

О ТАНГЕНЦИАЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЯХ УГОЛЬНЫХ ЩЕТОК

Э. К. Дамм, Л. Я. Зиннер, А. И. Скороспешкин

(Рекомендована семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

Хотя теоретическому и экспериментальному изучению тангенциальных колебаний щеток посвящено несколько работ [1, 2, 3, 4], характер и степень их влияния на коммутационный процесс, а также возможные меры борьбы с ними изучены еще недостаточно. В данной работе делается попытка на основе более точного уравнения движения щетки проанализировать условия возникновения тангенциальных колебаний, возникновения известного явления «свиста» щеток, а также некоторые вопросы влияния поперечных колебаний щеток на коммутационный процесс.

Уравнение движения щетки и его анализ

Расчетная схема узла токосъема представлена на рис. 1.

Принимаем следующие обозначения:

I — момент инерции щетки относительно оси поворота.

φ — угол отклонения щетки от положения равновесия.

(Положение равновесия соответствует отсутствию тангенциальных колебаний при работе, когда щетка силами трения прижата к краю C щеткодержателя).

P — нажимное усилие курка щеткодержателя;

$R_{щ}$ — радиус зеркала щетки;

R_k — радиус коллектора;

l — расчетное плечо приложения силы трения;

c — коэффициент трения покоя скользящей пары щетка—коллектор;

D — коэффициент, учитывающий уменьшение коэффициента трения при наличии относительного перемещения щетки и коллектора.

v — окружная скорость поверхности коллектора;

h — коэффициент, учитывающий потери энергии в теле щетки при ее деформировании, непосредственно связанной с коэффициентом восстановления материала щетки;

M_r — постоянная составляющая реакция щеткодержателя в точке C ;

d — вылет щетки из щеткодержателя;

k — жесткость контактного слоя в точке C .

Предполагается, что нажимное усилие направлено по оси щетки. Радиус щетки всегда больше радиуса коллектора.

В рассматриваемой системе действуют следующие моменты:

Момент от силы трения между щеткой и коллектором, переменная составляющая которого пропорциональна производной от угла φ ,

$$M_{\text{тр}} = lP[c - D(v - l\dot{\varphi})] = (lcP - lPDv) + l^2PD\dot{\varphi}. \quad (1)$$

Момент от реакции щеткодержателя в точке С, переменная составляющая которого пропорциональна φ ,

$$M_c = M_r + k(l-d)^2\varphi.$$

Динамический момент

$$M_J = -I\ddot{\varphi}. \quad (3)$$

Момент, обусловленный потерями энергии, возникающими при периодическом деформировании контактного слоя в точке С

$$M_B = h(l-d)^2\dot{\varphi}. \quad (4)$$

Момент от нажатия нажимного пальца

$$M_P = \frac{R_{\text{ш}}}{R_{\text{ш}} - R_{\text{к}}} lP \varphi. \quad (5)$$

Выражение (5) учитывает тот факт, что при изменении угла φ площадка контактирования щетки с коллектором (герцевская зона) перемещается по лицевой поверхности щетки.

С учетом (1) — (5) уравнение равновесия моментов относительно точки О для рассматриваемой системы запишется в виде

$$-I\ddot{\varphi} - lP \frac{R_{\text{ш}}}{R_{\text{ш}} - R_{\text{к}}} \varphi + lPc - lPDv - l^2PD\dot{\varphi} - M_r + k(l-d)^2\varphi - h(l-d)^2\dot{\varphi} = 0. \quad (6)$$

При постоянной скорости вращения коллектора щетка выбирает зазор в щеткодержателе и отклоняется на угол Ψ_0 такой величины, что постоянные составляющие момента трения и реакции щеткодержателя уравновешивают друг друга:

$$lPc - lPDv - M_r = 0. \quad (7)$$

С учетом (7) выражение (6) можно переписать в виде

$$\ddot{\varphi} + \left[\frac{h(l-d)^2 - l^2PD}{I} \right] \dot{\varphi} + \left[\frac{lP \frac{R_{\text{ш}}}{R_{\text{ш}} - R_{\text{к}}} + k(l-d)^2}{I} \right] \varphi = 0. \quad (8)$$

Уравнение (8) есть уравнение свободных колебаний рассматриваемой системы.

Характер колебательного процесса может быть различным в зависимости от знака коэффициента при φ . Предположим, что он положительный, т. е.

$$h(l-d)^2 - l^2PD > 0. \quad (9)$$

Физически это означает, что характеристика коэффициента трения не слишком круто падает с ростом скорости относительного перемещения щетки и коллектора, и что потери энергии при деформировании щетки относительно велики.

Наблюдения показывают, что тангенциальные колебания щеток всегда периодические. Колебания в данной системе при выполнении условия (9) могут происходить только под действием начального толчка. При этом затухающие колебания происходят по закону:

$$\varphi = \varphi_0 l^{-\frac{1}{2}} \sin \omega t, \quad (10)$$

где

$$\omega = \frac{1}{2} \sqrt{4 \left[\frac{lP \frac{R_{\text{ш}}}{R_{\text{ш}} - R_{\text{к}}} + k(l-d)^2}{I} \right]^2 - \left[\frac{h(l-d)^2 - l^2 P D}{I} \right]^2},$$

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

φ_0 — начальное отклонение системы.

Если щетка не будет испытывать возмущений со стороны коллектора, тангенциальные колебания будут вообще отсутствовать. На рис. 2 сопоставлены профилограмма коллектора и осциллограмма тангенциальных колебаний щетки. Обе осциллограммы сняты одновременно с экрана двухлучевого осциллографа. Выступающие на несколько микрон коллекторные пластины возбуждают колебания, которые затем затухают в соответствии с выражением (10).

До нуля колебания не затухают лишь по той причине, что невозможно получить идеальную поверхность скольжения. Колебания могут возбуждаться также из-за эллиптичности и эксцентриситета коллектора,

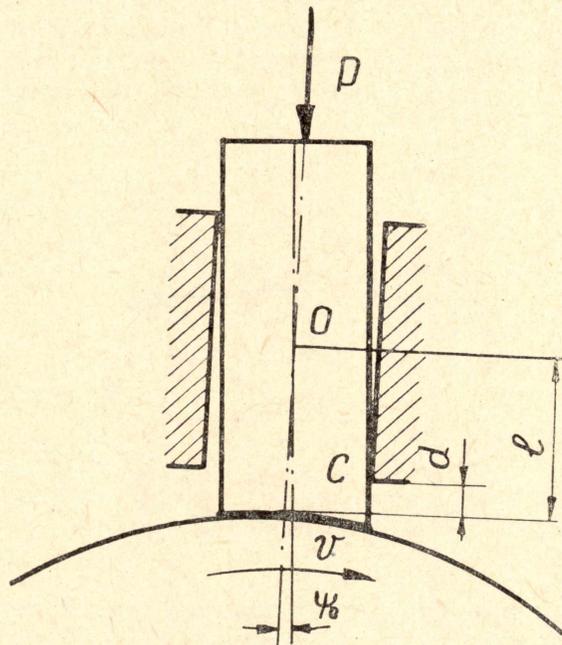


Рис. 1. Расчетная схема

поскольку в этом случае изменяется сила трения из-за модуляции контактного давления. На это указывал еще W. Volkmann [3].

Если выполняется условие

$$h(l-d)^2 - l^2 P D < 0. \quad (11)$$

рассматриваемая система становится неустойчивой. Решением уравнения (8) в этом случае является (при комплексно-сопряженных корнях характеристического уравнения) синусоида с бесконечно возрастающей амплитудой.

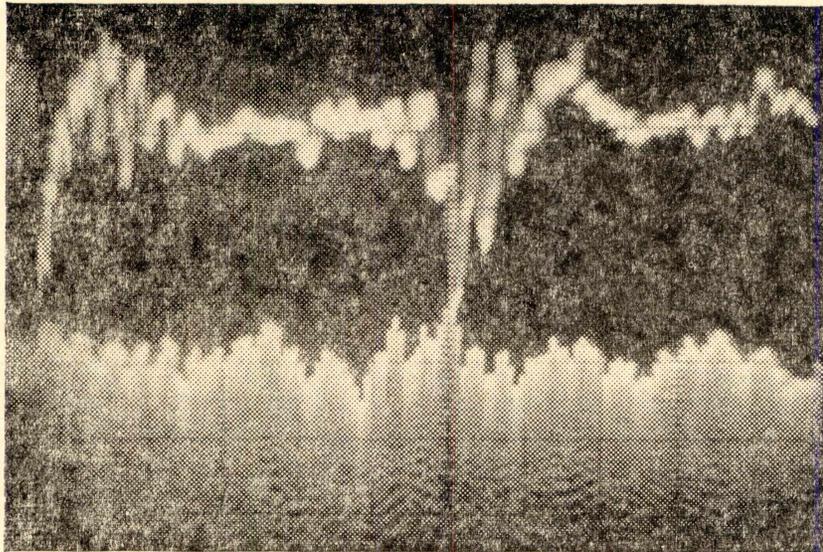


Рис. 2. Осциллограмма профиля коллектора (внизу), тангенциальных колебаний щетки (вверху)

На практике это не имеет места. Следовательно, для случая (11) уравнение (8) недействительно. Причина этого двоякая. Во-первых, характеристика коэффициента трения приближенно аппроксимируется выражением $K_{тр} = c - Dv$ лишь на небольшом участке (рис. 3).

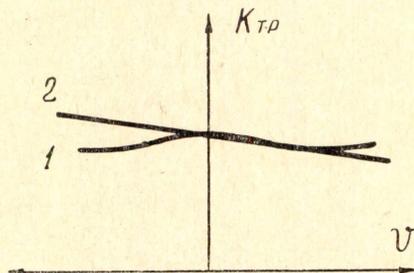


Рис. 3. 1 — реальная характеристика трения, 2 — расчетная, $K_{тр} = c - Dv$

Во-вторых, если раньше при колебаниях щетка не отрывалась от края С щеткодержателя, то теперь амплитуда тангенциальных колебаний возрастает настолько, что щетка отрывается от щеткодержателя и правильнее было бы рассматривать систему с ограничением.

При выполнении условия (11) система легко переходит в автоколебательный режим, который описывается сложным нелинейным уравнением.

Известное явление «свиста» щеток, сопровождающееся резким увеличением амплитуды тангенциальных колебаний, как раз и соответствует условию (11).

На рис. 4 представлены осциллограммы ламельного тока и переходного падения напряжения, полученные на установке, описанной в [5] данного сборника, при «свистящих» щетках. Бросается в глаза, что влияние колебаний на величину переходного падения напряжения значительное.

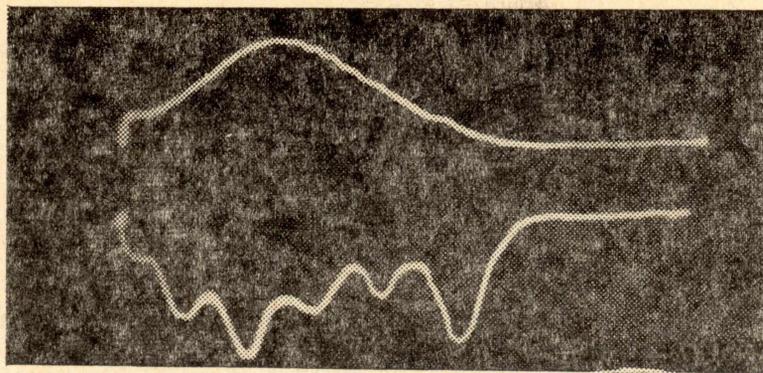


Рис. 4. Ламельный ток (вверху) и переходное падение напряжения (внизу) при «свистящих» щетках

Наблюдения показывают, что при отсутствии «свиста» щеток частота тангенциальных колебаний почти не зависит от скорости вращения коллектора, а по форме колебания близки к синусоидальным.

При свистящих щетках, как показывает непосредственное осциллографирование колебаний, частота в значительной степени зависит от скорости вращения, а по форме колебания значительно отличаются от синусоидальных, что является характерным признаком автоколебательного процесса.

О том, что явление «свиста» весьма вредно влияет на коммутационный процесс, убедительно говорит рис. 4.

Выражение (9) является условием того, что «свист» щеток не наступит. Эффективными мерами борьбы с этим вредным явлением являются: выбор минимального возможного вылета щетки из щеткодержателя d и установка демпфирующих прокладок в зазор между щеткой и щеткодержателем со стороны набегающего края щетки из материала с низким коэффициентом восстановления скорости.

Тангенциальные колебания щеток и коммутация

Когда говорят о том, что радиус зеркала щетки больше радиуса коллектора, считают, что щетка притирается по радиусу участка коллектора с наименьшей кривизной. Это соответствовало бы действительности, если бы щетка не совершала тангенциальных колебаний. Эти колебания можно рассматривать как вращение щетки вокруг оси O (рис. 1).

После длительной работы радиус зеркала щетки становится таким, чтобы при любом положении щетки площадь лицевой поверхности, воспринимающая нажатие, была одинакова. Зная геометрические размеры узла токосъема, можно получить выражение, связывающее радиус кривизны лицевой поверхности щетки с амплитудой тангенциальных колебаний.

Допустим, что щетка, совершая колебания, перемещается параллельно самой себе. Точное определение положения точки O затруднительно, но, учитывая, что амплитуда колебаний на несколько порядков меньше величины l , положение центра колебаний не играет существенной роли. Допустим далее, что щетка, изнашиваясь, получает кривизну с постоянным радиусом $R_{щ}$. Упругую деформацию щетки и коллектора не учитываем.

Если через A_m обозначить двойную амплитуду (размах) тангенциальных колебаний щетки, то зазор δ_k под краем щетки, если последняя занимает среднее положение, будет равен

$$\sigma_k = A_m \frac{b_{ш}}{2R_k}, \quad (12)$$

где $b_{ш}$ — ширина щетки.
Радиус кривизны щетки

$$R_{ш} = R_k + \frac{A_m b_{ш}}{2 \sqrt{R_k^2 - \frac{b_{ш}^2}{4}} - \frac{b_{ш}^2}{2R_k}}. \quad (13)$$

Если щетка занимает среднее положение, зазор между щеткой по ширине щетки изменяется по закону

$$\sigma = (R_{ш} - R_k) + (\sqrt{R_k^2 - a^2} - \sqrt{R_{ш}^2 - a^2}), \quad (14)$$

где a — расстояние от оси щетки.

Чтобы иметь представление о степени влияния тангенциальных колебаний, проведем расчет. Пусть $R_k = 4 \text{ см}$, $b_{ш} = 1 \text{ см}$, $A_m = 10^{-3} \text{ см} = \text{мк}$. Тогда из (4) имеем $R_{ш} = 4,0166 \text{ см}$. Радиус щетки увеличился на 166 мк . Из этого примера ясно, что основную роль в увеличении радиуса кривизны лицевой поверхности щетки играют тангенциальные колебания.

Прямые измерения зазора между щеткой и коллектором с помощью емкостного датчика, заложенного в межламельный паз, показывают, что при отсутствии «свиста» щеток зазор отсутствует (рис. 5а). Если под щеткой имелся бы зазор переменной величины, то импульс от емкостного датчика не был бы прямоугольной формы.

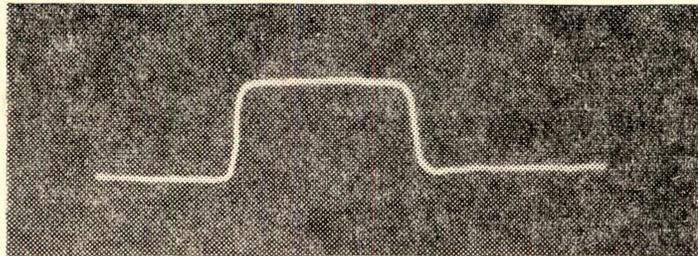


Рис. 5а. Зазор между щеткой и коллектором при спокойной работе

При «свистящих» щетках края щетки могут кратковременно отрываться от поверхности коллектора (рис. 5б).

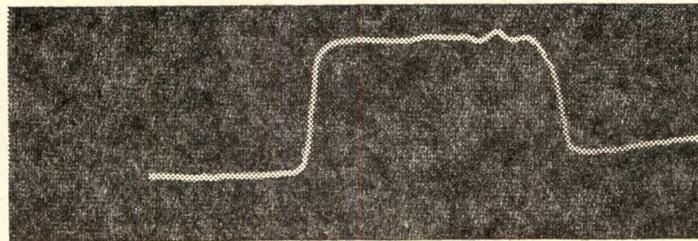


Рис. 5б. Зазор между щеткой и коллектором при «свистящих» щетках

Зазор под щеткой может полностью выбираться за счет упругой деформации материала щетки и коллектора, но распределение удельного давления в контактном слое становится неравномерным, что непосредственно влияет на величину переходного падения напряжения между ламелью и щеткой при множественном щеточном перекрытии.

Выводы

1. Получено и проанализировано уравнение тангенциальных колебаний щеток. При нормальной работе щетки амплитуда тангенциальных колебаний зависит от формы профиля коллектора, частота — от параметров щеточно-коллекторного узла.

2. Выяснено, при каких условиях возникает «свист» щеток, сопровождающийся резким возрастанием амплитуды тангенциальных колебаний, указаны меры борьбы с этим явлением.

3. Радиус кривизны лицевой поверхности щетки в основном определяется тангенциальными колебаниями щеток.

ЛИТЕРАТУРА

1. W. Volkmann. Über Kohlenbürsten — Schwingungen mit kleiner Amplitude. ETZ—A, № 5, 1961.

2. K. Binder. Der Einfluß mechanischer Eigenschwingung von Kohlenbürsten auf Kommutierung und Stromabnahme. ETZ—B, Bd. 13, H 10, 1961.

3. W. Volkmann. Über den Einfluß der Reibungskräfte auf das Dynamische Laufverhalten der Kohlenbürste. ETZ—A, № 6, 1964.

4. Л. Я. Зиннер, А. И. Скороспешкин. Тангенциальные колебания щеток. Известия ТПИ, т. 190, 1968.

5. А. И. Скороспешкин, Л. Я. Зиннер, Э. К. Дамм, В. П. Каратаев. Установка для экспериментального исследования скользящего контакта щетка — коллектор. Статья в данном сборнике.