

А. Г. КОЗАЧОК

(НОВОСИБИРСК)

ОПТИМАЛЬНАЯ КОРРЕКЦИЯ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Электрическая коррекция амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) измерительных преобразователей имеет важное значение [1—3], так как позволяет значительно расширить частотный диапазон измерительного устройства. Вместе с тем расширение диапазона рабочих частот всегда связано с увеличением уровня шума, что является принципиальной причиной, ограничивающей возможности коррекции. Таким образом, задачи обеспечения малых динамических погрешностей прибора и его низкого порога чувствительности взаимосвязанные и противоречивые, требующие компромиссного решения. В данной работе рассматривается один из аспектов электрической коррекции, а именно: оптимальный выбор граничных частот рабочего диапазона при измерении слабых импульсных сигналов.

Для усиления слабых сигналов от преобразователя используются электронные измерительные усилители. Усилитель всегда может быть выполнен достаточно широкополосным, так что рабочая полоса частот ограничивается в первую очередь преобразователем, а не усилителем. Кроме того, усилитель должен быть по возможности маломощным, а преобразователь и усилитель должны быть согласованы для получения максимального отношения сигнал/шум [4].

Рассмотрим вопрос о месторасположении корректирующего фильтра. Он может быть включен либо между каскадами усилителя, либо в цепи обратной связи (ОС) последнего, либо, наконец, между преобразователем и усилителем. Обычно каскады измерительных усилителей имеют достаточно большой коэффициент усиления ($k > 10$). Если фильтр расположен между каскадами такого усилителя, то шумами фильтра можно пренебречь. Если же включать фильтр в цепи ОС усилителя, то в этом случае необходима уверенность, что отношение сигнал/шум измерительного устройства не ухудшается за счет цепи ОС. ОС всегда увеличивает уровень шума, даже если пренебречь шумами цепи. Но это увеличение может быть сделано пренебрежимо малым [5]. Все зависит от вида ОС, величины элементов цепи ОС, коэффициента усиления усилителя без ОС. Нужно также учитывать, что расположение фильтра в цепи ОС может привести к потере устойчивости. Поэтому использовать корректирующий фильтр в цепи ОС надо осторожно, особенно если фильтр содержит более одного реактивного элемента.

Располагать корректирующий фильтр между преобразователем и усилителем нецелесообразно, поскольку это приводит к увеличению уровня шума. Но здесь есть одно исключение, из-за которого данный случай заслуживает особого внимания.

Рассмотрение вопросов согласования преобразователей с усилителями показывает, что важнейшей величиной, от которой зависит, будет ли сигнал измерен в присутствии шума или нет, является мощность источника сигналов [4]:

$$P_c = \frac{e_c^2}{|z|}$$

Здесь $e_c - |z|$ — модуль — э. д. с. полезного сигнала на выходе преобразователя; его выходного сопротивления.

Желательно, чтобы величина P_c была максимальной. За счет включения корректирующего фильтра между преобразователем и усилителем значение P_c уменьшается.

Заменив преобразователь эквивалентной электрической схемой, состоящей из последовательно соединенных э. д. с. e и внутреннего сопротивления z , нетрудно показать, что если z — активное сопротивление, то включение фильтра всегда уменьшает P_c . Если же выходное сопротивление имеет комплексный характер, то подключение фильтра может увеличить P_c , в тех случаях, когда фильтр компенсирует в определенном диапазоне частот реактивную составляющую выходного сопротивления. Это имеет место, например, если преобразователь с индуктивным характером выходного сопротивления, а фильтр — с емкостным. Корректирующий фильтр в данном случае мог бы выполнять две функции — увеличивать отношение сигнал/шум за счет оптимального согласования преобразователя с усилителем и корректировать АЧХ преобразователя. Однако обеспечить одновременное качественное выполнение одним фильтром этих двух функций весьма затруднительно. Поэтому целесообразно включать два фильтра: фильтр между преобразователем и усилителем, предназначенный только для увеличения мощности источника сигналов P_c и фильтр между каскадами усилителя (или в цепи ОС), основной функцией которого является коррекция частотной характеристики. Фильтр между преобразователем и усилителем создает дополнительные искажения частотной характеристики, поэтому частотная характеристика второго, корректирующего, фильтра должна

быть такой, чтобы скорректировать частотную характеристику не только преобразователя, а всей цепи преобразователь — первый фильтр.

Отсюда следует, что для уменьшения динамических погрешностей и снижения порога чувствительности прибора с коррекцией АЧХ включать корректирующие фильтры между преобразователем и усилителем может оказаться целесообразным только в тех случаях, когда преобразователь имеет комплексный характер выходного сопротивления. В большинстве же случаев предпочтение следует отдать включению фильтров между каскадами усилителя.

Очевидно, оптимальное построение измерительного устройства с точки зрения уменьшения порога чувствительности и улучшения его динамических свойств возможно при условии, если влияние шумов и ограниченной частотной полосы пропускания оценивается единым критерием. При измерении импульсных сигналов наибольшее преимущество, по нашему мнению, имеет корреляционный критерий [6]

$$c = \max_{\Delta t} \text{var} \left(\frac{\int_0^{\tau_n} x(t) y(t + \Delta t) dt}{\sqrt{\int_0^{\tau_n} x^2(t) dt \int_0^{\tau_n} y^2(t + \Delta t) dt}} \right)$$

Здесь $x(t)$ и $y(t)$ — процессы на входе и выходе преобразователя, а τ_n — длительность измеряемого импульса. В предыдущей формуле не учтен шум. Если же его учесть, то от реализации к реализации коэффициент корреляции c будет изменяться. Среднее значение его будет равно

$$\bar{c} = \frac{c}{\sqrt{1 + \frac{y_{ш}^2(t)}{y^2(t)}}},$$

где $\overline{y_{ш}^2(t)}$ и $\overline{y^2(t)}$ — среднеквадратичные значения шума и отклика.

Коэффициент корреляции характеризует сходство формы двух сигналов. Если сигналы одинаковы, то $c=1$. Погрешность измерения формы при $c \neq 1$ равна $\gamma = 1 - c$.

Методика определения оптимальных граничных частот может быть следующей. Задаем допустимой погрешностью измерения $\bar{c}_{доп}$. Полагая, что известны АЧХ преобразователя и спектр входного сигнала, находим отклик $y(t)$. Затем определяется коэффициент корреляции c для таких значений сигналов, когда шумами можно пренебречь. Вычисления проводятся для различных граничных частот, при которых $c > \bar{c}_{доп}$. Результаты этих вычислений позволяют приближенно оценить необходимую полосу рабочих частот. Далее граничные частоты уточняются следующим образом. Задается некоторое значение сигнала n , зная зависимость спектральной плотности шума от частоты для преобразователя и усилителя, для каждой пары граничных частот из найденной области вычисляются $\overline{y^2}$, $\overline{y_{ш}^2}$ и \bar{c} . Затем величина сигнала изменяется и процесс повторяется. Таким образом, в результате вычислений имеем зависимость $\bar{c} = \varphi(f_1, f_2, x)$, которая позволяет по заданному минимальному измеряемому сигналу и погрешности измерения определить граничные частоты.

Предлагаемый метод позволяет выполнить точное решение задачи оптимальной корреляции частотных характеристик измерительных преобразователей в присутствии шума.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Харкевич. О расчете одного рода корректирующих схем.— ЖТФ, 1947, т. XVII, вып. 4.
2. Р. Р. Харченко. Коррекция частотных характеристик вибраторного осциллографа.— Электричество, 1954, № 6.
3. Л. Д. Гик, К. Б. Карандеев. Электрическая коррекция виброизмерительной аппаратуры. Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1962.
4. Л. Д. Гик, А. Г. Козачок, В. М. Кунов, Ю. А. Щепеткин. Высокочувствительные измерительные усилители. Новосибирск, «Наука», 1970.
5. А. Г. Козачок, В. М. Кунов. Метод расчета шумовых параметров усилителей с обратными связями.— Электросвязь, 1971, № 6.
6. Л. Д. Гик, А. Г. Козачок, Ю. Н. Солодкин, А. В. Якименко. Искажения формы сигналов датчиками при измерении импульсных величин.— Автометрия, 1969, № 3.

Поступило в редакцию 18 октября 1970 г.