АКАДЕМИЯ НАУК СССР
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
АВТОМЕТРИЯ

№ 1 1969

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПЕРВИЧНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ (ДАТЧИКИ)

УДК 531.768.084.2

В. М. КУНОВ
(Новосибирск)

СОГЛАСОВАНИЕ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДАТЧИКА С УСИЛИТЕЛЕМ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ МИНИМАЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ШУМА

При измерении неэлектрических величин электрическими методами широко используются магнитоэлектрические датчики [1, 2], имеющие выходное сопротивление индуктивного характера. При этом измерения часто проводятся в широком диапазоне частот — от долей герца до нескольких килогерц. Возникающая задача согласования датчика с усилителем, с целью повышения отношения сигнал/шум, осложняется при этих условиях двумя обстоятельствами, а именно: индуктивным характером сопротивления источника сигнала и наличием в усилителе кроме «белого» шума, спектральная плотность мощности которого постоянна, еще и фликкер-шума, спектральная плотность мощности которого примерно обратно пропорциональна частоте. В данной работе эта задача решается при условии, что критерием оптимального согласования является минимум коэффициента шума. При этом частотная характеристика усилителя предполагается прямоугольной.

Различают коэффициенты шума — дифференциальный и средний. Они не исключают, а взаимно дополняют друг друга, и поэтому мы будем пользоваться как тем, так и другим и проводить анализ как для узкой, так и для широкой полосы частот.

Дифференциальный коэффициент шума характеризует отношение сигнал/шум в бесконечно узкой полосе частот и определяется выражением

$$F_{\text{д}} = 1 + \frac{d\,\overline{e_{\text{пр}}^2}}{d\,\overline{e_0^2}}, \tag{1}$$

где $\overline{e_{\text{пр}}^2}$ — квадрат действующего значения э.д.с. шумов усилителя, приведенных ко входу; $\overline{e_0^2}$ — квадрат действующего значения э.д.с. шумов источника сигнала.

В свою очередь, $\overline{e_{\text{пр}}^2}$ состоит из трех статистически независимых шумовых э.д.с., каждая из которых по-своему зависит от сопротивления источника сигнала [3]. Сначала рассмотрим случай чисто активного сопротивления источника:

$$d\,\overline{e_{\text{пр}}^2} = \left(a + \frac{a'}{f}\right)R^2\,df + \left(b + \frac{b'}{f}\right)R\,df + \left(c + \frac{c'}{f}\right)df, \tag{2}$$

где f — частота; R — сопротивление источника сигнала; a, b, c — коэффициенты, зависящие от уровня «белого» шума в усилителе; a', b', c' — коэффициенты, зависящие от уровня фликкер-шума. Согласно формуле Найквиста,

$$d\overline{e_0^2} = 4\,kTR\,df, \tag{3}$$

где $k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ *дж/град* — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура (° К).

Тогда с учетом (1) и (2) коэффициент шума может быть записан в виде

$$F_д = 1 + \frac{1}{4\,kT}\left[\left(a + \frac{a'}{f}\right)R + \left(b + \frac{b'}{f}\right) + \left(c + \frac{c'}{f}\right)R^{-1}\right]. \tag{4}$$

Из (4) видно, что коэффициент шума определяется шестью постоянными и зависит от частоты и сопротивления источника сигнала. При некотором значении R он имеет минимум. Постоянные a, b, c могут быть определены экспериментально. Для этого нужно измерить напряжение шумов, приведенных ко входу, при трех различных сопротивлениях на входе. Измерения следует проводить в области частот, где фликкер-шумом можно пренебречь (десятки килогерц). Коэффициенты a', b', c' определяются точно так же, только измерения нужно проводить в области низких частот, где фликкер-шум является преобладающим (менее ста герц). Измерения удобнее всего проводить при закороченном входе, разомкнутом входе и при сопротивлении на входе больше 100 *ком* для ламповых усилителей и больше 1 *ком* для транзисторных. При меньших сопротивлениях шум усилителя слабо зависит от сопротивления источника [4].

Средний коэффициент шума характеризует отношение сигнал/шум в широкой полосе частот и определяется выражением

$$F_{ср} = 1 + \frac{\overline{e_{пр}^2}}{\overline{e_0^2}}. \tag{5}$$

Принимая во внимание (2), (3), (5) и проводя интегрирование в полосе частот от f_1 до f_2, получим формулу для среднего коэффициента шума:

$$F_{ср} = 1 + \frac{1}{4\,kT}\left[\left(a + \frac{a' \ln \frac{f_2}{f_1}}{f_2 - f_1}\right)R + \left(b + \frac{b' \ln \frac{f_2}{f_1}}{f_2 - f_1}\right) + \left(c + \frac{c' \ln \frac{f_2}{f_1}}{f_2 - f_1}\right)R^{-1}\right]. \tag{6}$$

Выражение (6) показывает, что средний коэффициент шума зависит от верхней и нижней частот полосы пропускания усилителя.

Теперь обратимся к случаю, когда источник сигнала имеет кроме активного еще индуктивное сопротивление. Решение задачи о согласовании должно дать ответ на вопрос, какое активное сопротивление должна иметь катушка при заданной постоянной времени. Если по каким-либо соображениям невозможно выбрать заданное сопротивление, то для согласования применяются входные трансформаторы. Каков должен быть коэффициент трансформации? На этот вопрос также должен быть дан ответ при решении задачи о согласовании.

Поставим задачу в таком виде: пусть задано активное сопротивление катушки R и ее индуктивность L. Найдем коэффициент шума и оптимальный коэффициент трансформации входного трансформатора $n_{опт}$.

Условию оптимального согласования без трансформатора будет соответствовать случай $n_{опт} = 1$. При комплексном сопротивлении источника сигнала коэффициент шума зависит от модуля сопротивления источника сигнала. Фазовые соотношения в силу принятого критерия влияния на результат не оказывают.

Шумовые э.д.с., действующие в различных цепях усилителя, приводятся ко входной цепи с некоторыми коэффициентами [3]. Эти коэффициенты имеют вид $\alpha_i |Z + \beta_i|^2$, где α_i и β_i — величины, не зависящие от Z (Z — комплексное сопротивление источника сигнала). Поэтому квадрат действующего значения шумовой э. д. с., приведенной ко входной цепи, равен

$$d\overline{e_{пр}^2} = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i |Z + \beta_i|^2 \, d\overline{e_i^2}, \tag{7}$$

где $\overline{e_i^2}$ — квадрат действующего значения шумовой э.д.с., действующей в i-м элементе эквивалентной схемы усилителя.

С учетом того, что $Z = R + j\omega L$, это выражение приводится к виду

$$d\overline{e_{пр}^2} = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i R^2 d\overline{e_i^2} + \sum_{i=1}^{n} 2\alpha_i \beta_i R d\overline{e_i^2} + \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \beta_i^2 d\overline{e_i^2} + \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \omega^2 L^2 d\overline{e_i^2}. \tag{8}$$

В частном случае ($L=0$) выражения (8) и (2) должны быть тождественны. Поэтому

$$\sum_{i=1}^{n} \alpha_i \, d\overline{e_i^2} = \left(a + \frac{a'}{f}\right) df; \tag{9}$$

$$\sum_{i=1}^{n} 2\alpha_i \beta_i \, d\overline{e_i^2} = \left(b + \frac{b'}{f}\right) df; \tag{10}$$

$$\sum_{i=1}^{n} \alpha_i \beta_i^2 \, d\overline{e_i^2} = \left(c + \frac{c'}{f}\right) df. \tag{11}$$

С учетом (8)—(11) дифференциальный коэффициент шума при индуктивном характере выходного сопротивления источника сигнала может быть записан в виде

$$F_д = 1 + \frac{1}{4kT} \left\{ \left(a + \frac{a'}{f}\right) R + \left(b + \frac{b'}{f}\right) + \left[c + \frac{c'}{f} + \left(a + \frac{a'}{f}\right) \omega^2 L^2\right] R^{-1} \right\}.$$

Введем обозначения: $a + \frac{a'}{f} = A$; $b + \frac{b'}{f} = B$; $c + \frac{c'}{f} = C$. Тогда

$$F_д = 1 + \frac{1}{4kT} \left(AR + B + \frac{C + A\omega^2 L^2}{R}\right).$$

Так как при применении входного трансформатора сопротивление R и индуктивность L приводятся ко вторичной обмотке с коэффициентом n^2 (n — коэффициент трансформации входного трансформатора), то дифференциальный коэффициент шума при применении входного трансформатора равен

$$F_д = 1 + \frac{1}{4\,k\,T}\left(An^2R + B + \frac{C + A\,\omega^2\,n^4\,L^2}{n^2\,R}\right).$$

Дифференцируя это выражение по n и приравнивая производную нулю, получим оптимальный коэффициент трансформации

$$n^2_{опт} = \sqrt{\frac{C}{A\,(R^2 + \omega^2\,L^2)}}\,.$$

Условие оптимального согласования без трансформатора ($n_{опт} = 1$) имеет вид

$$R_{опт} = \sqrt{\frac{C}{A\,(1 + \omega^2\,\tau^2)}}\,,$$

где $\tau = \frac{L}{R}$ — постоянная времени датчика, которая зависит от размеров и свойств применяемых материалов и не зависит от числа витков катушки.

Средний коэффициент шума в полосе частот от f_1 до f_2 с использованием формул (5), (8) — (11) описывается выражением

$$F_{ср} = 1 + \frac{1}{4\,k\,T}\left(A'\,R + B' + \frac{C' + D\,L^2}{R}\right),$$

где

$$A' = a + \frac{a'\,\ln f_2/f_1}{f_2 - f_1}\,; \quad B' = b + \frac{b'\,\ln f_2/f_1}{f_2 - f_1}\,;$$

$$C' = c + \frac{c'\,\ln f_2/f_1}{f_2 - f_1}\,; \quad D = \frac{4\,\pi^2\,(f_2^3 - f_1^3)\,a + 6\,\pi^2\,(f_2^2 - f_1^2)\,a'}{3\,(f_2 - f_1)}\,.$$

Оптимальный коэффициент трансформации находится таким же образом, как и в случае узкой полосы, и оказывается равным

$$n^2_{опт} = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{C'}{A' + D\,\tau^2}}\,.$$

При бестрансформаторном согласовании ($n_{опт} = 1$) условие оптимума имеет вид

$$R_{опт} = \sqrt{\frac{C'}{A' + D\,\tau^2}}\,.$$

Таким образом, используя полученные соотношения, легко определить оптимальное сопротивление магнитоэлектрического датчика или оптимальный коэффициент трансформации согласующего трансформатора, если известны постоянная времени катушки и рабочая полоса частот датчика.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. М. Туричин. Электрические измерения неэлектрических величин. М.— Л., «Энергия», 1966.
2. Л. Д. Гик. Измерение ускорений. Новосибирск, «Наука», 1966.
3. Е. П. Дементьев. Элементы общей теории и расчета шумящих линейных цепей. М.— Л., Госэнергоиздат, 1963.
4. Л. Д. Гик, А. Г. Козачок, В. М. Кунов, Ю. А. Щепеткин. Анализ порога чувствительности измерительных усилителей.— Автометрия, 1967, № 6.

Поступила в редакцию
22 января 1968 г.