

М. М. АФАНАСЬЕВ

(Ленинград)

использованы следующие различные контактные пары: а) бронзовыми (Бр. Д2) кольцами и четырьмя различными контактными парами из меди; б) бронзовыми (Бр. Б2) кольцами и стальными струнными щетками (Х17Н2); в) медными кольцами и стальными струнными щетками (Х17Н2); г) двумя пружинящими посеребренными пластинами, выполненными в форме полусферы и соприкасающимися на двух дугах примерно в  $60^\circ$  с посеребренными кольцами диаметром 20 мм. Наилучшие результаты получены на контактных парах медь — сталь и бронза — сталь.

Наблюдения выходных сигналов на экране электронного осциллографа показали, что потери электрического контакта отсутствуют при скоростях до 40 м/с и контактной нагрузке, большем 0,3 кг. Уровень шума от пика до пика не превышал  $10 \cdot 10^{-3}$  Ом. Однако стабильность электрических параметров токоємника достигалась лишь при условии охлаждения зоны контактирования, а также непрерывного удаления продуктов износа и загрязнений.

На рис. 1 и 2 приведены корреляционные функции  $K(\tau)$  и спектральные плотности  $S(\omega)$  шумов токоємника для некоторых типичных случаев, встречающихся на практике.

Спектры  $S_1(\omega)$  и  $S_2(\omega)$  получены для измерительной системы на переменном токе с синхронным детектором (см. рис. 1). Отметим характерные составляющие на частоте  $f_1$ , соответствующей скорости вращения, или удвоенной частоте. Могут выделяться также сигналы на частоте собственных поперечных колебаний щетки (струны)  $f_2$ . Спектр  $S_3(\omega)$  соответствует питанию тензорезистора от источника постоянного тока. Выделяются значительные составляющие спектра на частоте 50 Гц, ее гармониках и субгармониках.

Спектры  $S_4(\omega)$  и  $S_5(\omega)$  соответствуют «чистому» шуму токоємника и термоэдс, обусловливаемых нерегулярностями переходного сопротивления  $\Delta R_k$  и температурных плей в области соприкосновения кольца и щетки. Спектры достаточно гладкие в большом диапазоне частот, что позволяет принять модель шума токоємника в виде идеального белого шума и определить его параметры.

Исчерпывающей характеристикой белого шума является его спектральная интенсивность  $B$  [1], выражаемая как

$$B \sim \zeta_1 \bar{n} [\Delta R_k (1/\bar{n})]^2 = \zeta_1 \Delta R_k^2 (1/\bar{n}), \quad (1)$$

где  $\bar{n}$  — среднее число приращений контактного сопротивления в единицу времени;  $\Delta R_k/\bar{n}$  — приращение контактного сопротивления;  $\zeta_1$  — здесь и далее безразмерные коэффициенты.

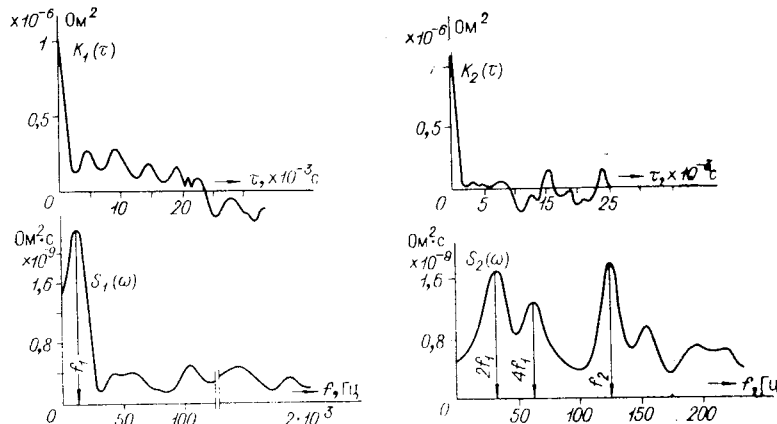


Рис. 1. Спектральные плотности  $S(\omega)$  и корреляционные функции  $K(\tau)$  шума измерительной системы.

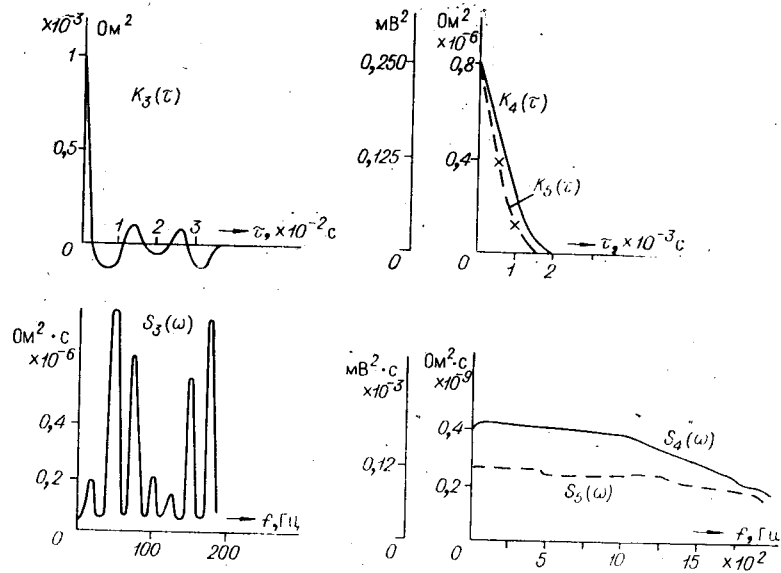


Рис. 2. Спектральные плотности  $S(\omega)$  и корреляционные функции  $K(\tau)$  шума токосъемника.

Параметры  $\bar{n}$  и  $\Delta R_k$  можно оценить, исходя из сложившихся представлений о физике процессов, протекающих в контакте (см., например, [2, 3]).

Упрощенная модель флюктуаций контактного сопротивления выглядит следующим образом. Соприкасающиеся токопроводящие элементы контактируют в отдельных точках — контактных пятнах, суммарная площадь которых образует эффективную поверхность  $S$  контакта. При вращении происходит столкновение выступов кольца и щетки, контактирующие поверхности при этом сжимаются; имеет место сначала упругая, а затем пластическая их деформация. Совершается переход от одной эффективной поверхности к другой, что обуславливает флюктуации переходного сопротивления  $\Delta R_k$ . Формирование импульса приращения происходит каждый раз в момент прохождения очередного контактного пятна. Если допустить, что токосъемник работает в режиме упругопластических деформаций, значение сопротивления  $\Delta R_k$  можно считать пропорциональным сопротивлению растягивания [2], т. е.

$$\Delta R_k \sim \rho / \sqrt{S}, \quad (2)$$

где  $\rho$  — удельное объемное электрическое сопротивление контактируемых материалов. В первом приближении площадь  $S$  для случая параболического распределения высоты выступов и контактирования по плоскости определяется формулой [3]

$$S \simeq 2,2\pi(N/E)\sqrt{r/h}. \quad (3)$$

Здесь  $N$  — контактное усилие;  $E$  — модуль упругости;  $r$ ,  $h$  — параметры шероховатости (среднее значение радиуса и высоты выступа).

Интенсивность импульсов во времени  $\bar{n}$  определяется следующим образом:

$$\bar{n} = (n_k/\beta)\omega, \quad (4)$$

где  $n_k$  — число контактирующих пятен на площади контакта;  $\beta$  — угол обхвата кольца щеткой;  $\omega$  — угловая скорость вращения.

Количество пятен  $n_k$ , в свою очередь, определяется через площадь  $S$  и параметры шероховатости  $r$  и  $h$  [3]:

$$n_k \simeq (1,2/\pi) \cdot (S/rh). \quad (5)$$

Подставляя приведенные значения (2)–(5) в формулу (1), получаем

$$B = \zeta_2 [\rho h (E/N)]^2 \beta / \omega. \quad (6)$$

Найдем также среднеквадратическое значение переходного сопротивления скользящего контакта  $\sigma$ . С этой целью обратимся к корреляционной функции  $K_4(\tau)$  (см. рис. 2). Как видно из рисунка, функция  $K_4(\tau)$  может быть аппроксимирована выражением

$$K_4(\tau) = \sigma^2 e^{-\alpha\tau}, \quad (7)$$

где  $\alpha$  — коэффициент, обратно пропорциональный длительности контактного импульса. Значение этого коэффициента определяется размерами контактного пятна и линейной скоростью перемещения кольца относительно щетки. Величину коэффициента  $\alpha$  для произвольной линейной скорости  $v$  удобно определять по значению  $\alpha_0$ , нормированному к единичной скорости  $v_0 = 1,0$  м/с:

$$\alpha = \alpha_0(v/v_0) = (\alpha_0/2)D\omega, \quad (8)$$

где  $D$  — диаметр кольца токосъемника.

Для контактной пары бронза — сталь, медь — сталь эмпирическое значение коэффициента  $\alpha_0$  находится в пределах 100—150 с<sup>-1</sup>. Параметр  $B$  связан с  $\alpha$  и  $\sigma$  следующим образом:

$$B = \sigma^2/\pi\alpha. \quad (9)$$

Следовательно, среднеквадратическое значение флюктуаций переходного сопротивления

$$\sigma = \xi_3 \rho h (E/N) \sqrt{\alpha\beta/\omega}. \quad (10)$$

Значение коэффициента  $\xi_3$  можно определить экспериментальным путем, исходя из корреляционной функции (параметры  $\alpha$  и  $\sigma$ ), а также из других параметров, входящих в формулу (10). В частности, для токосъемника с медными кольцами и стальными струнными щетками его значение составляет  $1 \cdot 10^{-2}$ .

Формула (10) может быть также представлена в виде

$$\sigma = \zeta_0 \rho h (E/N_0), \quad (11)$$

где  $\zeta_0 = \xi_3 \sqrt{\alpha\beta/\omega} / (e^{\mu\beta} - 1)$ ,  $N_0$  — усилие натяжения струны ( $\mu$  — коэффициент трения).

Формула (11) с точностью до коэффициента совпадает с результатом, полученным в работе [3, с 50] для переходного сопротивления многоточечного неподвижного контакта.

Пример расчета. Определим ожидаемую амплитуду переходного сопротивления струнного токосъемника с бронзовыми шлифованными кольцами и стальными щетками, если  $N_0 = 1$  кг,  $E = 2,1 \cdot 10^6$  кг/см<sup>2</sup>,  $\beta = 0,12 \cdot \pi$ ,  $\rho = 15 \cdot 10^{-6}$  Ом·см,  $\mu \cong \cong 0,15$ ,  $h = 0,12 \cdot 10^{-3}$  см,  $\omega = 62,8$  с<sup>-1</sup>,  $D = 15,0$  см.

По формулам (8), (10) и (11) находим:  $\alpha \cong 700$  с<sup>-1</sup>,  $\sigma \cong 1,25 \cdot 10^{-3}$  Ом,  $\zeta_0 \cong \cong 0,43$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. С. М. Рытов. Введение в статистическую радиофизику. М., «Наука», 1961.
2. Р. Хольм. Электрические контакты. М., Изд-во иностр. лит., 1961.
3. А. К. Белоусов, В. С. Савченко. Электрические разъемные контакты в радиоэлектронной аппаратуре. М., «Энергия», 1967.

Поступило в редакцию  
3 июля 1973 г.