

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СКОЛЬЗЯЩЕГО КОНТАКТА

А. И. СКОРОСПЕШКИН, В. И. КОСТЫЛЕВ, Р. Ф. БЕКИШЕВ

(Рекомендована научным семинаром кафедр электрических машин
и общей электротехники)

Глубокое изучение физических свойств скользящего контакта является непременным условием дальнейшего развития и решения теоретических и практических вопросов, связанных с проблемой коммутации.

В настоящей работе исследуются физические процессы, происходящие в скользящем контакте щетка—ламель коллектора с учетом емкости в контактном слое, предлагается методика ее определения, рассматриваются естественные динамические вольтамперные характеристики и дается их математическая аппроксимация.

Известно, что действительный механический контакт между двумя телами (щеткой—ламелью коллектора) имеет место лишь на сравнительно малой доле кажущейся макроскопической поверхности контактирования [1]. При этом прямой электрический контакт имеется лишь на части поверхности, воспринимающей нажатие, которая соответствует действительному механическому контакту. Участки прямого электрического контакта так называемые а-пятна имеют размеры, не превышающие 30—40 мк, причем их форма и происхождение связаны с микрорельефом поверхности коллектора. В случае, когда вся поверхность контакта покрыта оксидной пленкой, электрическая проводимость в контакте происходит путем пробоя пленки, при этом напряженность электрического поля достигает величин порядка 10^6 — 10^7 в/см.

Доказано, что при наличии на поверхности коллектора перепадов уровня коллекторных пластин $\Delta_{\text{мин}} < 0,5$ мк безотрывное контактирование обеспечивается за счет упругих свойств электрощеточных материалов. Таким образом, щетка и коллектор разделены при вращении последнего небольшим зазором, величина которого может колебаться в пределах 0,01—1 мк.

Рассматривая оксидную пленку на коллекторе, имеющую, по данным [2], толщину 40—500 Å, как диэлектрик и учитывая разделение контактов щетка—ламель, физическую модель скользящего контакта можно представить в виде рис. 1.

Так как контактирование осуществляется лишь в нескольких точках, размеры которых намного меньше расстояния между контактирующими точками, схему замещения скользящего контакта можно представить в виде параллельного соединения дифференциальной емкости контакта и переменного активного сопротивления точек контактирования (рис. 2).

Емкость между контактирующими элементами щетка—ламель коллектора зависит от расстояния между контактами (последнее включает

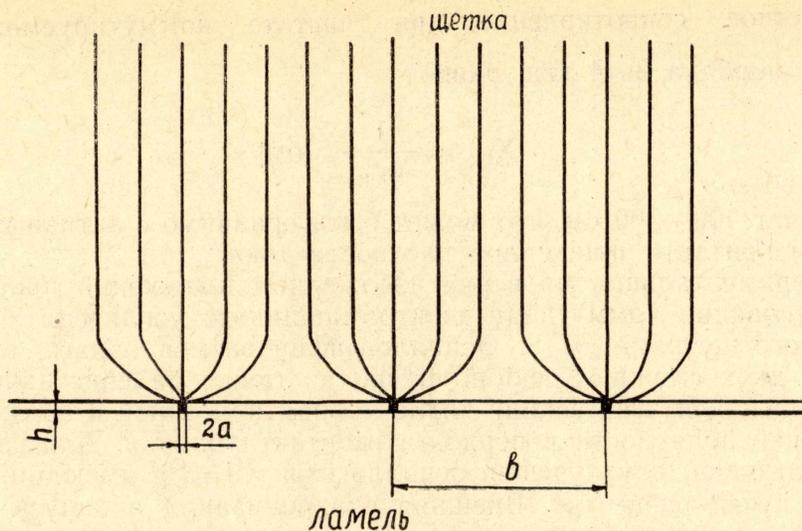


Рис. 1. Физическая модель скользящего контакта

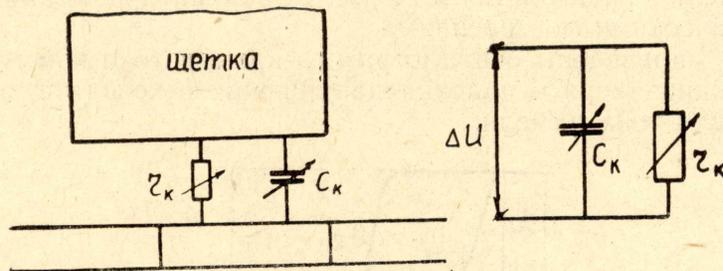


Рис. 2. Схема замещения скользящего контакта

в себя толщину оксидной пленки и разделение контактов) и кажущейся площади контактирования. При этом можно пренебречь площадью действительного электрического контакта, так как последняя намного меньше кажущейся.

Емкость между двумя параллельными контактами, площадью A и расстоянием h при $\epsilon=1$ определяется

$$C_k = \epsilon_0 \int \frac{dA}{h} |\phi| .$$

В конкретном случае при кажущейся площади контактирования $A=1 \text{ см}^2$ и расстоянии между контактами $h=0,01 \text{ мк}$ максимальное значение емкости скользящего контакта достигает величины $C_{\text{max}}=0,0885 \text{ мкф}$.

При постоянном расстоянии между контактами емкость изменяется от 0 до C_{max} по закону изменения кажущейся площади контактирования при вращении коллектора. Если учесть, что разделение между контактами также не остается постоянным, можно видеть, что закон изменения емкости скользящего контакта определить весьма затруднительно.

В свою очередь, активное сопротивление контакта, зависящее от плотности тока, также является переменным.

Основная трудность при этом состоит в определении соотношения между активным и емкостным сопротивлениями скользящего контакта.

Емкостное сопротивление при частоте коммутируемого тока

$$f_1 = \frac{1}{T_k} \quad \text{порядка } 3-4 \text{ кгц равно}$$

$$X_{с\kappa} = \frac{1}{\omega c_{\kappa}} \quad [\text{ом}]$$

и составляет 400—300 ом, что может быть сравнимо с активным сопротивлением контакта при малой плотности тока.

Экспериментальная проверка изложенных положений проводилась при исследовании коммутации электромашинного усилителя ЭМУ-12А, снабженного щетками ЭГ-8. Осциллографировались кривые тока коммутации двух смежных секций якоря, а также падение напряжения между общей для этих секций коллекторной пластиной и щеткой, соответствующей полярности в период их контактирования. Для измерений был использован двухлучевой осциллограф С1=16, имеющий общую для двух лучей развертку. Внешняя синхронизация и запуск ждущих разверток осуществляется сигналом, полученным электромагнитным путем и жестко связанным со скоростью вращения якоря. Конструкция синхронизирующего устройства позволяет производить запуск осциллографа в любой требуемый момент времени в течение каждого оборота коллектора.

Ток ламели определяется для всего времени пребывания под щеткой геометрическими построениями.

На рис. 3 приведены осциллограммы кривых тока коммутации двух смежных секций якоря и падения напряжения в контакте, а также построена кривая тока ламели.

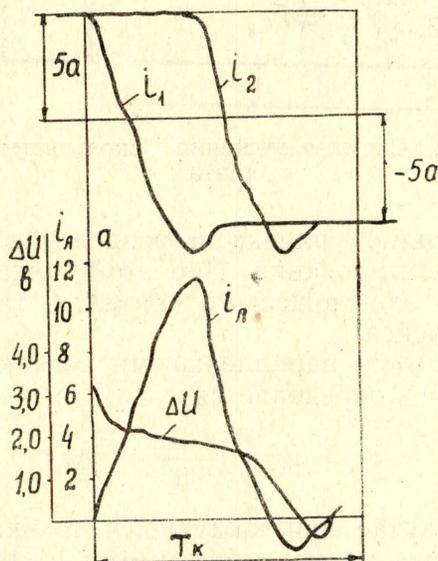


Рис. 3. Осциллограммы тока секций и падения напряжений.

i_1, i_2 — токи секций, $i_{л}$ — ток ламели, ΔU — контактное падение напряжения, T_k — период короткого замыкания щетки ламелью

Анализируя указанные осциллограммы, легко увидеть, что ток ламели достигает нулевого значения раньше, нежели падение напряжения, иными словами, имеет место несовпадение фаз тока и падения напряжения, что подтверждается наличием емкости скользящего контакта.

Для того, чтобы выяснить, обусловлена ли емкость контакта наличием тонких пленок окиси на коллекторе или разделением контактов при вращении коллектора, поставлен следующий эксперимент. Осцил-

лографировались кривые тока коммутации смежных секций и падения напряжения в контакте после продолжительной наработки политуры и определялся временной сдвиг между током ламели и падением напряжения. Затем с помощью стеклянной бумаги снималась политура и вновь производилось осциллографирование. При этом временной сдвиг уменьшался. В результате опыта выяснено, что высокие емкости контакта обусловлены в основном наличием пленки окиси, хотя зазор между контактами также участвует в этом процессе.

Опытами Parker'a [3] также показано, что для контактов, не имеющих окисной пленки, золото—графит и графит—графит высокие емкости контакта тоже имеют место.

При осциллографировании кривой тока и напряжения на короткозамкнутом коллекторе с использованием переменного тока высокой частоты, соответствующей частоте тока коммутации, временного сдвига между током ламели и падением напряжения не наблюдалось. Это объясняется совершенно другим характером изменения нагрузки скользящего контакта. Действительно, на короткозамкнутом коллекторе имеет место изменение только во времени тока, проходящего по щетке, в коммутационном же процессе на коллекторе электрической машины происходит периодическое перераспределение тока по отдельным участкам контактной поверхности щетки.

Анализируя полученные осциллограммы (рис. 3), видим, что характер изменения тока ламели и падения напряжения в контакте зависит от соотношения переменных τ и ϵ скользящего контакта. Так, при ускоренной коммутации на набегающем крае плотность тока высока, а емкость незначительна, в связи с небольшой площадью перекрытия ламели щеткой, и контактирование осуществляется полностью через активное сопротивление. По мере продвижения пластины под щеткой плотность тока уменьшается до нуля, а площадь контакта щетка—ламель и, соответственно, емкость становятся максимальными. Так как емкостью запасена соответствующая энергия, при достижении током нулевого значения имеет место определенная величина падения напряжения в скользящем контакте.

При замедленной коммутации на набегающем крае плотность тока близка к нулю, однако емкость невелика, поэтому реактивность контакта проявляется слабее, нежели при ускоренной коммутации при соответствующей плотности тока. На сбегающем крае при незначительной емкости контактного слоя имеет место высокая плотность тока и реактивность скользящего контакта практически не проявляется.

Величина и соотношение между емкостью и активным сопротивлением скользящего контакта непосредственно связаны с изменением действительного периода коммутации. Этот вопрос подробно рассмотрен в [4].

Точное измерение емкости скользящего контакта в реальной машине сопряжено с большими трудностями, так как величина емкости зависит от двух переменных A и h .

Единственным способом для этой цели может быть принят косвенный, основанный на измерении угла сдвига фаз между током ламели и падением напряжения в контакте.

На рис. 4 представлена схема измерения емкости. Измерение производилось методом сравнения емкости скользящего контакта с емкостью эталонного конденсатора C_0 , причем подключение эталонной емкости параллельно емкости контакта производилось лишь в течение времени контактирования щетки с исследуемой коллекторной пластиной с помощью контакта K . Для этой цели на валу токосъемника устанавливалось кольцо, изготовленное из текстолита, и на его поверхности

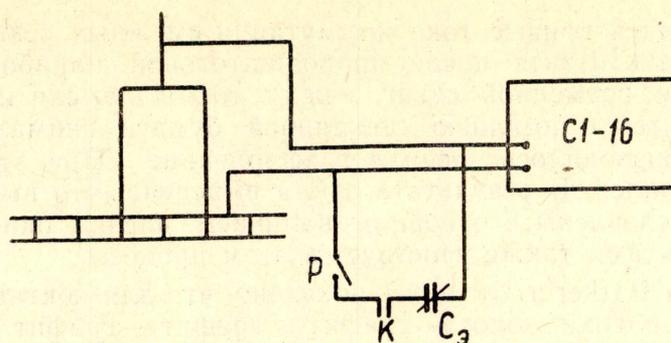


Рис. 4. Схема измерения максимального значения емкости

в аксиальном направлении размещалась медная пластина шириной, равной ламели коллектора. По поверхности кольца скользят два контакта, которые замыкаются в момент нахождения ламели под щеткой. Снимаются осциллограммы кривых тока коммутации и падения напряжения в контакте при разомкнутом рубильнике P и оценивается фазовый сдвиг. Затем, замкнув P , подключаем эталонную емкость C_3 и, изменяя ее величину, добиваемся увеличения фазового сдвига вдвое. Очевидно, в этом случае величина емкости контакта равна величине эталонной емкости, так как C_3 и C_K соединены параллельно. Таким методом можно определить лишь величину максимальной емкости скользящего контакта. Естественно, что внешняя синхронизация осциллографа в этом случае должна быть хорошо настроена. Величина максимальной емкости, измеренная данным методом, составляет 0,03—0,05 мкф.

Для сравнительной оценки величины емкости контактного слоя проведено ее измерение в случае неподвижных контактов при различном их разделении. Емкость неподвижной контактной пары щетка—ламель коллектора можно измерить кулоностатическими методами, широко применяемыми в электрохимии. Из электрохимии известно, что, если расстояние между двумя поверхностями, имеющими противоположные заряды, исчезающе мало, совокупность этих поверхностей определяет характер двойного электрического слоя, где имеет место скачок потенциала, пропорциональный плотности зарядов на обкладках двойного слоя. Скачки электродных потенциалов на границе фаз непосредственно связаны с образованием пограничных двойных слоев. Механизм образования двойного слоя состоит в том, что адсорбированные на фазовой границе дипольные молекулы, например молекулы воды, ориентируются определенным образом.

Работа контактной пары щетка—ламель коллектора в реальных условиях полностью соответствует механизму образования двойного слоя.

Для измерения емкости принята схема, применяемая в электрохимии для определения параметров электрохимической реакции [5].

Принципиальная схема измерительной установки приведена на рис. 5.

Измерение заряда исследуемого электрода (и.э.) осуществляется путем разряда на него конденсатора C_1 , заряженного предварительно от батареи B . Конденсатор C_1 должен быть высокого качества и без утечки, чтобы можно было рассчитать изменение заряда по уравнению

$$\Delta Q = c_1 U_B.$$

Переключение конденсатора C_1 на исследуемые электроды осуществляется с помощью реле, которое одновременно производит запуск осциллографа. Заряд электрода изменяется за время 0,1—1 мксек, в

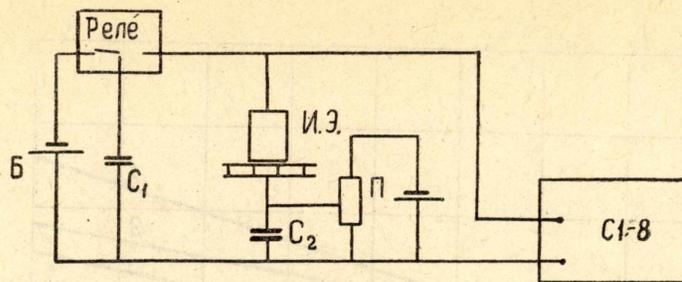


Рис. 5. Принципиальная схема измерительной установки для определения C

течение которого необходимо следить за изменением потенциала. Потенциал φ достигает своего максимального значения φ_{\max} , после чего начинает падать до нуля. Имея величину потенциала φ_{\max} , емкость двойного слоя можно определить по формуле

$$c_k = c_d = \frac{c_1 \varphi_{\max}}{U_B}$$

В измерительной схеме потенциометр Π служит для компенсации равновесного потенциала, так что на осциллографе до изменения заряда электрода напряжение должно быть равно нулю, чтобы сопротивление потенциометра не увеличивало время заряжения двойного слоя, потенциометр шунтируется емкостью C_2 большой величины.

Указанный метод позволяет просто определять величину емкости неподвижного контакта, что с помощью моста переменного тока сделать трудно из-за наличия псевдоемкости, увеличивающей истинное значение C_k .

Однако этим методом можно лишь установить наличие емкости контакта или определить ее порядок, так как предварительно перед измерением устанавливается определенное разделение контактов. Так, при установке среднего зазора $0,5$ мк величина емкости составляет $0,03-0,05$ мкф.

Результаты экспериментального исследования естественных динамических вольтамперных характеристик скользящего контакта щетка — коллектор подтверждают справедливость принятой физической модели скользящего контакта.

Как показало осциллографирование кривых тока коммутации при использовании щеток ЭГ-8, действительный период коммутации значительно отличается от теоретического, даже при обеспечении удовлетворительных механических условий работы коллектора. Состояние поверхности коллектора контролировалось снятием профилограммы коллектора с помощью профилометра с емкостным датчиком [6].

Построение естественных динамических вольтамперных характеристик производится путем сопоставления во времени точек кривых плотности тока и падения напряжения [7].

Вольтамперные характеристики катодно- и анодно-поляризованных щеток соответственно для продольной и поперечной цепи ЭМУ-12А приведены на рис. 6 и 7.

Анализируя естественные динамические вольтамперные характеристики, необходимо отметить, что их вид полностью определяется характером коммутации. Величина падения напряжения между щеткой и коллекторной пластиной, контактирующей со щеткой определенной полярности, зависит от величины и скорости изменения плотности тока и реактивности контакта. Последняя сказывается значительно лишь

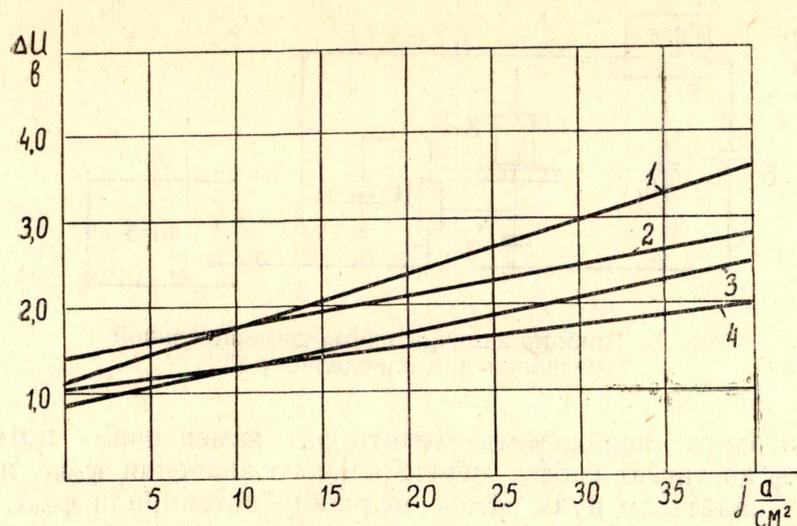


Рис. 6. Вольтамперные характеристики катодно- и анодно-поляризованной щеток продольной цепи ЭМУ-12А.

1 — вольтамперная характеристика катодно-поляризованной щетки на нижней границе безыскровой зоны; 2 — то же на верхней границе безыскровой зоны; 3 — вольтамперная характеристика анодно-поляризованной щетки на нижней границе безыскровой зоны; 4 — то же на верхней границе безыскровой зоны

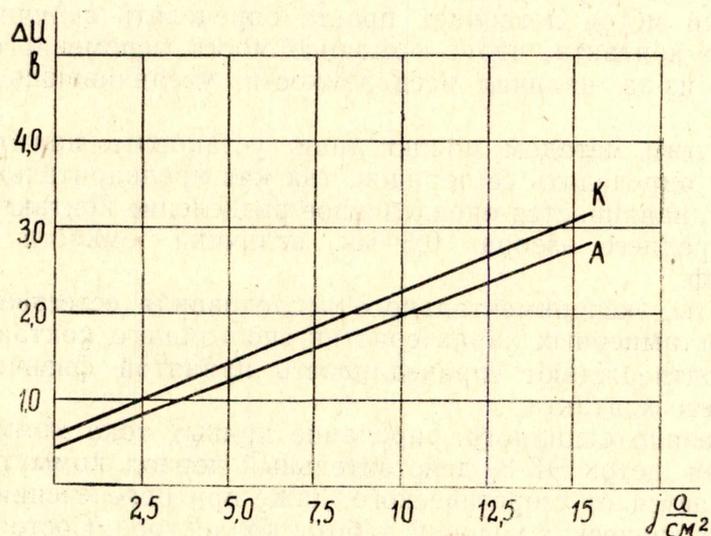


Рис. 7. Вольтамперные характеристики катодно- и анодно-поляризованной щеток поперечной цепи ЭМУ-12А

при плотностях тока, близких нулю, и величина падения напряжения ΔU_0 в этот момент времени может достигать значений 1,0—1,5 в. Так, при ускоренной коммутации момент времени, когда плотность тока достигает нулевого значения, соответствует наибольшему значению емкости скользящего контакта, и величина падения напряжения ΔU_0 максимальна. При последующем изменении характера коммутации от сильно ускоренной к прямолинейной и далее к замедленной момент перехода тока через нуль все более смещается к сбегавшему краю щетки (действительный период коммутации стремится к теоретическому). При этом мгновенное значение емкости контакта, соответствующее

моменту перехода тока ламели через нуль, значительно уменьшается. Это, естественно, влечет за собой снижение величины падения напряжения ΔU_0 . Если бы с помощью регулирования тока добавочных полюсов достигнуть такой степени замедления коммутации, при которой ток ламели становится равным нулю в момент выхода ламели из-под щетки, а начало контактирования совпадает с моментом вхождения пластины под щетку, реактивность скользящего контакта сказываться не будет ни на сбегавшем, ни на набегавшем краях щетки. Однако таких условий в реальных машинах достигнуть невозможно.

Как показали исследования коммутации по продольной и поперечной осям ЭМУ-12А, при различных условиях коммутации в пределах безыскровой зоны, величина падения напряжения ΔU_0 , обусловленная реактивностью скользящего контакта, изменяется в широких пределах: (1,5—0,6) в для катодно-поляризованной щетки и (1,1—0,4) в для анодно-поляризованной.

Характер изменения падения напряжения скользящего контакта при больших плотностях тока определяется в основном величиной и скоростью изменения плотности тока. Так, при ускоренной коммутации плотность тока резко уменьшается и формирование контактной проводимости происходит быстро путем интенсивного расширения контактных пятен посредством В-фриттинга. При этом уровень падения напряжения несколько понижается. При замедленной коммутации величина и скорость изменения плотности тока незначительны в начале контактирования, возрастая лишь к концу периода коммутации, поэтому формирование контактной проводимости происходит вяло и уровень падения напряжения резко повышается. Этим объясняется малый наклон вольтамперных характеристик к оси плотности тока при ускоренной коммутации и значительный — при замедленной.

Большое количество опытов, проведенных с использованием щеток ЭГ-8, показало, что для данной марки щеток в реальных условиях работы скользящего контакта зависимость переходного падения напряжения от плотности тока в контакте выражается прямой линией. Следует отметить, что при прямолинейной коммутации, которую можно обеспечить регулировкой добавочных полюсов, естественная динамическая вольтамперная характеристика обращается в точку, так как плотность тока и падение напряжения в контакте постоянны.

Различие в вольтамперных характеристиках анодно- и катодно-поляризованных щеток объясняется известным эффектом полярности.

Полученные естественные динамические вольтамперные характеристики с достаточной для практических расчетов точностью могут быть аппроксимированы выражением вида

$$\Delta U = \Delta U_0 + K j.$$

Для катодно- и анодно-поляризованных щеток соответственно выражение имеет вид

$$\Delta U_K = \Delta U_{OK} + K_K \cdot j,$$

$$\Delta U_A = \Delta U_{OA} + K_A \cdot j,$$

где

$\Delta U_{OK}, \Delta U_{OA}$ — падения напряжения при плотности тока, равной нулю, для катодно- и анодно-поляризованной щеток,

K_K, K_A — тангенсы углов наклона вольтамперной характеристики к оси плотности тока соответственно для катодно- и анодно-поляризованной щеток.

В заключение необходимо отметить, что в работах [8, 9, 10, 11] сделана попытка учитывать при расчетах коммутации емкость между рядом лежащими коллекторными пластинами и распределенную емкость

секций. При этом отмечается влияние емкости на коммутацию тока как фактора, уменьшающего вероятность искрообразования. Емкость же между щеткой и ламелью коллектора не учитывается, хотя в действительности она является основной как по величине, так и по ее роли в коммутационном процессе.

Кроме того, по предлагаемой авторами [12] схеме ведется определение емкости между секцией обмотки якоря и пакетом якоря, которая затем вводится в расчет коммутации, в то время как эта емкость, по существу, не принимает участия в коммутационном процессе.

Исследованиями, проведенными нами с использованием щеток различных типов, отмечена следующая особенность. Щетки, обнаруживающие высокую реактивность скользящего контакта (ЭГ-8, ЭГ-74), обладают, как правило, высокими коммутающими свойствами.

Таким образом, можно считать, что одной из важных характеристик щеток в коммутационном отношении является соотношение между активным сопротивлением и емкостью при плотности тока, достигающей нулевого значения. Вместе с тем учет реактивности скользящего контакта позволяет ответить на вопрос, каким образом щетки, обладающие высокими коммутающими свойствами, удерживают в переходном слое у сбегающего края определенную величину напряжения.

В результате проведенных исследований можно сформулировать следующие выводы:

1. Построена физическая модель скользящего контакта в электрических машинах, согласно которой контакт щетка—ламель коллектора необходимо рассматривать как нелинейную цепь при параллельном соединении переменных r_k и C_k .

2. Предлагаемый способ определения емкости скользящего контакта путем сравнения с емкостью эталонного конденсатора позволяет измерить величину максимальной емкости скользящего контакта в реальных условиях работы коллекторных электрических машин.

3. Естественные динамические вольтамперные характеристики, учитывающие реактивность скользящего контакта, аппроксимируются выражением вида

$$\Delta U = \Delta U_0 + K \cdot j.$$

4. Коммутающие свойства щеток неразрывно связаны с наличием емкости в контакте щетка—ламель коллектора и соответственно величины падения напряжения, которую удерживает щетка у сбегающего края при ускоренной коммутации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Р. Холм. Электрические контакты, ИИЛ, 1961.
2. Van Brunt C., Savage R. N. Коллекторные пленки, часть II. General Electric Review, 1945, 47, 8.
3. Parker D. A., The Surface Properties of Copper-Graphite Contacts, Conf. Commut. Rotat. Mach., London, 1964.
4. А. И. Скороспешкин, Л. Я. Зиннер, Р. Ф. Бекишев. Влияние механики коллекторно-щеточного узла на период короткого замыкания щетки ламелью. Известия ТПИ, том 190, 1968.
5. Б. Б. Дамаскин. Принципы современных методов изучения электрохимических реакций. Изд-во МГУ, 1965.
6. Л. Я. Зиннер, А. И. Скороспешкин. Прибор для измерения малых перемещений, Известия ТПИ, т. 172, 1967.
7. Ю. П. Галишников, А. И. Скороспешкин. Естественные вольтамперные характеристики скользящего контакта угольная щетка-коллектор. Известия ТПИ, т. 172, 1967.
8. Е. М. Синельников. К вопросу о коммутации машин постоянного тока. «Электричество», № 5, 1952.

9. Н. С. Сиунов, Б. В. Ковылов. Влияние добавочной емкости на коммутацию тока. ИВУЗ — Электромеханика, № 6, 1959.

10. Б. В. Ковылов. Исследование коммутации тока в электрических машинах с учетом емкости секций и коллектора, ИВУЗ — Электромеханика, № 3, 1962.

11. Б. К. Тур. К вопросу коммутации в машинах постоянного тока. «Электричество», № 11, 1956.

12. Е. М. Синельников, А. Г. Назикян, В. В. Клейменов, Ф. И. Чернявский. Применение счетных машин непрерывного действия для исследования коммутации машин постоянного тока. ИВУЗ — Электромеханика, № 10, 1960.