

ВЛИЯНИЕ МЕХАНИКИ КОЛЛЕКТОРНО-ЩЕТОЧНОГО УЗЛА НА ВРЕМЯ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ЛАМЕЛИ ЩЕТКОЙ

А. И. СКОРОСПЕШКИН, Л. Я. ЗИННЕР, Р. Ф. БЕКИШЕВ

(Рекомендована семинаром кафедр электрических машин
и общей электротехники)

Известно, что время коммутации якорной секции меньше времени короткого замыкания ламели щеткой и что полного контакта между щеткой и коллекторной пластиной не существует.

К факторам, влияющим на период коммутации, можно отнести следующие: ток якоря, ток добавочных полюсов, скорость вращения, температуру щеток и коллектора, нажатие на щетку, марку щеток и степень их притертости [1].

Кажущееся и действительное время короткого замыкания ламели щеткой однозначно определяется через кажущуюся и действительную дугу контактирования щетки с поверхностью коллектора. Очевидно, что кажущаяся длина дуги контактирования при отсутствии межламельных перепадов и цилиндричности коллектора определится из выражения:

$$l_k = 4,375 \cdot 10^{-4} D_k \arcsin \frac{2b_{\text{щ}}}{D_k}. \quad (1)$$

В реальных машинах это равенство не выполняется из-за наличия межламельных перепадов высот, эксцентricности и эллиптичности коллекторов, и, следовательно, действительная дуга контактирования l_d меньше кажущейся.

Учитывая то обстоятельство, что щетка при наличии макронеровностей притирается по максимальному радиусу коллектора, получим выражение для действительной ширины щетки:

$$b_d = Kb_{\text{щ}} D_k \sqrt{\frac{2,3P(1 - K_{\text{п}})}{Eh \sin \omega t}}, \quad (2)$$

где

P — нажатие на щетку, н;

$K_{\text{п}}$ — коэффициент пульсации контактного давления;

h — высота неровности, мм;

E — модуль упругости электрощеточного материала, н/мм².

Как видно из (2), при наличии эксцентricности и эллиптичности коллектора действительная дуга контактирования не остается постоянной, а модулируется с частотой, равной частоте следования неровностей. Глубина модуляции, в свою очередь, определяется массой щеток, нажатием, скоростью вращения, максимальной высотой неровности и диаметром коллектора.

Влияние перечисленных факторов на время короткого замыкания ламели щеткой исследовалось на установке с короткозамкнутым коллектором и двумя контактными кольцами (рис. 1).

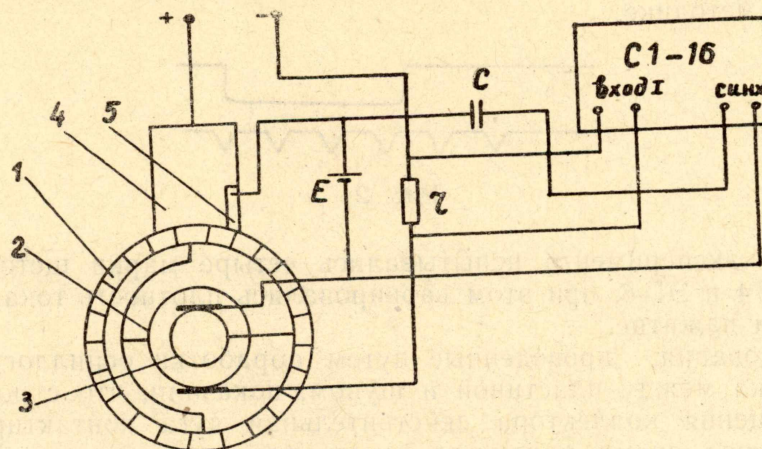


Рис 1. Экспериментальная установка.
1 — короткозамкнутый коллектор; 2—3 — контактные кольца; 4 — щетка; 5 — дополнительная щетка

Среди короткозамкнутых ламелей имелись три пластины-щупа, изолированные от остальных ламелей. Две диаметрально противоположные пластины-щупы были замкнуты накоротко и имели контакт с одним из колец.

На контактное кольцо через щетку подавалось напряжение 10 в от аккумуляторной батареи, второй зажим которой присоединялся к щетке на коллекторе. При замыкании пластины-щупа щеткой через контакт протекал ток 3 а. При этом осциллографировалось падение напряжения.

Для синхронизации развертки осциллографа со скоростью вращения использовалось второе контактное кольцо и третья пластина-щуп. При осциллографировании наблюдаются характерные импульсы тока, длительность которых соответствует действительному времени короткого замыкания ламели щеткой.

Для калибровки импульсов по длительности использовался профилометр со специально разработанным для этих целей емкостным датчиком, имеющим две обкладки. Одна из обкладок датчика устанавливалась на набегающем, другая — на сбегающем краях щетки с тем, чтобы точно фиксировать момент вхождения ламели под щетку и момент выхода ее. Сам датчик помещался в щеткодержатель и устанавливался на одной линии со щеткой вдоль коллектора.

Сигналы с пластины-щупа и профилометра подавались на два луча электронного осциллографа С1-16.

Кажущееся время короткого замыкания пластины щеткой определялось из выражения:

$$T_k = \frac{60(b_{щ} + b_k)}{\pi D_k n}, \quad (3)$$

где

T_k — кажущееся время короткого замыкания;

$b_{щ}$ — ширина щетки, см;

b_k — ширина ламели, см;

D_k — диаметр коллектора, см;

n — скорость вращения, об/сек.

В этом случае имеет место полное прилегание щетки к поверхности коллектора. Действительное время короткого замыкания T_d с большой точностью устанавливается совмещением импульса тока и профилограммы. На рис. 2 приведены типичные кривые, снятые по вышеописанной методике.

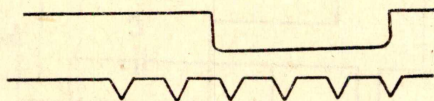


Рис. 2

В ходе эксперимента испытывались четыре марки щеток: ЭГ-4Э, ЭГ-14, ЭГ-74 и ЭГ-8, при этом варьировались плотность тока, скорость вращения и нажатие.

Исследования, проведенные путем обработки осциллограмм импульсов тока между пластиной и щупом, показали, что с ростом скорости вращения коллектора действительная дуга контактирования и действительное время короткого замыкания уменьшаются. При этом контакт пластины со щеткой становится нестабильным как на сбегающем, так и на набегающем краях. На рис. 3 приведены зависимости T_k и T_d от скорости вращения при $P=250$ г.

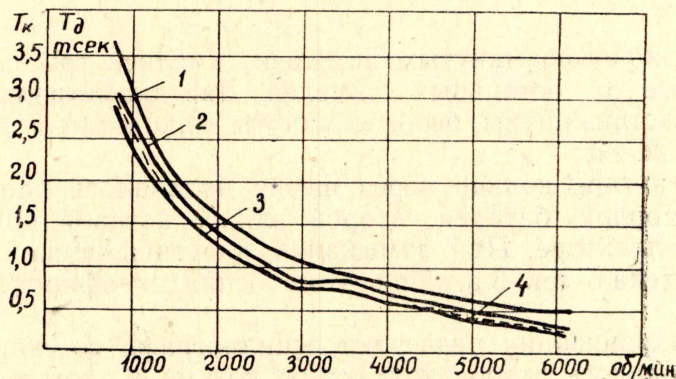


Рис. 3. Зависимости T_k и T_d от скорости вращения.

1 — кажущееся время короткого замыкания ламели щеткой (T_k); 2 — действительное время короткого замыкания (T_d) ламели щеткой ЭГ-4Э; 3 — то же щеткой ЭГ-74; 4 — то же щеткой ЭГ-14

За меру эффективности контакта бралось отношение действительного времени короткого замыкания к кажущемуся.

$$K = \frac{T_d}{T_k} \cdot 100, \quad (4)$$

где T_d — действительное время короткого замыкания ламели щеткой.

На рис. 4, 5, 6 приведены зависимости $\frac{T_d}{T_k} \cdot 100$ в функции от скорости вращения для трех марок щеток ЭГ-4Э, ЭГ-14, ЭГ-74. Как видно из этих кривых, при малых скоростях вращения контакт щетки с коллектором устойчив и усечение дуги контактирования на набегающем и сбегающем краях щетки происходит лишь за счет клиновых зон. При этом щетки с разными модулями упругости характеризуются неодинаковым усечением. Так, для ЭГ-4Э величина усечения составляет 10—12 проц., для ЭГ-14 — 16—18 проц., для ЭГ-74 — 18—20 проц.

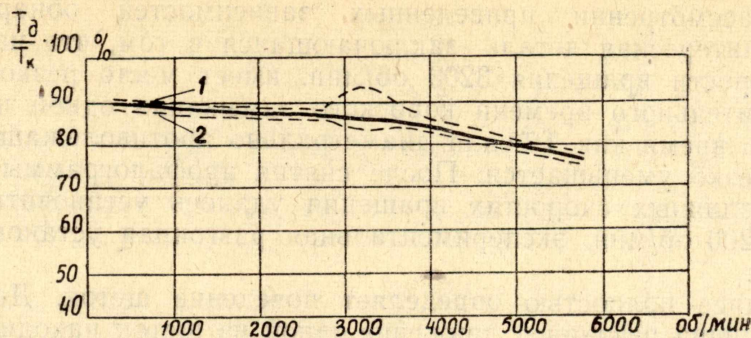


Рис. 4. Зависимость $\frac{T_d}{T_k} 100 = f(n)$ для щетки
ЭГ-40.
1—2 область рассеивания

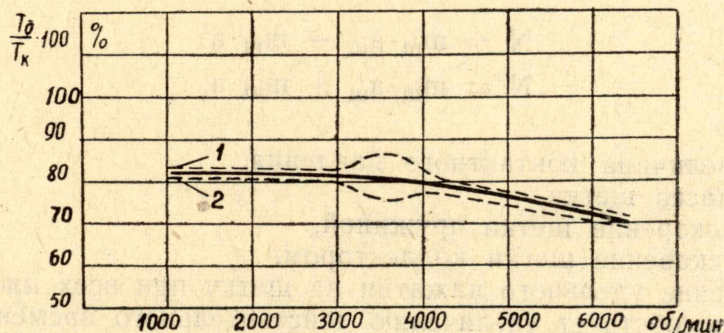


Рис. 5. Зависимость $\frac{T_d}{T_k} 100 = f(n)$ для щетки
ЭГ-14.
1—2 область рассеивания

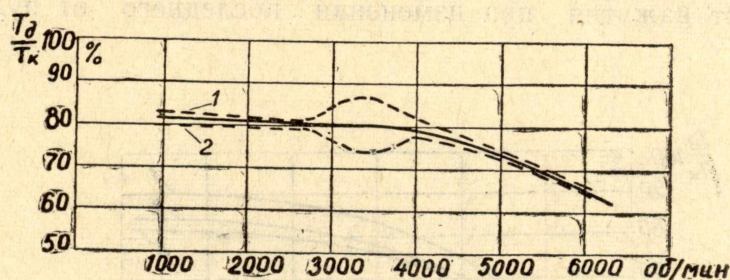


Рис. 6. Зависимость $\frac{T_d}{T_k} 100 = f(n)$ для щетки
ЭГ-74.
1—2 область рассеивания

С увеличением скорости вращения до 6000 об/мин. контакт щетки с коллектором становится нестабильным как в набегающей, так и в сбегающей частях щеток. Одновременно наблюдается резкое сокращение действительного времени короткого замыкания ламели и, следовательно, укорочение дуги контактирования. Так, усечение полезной ширины щеток при $n=6000$ об/мин. составляет для ЭГ-4Э 20—22 проц., для ЭГ-14 — 26—28 проц., для ЭГ-74 — 32—36 проц.

Кривые на рис. 3, 4, 5, 6 построены по усредненным значениям десяти равнооточных измерений.

Ошибка определения T_d , полученная по методу наименьших квадратов, составляет не более 2 проц.

При рассмотрении приведенных зависимостей обнаруживается еще одна интересная деталь, заключающаяся в том, что на фиксированной скорости вращения 3200 об/мин. имеет место резкое увеличение действительного времени короткого замыкания одной из ламелей щеткой, в то время как $T\tau$ для диаметрально противоположной пластины-щупа резко уменьшается. После снятия профилограммы коллектора при различных скоростях вращения удалось установить, что при скорости 3200 об/мин. экспериментальная разгонная установка входит в резонанс.

Последнее полностью определяет поведение щеток. Действительно, при наличии резонанса движение одной из щеток находится в фазе с движением коллектора, что приводит к ослаблению контакта, в то время как движение диаметрально противоположной щетки находится в противофазе, укорочая контакт. Это вытекает из следующих соотношений для величины контактного давления между щеткой и коллектором:

$$N = m_{щ} \cdot a_{щ} - m_{щ} \cdot a' \quad (5)$$

$$N = m_{щ} \cdot a_{щ} + m_{щ} \cdot a, \quad (6)$$

где

N — величина контактного давления,

$m_{щ}$ — масса щетки,

$a_{щ}$ — ускорение щетки пружиной,

a' — ускорение щетки коллектором.

Увеличение удельного нажатия на щетку при всех прочих равных условиях способствует увеличению действительного времени короткого замыкания и стабилизации контакта щетка—коллектор. На рис. 7 приведены зависимости $\frac{T_d}{T_k} \cdot 100$ в функции от нажатия, снятые при скорости 2500 об/мин. для щеток ЭГ-4Э, ЭГ-14, ЭГ-74, из которых видно, что действительные дуга и время короткого замыкания значительно зависят от нажатия при изменении последнего от нуля до 250—300 г/см².

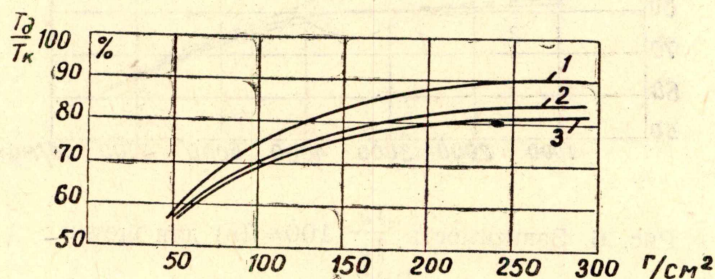


Рис. 7. Зависимость $\frac{T_d}{T_k} \cdot 100$ от нажатия при $n=2500$ об/мин.
1 — ЭГ-4Э; 2 — ЭГ-14; 3 — ЭГ-74

Дальнейшее увеличение P не рекомендуется, так как (при существующих допусках на состояние рабочей поверхности коллекторов) увеличение удельного нажатия свыше 300 г/см² не дает существенного улучшения в работе скользящего контакта, приводя, однако, к резкому увеличению скорости износа электрощеток.

Увеличение температуры коллектора также способствует более стабильной работе щеток, что отчасти объясняется размягчением кон-

тактного слоя щетки и, следовательно, лучшим прилеганием ее к коллектору.

В отношении загрузки щеток током следует отметить, что влияние тока косвенно проявляется через изменение температуры скользящего контакта. Так, T_0 при токе через контакт в 3 а и 12 а, определенные непосредственно друг за другом, имеют одно и то же значение, поскольку температура контакта не успела измениться.

Исследования, проведенные по описанной методике, показывают, что устойчивый механический контакт щетки с коллектором имеет место лишь в зоне 0,5—0,85 $b_{\text{щ}}$, симметричной оси щетки, и, следовательно, в герцевской зоне. Нестабильность времени короткого замыкания и дуги контактирования наблюдается в неустойчивости набегающего и сбегавшего краев щетки.

В этом отношении следует указать на некоторую связь между действительной длиной дуги механического контакта и физическими явлениями, наблюдающимися при коммутации якорной секции. Так, при внимательном рассмотрении совмещенных кривых переходного падения напряжения и тока ламели (рис. 8) обнаруживается, что

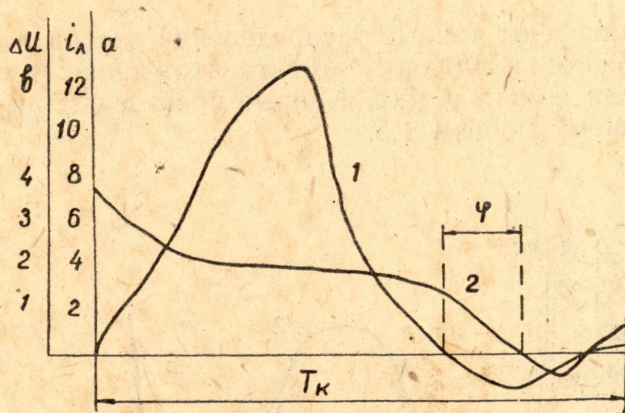


Рис. 8. Кривые тока ламели и переходного падения напряжения.

1 — ток ламели; 2 — переходное падение напряжения; T_k — период короткого замыкания щетки ламелью; ϕ — сдвиг фазы

между кривыми имеется некоторый фазовый сдвиг ϕ , заключающийся в том, что в момент прохождения тока через нуль переходное падение напряжения не равно нулю, а имеет вполне определенное значение. Этот сдвиг может быть объяснен влиянием емкости контактной пары щетка—ламель. При этом емкостью секции и межламельной емкостью можно пренебречь, как имеющими второй порядок малости по сравнению с емкостью контакта.

Измерение емкости контакта обычными методами затруднительно вследствие параллельно включенных активных сопротивлений, образующихся в местах фриттинга политуры.

Нами для большей точности определения емкости контакта и распределения ее вдоль дуги контактирования использован следующий прием. После многочасовой работы щетки под током последняя накладывалась на фотопленку, и пленка засвечивалась падающим параллельным пучком света. В дальнейшем после 20-кратного увеличения пленки производилась ее обработка. При этом вычислялась действительная контактная зона щетки с коллектором, длина клиновых зон, распределения зазоров между коллектором и щеткой в клиновых зонах и, кроме того, распределение емкости вдоль кажущейся дуги контактирования. В зоне действительного механического контакта для вы-

числения емкости максимальное сближение контактной пары щетка — ламель бралось равным 0,5 мк, исходя из предельной деформируемости выступов щетки под действием нажимного усилия пружины.

Расчет емкости в клиновых зонах производился по уточненной формуле для плоского непараллельного конденсатора

$$C = \varepsilon_0 \frac{S(t)}{d(t)} \left[1 + \frac{L^2}{12\alpha^2} \alpha^2 \right], \quad (7)$$

где

$S(t)$ — текущее значение площади щетки, перекрываемой ламелью;

$d(t)$ — текущее значение зазора между обкладками;

L — длина щетки вдоль коллектора;

α — угол между обкладками.

В зоне установившегося контакта емкость рассчитывалась по известной формуле

$$C = \varepsilon_0 \frac{S(t)}{d}. \quad (8)$$

На рис. 9 приведены кривые распределения зазора и емкости между щеткой и ламелью, начиная с момента вхождения и кончая моментом выхода ламели из-под щетки. Кривые построены для щетки марки ЭГ-8 с перекрытием, равным 1,5.

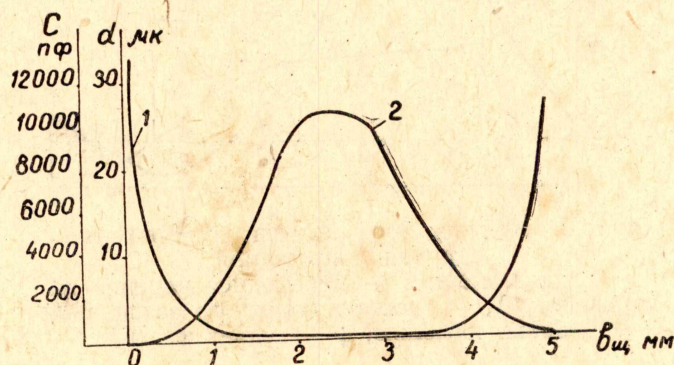


Рис. 9. Кривые распределения зазора и емкости между щеткой и ламелью.
1 — распределение зазора под щеткой; 2 — распределение емкости контакта

Из рис. видно, что емкость скользящего контакта во много раз больше межламельной емкости и емкости между секциями, лежащими в одном пазу. Межламельные и межсекционные емкости, измеренные мостом, составляют 80—100 пкф, в то время как емкость контакта достигает значений (8000—10 000) пф.

При рассмотрении влияния емкости контакта на коммутацию целесообразно, на наш взгляд, учитывать не величину самой емкости, а соотношение между активным и емкостным сопротивлениями контакта на каждой стадии коммутационного процесса. Рассмотрим это более подробно. На рис. 10 представлено распределение переходного сопротивления между щеткой и ламелью, построенной по кривым переходного падения напряжения и тока ламели (рис. 7) для случая нормально ускоренной коммутации (кривая 1). Кроме того, построено распределение емкостного сопротивления по ширине щетки (кривая 2).

Из рис. 8 и 9 видно, что на начальной стадии коммутационного процесса емкость контакта щетка—ламель мала, и переходное емкостное сопротивление велико из-за наличия клиновой зоны на набегающем крае щетки и малой площади перекрытия, в то время как переходное активное сопротивление контакта сравнительно мало. Следовательно, емкость контакта на начальной стадии не оказывает какого-либо влияния на коммутационный процесс.

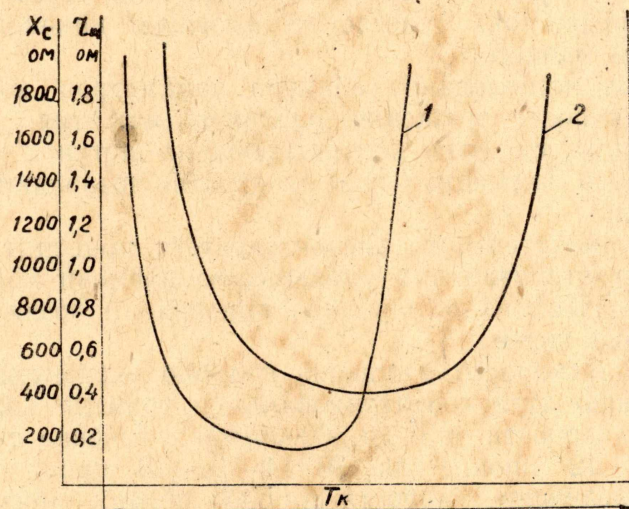


Рис. 10. 1 — переходное сопротивление между щеткой и ламелью; 2 — емкостное сопротивление контакта

На средней стадии влияние емкости также не сказывается вследствие чрезвычайной малости переходного сопротивления щетка—ламель и большей величины емкостного сопротивления. Здесь происходит заряд емкости контакта до амплитудного значения переходного падения напряжения. Иначе обстоит дело на завершающей фазе коммутации, где вследствие уменьшения плотности тока резко возрастает переходное сопротивление щетка—ламель, становясь «соизмеримым» с емкостным сопротивлением. При этом в момент спада тока ламели до нуля сбегаящий край щетки удерживает в течение некоторого времени определенное значение напряжения $\Delta U_{щ}$ за счет заряда на емкости контакта, препятствуя изменению тока ламели. Время, в течение которого емкость контакта демпфирует изменение тока ламели, определяется временем разряда емкости через параллельно включенное сопротивление а-пятен. Из рис. 7 видно, что это время достаточно велико и достигает 15—20 проц. от периода коммутации при различных степенях ускорения.

Вышеизложенное справедливо для ускоренной коммутации. В случае замедленной коммутации влияние емкости контакта на коммутационный процесс незначительно вследствие того, что момент окончания коммутации сдвигается на сбегаящий край щетки, где емкость мала.

Необходимо отметить, что емкость скользящего контакта во многом определяет коммутирующую способность электрощеток. Наибольшее влияние емкости на коммутирующую способность наблюдается у твердых марок щеток ЭГ-8, ЭГ-74 и других. Последнее вызвано тем, что на завершающей фазе коммутации переходное сопротивление у этих щеток сравнительно велико при малой плотности тока, что способствует сохранению в течение некоторого времени заряда на емкости контакта, демпфирующего реверс тока. При использовании мягких

марок щеток влияние емкости на коммутацию незначительно, хотя величина ее больше, чем для твердых щеток. Увеличение емкости скользящего контакта при использовании мягких щеток объясняется лучшей притиркой их и большим сближением контактирующих поверхностей.

Однако из-за чрезвычайной малости переходного сопротивления емкость постоянно оказывается короткозамкнутой, что приводит к мгновенному разряду ее в момент перехода тока через нуль. В дальнейшем при реверсе тока емкость не оказывает никакого влияния на коммутационный процесс.

Проведенные исследования влияния параметров коллекторно-щеточного узла, скорости вращения, удельного нажатия, температуры и тока на нестабильность дуги контактирования щетки с коллектором и времени короткого замыкания ламели щеткой позволяют сделать следующие выводы:

1. Наличие значительного эксцентриситета приводит к нестабильности дуги контактирования и уменьшению времени короткого замыкания ламели щеткой из-за неполной притирки и возникающих радиальных ускорений щеток.

2. Изменение скорости вращения подобно эксцентриситету приводит к уменьшению дуги контактирования и времени короткого замыкания. Так, при скорости от 0 до 500 об/мин. усечение дуги составляет для ЭГ-4Э 10—12 проц., для ЭГ-14—16—18 проц., для ЭГ-74—18—20 проц. Увеличение скорости до 6000 об/мин. приводит к усечению для ЭГ-4Э на 20—22 проц., для ЭГ-14 на 26—28 проц., для ЭГ-74 на 32—36 проц.

3. Повышение удельного нажатия способствует стабилизации дуги контактирования и увеличению действительного времени короткого замыкания. Повышение нажатия свыше 250—300 г/см² не рекомендуется, так как дальнейшее увеличение не оказывает существенного влияния на улучшение работы скользящего контакта, приводя к повышенному износу щеток.

4. Предлагается методика и экспериментальная установка для исследования действительной дуги контактирования и действительного времени короткого замыкания ламели щеткой.

5. Предлагается фотографический метод определения зазоров между щеткой и коллектором для расчета емкости и ее распределения вдоль дуги контактирования. Показано, что величина емкости достигает значения 10 000 пф и более.

6. Исследования показали, что наличие емкости скользящего контакта позволяет удерживать на сбегавшем крае определенную величину напряжения. Коммутирующая способность электрощеток непосредственно связана с величиной этой емкости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Kluge. Период коммутации якорной секции и ступенчатый характер кривой коммутации. ETZ-A, 22, 1955.