

ТАНГЕНЦИАЛЬНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ЩЕТОК

Л. Я. ЗИННЕР, А. И. СКОРОСПЕШКИН

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин
и общей электротехники)

Теоретическим и экспериментальным исследованиям динамики скользящего контакта в настоящее время уделяется все большее внимание. Это обусловлено тем, что неудовлетворительное механическое состояние скользящего контакта приводит к серьезным нарушениям коммутационного процесса коллекторной электрической машины.

Наиболее детально к настоящему времени изучены радиальные колебания коллекторно-щеточного узла. Однако, как известно, в реальном скользящем контакте всегда имеют место и другие виды вибрации щеток, к которым относятся тангенциальные и аксиальные колебания. Если вопрос о радиальных колебаниях снимается при переходе на торцовые коллекторы и улучшении технологии цилиндрических коллекторов, то устранение тангенциальных колебаний связано с большими трудностями, поскольку они обуславливаются только фрикционными характеристиками пар трения.

Тангенциальные колебания щеток, имеющие место в работе скользящего электрического контакта, являются по своей природе автоколебательными и не отличаются в этом отношении от весьма распространенных в природе фрикционных автоколебаний.

Следует отметить, что механика фрикционных автоколебаний весьма детально изучена рядом исследователей [1, 2, 3]. Однако в приложении к скользящему контакту электрических машин, отличающемуся некоторыми специфическими особенностями, этот вопрос до сих пор остается неизученным. Имеющиеся работы [4, 5] только частично затрагивают вопрос о влиянии тангенциальных колебаний на токосъем, не касаясь физики процесса и путей их устранения.

Многочисленными исследованиями установлено, что фрикционный контакт имеет упруго-вязкую природу, а в точках касания протекают явления, до некоторой степени аналогичные ползучести, и что возникновение автоколебаний обусловлено определенным видом статических и кинетических характеристик трения. Таким образом, причиной возникновения автоколебаний щеток на поверхности коллектора и кольца является наличие разности между статическим и кинетическим коэффициентами трения. Эта разность может быть обусловлена как ростом силы трения покоя от продолжительности неподвижности контакта при совместном движении щетки и коллектора, так и падением силы трения скольжения при увеличении относительной скорости движения фрикционных пар.

Настоящая работа посвящена аналитическому и экспериментально-

ному исследованию тангенциальных колебаний щеток и их влиянию на токосъем. В качестве расчетной схемы авторами принята схема, изображенная на рис. 1. Механизм происходящих колебаний можно пояснить следующим образом.

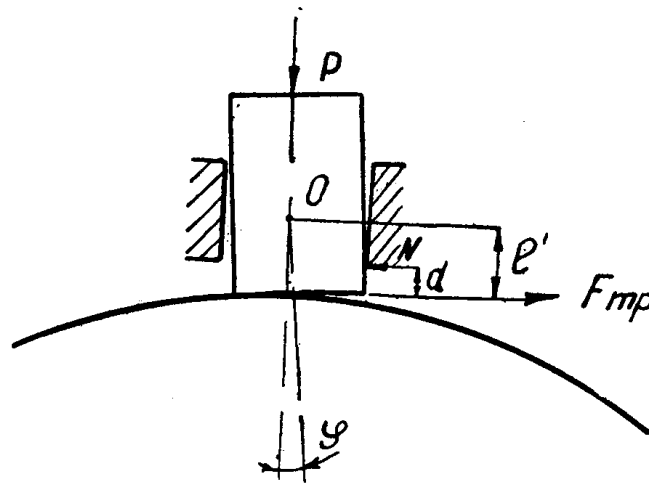


Рис. 1. Расчетная схема

При вращении кольца или коллектора щетка под воздействием силы трения увлекается поверхностью кольца по направлению вращения и отклоняется от вертикали на некоторый угол φ_0 , выбирая зазор в направляющих. В дальнейшем щетка деформируется в местах прилегания к щеткодержателю, вследствие чего возникает нормальная реакция, играющая роль восстанавливающей силы. Пока щетка движется вместе с кольцом, возвращающая сила постоянно уравновешивается силой трения. Когда возвращающий момент равен максимальному моменту от силы трения, происходит скачкообразное увеличение относительной скорости движения и уменьшение момента силы трения, вследствие чего щетка начинает двигаться в противоположном направлении. В точке, соответствующей минимуму восстанавливающего момента, вновь происходит изменение направления движения щетки. Процесс повторяется.

Таким образом, на щетку кроме момента силы трения действует еще момент от нажатия и некоторый возвращающий момент, пропорциональный углу отклонения щетки от вертикали. При неизменном моменте трения щетка отклоняется на некоторый угол φ_0 , определяемый из равенства:

$$M_p + M_{\varphi_0} = M_{\text{тр}}, \quad (1)$$

где M_p — момент от силы нажатия,

M_{φ_0} — возвращающий момент,

$M_{\text{тр}}$ — момент трения.

Однако, по данным [6], сила трения не остается постоянной и имеет некоторую зависимость от скорости перемещения подвижного звена пары трения. В общем случае эта зависимость представляется линейно-изогнутой характеристикой, слегка падающей с увеличением скорости.

В соответствии с этим момент силы трения также является некоторой функцией относительной скорости

$$M_{\text{тр}} = f'p[C - D \cdot V - f'(\dot{\varphi})], \quad (2)$$

где

D — коэффициент, учитывающий наклон характеристики трения;

V — окружная скорость кольца;

$l'\varphi$ — линейная скорость поверхности щетки;

l' — эффективное плечо приложения силы трения;

P — нажатие на щетку.

С учетом (1) и (2) уравнение движения щетки запишем в виде:

$$I\ddot{\varphi} + mga\varphi = PlD(V - l'\dot{\varphi}), \quad (3)$$

a — приведенная длина щетки,

I — момент инерции щетки,

m — масса щетки,

g — ускорение свободного падения.

Выражение (3) описывает только свободные колебания щетки под воздействием переменной силы трения. Однако ввиду того, что реальная щетка, помещенная в щеткодержатель, испытывает со стороны последнего определенные воздействия, то необходимо учесть восстанавливающий момент M_φ . Этот момент, как уже отмечалось ранее, направлен противоположно действию момента силы трения и полностью определяется упруго-пластическими свойствами щетки при взаимодействии со щеткодержателем. Учитывая, что речь идет о весьма малых амплитудах колебаний, измеряемых в единицах микрон, можно определить плечо приложения восстанавливающей силы, как $l' - d$. Тогда момент восстанавливающей силы определится из выражения

$$M_\varphi = K(l' - d)^2\varphi, \quad (4)$$

где

d — вылет щетки из щеткодержателя,

K — жесткость связи, зависящей от упругих свойств щетки.

Одновременно необходимо еще учесть момент от силы нажатия, который определяется величиной нажатия и точкой его приложения. При этом могут иметь место следующие случаи:

1. Нажатие направлено по набегающему краю щетки. При этом момент M_p совпадает по направлению с моментом силы трения и увеличивает неустойчивость щетки.

2. Нажатие направлено по оси щетки, $M_p = 0$.

3. Нажатие направлено по сбегающему краю.

При этом M_p действует встречно с моментом трения. В этом случае выбором P и плеча его приложения удастся скомпенсировать некоторую долю момента трения.

$$P \frac{b_{щ}}{2} = l'PS. \quad (5)$$

Строго говоря, перечень сил, действующих на щетку, не ограничивается указанными выше. Для строгого расчета дифференциальное уравнение движения включало бы еще и момент, возникающий при взаимодействии набегающего края щетки с кольцом или коллектором и сопровождающийся неопределенно малыми деформациями щеточной поверхности. Но, поскольку этот момент мал по сравнению с M_φ , то мы его в дальнейшем не учитываем.

Исходя из вышеизложенного, полное уравнение движения щетки без учета демпфирования запишем в виде:

$$I\ddot{\varphi} + mga\varphi + M_{(\varphi)} - PlD(V - l'\dot{\varphi}) = 0. \quad (6)$$

Как видно из (6), характер колебаний определяется функцией M_φ . Строго говоря, эта функция нелинейна вследствие того, что возвра-

щающий момент, обусловленный упруго-пластическими деформациями, нелинейно зависит от величины деформаций. Тем не менее, учитывая, что амплитуда колебаний щетки — величина очень малая, можно с достаточной точностью считать $M_{(\varphi)}$ линейно зависящим от φ . Приняв это допущение, имеем

$$I\ddot{\varphi} + K(l' - d)^2\dot{\varphi} - Pl'D(V - l'\varphi) = 0. \quad (7)$$

Из (7) видно, что система имеет единственное состояние неустойчивого равновесия при $V - l'\varphi = 0$. При этом щетка отклонена на некоторый угол φ_0 и находится в зацеплении с кольцом, что имеет место, когда выполняется условие:

$$K(l' - d)^2\varphi_0 = Pl'[C - D(V - l'\varphi)]. \quad (8)$$

Это состояние равновесия неустойчиво, если $PDI'(V - l'\varphi) < 0$ и устанавливаются автоколебания, близкие по форме к синусоидальным. Кроме того, чем меньше момент инерции щетки, тем ближе эти колебания к релаксационным. В этом случае колебания распадаются на два вида:

1. При $K(l' - d)^2\varphi \approx Pl'D(V - l'\varphi)$ система имеет сравнительно наибольшие ускорения, несмотря на малый момент инерции I , и, следовательно, происходит движение щетки через состояние равновесия с небольшими скоростями.

2. При $K(l' - d)^2\varphi \neq Pl'D(V - l'\varphi)$ ускорения щетки велики, а изменение скорости происходит довольно быстро, и чем меньше момент инерции I , тем меньше длительность скачка, изменение координаты φ и деформация прилегающего края щетки.

После некоторых преобразований (7) получим окончательное выражение, описывающее движение щетки

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + h\frac{d\varphi}{dt} + \omega^2\varphi = -\frac{Pl'(C - DV)}{I}, \quad (9)$$

где

$$h = \frac{P(l')^2D}{I},$$

$$\omega = \frac{K(l' - d)^2}{I}.$$

Решением (9) будет выражение вида

$$\varphi = Ae^{-ht} \cdot \sin \omega t - \frac{Pl'(C - DV)}{I\omega^2}. \quad (10)$$

Таким образом, мы получили выражение для φ , в котором частота колебаний не зависит от амплитуды, что не совсем справедливо.

Экспериментальные исследования тангенциальных колебаний щеток показывают, что амплитуда и частота их находятся в определенной функциональной связи. Так, с увеличением амплитуды наблюдается уменьшение частоты колебаний.

Для получения некоторых представлений об этой зависимости предположим, что колебания происходят без демпфирования и справедливо равенство:

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{K(l' - d)^2\varphi}{2I}t. \quad (11)$$

Из (11) для φ имеем

$$\varphi = \frac{I_{\max}}{\left[\frac{(l' - d)^2 \cdot Kt^2}{4I} - 1 \right]} \quad (12)$$

Приняв в (9) $I\ddot{\varphi} = 0$, найдем максимальный угол отклонения щетки для этого случая из условия $V - l'\dot{\varphi} \approx 0$.

$$\varphi_{\max} = \frac{Pl'C}{K(l' - d)^2} \quad (13)$$

На основании (12) и (13) имеем для φ и частоты автоколебаний:

$$\varphi = \frac{Pl'C}{K(l' - d)^2 \left[\frac{(l' - d)^2 Kt^2}{4I} - 1 \right]} \quad (14)$$

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K(l' - d)^4 \varphi}{Pl'C}} \quad (15)$$

Таким образом, из (14) и (15) видно, что амплитуда и частота тангенциальных колебаний щеток находятся в прямой зависимости от параметров токосъемного устройства l' , d , I и K . Так, с увеличением зазора между кольцом и щеткодержателем амплитуда колебаний увеличивается, а частота уменьшается, что хорошо подтверждается экспериментальными исследованиями.

Для изучения тангенциальных колебаний авторами использовалась установка рис. 2 с тщательно подготовленным коллектором и контактными кольцами.

Измерения проводились с помощью профилометра [7] и специально разработанного для этих целей емкостного бесконтактного датчика. Одновременно с измерением вибраций щеток производилось измерение распределения токов в различных частях щеток, для чего использовались трехслойные составные щетки. Проведенные экспериментальные исследования позволили установить связь тангенциальных колебаний с параметрами скользящего контакта. Ниже нами дается краткое описание характера влияния того или иного параметра на поведение щетки.

1. Влияние на тангенциальные колебания нажимного усилия и направления его действия. Как известно, соприкосновение фрикционных пар наблюдается не по всей так называемой «номинальной» площади контакта, вследствие неоднородности радиусов кривизны и наличия волнистости и шероховатости контактирующих поверхностей. Волнистость и шероховатость обуславливают дискретный характер распределения точек механического контакта, вследствие чего взаимодействие поверхностей происходит на незначительной части номинальной площади, называемой «фактической» площадью контакта. Фактическая площадь контакта зависит от нажатия, действующего на соприкасающиеся поверхности, и, следовательно, оказывает определенное влияние на рост силы трения. В данном случае, когда характеристика трения линейна, можно считать, что выполняется закон Амонтона и, следовательно, увеличение нажатия ведет к увеличению силы трения, что в свою очередь приводит к увеличению амплитуды и уменьшению частоты колебаний.

Относительно фактической площади контакта можно отметить следующее: чем больше площадь перекрытия коллектора щеткой, тем меньше амплитуда колебаний. Кроме того, большое влияние на интенсивность колебаний оказывает направление нажимного усилия. В этом

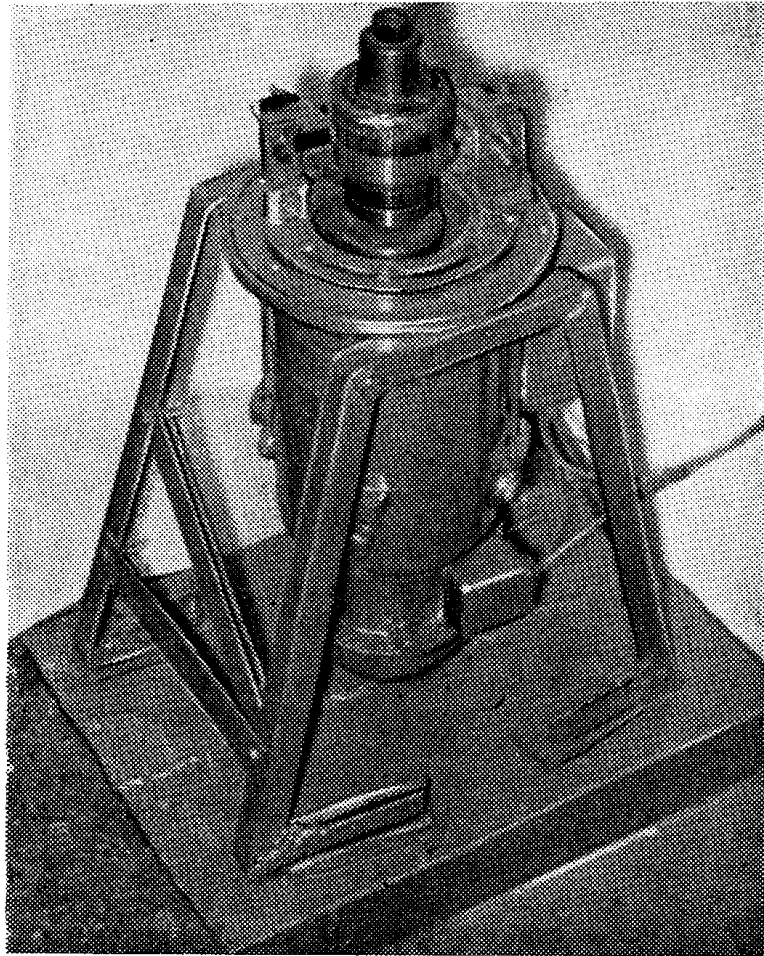


Рис. 2. Экспериментальная установка

отношении, как уже отмечалось ранее, существует два предельных случая:

а) при направлении нажатия по набегающему краю щетки увеличивается момент трения, так как остается нескомпенсированным момент статической силы трения и амплитуда колебаний резко увеличивается;

б) при направлении нажатия по сбегающему краю амплитуда колебаний значительно меньше. На рис. 3 а, б приведены осциллограммы тангенциальных колебаний щетки ЭГ-14 для двух предельных случаев при всех прочих одинаковых условиях. Из осциллограмм видно, что в случае нажатия по набегающему краю щетки амплитуда колебаний увеличивается.

II. Влияние эллиптичности и эксцентричности кольца на поведение щетки. Все вышеизложенное справедливо для случая, когда мы имеем дело с идеальным в отношении боя кольцом. В противном случае возникают еще дополнительные факторы, могущие быть причиной нестабильности контакта щетка—кольцо. При наличии значительного боя происходит модуляция контактного давления, следовательно, и силы трения, с амплитудой и частотой боя. Колебание силы трения приводит к интенсификации колебаний щеток.

III. Влияние скорости вращения кольца на тангенциальные колебания щеток. В ходе экспериментальных

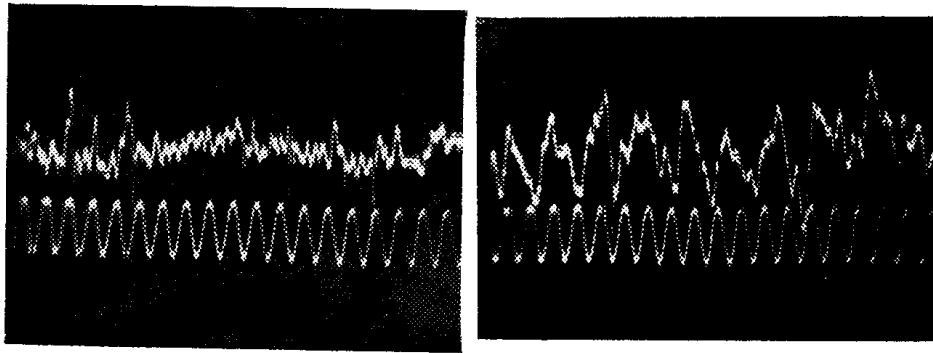


Рис. 3. Осциллограммы тангенциальных колебаний щеток при $P=250$ г/см², $n=2300$ об/мин, щетка ЭГ-14.

а — нажатие по сбегающему краю,
б — нажатие по набегающему краю

исследований установлено, что с увеличением скорости вращения кольца происходит некоторое уменьшение амплитуды колебаний щеток и увеличение частоты. Частота, однако, очень незначительно зависит от скорости вращения.

Так, при увеличении скорости вращения кольца от 500 до 2500 об/мин. частота изменяется на 15 проц. При этом частота колебаний для различных марок щеток различна. Для ЭГ-4Э она составляет 750—800 гц, ЭГ-14 — 1000 гц, ЭГ-74 — 1500—2000 гц и зависит, таким образом, от жесткости щетки.

Следует отметить, что частота колебаний для одной и той же щетки одинакова как в случае работы щетки на кольце, так и на коллекторе. Разница лишь в том, что в последнем случае на основные колебания накладываются более высокочастотные изгибные колебания. Спектр изгибных колебаний лежит в диапазоне ламельной частоты и с достаточной точностью определяется из соотношения:

$$f_{\text{изг}} = 0,162 \frac{h^2}{l} \sqrt{\frac{E}{lm}}, \quad (16)$$

h — высота щетки,

l — длина щетки,

E — модуль упругости.

На рис. 4 (а, б, в, г) приведены осциллограммы тангенциальных колебаний щетки ЭГ-14, снятые при различных скоростях вращения кольца и нажатии $P=250$ г/см². Как видно из осциллограмм, частота колебаний с изменением скорости в широких пределах изменяется весьма незначительно, в то время как амплитуда и характер их претерпевают значительные изменения. На низких скоростях вращения, рис. 4, а (2000 об/мин.) амплитуда колебаний велика и характер их близок к релаксационным. С увеличением скорости амплитуда несколько уменьшается, частота увеличивается, и сами колебания становятся синусоидальными. Последнее объясняется действием момента инерции щетки.

IV. Влияние температуры контакта. Анализ влияния температуры на колебания щеток оказывается наиболее сложным, так как температура влияет на все физико-механические свойства фрикционных пар. С увеличением температуры до 90—100°С амплитуда колебаний увеличивается, а частота незначительно падает. Это объясняется увеличением коэффициента трения. При дальнейшем увели-

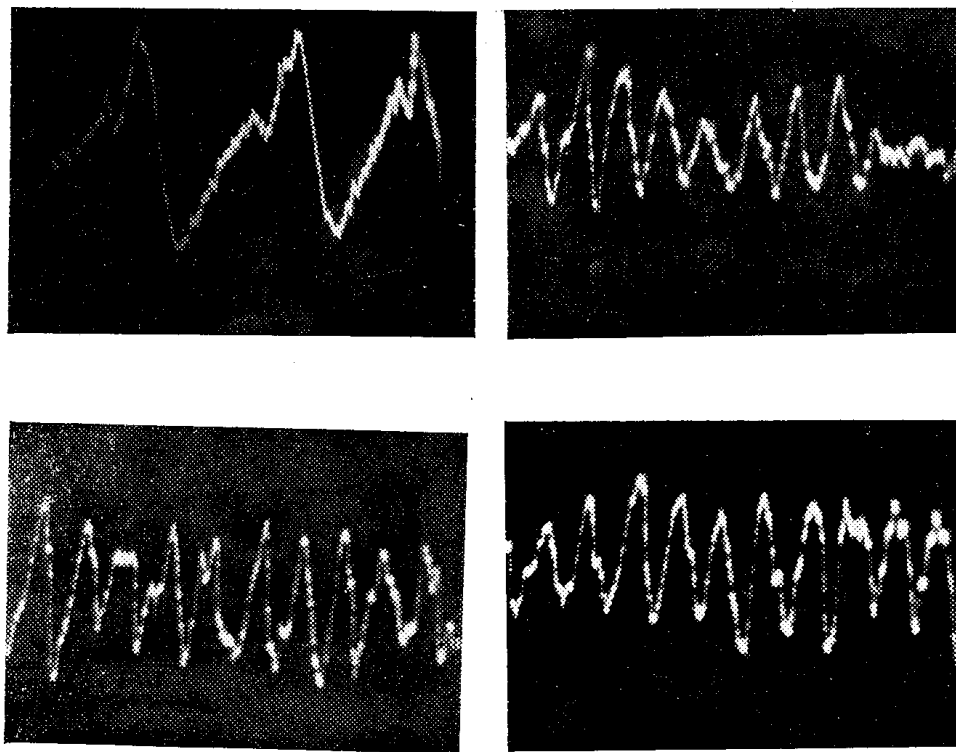


Рис. 4. Осциллограммы тангенциальных колебаний щетки ЭГ-14 при $P=250$ г/см².
 а — $n=200$ об/мин; б — $n=1200$ об/мин;
 в — $n=2000$ об/мин; г — $n=3000$ об/мин.

чении температуры амплитуда колебаний уменьшается, что очевидно, связано с размягчением поверхности щетки и образованием вязкой прослойки.

V. Влияние вылета щетки из щеткодержателя. Из вышеперечисленных факторов, влияющих на колебания щеток, наибольшее влияние оказывает зазор между щеткодержателем и кольцом. Увеличение зазора с 2 до 4 мм приводит к увеличению амплитуды колебаний в 2—2,5 раза.

VI. Кроме перечисленных факторов большое влияние на интенсивность колебаний щеток оказывает также угол, образуемый щеткой с поверхностью кольца. При установке щетки под углом 2—4° по направлению вращения кольца удается почти полностью избавиться от тангенциальных колебаний.

Для исследования влияния тангенциальных колебаний на токосъем авторами был поставлен эксперимент с трехслойными щетками. Щетки предварительно тщательно притирались на медном кольце при плотности тока 20 а/см². В ходе эксперимента наблюдался характер распределения тока по слоям щетки и связь этих токов с тангенциальными колебаниями.

Как показали экспериментальные исследования, при работе щетки на кольце или коллекторе постоянно происходит перераспределение тока по слоям щетки. При этом наибольшие изменения претерпевают токи в набегающем и сбегаящем краях щетки, что указывает на нестабильность работы набегающего и сбегаящего краев щетки. В табл. 1 приведены значения падений напряжений на слоях щетки ЭГ-14, из которых можно заключить, что глубина модуляции падения

Таблица 1

Скорость n об/мин	Набегающий край		Средний слой		Сбегающий край	
	U =	в U ≈	U =	в U ≈	U =	в U ≈
2300	0,54	0,24	0,50	0,15	0,52	0,24
1800	0,54	0,23	0,50	0,15	0,52	0,23
1400	0,53	0,22	0,50	0,15	0,51	0,22
1000	0,51	0,20	0,49	0,14	0,51	0,18
500	0,51	0,14	0,48	0,12	0,50	0,16
0	0,46	0	0,46	0	0,48	0

напряжения достигает значительной величины, принимая значения от 16 до 50 проц. За глубину модуляции бралось отношение переменной $U \approx$ к постоянной составляющей $U =$ переходного падения напряжения, выраженное в процентах. Измерение $U \approx$ и $U =$ производилось методом осциллографирования. При осциллографировании напряжений на сбегающем и набегающем краях щетки с помощью двухлучевого осциллографа С1-16 оказывается, что эти напряжения находятся строго в противофазе (рис. 5). Последнее указывает на то, что имеющие место колебания щеток по природе своей качательные, а не изгибные, как указывает К. Binder [4].

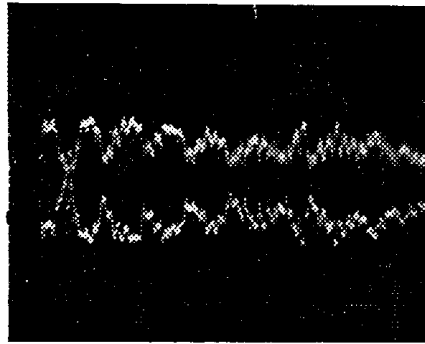


Рис. 5. Осциллограмма падения напряжения в набегающем и сбегающем слоях щетки

Имеющая место модуляция падения напряжения на щетке находится в непосредственной связи с модуляцией фактической площади контакта щетка—коллектор и, следовательно, переходным сопротивлением. Как известно, мгновенная площадь контакта, воспринимающая нажатие, составляет лишь незначительную долю номинальной площади. При этом фактическая площадь зависит от величины удельного нажатия, твердости электрощеточного материала и связана с ними следующей зависимостью [8]:

$$F = \frac{P}{kH} \quad (17)$$

С другой стороны, переходное сопротивление между щеткой и кольцом состоит из сопротивления стягивания R_F и сопротивления окисной пленки. Последнее можно считать обратно пропорциональным площади соприкосновения контактов

$$R_F = \alpha \frac{1}{F} \quad (18)$$

где α — некоторый коэффициент пропорциональности.

Таким образом, наблюдающаяся на практике модуляция падения напряжения может быть объяснена изменением площади контактирования и переходного сопротивления при наличии тангенциальных колебаний щеток.

$$R = f(\varphi, P, t). \quad (19)$$

Из (19) видно, что для учета величины модуляции переходного сопротивления необходимо знать зависимость фактической площади контакта от параметров колебаний.

Как известно из практики, падение напряжения в скользящем контакте больше падения напряжения на неподвижном контакте на некоторую величину ΔU :

$$U = RI + \Delta U. \quad (20)$$

Если сделать допущение, что ток через контакт не модулируется (что в большинстве случаев и имеет место), то для контактного падения напряжения можно записать

$$U = \frac{\alpha \xi H}{P} \cdot I + \frac{m \alpha \xi H}{P} \cdot I \sin 2\pi ft. \quad (21)$$

Из (21) имеем для U и R :

$$U = \frac{\alpha \xi H I}{P} (1 + m \sin 2\pi ft), \quad (22)$$

$$R = \frac{\alpha \xi H}{P} (1 + m \sin 2\pi ft). \quad (23)$$

В случае, когда наблюдаются интенсивные колебания щеток, сопровождающиеся треском и свистом, имеет место и модуляция тока через контакт, что приводит к искрению.

Таким образом, несомненным является то, что поперечные колебания щеток при определенных условиях являются чрезвычайно вредными, приводящими к серьезным нарушениям коммутации. На основании (23) можно показать, что переходное сопротивление контакта щетка—ламель также не остается постоянным при замыкании коммутирующей секции и изменяется по некоторому закону, определяемому глубиной модуляции контактного сопротивления и фазой положения щетки:

$$R = R_0 \left(1 + \frac{m \sin 2\pi ft}{T - t} \right), \quad (24)$$

где

T — теоретический период коммутации,

t — текущая координата времени,

f — частота колебаний щетки,

m — глубина модуляции контактного падения напряжения.

Из вышеизложенного видно, что тангенциальные колебания, кроме всего прочего, оказывают значительное влияние на неидентичность коммутационных циклов в отношении периода коммутации. Последнее вытекает из того, что тангенциальные колебания приводят к нестабильности набегающего и сбегающего краев щетки.

Выводы

1. В работе приводятся результаты исследований тангенциальных колебаний щеток на контактном кольце и короткозамкнутом коллекторе на основе общей теории фрикционных колебаний [1, 2, 3].

2. Показано, что характер и интенсивность тангенциальных колебаний зависят от следующих параметров коллекторно-щеточного узла: массы и момента инерции щетки, жесткости тела щетки, вылета щетки из щеткодержателя, высоты щеткодержателя, нажатия, температуры и зазора в направляющих.

3. На основании проведенных исследований даны следующие рекомендации по частичному устранению тангенциальных колебаний:

- а) уменьшение до минимума зазора в направляющих;
- б) уменьшение зазора между щеткодержателем и коллектором;
- в) использование более твердых щеток;
- г) уменьшение общего боя коллекторов.

4. Устанавливается связь между тангенциальными колебаниями и электрическими характеристиками скользящего контакта. Так, тангенциальные колебания всегда сопровождаются модуляцией переходного сопротивления и контактного падения напряжения, что может приводить к модуляции тока коммутирующей секции и, следовательно, к ухудшению коммутации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. В. Дерягин, В. Э. Пуш, Д. И. Полстой. Теория скольжения твердых тел с периодическими остановками. Ж. Т. Ф., т. XXVI, вып. 6, 1956.
2. С. П. Стрелков. Маятник Фрауда. Ж. Т. Ф., т. III, вып. 4, 1933.
3. О. А. Торопов. О нелинейных колебаниях фрикционных систем с односторонней связью. Труды НПИ, т. 163, 1966.
4. К. Биндер. Влияние механических собственных колебаний угольных щеток на коммутацию и токосъем. ETZ — В, Bd13, N10, 1961.
5. W. Wolkman. О влиянии сил трения на динамическое поведение угольных щеток. ETZ-A, № 6, 1964.
6. П. С. Лившиц. Эксплуатация электрощеток в металлургической промышленности. Металлургия, 1966.
7. Л. Я. Зиннер, А. И. Скороспешкин. Прибор для измерения малых перемещений. Известия ТПИ, т. 172, 1967.
8. Р. Хольм. Электрические контакты, ИИЛ, 1961.