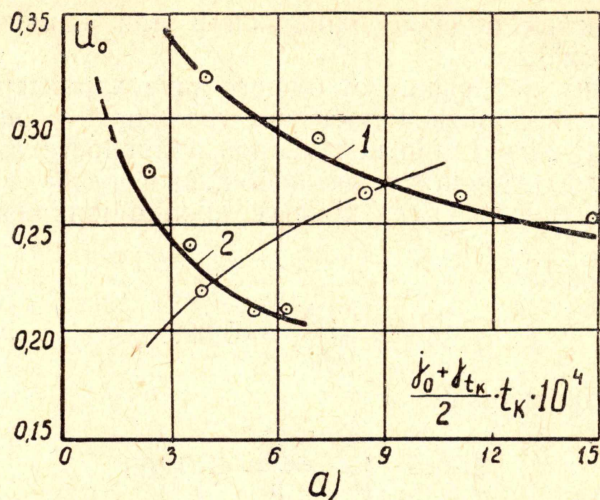


Рис. 3. Зависимости $U_0 = U_0 \left(\frac{j_0 + j_{tk}}{2} \cdot t_k \right)$

для щетки ЭГ-4Э

- а) анодно-поляризованная щетка,
б) катодно-поляризованная щетка.

$$U = \frac{C}{\left(\frac{j_0 + j_{tk}}{2} \cdot t_k \right)^n} \cdot j^m. \quad (4)$$

Выражение (4) описывает семейство частных естественных вольт-амперных характеристик скользящего контакта и может быть использовано при расчетах коммутации и коммутационной устойчивости машин постоянного тока с различными условиями коммутации.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. И. Скороспешкин, Ю. П. Галишников, Э. Г. Чеботков. Электродинамические свойства скользящего контакта. Труды II научной сессии вузов, вып. 5, 1966.
2. Ю. П. Галишников, А. И. Скороспешкин. К вопросу о неустойчивости динамических вольт-амперных характеристик скользящего контакта угольная щетка—коллектор. Известия ТПИ, т. 160, 1966.
3. А. И. Скороспешкин, Ю. П. Галишников. Исследование коммутации машин серии «П». Известия ТПИ, т. 145, 1966.
4. F. Jordan, Экспериментальное исследование коммутации, ETZ, 30, 1909.
5. О. Г. Вегнер. Теория и практика коммутации машин постоянного тока. Госэнергоиздат, 1961.