

**К ВОПРОСУ О НЕСТАБИЛЬНОСТИ ДИНАМИЧЕСКИХ
ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СКОЛЬЗЯЩЕГО
КОНТАКТА УГОЛЬНАЯ ЩЕТКА-КОЛЛЕКТОР**

Ю. П. ГАЛИШНИКОВ, А. И. СКОРОСПЕШКИН

(Представлена семинаром кафедр электрических машин
и общей электротехники)

Вольт-амперные характеристики скользящего контакта в зависимости от способа их снятия различают на статические и динамические.

Согласно определению [1, 2, 3], каждая точка статической вольт-амперной характеристики, получаемой на короткозамкнутом коллекторе или гладком контактном кольце, отражает установившееся (статическое) состояние контакта. Для достижения установившегося состояния необходимы выдержки времени до получаса при каждом фиксируемом значении тока. При этом контактные падения напряжения, соответствующие каждой ступени тока, достигают своего наименьшего значения. Поскольку, кроме того, при снятии статической характеристики линии тока в пределах кажущейся контактной поверхности распределены равномерно, то есть отсутствует вынужденное повышение или снижение плотности тока в какой-либо части лицевой поверхности щетки, как это имеет место при ускоренной или замедленной коммутации, получаемая кривая с достаточным основанием характеризует работу щеточного контакта лишь в условиях классической прямолинейной коммутации. Однако при этом остается неучтенным имеющее место в действительности различие в работе набегающего и сбегающего краев щетки. Кроме того, использование статических характеристик неправомерно для расчета коммутации машин постоянного тока, работающих в переходных режимах.

Использование же при расчетах коммутации динамических вольт-амперных характеристик, представляющих собой зависимость мгновенных значений контактного падения напряжения от тока при сравнительно быстром изменении последнего, затруднительно ввиду их чрезвычайной неустойчивости. Предметом настоящей статьи является одна из основных сторон этой неустойчивости, а именно, зависимость динамических вольт-амперных характеристик от величины, а также скорости и направления изменения тока, протекающего через контакт угольная щетка-коллектор в условиях электрической машины.

Известно, что действительный механический контакт двух соприкасающихся поверхностей всегда меньше кажущейся макроскопической поверхности контактирования. Связь между величиной нажатия на щетку и поверхностью, воспринимающей нажатие, выражается как [2]:

$$P = \xi \cdot H \cdot S,$$

где ξ — коэффициент сжатия материала (обычно 0,25—0,5),
 H — твердость материала щетки.

Площадь электрического контакта при этом еще меньше вследствие наличия на поверхности медного коллектора тонкой оксидной пленки. Согласно [5], первоначальное окисление медной поверхности в окружении кислорода воздуха происходит чрезвычайно быстро, так что в течение нескольких секунд образуется пленка окисла толщиной около 30 Å. Хотя поверхностная пленка Cu_2O является полупроводником с положительным коэффициентом Холла (p - n переход на границе с металлом), ее собственное электрическое сопротивление велико [2], и когда пленка не нарушена механически, протекание через нее тока осуществляется путем пробоя. Электрический пробой пленки Cu_2O , называемый фриттингом, является типичным зерновым пробоем тонкого полупроводника, связанным с разрушением кристаллической решетки пленки, и характеризуется напряженностью поля 10^6 — 10^7 в/см. Очевидно, что напряжение пробоя определяется толщиной пленки. При толщине последней 50—400 Å оно составляет 0,5—1,5 в [2, 4].

Разрушение пленки вследствие фриттинга приводит к образованию металлических мостиков или проводящих пятен круглой или эллиптической формы. Сопротивление стягивания для одного из контактирующих элементов в случае круглой проводящей поверхности определяется следующим образом [2]:

$$R_a = \frac{\rho}{4 \cdot a},$$

где

ρ — удельное сопротивление материала контакта, в данном случае графита,

a — радиус круглого проводящего пятна.

Для случая контакта угольная щетка — коллектор величина R_a представляет собой одновременно контактное сопротивление единичного пятна, поскольку сопротивлением стягивания в меди можно пренебречь.

Новейшими экспериментальными исследованиями полностью подтверждается описанный механизм электрической проводимости контакта. Исследование поверхности медного коллектора с помощью электрода из золотой проволоки [4] позволило установить, что поверхностная пленка испещрена малыми пятнами эллиптической формы, вытянутыми вдоль направления вращения коллектора. Электрическое сопротивление таких пятен практически равно нулю. Микроскопический анализ поверхности коллектора [5] также показывает наличие хорошо отполированных металлических пятен диаметром 10—20 мк, количество которых, определенное статистическим путем с использованием щетки специальной формы, равно примерно 30 для щетки 5×5 мм. Наконец, при измерении температуры контактной поверхности с помощью фотоэлемента [6] обнаружено, что протекание тока сопровождается появлением явно выраженных пятен нагрева, что свидетельствует о локальном характере протекания тока. Наибольшие наблюдаемые температуры составляют 600—700°C.

Особенность скользящего контакта состоит в том, что металлические контактные пятна, образующиеся во время пребывания данного участка поверхности коллектора под щеткой, при перемещении от одной щетки до другой, противоположной полярности, успевают в значительной степени окислиться вследствие трения поверхности коллектора о воздух. Фрикционное окисление ускоряется действием высоких температур, имеющих место в точках электрического контакта. Механизм окисления подробно исследован Е. Хольм. Согласно [7], окисление вследствие трения о воздух в течение одного или нескольких оборотов коллектора почти полностью уничтожает контактные пятна. Однако, за время прохождения данной коллекторной пластины от одной щетки до

щетки противоположной полярности пятна лишь уменьшают свои размеры. При этом фриттинги вновь становятся необходимыми, чтобы привести в соответствие размеры контактных пятен и ток, протекающий через щетку.

Таким образом, электрическая проводимость в контакте щетка-коллектор осуществляется в условиях протекания двух взаимнопротивоположных процессов. Это, с одной стороны, процесс разрушения оксидной пленки путем механического истирания и фриттингов, сопровождающийся образованием на поверхности коллектора дискретных металлических проводящих пятен и, с другой стороны, окисление образующихся при фриттинге проводящих пятен вследствие трения поверхности коллектора о воздух. Названные процессы находятся в определенном динамическом равновесии.

Как видим, электрический скользящий контакт представляет собой динамическую систему и, как любая подобная система, отличается вполне определенной инерционностью. Инерционность электрических свойств скользящего контакта обусловлена физической природой происходящих процессов. Действительно, образование проводящих пятен не происходит мгновенно. Формирование канала фриттинга требует времени около $1/300$ сек [2], так что при имеющихся обычно значениях ламельной частоты фриттинги не успевают развиваться. Например, при частоте напряжения порядка 5 кГц фриттинг завершается в течение нескольких полупериодов (при отсутствии окисления в промежутках между приложениями напряжения). С другой стороны, окисление трением о воздух также не приводит к мгновенному и полному уничтожению контактных пятен. В определенных условиях эти пятна способны сохраняться в течение нескольких часов [4]. Поверхность коллектора, условно говоря, запоминает величину тока, протекавшего через контакт.

Приведенная на рис. 1 искусственная динамическая вольт-амперная характеристика убедительно подтверждает инерционность электрического скользящего контакта. Характеристика получена для анодно-поляризованной щетки ЭГ-4Э, скользящей по короткозамкнутому коллектору, поверхность которого покрыта оксидной пленкой. Образование пленки происходило в течение 4—6 час. при токе 8 а (средняя плотность тока в контакте 6 а/см²). Снятие характеристики производилось при монотонном возрастании тока через контакт за время $0,1$ сек от нуля до 8 а и обратном его снижении до нуля. В соответствии с этим характеристика имеет восходящую и нисходящую ветви. Расхождение этих ветвей и является свидетельством инерционности скользящего контакта.

Процессу формирования электрической проводимости соответствует восходящая ветвь характеристики (рис. 1), которая явно нелинейна

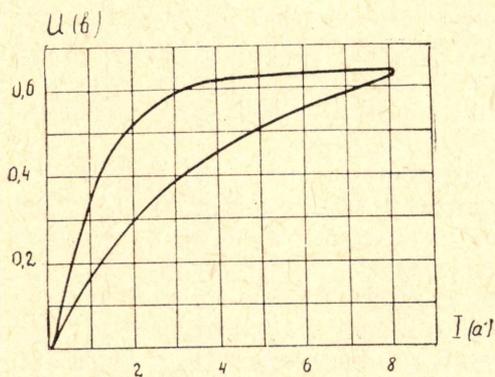


Рис. 1. Искусственная динамическая вольт-амперная характеристика щетки ЭГ-4Э.

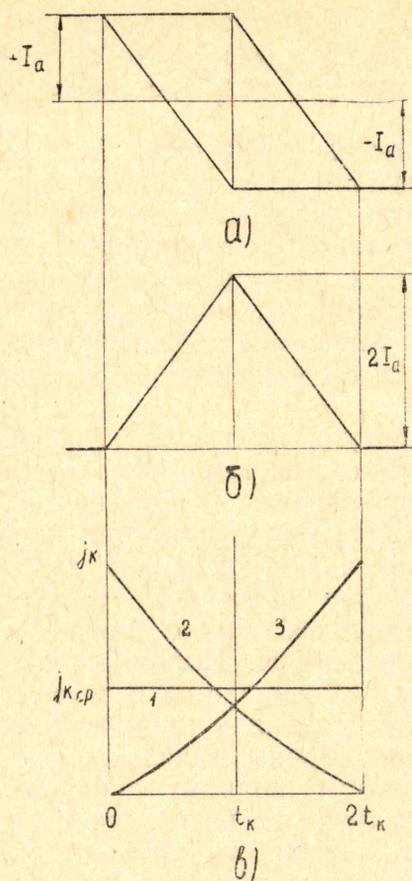


Рис. 2. а — кривые тока коммутации двух смежных секций якоря; б — ток коллекторной пластины; в — изменение плотности тока коллекторной пластины. 1 — прямолинейная коммутация, 2 — нормально-ускоренная коммутация, 3 — замедленная коммутация.

верхности коллектора образуются металлически проводящие пятна, достаточные для протекания данного тока. Количество и размеры этих пятен определяются величиной тока и временем формирования контакта. При последующем уменьшении тока контактные пятна, не успевая заметно окислиться, продолжают работать, обеспечивая тем самым линейность обратной ветви вольт-амперной характеристики.

Итак, наряду со способностью обеспечивать электрическую проводимость металлического характера путем пробоя изолирующей оксидной пленки скользящий контакт обладает другим важнейшим свойством, а именно инерционностью.

Обращаясь к выяснению причин нестабильности динамических вольт-амперных характеристик, рассмотрим особенности формирования электрической проводимости скользящего контакта с учетом его инерционности при различных условиях изменения тока коммутации. На рис. 2, а представлены кривые тока коммутации двух смежных секций якоря. При этом ток в непосредственно связанной с этими секциями коллекторной пластине определяется, как алгебраическая сумма мгновенных значений токов секций, и при ширине щетки, равной одному коллекторному делению, имеет вид импульса симметричной треугольной формы (рис. 2, б). При отклонениях коммутации в ту или иную

из-за наличия оксидной пленки с высоким электрическим сопротивлением. По мере увеличения тока изолирующая пленка многократно фриттируется, в результате чего контактное сопротивление значительно понижается. Высказываемые иногда предположения о том, что это уменьшение сопротивления связано преимущественно с ростом температуры в контактной зоне, несостоятельны, так как, по данным [8], удельное сопротивление графита при увеличении температуры до 2800°C вследствие отрицательного температурного коэффициента снижается всего в 3 раза. В данном случае это снижение больше, хотя температура в точках непосредственного контакта, как отмечалось, не превышает $600\text{--}700^{\circ}\text{C}$. Таким образом, нелинейность восходящей ветви вольт-амперной характеристики связана прежде всего с пробоем оксидной пленки, обладающей высоким электрическим сопротивлением. Опыты с различными сортами щеток показывают, что нелинейность восходящей ветви тем больше, чем ниже удельное сопротивление материала щетки. Это становится понятным, если учесть, что толщина пленки, образующейся на коллекторе при использовании различных щеток, а следовательно, и напряжение пробоя этой пленки в среднем одинаковы.

Нисходящая ветвь характеристики, будучи более пологой, отличается одновременно и большей линейностью. С точки зрения теории электрического контакта это объясняется следующим. По достижении наибольшей величины тока на по-

сторону от прямолинейной импульс тока коллекторной пластины несколько искажается, но общий вид его, в частности, наибольшее мгновенное значение тока, остается неизменным.

Динамические вольт-амперные характеристики, получаемые экспериментально в реальных условиях работы скользящего контакта, названы авторами естественными в отличие от искусственных динамических характеристик, которые снимаются при работе щетки на короткозамкнутом коллекторе или кольце, когда общий ток контакта более или менее равномерно распределен по лицевой поверхности щетки. Естественные характеристики контакта представляются, как правило, в виде зависимости контактного падения напряжения от тока коллекторной пластины (петушка) [9]. В таком представлении различия вольт-амперных кривых, обусловленные различным характером коммутации, имеют вид большего или меньшего случайного разброса. Физическая природа этого разброса остается невыясненной.

В действительности, как будет показано ниже, формирование электрической проводимости под щеткой определяется величиной и характером изменения плотности тока в контакте, а не величиной тока. В самом деле, в процессе коммутации имеет место не только изменение тока коммутируемой секции во времени, но также и пространственное перемещение связанных с этой секцией коллекторных пластин, так что поверхность контактирования данной пластины и щетки постоянно изменяется, соответствующим образом изменяя плотность тока в контакте даже при неизменной величине тока. Представленные на рис. 2, в кривые плотности тока построены путем соотнесения мгновенных значений тока в контакте к мгновенным значениям кажущейся площади контактирования пластины со щеткой. При этом полагается, что вся лицевая поверхность щетки является рабочей.

Для сопоставления естественных вольт-амперных характеристик рассмотрим формирование контакта при нормально ускоренной и несколько замедленной коммутации, когда, однако, еще обеспечивается безыскровая работа щетки. Работа щеточного контакта с искрением в пределах настоящей статьи не рассматривается, поскольку в этом случае проводимость контакта связана с электрическим пробоем воздушных промежутков, и вольт-амперная характеристика контакта, по крайней мере, в районе искрения описывается специфическими закономерностями газового разряда, для которого характерно постоянство напряжения на электродах вне зависимости от интенсивности разряда.

Начнем рассмотрение со случая ускоренной коммутации. Кривая 2 на рис. 2, в представляет изменение плотности тока в данной коллекторной пластине на поверхности ее контактирования со щеткой. Как отмечалось, при пробегании пластины от одной щетки до другой контактные пятна в значительной степени окисляются и при вхождении пластины под щетку сравнительно большое падение напряжения, обусловленное значительной плотностью тока, почти полностью приложено к пленке. Под действием этого падения напряжения происходит ряд фриттингов оксидной пленки, в результате чего расширяются прежние или образуются новые контактные пятна. При этом контактное сопротивление скачками снижается. Вследствие инерционности измерительных приборов спады напряжения, характерные для фриттинга, не поддаются непосредственному наблюдению, проявляя себя лишь заметной нерегулярностью в начальной части кривой контактного падения напряжения. При дальнейшем движении пластины контактное падение напряжения вследствие значительной плотности тока продолжает оставаться достаточным для фриттинга.

После того как пластина полностью вошла под щетку, начиная с некоторой плотности тока, контактное напряжение реализуется как падение напряжения на сопротивлении стягивания, поэтому фриттиро-

вание оксидной пленки прекращается, и расширения контактных пятен не происходит. С этого времени контакт является сформированным, а контактное сопротивление достигает своего наименьшего в данных условиях значения и определяется, как сопротивление стягивания в материале щетки. Ясно, что чем выше максимальная плотность тока, зависящая от степени ускорения коммутации, тем большее количество проводящих пятен образуется под щеткой и тем ниже соответственно результирующее сопротивление контакта. С другой стороны, время формирования контакта также находится в тесной связи со степенью ускорения коммутации.

Итак, начиная с некоторой плотности тока, работа скользящего контакта осуществляется с использованием уже имеющихся контактных пятен, число и размеры которых остаются неизменными, поскольку окисления пятен не происходит из-за отсутствия доступа к ним воздуха. Сопротивление же всегда имеющихся на металлических поверхностях адгезионных пленок, протекание тока через которые обеспечивается посредством туннельного эффекта, практически постоянно в широком диапазоне температур [2]. Таким образом, с определенного момента вольт-амперная характеристика контакта носит омический характер.

Было бы неправильно полагать, что скользящий контакт при ускоренной коммутации имеет линейную вольт-амперную характеристику лишь при малых плотностях тока [11]. Эксперименты авторов на корогкозамкнутом коллекторе показывают, что при динамическом уменьшении тока от некоторого установившегося значения до нуля скользящий контакт обнаруживает сравнительную линейность вольт-амперной характеристик при плотностях тока $10-12 \text{ а/см}^2$. Следует ожидать линейности характеристики контакта и в случае изменения направления тока в петушке на противоположное при значительном ускорении коммутации опять же в силу омического характера проводимости.

Линейность вольт-амперной характеристики контакта при уменьшении плотности тока (ускоренная коммутация) нарушается лишь скачкообразным изменением контактного сопротивления вследствие выхода из-под щетки отдельных пятен в заключительной фазе коммутации, так как общее число этих пятен на перекрытой щеткой поверхности пластин ограничено. Однако, по данным [10], амплитуда этих скачков составляет примерно 2,5 проц. общего падения напряжения.

Рассмотрим далее формирование контактной проводимости при замедленной коммутации (кривая 3 на рис. 2, в). Как явствует из кривой, вхождение коллекторной пластины под щетку происходит при плотностях тока, близких к нулю. Поэтому развивающееся контактное напряжение не способно приводить к эффективному фриттированию оксидной пленки. Однако фриттинги все же происходят, так как минимальное напряжение пробоя пленки составляет $0,02 \text{ в}$ [4]. Исключение представляет катодно-поляризованная щетка, под которой имеется некоторая начальная проводимость.

Нарастающая по мере движения пластины плотность тока ведет к увеличению контактного падения напряжения. В результате перемещение пластины сопровождается следующими друг за другом фриттингами, расширяющими контактные пятна. Этот процесс продолжается до тех пор, пока коллекторная пластина вовсе не выйдет из-под щетки. Таким образом, при замедленной коммутации формирование контакта происходит в течение всего времени пребывания коллекторной пластины под щеткой. Следствием этого является меньшая при прочих равных условиях (имеется в виду и величина наибольшей плотности тока), чем в случае ускоренной коммутации, величина результирующего удельного контактного сопротивления. Последним, кстати, объясняется известный из практики факт, что при ускоренной коммутации щеточный контакт

оказывает большее воздействие посредством своих падений напряжений на ток коммутируемой секции. Возвращаясь к виду вольт-амперной характеристики контакта при замедленной коммутации, отметим, что какое-либо постоянство удельного контактного сопротивления в этом случае отсутствует.

Рассмотрение процесса формирования контактной проводимости с учетом ее инерционности для двух противоположных в определенном смысле случаев коммутации приводит к заключению о том, что разброс естественных вольт-амперных характеристик скользящего контакта не случаен, а обусловлен различными условиями формирования контакта. Действительно, в зависимости от степени ускорения или замедления изменяется в широких пределах прежде всего величина наибольшей плотности тока, причем сгущение линий тока приходится то на набегающий, то на сбегающий край щетки. Это, как видно из рассмотренного, оказывает решающее влияние на характеристику контакта. Далее, время формирования контакта также не остается постоянным. Так, при ускоренной коммутации оно значительно меньше, чем при замедлении той же степени. Наконец, сам вид естественных вольт-амперных характеристик весьма различен.

Таким образом, естественная вольт-амперная характеристика, получаемая при определенном характере коммутации, в силу своих особенностей описывает лишь один частный случай работы скользящего контакта и при имеющемся разнообразии электрических условий на коллекторе электрической машины не может характеризовать скользящий контакт в целом. В связи с этим нельзя признать справедливыми предложения принимать в качестве критерия коммутирующих свойств электрощетки те или иные параметры частных вольт-амперных характеристик [9]. С нашей точки зрения, оценку коммутирующей способности следует производить на основании совокупности свойств электрощеточного материала, главными из которых являются его удельное сопротивление, способность к образованию устойчивой политуры на коллекторе, а также твердость и упругие свойства.

С физической точки зрения также необоснованным является использование при расчете коммутации какой-либо частной вольт-амперной характеристики. Интенсивно разрабатываемая в настоящее время теория оптимальной коммутации [11] наилучшей считает несколько ускоренную коммутацию. Подобные соображения высказывались и ранее, и теоретически они, разумеется, оправданы. Приближенный расчет коммутации возможен в этом случае и при использовании частной характеристики контакта. Однако, как показывает проведенное авторами осциллографическое исследование коммутации машин постоянного тока небольшой мощности, наряду со случайным по характеру влиянием механических факторов имеет место неидентичность условий коммутации секций якоря, обусловленная электромагнитными причинами. Речь идет о различии коммутации несамостоятельных и самостоятельных секций, связанном с перераспределением электромагнитной энергии. При этом в наихудшем положении оказываются самостоятельные секции паза, то есть, секции, заканчивающие коммутацию в отсутствие магнитно связанных с ними короткозамкнутых контуров. Отсутствие демпфирования приводит к тому, что коммутация таких секций явно замедлена даже при оптимальной по отношению к другим секциям якоря настройке дополнительных полюсов. Широко практикуемые ныне расчеты коммутации с использованием ЭЦВМ на основе учета мгновенных значений само- и взаимоиндуктивностей секций не позволяют пренебречь указанной особенностью, присущей, по-видимому, всем машинам постоянного тока независимо от мощности. В этих условиях введение в расчет единичной частной характеристики скользящего контакта недопустимо. Из всего рассмотренного следует, что единственно правильным при уточ-

ненных расчетах коммутации является введение в расчет семейства вольт-амперных характеристик, описывающих работу скользящего контакта при широких отклонениях коммутации, скажем, от прямолинейной. Математическая обработка семейства вольт-амперных характеристик скользящего контакта средствами регрессионного анализа позволяет получить достаточно простые выражения аппроксимации.

ЛИТЕРАТУРА

1. R. E. Hellmund, L. R. Ludwig. Искрение под щетками коллекторных машин, *Electrical Engineering*, 1935.
2. Р. Хольм. Электрические контакты, ИИЛ, 1961.
3. H. A. Schultze. К динамике скользящего контакта, *ETZ-A*, 8, 1964.
4. E. Shobert. Электрическое сопротивление угольной щетки на медном кольце, *AIEE Transactions*, ч. III-A, 1954, 73.
5. A. E. Stebbens. Процессы износа контактной поверхности и протекания тока в ней между углем и медью, *Conf. Commut. Rotat. Mach.*, London, 1964.
6. D. A. Parker. Свойства поверхности скользящего контакта пары медь—графит, *Conf. Commut. Rotat. Mach.*, London, 1964.
7. E. Holm. К теории контакта между угольной щеткой и медным контактным кольцом, *Journal of Applied Physics*, т. 28, 1957, 10.
8. F. Schröter. Переходное сопротивление скользящего контакта, *ETZ—A*, 14, 1955.
9. О. Г. Вегнер. Теория и практика коммутации машин постоянного тока ГЭИ, 1962.
10. F. Schröter. Коммутирующая способность угольных щеток, *ETZ—B*, 3, 1962.
11. М. Ф. Карасев, В. Н. Козлов. Оптимальная коммутация в машинах постоянного тока, *Труды ОМИИТа*, т. 44, 1964.