

ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК ДАТЧИКОВ

THE EVALUATION OF LIMITING VALUES OF SENSORS CHARACTERISTICS

Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный технический университет
Saint-Petersburg, Saint-Petersburg State Technical University

Предложен феноменологический метод оценки характеристик генераторных датчиков. С целью получения предельных значений характеристик в теоретическую модель введены энергетические параметры. Практическая реализация метода осуществлена для пьезоэлектрических датчиков механических величин.

There is suggested the phenomenological method of an evaluation the generating sensors characteristics. The power parameters are brought in a theoretical model to get limiting values. Practical realization of this method is put into practice for piezoelectric sensors of the mechanical quantities.

На начальном этапе проектирования датчиков целесообразно оценить соответствие «предельных» возможностей используемых в датчиках измерительных преобразователей требованиям технического задания.

Для генераторных (обратимых) измерительных преобразователей такая оценка может быть получена на основе рассмотрения теоретической модели преобразователя в виде обобщённого четырёхполюсника. Подобной модели соответствует известная система феноменологических уравнений:

$$\begin{aligned} X_1 &= Z_{11} V_1 + Z_{12} V_2 \\ X_2 &= Z_{21} V_1 + Z_{22} V_2 \end{aligned} \quad (1)$$

где индекс "1" относит соответствующие величины к входной стороне, индекс "2" к выходной стороне преобразователя; X и V – обобщённые сила и скорость; Z_{11} и Z_{22} – собственные входное и выходное сопротивления преобразователя; $Z_{12} = Z_{21}$ – взаимные сопротивления.

Данные уравнения справедливы для широкого класса датчиков: магнитоэлектрических, электромагнитных, пьезоэлектрических, электростатических и ряда других.

Характеристики генераторных преобразователей во многом определяются происходящими в них энергетическими процессами: эффективностью преобразования энергии (мощности), потребляемой от объекта измерения, в выходную электрическую энергию и процессом рассеивания определённой части энергии (эффектом диссипации). Эффективность этих процессов целесообразно оценить с помощью обобщённых энергетических параметров – коэффициента энергетической связи k и коэффициента диссипации k_g .

Квадрат коэффициента энергетической связи может быть определён, как где E – подведённая к преобразователю энергия; ΔE – запасённая в преобразователе энергия, способная к обращению.

$$k^2 = \frac{\Delta E}{E} \quad , \quad k^2 = \frac{Z_{12}^2}{Z_{11} Z_{22}} \quad (2)$$

Используя систему уравнений (1), выражение для k можно представить в обобщённом виде:

Квадрат коэффициента диссипации определяется отношением диссипируемой в преобразователе энергии E_g к энергии E :

С учетом уравнений (1) будет равен отношению реальной и мнимой части входного (выходного) сопротивления обратимого преобразователя. Для механических систем имеет смысл величины, обратной добротности, для электрических – тангенса угла потерь.

Использование рассмотренных выше энергетических параметров позволило разработать феноменологический метод оценки некоторых характеристик генераторных (реверсивных) датчиков. Данный метод даёт возможность, исходя из значений k и k_g , а так же входных Z_1 и выходных Z_2

сопротивлений датчиков, найти коэффициенты преобразования (чувствительности) датчиков, их порог чувствительности, определяемый спектральной плотностью собственных шумов. Введение в систему исходных параметров понятия максимально допустимой энергии преобразователя позволяет оценить максимально допустимое значение измеряемой величины. Ограниченность значений энергетических параметров приводит к оценкам предельных значений характеристик, независимых от вида конструкции датчиков.

В качестве иллюстрации возможностей предлагаемого метода установим обобщенные выражение для чувствительностей и шумового порога чувствительности датчиков. При этом с целью упрощения выражений разницу между значениями Z_1 и Z_{11} , Z_2 и Z_{22} будем считать несущественной.

При измерении обобщенной силы X_1 чувствительность датчика может характеризоваться выражением $K_{xx}=X_2/X_1$. Исходя из уравнений (1) и выражения (2) нетрудно установить следующее соотношение:

$$K_{xx} = \frac{Z_{12}}{Z_{11}} = k \sqrt{\frac{Z_{22}}{Z_{11}}} \approx k \sqrt{\frac{Z_2}{Z_1}}.$$

На практике могут использоваться также и другие выражения для чувствительностей:

$$K_{vx} = \frac{V_2}{X_1}; \quad K_{xv} = \frac{X_2}{V_1}; \quad K_{vv} = \frac{V_2}{V_1}.$$

Данные чувствительности так же, как и K_{xx} , будут являться функциями от k , Z_1 и Z_2 .

Учитывая принципиальное ограничение значения коэффициента энергетической связи ($k^2 < 1$), для чувствительностей генераторных датчиков получаем предельные оценки:

$$K_{xx} < \sqrt{\frac{Z_2}{Z_1}}; \quad K_{vx} < \frac{1}{\sqrt{Z_1 Z_2}}; \quad K_{xv} < \sqrt{Z_1 Z_2}; \quad K_{vv} < \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}};$$

Данные соотношения являются универсальными оценками, так как они справедливы для любого датчика, независимо от принципа его действия и конструкции.

Оценим шумовой порог генераторных датчиков. Спектральная плотность S_{x2} флуктуаций обобщенной силы X_2 на выходе датчика в соответствии с флуктуационно-диссипационной теоремой будет равна:

$$S_{x2} = 4K_B T k_{g2}^2 Z_2$$

где K_B – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура;

k_{g2} – коэффициент диссипации, определённый с выходной стороны датчика. Тогда спектральная плотность S_{x1} эквивалентного (приведённого ко входу) шума:

$$S_{x1} = \frac{S_{x2}}{K_{xx}^2} = 4K_B T \frac{k_{g2}^2}{k^2} Z_1.$$

Спектральная плотность S_{v1} эквивалентной шумовой скорости

$$S_{v1} = \frac{S_{x2}}{K_{xv}^2} = 4K_B T \frac{k_{g2}^2}{k^2} \frac{1}{Z_1}.$$

Вид частотной зависимости спектральных плотностей S_{x1} и S_{v1} обуславливается характером частотных зависимостей Z_1 и Z_2 . Шумовой порог чувствительности определяется интегрированием полученных выражений в заданной полосе частот.

Разработанный феноменологический метод был использован для оценки предельных соотношений характеристик пьезоэлектрических датчиков механических величин. В частности, для пьезоэлектрических датчиков силы и ускорения были получены следующие предельные соотношения характеристик:

$$K_F \sqrt{WC} < 0.7; \quad \frac{K_a f_0 \sqrt{C}}{\sqrt{m}} < 0.1,$$

где K_F и K_a – чувствительности датчиков по напряжению; C – их емкость; W – жесткость датчика сила; f_0 – резонансная частота датчика ускорения; m – масса инерционного элемента.

Спектральная плотность выходного шумового напряжения пьезоэлектрических датчиков была определена следующим образом:

$$S = \frac{2K_B T \operatorname{tg} \delta}{\pi f C}, \quad (3)$$

где $\operatorname{tg} \delta$ - тангенс угла потерь датчиков (коэффициент диссипации).

Поскольку $\operatorname{tg} \delta$ практически не зависит от частоты f , собственный шум пьезоэлектрических датчиков можно отнести к шуму типа $1/f$. Экспериментальные исследования подтвердили справедливость выражения (3), а также показали, что собственные шумы пьезоэлектрических датчиков сопоставимы с шумами измерительных усилителей.

Приложение вышеизложенного феноменологического метода к другим типам генераторных датчиков требует дополнительных исследований.