

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОЩЕТОК НА КОЛЛЕКТОРАХ И ТОКОСЪЕМНЫХ КОЛЬЦАХ

Л. Я. ЗИННЕР, А. И. СКОРОСПЕШКИН, Э. К. ДАММ

(Рекомендована научным семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

Удовлетворительная коммутация коллекторных электрических машин в значительной мере определяется качеством выполнения коллекторно-щеточного аппарата и, следовательно, состоянием рабочей поверхности.

Одной из причин неудовлетворительной коммутации является нестабильность поверхности коллектора, приводящая к отрыву щеток и, следовательно, к искрообразованию даже на низких скоростях вращения.

В связи с этим возникает необходимость аналитического и экспериментального исследования устойчивости работы щеток на коллекторах и токосъемных кольцах и в разработке допусков на основные параметры узла токосъема.

В настоящей работе основное внимание уделяется исследованию работы щеток при воздействии на них гармонических и ударных возмущений со стороны коллектора, определению условий безотрывной работы щеток и разработке допусков.

Эксцентриситет, эллиптичность и межламельный перепад высот.

В качестве расчетной схемы при воздействии на щетку гармонических возмущений принята схема рис. 1, где T — сила трения щетки о щеткодержатель, W — сила вязкого трения щетки о воздух, N — реак-

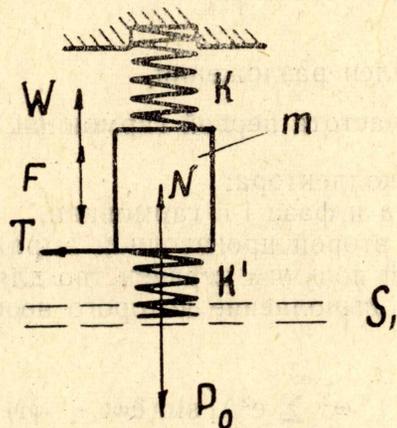


Рис. 1. Расчетная схема коллекторно-щеточного узла

ция коллектора, развиваемая при упруго-пластической деформации контактного слоя, P_0 — нажатие на щетку, m — масса щетки, K — жесткость нажимной пружины, K' — жесткость контактного слоя, S_1 — зона деформации щетки.

В случае простого щеткодержателя, когда отсутствуют демпфирующие массы для уменьшения внешних вибраций, сила весьма мала и определяется соотношением [1]

$$W = C \cdot g \cdot S, \quad (1)$$

где

C — коэффициент лобового сопротивления;

$$q = -\frac{\rho}{2} V_{щ}^2,$$

S — площадь сечения щетки;

ρ — плотность воздуха $+20^\circ\text{C}$;

$V_{щ}$ — скорость радиального перемещения щетки.

В первом приближении скорость щетки может быть определена как:

$$V_{щ} = \sqrt{\frac{2h_{\max}P_0}{m}}, \quad (2)$$

где

h_{\max} — максимальная высота неровности;

P_0 — нажимное усилие;

m — масса щетки.

Условие безотрывного движения щетки запишем в виде:

$$\frac{P_0}{m} = \frac{d^2h(e)}{dt^2}. \quad (3)$$

Отсюда нажатие, необходимое для обеспечения непрерывного следования щетки по неровностям коллектора, определится из выражения:

$$P_0 = K[\delta - \xi + h(e)], \quad (4)$$

где

ξ — сближение контактирующих поверхностей за счет упругой деформации щетки под действием силы P_0 ,

δ — предварительное смещение нажимной пружины;

$h(e)$ — функция, описывающая профиль коллектора.

В общем случае функцию $h(l)$ можно представить в виде разложения в ряд Фурье, выразив длину окружности коллектора через окружную скорость и время:

$$h(e) = a_0 + \sum_{i=1}^{\infty} A_i \sin(i\omega t + \varphi_i), \quad (5)$$

где

a_0 — постоянный член разложения,

$\omega = \frac{2\pi V}{e}$ — круговая частота первой гармоники, соответствующая экс-

центриситету коллектора;

A_i и φ_i — амплитуда и фаза i -й гармоники.

После подстановки второй производной выражения (5) в (3) и некоторых преобразований получим неравенство для собственной частоты колебательной системы, выполнение которого необходимо для устойчивости контакта.

$$p^2 \leq \frac{\omega^2 \sum_{i=1}^{\infty} e^2 A_i \sin(e\omega t + \varphi_i)}{\delta - \xi + \sum_{i=1}^{\infty} A_i \sin(i\omega t + \varphi_i) + a_0}, \quad (6)$$

где $p = \sqrt{\frac{K}{m}}$ — собственная частота системы щетка—пружина.

Их (6) после ряда преобразований получим выражение для предельного значения амплитуды любой гармонической составляющей профиля коллектора:

$$A_1 \leq \frac{\delta - \xi + a_0}{1 + \frac{\omega^2 I^2}{p^2}}. \quad (7)$$

Выражения (6, 7) справедливы для случая, когда не учитывается сила сопротивления F и контактная жесткость K' .

С учетом F и K' движение щетки описывается дифференциальным уравнением вида:

$$m\ddot{y} + m\dot{h}(e) - K\delta + K'\xi \pm N'(C - Dy) = 0, \quad (8)$$

где

N' — давление на щетку со стороны щеткодержателя в местах прилегания,

C и D — коэффициенты в силе сопротивления, характеризующие трение свойства электрощеточного материала [2].

Из (8) видно, что условие безотрывности движения щетки по деформированному коллектору выполняется, если имеют место неравенства:

$$m\ddot{y} + m\dot{h}(l) - K\delta + K'\xi \pm N'(C - Dy) < 0. \quad (9)$$

при $y \leq h(l)$.

Предположим, что движение щетки отлично от движения неровности на поверхности коллектора и происходит по закону $y = y \sin \theta t$. Тогда с учетом контактной жесткости и силы сопротивления решением неравенства (9) будет выражение вида:

$$A_1 \leq \frac{\delta + a_0 - \frac{K'}{K} \xi - y \frac{\theta^2}{p^2} \pm N' \frac{C}{K}}{\frac{\omega^2 I^2}{p^2}}. \quad (10)$$

Анализ выражения (6, 7, 10) позволяет сделать следующие выводы:

1. С целью уменьшения вероятности отрыва щеток необходимо увеличить собственную частоту колебаний системы при неизменном нажатии, что достигается уменьшением массы щеток и увеличением жесткости нажимной пружины и, кроме того, использовать щетки с меньшей контактной жесткостью.

2. При использовании твердых марок щеток, как обладающих лучшими коммутационными свойствами, необходимо уменьшать допустимые значения неровностей поверхности коллектора и линейные скорости, что достигается уменьшением диаметра коллектора при заданной скорости вращения.

Значительно большие трудности в обеспечении безотрывного движения щеток, как правило, возникают при наличии значительных межламельных перепадов.

Для рассмотрения механизма взаимодействия щеток с выступающими ламелями рассмотрим схему рис. 2, где S — импульс ударной силы; S_0 — нормальная составляющая импульса ударной силы, F — тангенциальная составляющая; R_k — радиус коллектора; $R_{щ}$ — радиус закругления щетки; α_0 — угол удара; h — перепад высот соседних ламелей.

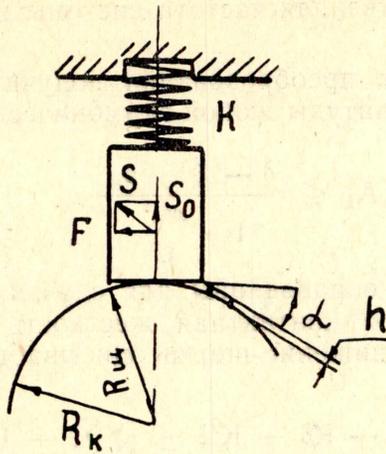


Рис. 2. Схема взаимодействия щетки с выступающей ламелью

Поведение щетки при ударе о выступающую пластину определится импульсом ударной силы [2], который в общем случае запишется в следующем виде:

$$S = \lim_{\tau \rightarrow 0} (S_0 \tau), \quad (11)$$

где τ — продолжительность удара,
 S_0 — единичный импульс ударной силы.

Зная величину импульса силы, смещение щетки после соударения и ее скорость можно определить из выражений

$$y = \frac{1}{m_p} \sum_{j=0}^j \left[S_0 \sin p t + \dots + S_j \sin p(t - jT_c) \right], \quad (12)$$

$$\dot{y} = \frac{1}{m} \sum_{j=0}^j \left[S_0 \sin p t + \dots + S_j \sin p(t - jT_c) \right], \quad (13)$$

где $T_c = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{m}{k}}$ — период собственных колебаний системы щетка — пружина.

Таким образом, при исследовании поведения щетки, ударяющейся о выступающие пластины коллектора, задача сводится к определению возникающих при каждом ударе импульсов мгновенных сил и суммированию рядов для y и \dot{y} при любом количестве выступающих пластин, j .

В случае единичного удара импульс силы определим как:

$$S_j = \frac{m_{np} \cdot m(V - V_j)}{m_{np} + m}, \quad (14)$$

где m_{np} — приведенная масса якоря,

$$m_{np} = \frac{I_x}{r^2},$$

I_x — момент инерции якоря относительно оси вращения;

m — масса щетки,

r — радиус удара,

V_j — скорость щетки в момент удара,

V — скорость ламели.

Из рис. 2 определим радиальную составляющую импульса ударной силы:

$$S_0 = S_j \alpha, \quad (15)$$

где

α — угол удара,
 h — высота ламели,
 $b_{щ}$ — ширина щетки по коллектору.

Учитывая, что в момент соударения радиальная составляющая скорости щетки $V_j = 0$, получим после подстановки в (14) значений для α и $m_{пр}$ выражение для импульса ударной силы:

$$S_0 = \frac{2I_x m V h}{r^2 \left(\frac{I_x}{r^2} + m \right) b_{щ}}. \quad (16)$$

После подстановки в (16) значения $r = (R_k + h) \approx R_k$ и $\frac{m}{I_x} \approx 0$ и некоторых преобразований имеем для импульса ударной силы:

$$S_0 = \frac{y \pi R_k m h \omega}{b_{щ}} (1 + K_B), \quad (17)$$

где

ω — угловая скорость,
 K_B — коэффициент восстановления скорости щетки, учитывающий способность щеток демпфировать ударные нагрузки.

Из (12) находим:

$$y = \frac{1}{m_p} \sum_0^1 S_0 \sin \pi t = \frac{4 \pi R_k h \omega}{b_{щ} p} (1 + K_B). \quad (18)$$

Выражение (18) получено при условии, что нажимная пружина предварительно не напряжена. С учетом предварительного смещения пружины имеем:

$$y_{\max} = \sqrt{\delta^2 + \left(\frac{4 \pi R_k h \omega}{b_{щ} p} \right)^2 \cdot (1 + K_B)^2}. \quad (19)$$

Из (19) найдем условие безотрывности движения щетки по коллектору при соударении с выступающей ламелью. Очевидно, что условие должно выполняться при $y_{\max} \leq h$, откуда

$$h_{\max} \leq \delta \sqrt{\frac{1}{\frac{4 \pi^2 D k^2 \omega^2}{b_{щ}^2 p^2} \cdot (1 + K_B)^2}}. \quad (20)$$

Из (20) видно, что для обеспечения безотрывного движения щеток по коллектору при взаимодействии с выступающими ламелями необходимы те же меры, что и в случае высокочастотных гармонических возмущений. Наиболее эффективным мероприятием следует считать уменьшение перепада между ламелями и уменьшение диаметра коллектора, особенно в высокоскоростных машинах.

В этой связи следует считать необходимой разработку жесткой системы допусков на основные параметры состояния поверхности коллекторов. Выражения, полученные из аналитического рассмотрения условий безотрывности движения щеток, позволяют получить простые формулы для определения допустимых значений эксцентриситета, эллиптичности и межламельных перепадов. Для этого рассмотрим уравнение баланса сил, действующих на щетку:

$$\delta_k - \frac{d^2h(e)}{dt^2} = 0. \quad (21)$$

Из (21) определим критические значения эксцентриситета e и эллиптичности E , выше которых происходит отрыв щеток от коллектора:

$$e \leq \frac{3600\delta_k}{4\pi^2 n^2 m}, \quad (22)$$

$$E \leq \frac{3600\delta_k}{16\pi^2 n^2 m}. \quad (23)$$

В общем случае при известном шаге неровности по коллектору значение допустимой высоты ее определится из выражения:

$$A \leq \frac{3600\delta_k e^2}{4\pi^4 D_k^2 n^2 m}. \quad (24)$$

Значения для E и e , полученные расчетным путем из (22) и (23), представляют собой предельные значения, выше которых происходит отрыв щеток от коллектора. Очевидно, что реальные значения эксцентриситета и эллиптичности должны быть много меньше предельных, поскольку уже на сравнительно низких скоростях вращения наличие эксцентриситета приводит к таким вредным явлениям, как модуляция контактного давления, переходного сопротивления, действительной дуги контактирования щетки с коллектором и интенсификация тангенциальных колебаний.

Следовательно, необходимо установить некоторые критерии, которые характеризовали бы надежность работы скользящего контакта.

Таковыми критериями, на наш взгляд, являются, с одной стороны, запас механической устойчивости по скорости и, с другой стороны, коэффициент пульсации контактного давления K_n .

$$\psi = \frac{n}{n_{\text{крит}}}. \quad (25)$$

В (25) приняты следующие обозначения:

n — рабочая скорость вращения; $n_{\text{крит}}$ — критическая скорость, при которой происходит отрыв щеток от коллектора.

Выражение для коэффициента пульсации контактного давления получим из равенства силовых воздействий на щетку (21) путем подстановки в него выражений для ускорения щетки коллектором и нажимной пружины. После ряда преобразований имеем:

$$K_{n(e)} = \frac{4\pi^2 m n^2 e}{900 P_0}, \quad (26)$$

$$K_{n(E)} = \frac{16\pi^2 m n E}{900 P_0}. \quad (27)$$

где

$K_{n(e)}$ и $K_{n(E)}$ — коэффициенты пульсации контактного давления, обусловленные эксцентриситетом и эллиптичностью.

Из (25, 26, 27) видно, что контакт щетка с коллектором устойчив при $\psi = K_n = 0$. При $\psi = 1$ и $K_n = 1$ контакт полностью неустойчив.

Для разработки обоснованной системы допусков необходимо также экспериментальное исследование значений ψ и K_n , при которых работа щеток удовлетворительна. С этой целью нами был поставлен эксперимент на разгонной установке с медным кольцом диаметром 130 мм, имевшим эксцентриситет 100 мкм. На кольцо устанавливались испытываемые щетки, тщательно притертые при плотности тока 20 а/см².

Методика эксперимента заключалась в следующем: диск приводился во вращение, и на определенной скорости измерялись постоянная и переменная, обусловленные действием эксцентриситета, составляющие контактного падения напряжения.

В ходе эксперимента варьировались скорость вращения кольца от 500 до 6000 об/мин и нажатие на щетку от 100 до 500 г/см². За критерий нормальной работы контакта бралась величина глубины модуляции контактного падения напряжения, равная

$$m = \frac{U_{\sim}}{U_{=}} \cdot 100. \quad (28)$$

Было установлено, что признаки неудовлетворительной работы скользящего контакта, заключающиеся в появлении видимого искрения, наблюдаются уже при $m=50$ проц., а надежная работа имеет место при $m=(5-10)$ проц. Кроме того, выявлено, что между глубиной модуляции контактного падения напряжения и коэффициентами Ψ и K_n имеется прямая зависимость. Так, при $m=15$ проц., что имеет место, когда $n=3000$ об/мин, $P_0=3000$, $e=100$ мк и $G=10$ г, величина $K_{n(e)}$, вычисленная по (26) для тех же значений n , P_0 , e и G , составляет 0,15, а величина $\Psi = 0,10$.

Таким образом, можно считать установленным, что для хорошей работы скользящего контакта необходимо, чтобы Ψ и K_n имели значения

$$\Psi \leq 0,10,$$

$$K_n \leq 0,10-0,15.$$

С учетом значений для Ψ выражения для допустимых значений амплитуды гармоник запишутся в виде:

$$e \leq \frac{3600\delta k \psi}{4\pi^2 n^2 m}, \quad (29)$$

$$E \leq \frac{3600\delta k \psi}{16\pi^2 n^2 m}. \quad (30)$$

На рис. 3, 4 приведены зависимости $e=f(n, \delta k, m)$ и $E=f(n, \delta k, m)$, полученные расчетным путем по (29, 30).

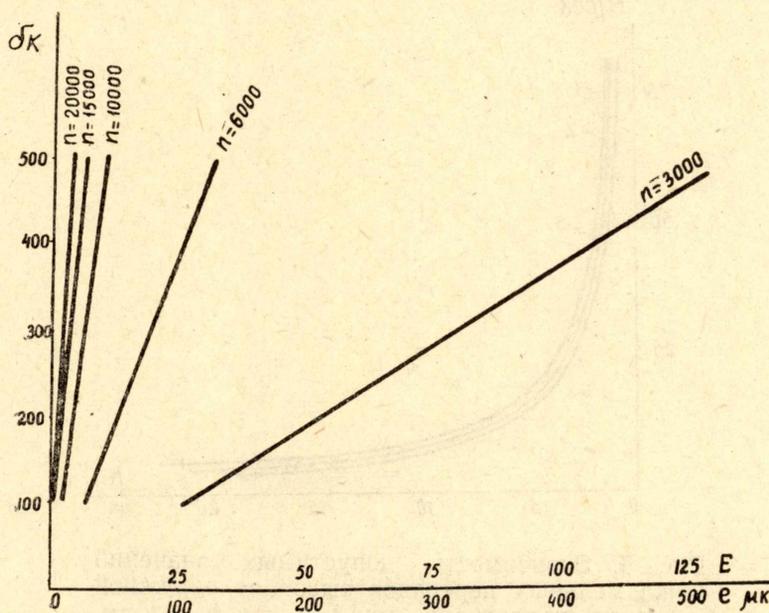


Рис. 3. Зависимость допустимых значений E и e от нажатия и скорости вращения при $G=10$ г.

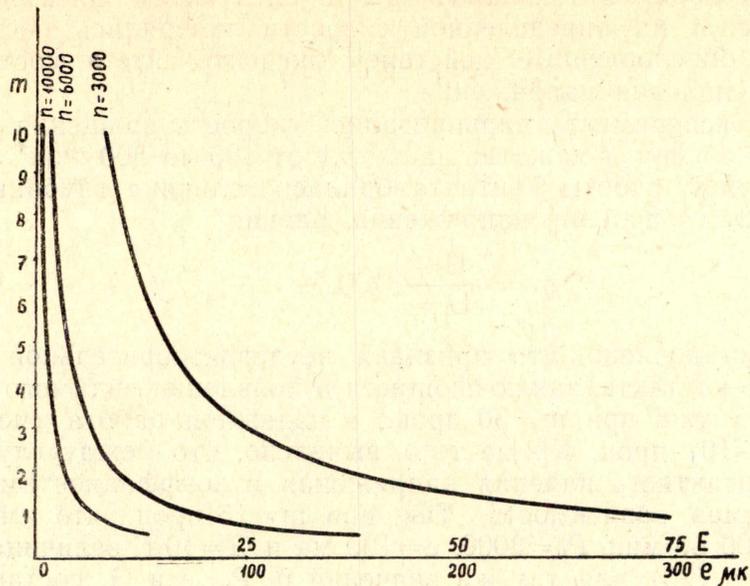


Рис. 4. Зависимость допустимых значений e и E от массы щеток при $n=3000, 6000, 10\,000$ об/мин и $\delta_k=300$ г.

Из кривых видно, что допустимые значения эксцентриситета и эллиптичности находятся в сильной зависимости от скорости вращения, массы щеток и нажатия. Так, увеличение нажатия стабилизирует работу щеток и увеличивает допустимые значения e и E , увеличение n и m приводит к снижению допустимых E и e и увеличивает нестабильность контакта. Из рис. 3, 4 видно также, что максимально допустимые значения e и E несколько больше для низкоскоростных машин и значительно меньше для высокоскоростных по сравнению с существующими [3].

На рис. 5 приведены зависимости допустимых межламельных перепадов от окружной скорости коллектора, полученные расчетным путем

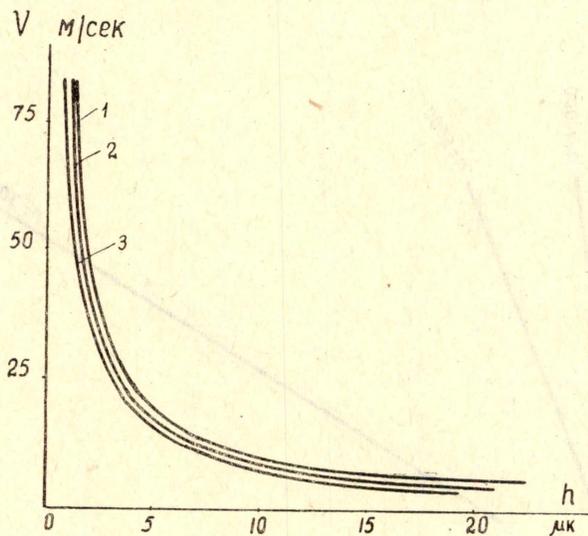


Рис. 5. Зависимость допустимых значений межламельных перепадов высот от окружной скорости коллектора при $\delta=1$ см, $b_{щ}=1$ см, $P^2=300$ 1/сек², $D_k=80$ мм.
1 — для щетки марки ЭГ-4Э, 2 — для щетки марки ЭГ-14, 3 — для щетки марки ЭГ-74

из (20), а на рис. 6, 7 — зависимости допустимых значений межламельных перепадов от собственной частоты колебательной системы щетка — пружина и ширины щетки.

Из приведенных зависимостей видно, что увеличение собственной частоты колебательной системы увеличивает допустимое значение межламельных перепадов. Увеличение собственной частоты, при сохранении нажимного усилия неизменным, может быть достигнуто увеличением жесткости пружины или уменьшением массы щеток.

Проведенные исследования устойчивости движения щеток по поверхности коллектора позволяют сделать следующие выводы:

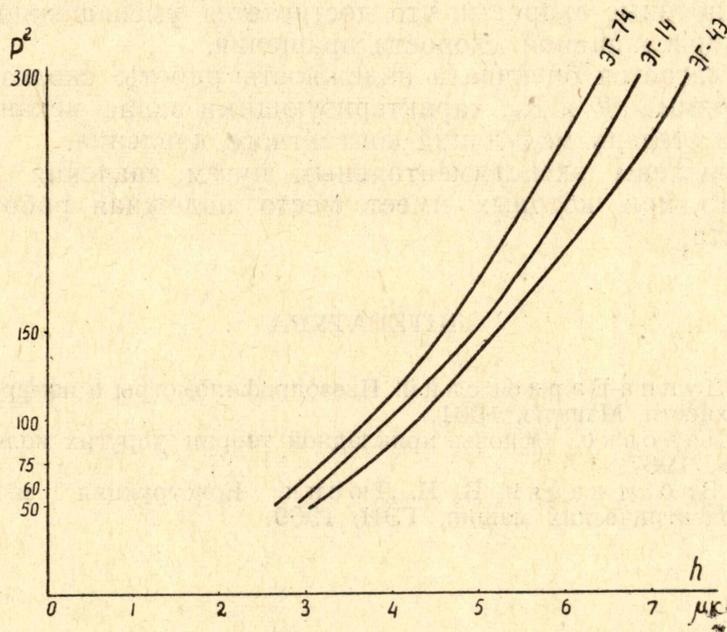


Рис. 6. Зависимость допустимых значений межламельных перепадов высот от собственной частоты системы щетка—пружина при $K=300$ г/см, $m=1, 2, 3, 4, 5, 6$ г, $D_K=80$ мм, $n=3000$ об/мин.

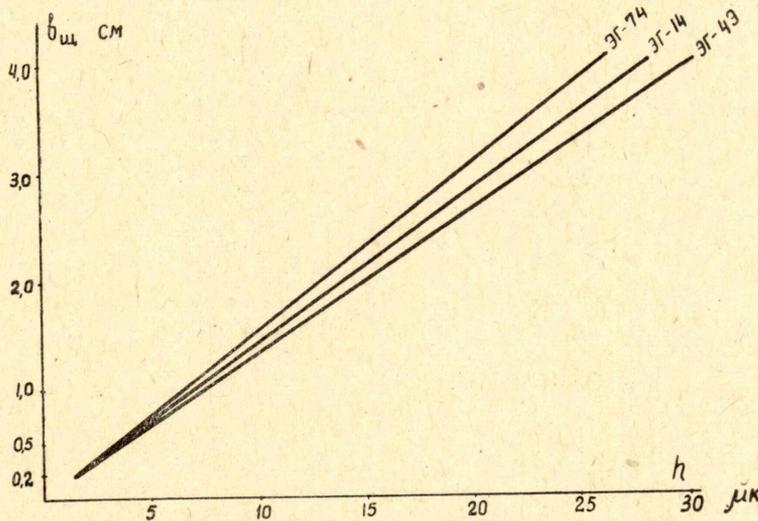


Рис. 7. Зависимость допустимых значений межламельных перепадов высот от ширины щеток при $D_K=80$ мм, $P^2=300^1/\text{сек}^2$, $\delta_K=10$ мм, $K=300$ г/см, $n=3000$ об/мин.

1. Получены выражения, позволяющие рассчитать как допустимые значения эксцентриситета, эллиптичности и перепада ламелей, так и основные параметры колебательной системы щетка — пружина.

2. На основании полученных аналитических выражений, определяющих условия устойчивой работы щеток на коллекторах, разработаны допуски на основные параметры состояния поверхности коллекторов.

3. Для повышения надежности работы скользящего контакта щетка — коллектор необходимо:

а) увеличить собственную частоту колебательной системы щетка — пружина при неизменном нажатии;

б) уменьшить допустимые значения неровностей поверхности коллектора и линейные скорости, что достигается уменьшением диаметра коллектора при заданной скорости вращения.

4. Предлагается оценивать надежность работы скользящего контакта критериями Ψ и K_n , характеризующими запас механической устойчивости и степень модуляции контактного давления.

5. Определены экспериментальным путем значения $\Psi \leq 0,10$ и $K_n \leq 10-0,15$, при которых имеет место надежная работа скользящего контакта.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. В. Дунин-Барковский. Пьезофилометры и измерение шероховатости поверхности. Машгиз, 1961.

2. Я. Г. Пановко. Основы прикладной теории упругих колебаний. «Машиностроение», 1967.

3. П. А. Бабаджанян, Б. Н. Люсин. Конструкция и производство коллекторов электрических машин. ГЭИ, 1960.