

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА СИСТЕМЫ ВИБРОАКУСТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Воронцов А.Г.

Донецкий государственный технический университет

Vag@fcita.donetsk.ua

Analysis STD of noise and fluctuation of signals in measurement channel of vibration diagnostics system is made. Main influence factors are random variation of output accelerometer impedance, elements' noise, discretisation noise of ADC. Existence the minimum of measurement error of acceleration is demonstrated.

Разработка систем виброакустической диагностики для оценки технического состояния электрических машин требует решения комплекса вопросов, связанных с обеспечением высокой линейности, стабильности и малых собственных шумов измерительных каналов (ИК) системы [1]. Метрологические показатели каналов позволяют дать комплексную оценку успешности решения задачи разработки канала с учетом влияния разноплановых факторов.

Данная работа посвящена вопросам оптимизации шумящего ИК по показателю относительной погрешности измерения виброускорения с учетом нестабильности эквивалентной емкости и сопротивления пьезоэлектрического датчика-акселерометра. Причинами нестабильности могут быть изменения емкости и сопротивления утечки соединительного кабеля в сложных условиях эксплуатации, например, в горнодобывающей промышленности.

Обобщенная структурная схема ИК современной системы вибродиагностики, реализованной на основе ПЭВМ (см. рис. 1), включает:

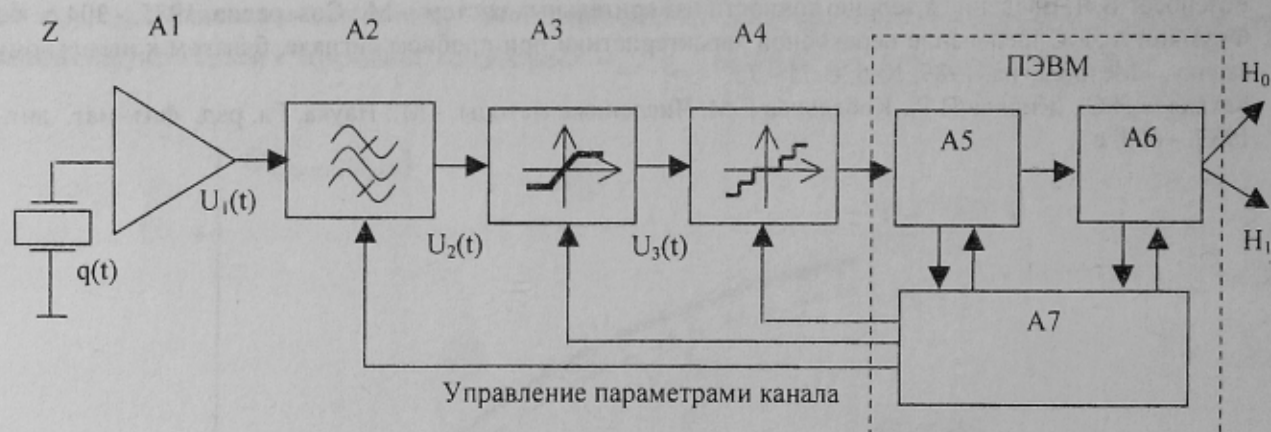


Рисунок 1 – Структурная схема измерительного канала в составе системы вибродиагностики

- Датчик Z – пьезоэлектрический акселерометр, формирующий выходной сигнал в виде электрического заряда $q(t)$;

- Входной усилитель A1, преобразующий выходной сигнал датчика в электрическое напряжение $U_1(t)$;
- Полосовой фильтр A2, выделяющий информационную область частот в спектре вибросигнала $U_1(t)$;
- Масштабирующий усилитель A3, обеспечивающий согласование динамического диапазона профильтрованного вибросигнала $U_2(t)$ с динамическим диапазоном АЦП;
- АЦП - A4, осуществляющий преобразование непрерывного вибросигнала в цифровую форму.

Влияние на шумы в ИК таких факторов как полоса фильтрации, нелинейность масштабирующего усилителя и дискретизация вибросигнала в АЦП рассмотрены в [2]. При известных параметрах звеньев A2, A3, A4 эквивалентные шумы этой части канала могут быть приведены к входу фильтра A2 и характеризоваться напряжением случайной помехи $e_c(t)$ с дисперсией σ_c^2 . При известной крутизне преобразования входного усилителя A1 по заряду

$$S_q^U = \frac{dU_1}{dq},$$

шумы вышеупомянутой части ИК можно привести ко входу усилителя A1

$$\sigma_{qc} = \frac{\sigma_c}{S_q^U},$$

куда поступает входной сигнал в виде заряда с амплитудой q_0 от акселерометра Z.

Отношение

$$\eta = \frac{\sigma_{qc}}{q_0}$$

характеризует величину относительной случайной погрешности измерения величины заряда, зависящую от свойств звеньев А2, А3, А4. Увеличивая крутизну S_q^U можно уменьшить эту составляющую погрешности.

Однако, изменение параметров звена А1 с целью увеличения S_q^U может привести к ухудшению его собственных шумовых свойств и увеличению влияния нестабильности эквивалентного выходного сопротивления акселерометра на погрешности измерения.

Для анализа вышеуказанных взаимосвязей на приведенную к входу усилителя погрешность рассмотрим входной усилитель (устройство А1), реализованный по схеме преобразователя ток-напряжение. Такая схема обладает определенными преимуществами в сравнении с получившим распространение усилителем заряда [3]. Эквивалентная схема усилителя приведена на рис. 2, где обозначены:

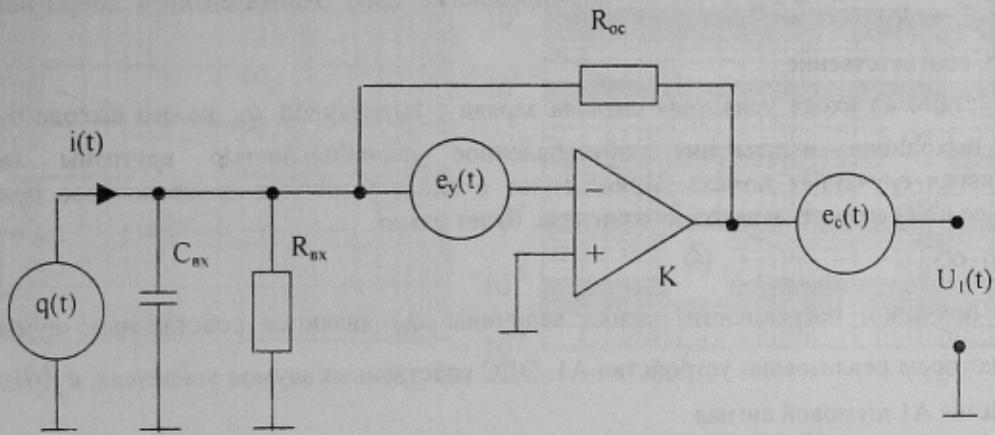


Рисунок 2 - Эквивалентная схема входного усилителя измерительного канала.

$C_{вх}$, $R_{вх}$ - эквивалентная емкость и сопротивление акселерометра, соответственно;

K - коэффициент усиления операционного усилителя без обратной связи;

$R_{ос}$ - сопротивление обратной связи;

e_c - эквивалентная шумовая ЭДС последующих звеньев ИК, характеризующаяся среднеквадратическим отклонением (СКО) σ_c ;

e_y - эквивалентная шумовая ЭДС, обусловленная собственными шумами операционного усилителя и характеризующаяся СКО σ_y .

Выходной сигнал усилителя А1 - $U_1(j\omega)$, обусловленный действием на его входе гармонического сигнала заряда с амплитудой q_0 , будет равен

$$U_1(j\omega) = S_q^U(j\omega)q(j\omega) = S_q^U(\omega)q_0(\omega)e^{j\varphi(\omega)},$$

где, $S_q^U(\omega) = \frac{\omega R_{ос} K}{\sqrt{(K + b_r)^2 + b_c^2}}$ - модуль крутизны характеристики усилителя А1 по заряду;

$q_0(\omega)$ - амплитуда гармонического входного сигнала;

$\varphi(\omega)$ - фаза выходного сигнала;

$b_R = \frac{R_{ax}}{R_{ax}}$ - нормированная активная проводимость акселерометра;

$b_c = \omega C_{ax} R_{ax}$ - нормированная емкостная проводимость акселерометра.

Относительные коэффициенты влияния изменений активной и емкостной проводимостей на крутизну характеристики усилителя соответственно равны:

$$B_{b_R}^S = \frac{b_R}{S_q^U} \frac{\partial}{\partial b_R} S_q^U = -\frac{2b_R^2(K+b_R)}{(K+b_R)^2 + b_c^2},$$

$$B_{b_c}^S = \frac{b_c}{S_q^U} \frac{\partial}{\partial b_c} S_q^U = -\frac{b_c^2}{(K+b_R)^2 + b_c^2}.$$

Обусловленное нестабильностью R_{ax} и C_{ax} изменения крутизны S_q^U может быть охарактеризовано соответствующей величиной нормированного СКО

$$\sigma_{S_q^U} = \frac{\sigma_S}{S_q^U} = \sqrt{\left(B_{b_R}^S \frac{\sigma R_{ax}}{1 + \sigma R_{ax}} \right)^2 + \left(B_{b_c}^S \sigma C_{ax} \right)^2},$$

где, $\sigma R_{ax} = \frac{\sigma_R}{R_{ax}}$ и $\sigma C_{ax} = \frac{\sigma_C}{C_{ax}}$ - нормированные СКО эквивалентного сопротивления и емкости

акселерометра, соответственно.

При действии на входе усилителя сигнала заряда с амплитудой q_0 на его выходе будет иметь место приращение выходного напряжения, обусловленное нестабильностью крутизны характеристики - мультипликативная случайная помеха. Приведенное к входу усилителя эквивалентное приращение заряда, характеризующее СКО амплитуды входного сигнала, будет равно

$$\sigma_{qS} = q_0 \sigma_{S_q^U}.$$

Другой причиной погрешности оценки величины q_0 являются собственные шумы операционного усилителя на котором реализовано устройство А1. ЭДС собственных шумов усилителя $e_y(j\omega)$ возбуждает на выходе устройства А1 шумовой сигнал

$$U_y(j\omega) = e_y(j\omega) K_0(\omega) e^{j\varphi(\omega)},$$

где, $\varphi(\omega)$ - фазовый сдвиг, вносимый устройством А1 относительно e_y ;

$K_0(\omega) = \sqrt{(1+b_R)^2 + \omega^2 R_{ax}^2 C_{ax}^2}$ - модуль коэффициента передачи устройства А1 по напряжению относительно e_y .

Приведенное к входу устройства А1 СКО эквивалентного заряда, обусловленного шумами операционного усилителя равно

$$\sigma_{qy} = \frac{\sigma_y}{S_q^U} K_0(\omega).$$

Дисперсия приведенных к входу А1 эквивалентных отклонений заряда, связанных с нестабильностью цепей акселерометра, собственными шумами входного усилителя и остальной части ИК будет равна

$$\sigma_q^2 = \sigma_{qS}^2 + \sigma_{qy}^2 + \sigma_{qc}^2. \quad (1)$$

Тогда относительная погрешность измерения заряда q_0 может быть получено из соотношения

$$\delta q = \frac{z}{q_0} \sigma_q,$$

где, z - коэффициент, определяемый принятым значение доверительной вероятности P_0 и результирующим законом распределения случайной погрешности [4] (для $P_0=0,95$ и нормального закона, $z=2$).

С учетом полученных результатов, приведенная к входу ИК относительная погрешность измерения виброускорения с амплитудой a_0 будет равна

$$\delta\alpha = \frac{z}{a_0} \sqrt{\left(\frac{\sigma_q}{S_a^q}\right)^2 + \left(\frac{\delta a_0 a_0}{z}\right)^2}, \quad (2)$$

где, δa_0 - относительная случайная погрешность акселерометра;

$S_a^q = \frac{dq}{da}$ - крутизна характеристики акселерометра по заряду;

$a_0 = \frac{q_0}{S_a^q}$ - амплитуда измеряемого виброускорения.

Так как составляющая σ_q^2 , входящая в выражение (2), является функцией параметров схемы устройства А1, представляет интерес исследование зависимости погрешности ИК от этих параметров, и, в частности, от R_{oc} - наиболее удобного для регулировки. На рис. 3 приведены зависимости $\delta q(R_{oc})$ и $\delta\alpha(R_{oc})$ из которых следует, что зависимость $\delta\alpha(R_{oc})$ имеет явный, но довольно размытый минимум.

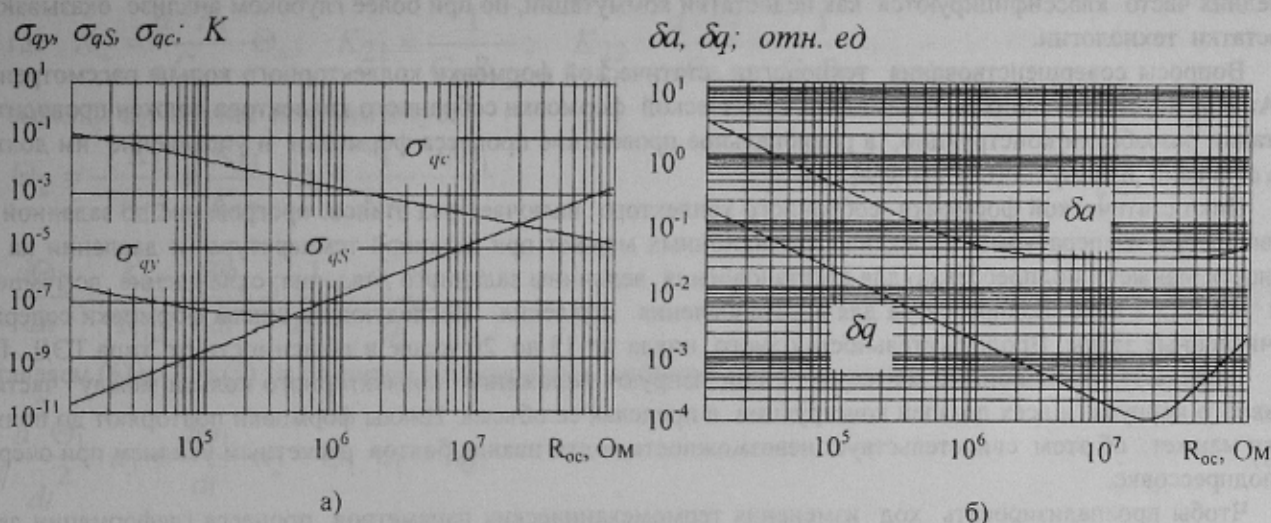


Рисунок 3 - Зависимость метрологических характеристик измерительного канала системы вибродиагностики от R_{oc} (а - СКО заряда, б - относительная погрешность).

Расчетные значения параметров- $R_{oc}=10^7$ Ом; $C_{ок}=10^{-9}$ Ф; $\omega = 6280$ с⁻¹; $K=10^4$;

$$\delta R_{ок} = \delta C_{ок} = 0,1; \delta a_0 = 0,015; S_a^q = 10^{-10} \text{ К с}^2/\text{м}.$$

Координаты минимума зависят от частоты изменения виброускорения. Однако, при относительной полосе фильтрации вибросигнала не более 1/3 октавы можно считать, что условию минимума удовлетворяют все частотные компоненты вибросигнала, прошедшие через фильтр. Относительная глубина минимума для зависимости $\delta\alpha(R_{oc})$, а, следовательно, и выигрыш, обеспечиваемый оптимизацией по R_{oc} , зависит от соотношения случайных погрешностей собственно акселерометра и приведенных к его входу случайных погрешностей остальных преобразователей ИК.

ЛИТЕРАТУРА

1. Barkov A., Barkova N. Condition assessment and life prediction of rolling element bearings.- Part 1, Sound and Vibration, 1995, №6; Part 2, Sound and Vibration, 1995, № 9.
2. Воронцов А.Г., Ярошенко О.А. Исследование влияния нелинейностей аналоговой части измерительного канала системы виброакустической диагностики машин на соотношение сигнал-шум. Труды Донецкого государственного технического университета «Прогрессивные технологии и системы машиностроения»: Международный сборник научных трудов.- Вып. 15.-Донецк: ДонГТУ.- 2001,С. 59-67.
3. Серридж М., Лихт Т. Справочник по пьезоэлектрическим акселерометрам и преусилителям.- Изд-во «Ларсен и сын».- Глоуструп, Дания, 1987.- 186 с.
4. П.П.Орнатский. Теоретические основы информационно-измерительной техники.- Киев: «Вища школа», 1976.-431 с.