

К ВОПРОСУ ОБ ОПТИМАЛЬНОЙ ЧАСТОТЕ ПРОВЕРОК ПАРАМЕТРОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

В настоящее время в практике производственного контроля широко используются весьма быстродействующие измерительные преобразователи, быстродействие которых часто значительно превосходит скорость изменения контролируемого параметра. Наличие более широкой полосы пропускания у преобразователя по сравнению с частотой контролируемого процесса приводит к увеличению погрешности измерителя. Для частотного согласования преобразователя с объектом измерения можно либо уменьшить полосу пропускания за счет включения соответствующего фильтра, либо использовать запас быстродействия преобразователя для более частой проверки его, что также приводит к уменьшению погрешности. Устройство для проверки градуировки в этом случае включается в конструкцию прибора, а процесс проверки производится автоматически с относительно высокой частотой (1 раз в секунду и быстрее) [1, 2, 3]. В работе [4] метод проверки преобразователя в процессе измерения (за счет запаса быстродействия) отнесен к коррекции погрешностей за счет введения образцовых сигналов. Наличие различных способов согласования частотных характеристик преобразователя и объекта измерения ставит вопрос о связи частоты с погрешностями. В данной работе делается попытка осветить этот вопрос.

Считаем, что любое измерение сопровождается преобразованием и передачей энергии контролируемого сигнала. В случае, если измеряется неэнергетический параметр, то в измерителе вырабатывается энергия, связанная с этим параметром, а измерение опять же заключается в преобразовании и передаче энергии.

Все действующие на измеритель помехи имеют энергетический характер. Их можно разделить на две группы: помехи той же природы, что и энергия контролируемого сигнала, и помехи, энергия которых отлична от него. Первая группа помех воздействует на сигнал и искажает его. Они обычно суммируются с сигналом. Помехи второй группы не искажают сигнала, но воздействуют на

измерительное устройство, изменяя его градуировку. Погрешность от них обычно зависит от величины сигнала.

Считаем, что все помехи, независимо от места действия, приведены ко входу измерительного устройства и так же, как контролируемые сигналы, имеют случайный характер. Такое представление нашло отражение в ряде работ [5, 6, 7].

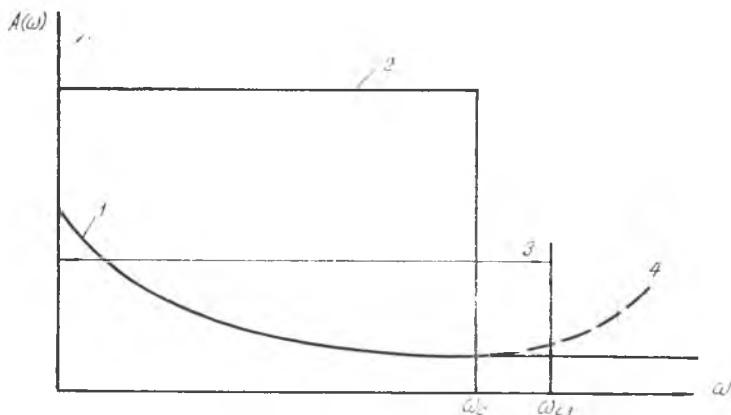


Рис. 1. Спектры помех 1, сигнала 2 и полоса пропускания измерителя 3

Основными характеристиками случайных сигналов являются: закон распределения вероятностей и спектральное распределение мощности. Рассмотрим подробнее вторую характеристику случайного сигнала — спектральную. Очевидно, помехи имеют бесконечно широкий спектр от 0 до ∞ . Однако спектр помех, вызывающих погрешность измерений, ограничивается полосой пропускания измерительного устройства, которая выбирается в зависимости от спектра контролируемого сигнала и частоты проверки.

На рис. 1 приведены примерный вид спектрального распределения мощности помех 1 сигнала 2 и полоса пропускания измерительного устройства 3.

Полоса пропускания измерительного устройства ограничена только сверху, но общность рассуждений не нарушится и при ограничении ее снизу. Обязательным для измерителя является пропускание всего спектра контролируемых сигналов ω_c и сигналов проверки $\omega_{пр}$. Под сигналами проверки подразумеваются сигналы от образцовых мер той же природы, что и от контролируемых объектов.

Частота проверки измерительного устройства определяется стабильностью схем и узлов, входящих в него и, в общем случае, может быть любой: как ниже частоты контролируемого сигнала,

так равной и выше ее. Разделение во времени процессов измерения и проверки влияют на фазочастотный спектр и не влияют на амплитудночастотный. Поэтому по графикам рис. 1 нельзя определить, мешает ли проверка измерению и наоборот. Для уменьшения динамических погрешностей быстроедействие измерительного устройства должно быть выше максимально возможной скорости изменения контролируемого объекта. Со спектральных позиций это означает, что верхняя граница полосы пропускания должна быть раз в 10 выше максимальной частоты измерений.

Погрешность измерительного устройства определяется помехами с частотами, лежащими в полосе пропускания. Принципиально все эти помехи имеют случайный характер, но некоторые из них могут быть определены при проверках и учтены при считывании результата. В соответствии с теоремой Котельникова, помехи, имеющие спектр частоты от 0 до $\left(\frac{1}{2} \div \frac{1}{3}\right) \omega_{\text{пр}}$, могут быть полностью определены при проверках с частотой $\omega_{\text{пр}}$.

В соответствии с принятым определением (8): «Систематически называются погрешности, остающиеся постоянными или изменяющиеся по определенному закону», — можно считать, что случайные помехи в диапазоне от 0 до $\frac{1}{3} \omega_{\text{пр}}$ создают систематическую погрешность, так как величина и знак ее легко определяются для всего межпроверочного интервала времени.

Случайные помехи, определенные с помощью дополнительных измерительных устройств, также создают систематическую погрешность.

Таким образом, все воздействия на измерительное устройство считаем случайными, но если величина этих воздействий может быть определена при проверке или с помощью дополнительных измерительных устройств, то такие помехи создают систематическую погрешность.

Все остальные помехи, входящие в полосу пропускания измерительного устройства, создают случайную погрешность.

При ручной проверке обычно $\omega_{\text{пр}} \ll \omega_c$ и борьба с низкочастотными помехами заключается в создании стабильных конструкций и схем измерительных устройств, а также в использовании специальных методов и приемов измерений [8].

При автоматической проверке со значительной частотой ($\omega_{\text{пр}} \ll \ll \omega_c$) есть возможность исключить влияние всех низкочастотных помех, однако полоса пропускания измерителя при этом должна быть увеличена ($\omega_{\text{из}} \approx 10\omega_{\text{пр}}$), что может привести к увеличению случайной погрешности. Значение случайной погрешности определяется мощностью помех в полосе частот от $\frac{1}{3}\omega_{\text{пр}}$ до $\omega_{\text{из}}$

$$P = \int_{\omega_1}^{\omega_2} A(\omega) d\omega. \quad (1)$$

В выражении (1) подразумевается, что всевозможные помехи, независимо от их природы и места действия приведены ко входу измерительного устройства и образуют энергетический спектр $A(\omega)$. Если частота проверок $\omega_{\text{пр}} = 0,1\omega_c$, а $\omega_{\text{из}} \approx \omega_c$, то полоса частот, в которой помехи образуют случайную погрешность, будет определяться

$$\Delta\omega = \omega_c - \frac{\omega_{\text{пр}}}{3} \approx 0,97 \omega_c.$$

Это минимальная полоса частот случайных помех, уменьшить которую невозможно.

Если частота проверок $\omega_{\text{пр}} > 0,1\omega_c$, то максимальная частота пропускания преобразователя $\omega_{\text{из}} = 10\omega_{\text{пр}}$ и полоса частот, в которой помехи образуют случайную погрешность, будет $\Delta\omega \approx \approx 0,97\omega_{\text{из}} > 0,97\omega_c$. Таким образом при увеличении частоты проверок полоса частот увеличивается, однако мощность помех при этом может как увеличиваться, так и уменьшаться в зависимости от вида спектра помех.

В случае равномерного спектра помех, очевидно, необходимо стремиться к минимальной полосе пропускания преобразователя, то есть $\omega_{\text{из}} \approx \omega_c$ и $\omega_{\text{пр}} = 0,1\omega_c$. Если же спектр неравномерный, особенно если на низких частотах амплитуда помех значительно больше, чем на высоких (соизмеримых с частотой сигнала ω_c), то может оказаться целесо-

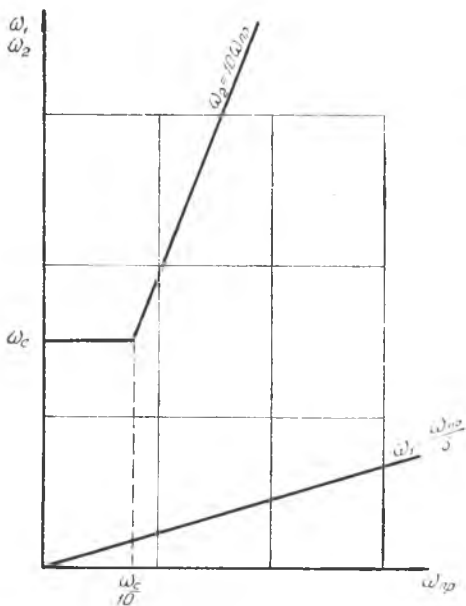


Рис. 2. Зависимость полосы частот помех, образующих случайную погрешность, от частоты проверок

образным смещение полосы $\Delta\omega = \omega_{\text{из}} - \frac{\omega_{\text{пр}}}{3}$ в область более высоких частот, несмотря на то, что абсолютная величина полосы при этом увеличится. На рис. 2 приведены зависимости пределов интегрирования от частоты проверок.

Таким образом, за счет выбора частоты проверок возможно подавить влияние помех в определенном диапазоне частот ($\omega < \frac{1}{3} \omega_{\text{пр}}$).

Критерием выбора частоты проверок является минимизация интеграла 1.

Был экспериментально определен энергетический спектр помех измерительного устройства с токовихревым преобразователем. Для этого записывалось выходное напряжение преобразователя при неизменном значении объекта измерения.

Считали, что случайные изменения выходного напряжения обусловлены действием помех. По этому графику определялась автокорреляционная функция и по ней — энергетический спектр помехи.

При автоматическом контроле параметров измерительного преобразователя наблюдается увеличение энергии помех при возрастании частоты проверок. В результате этого погрешность измерительного устройства с ростом частоты проверок увеличивается, что эквивалентно изменению энергетического спектра подобно графику 4 рис. 1 (штриховая линия).

В ограниченном диапазоне частот (в полосе пропускания измерителя) энергетический спектр хорошо аппроксимируется суммой двух экспонент

$$A_{\omega} = A_1 e^{-\alpha\omega} + A_2 e^{\beta\omega}, \quad (2)$$

где первый член характеризует низкочастотные помехи, влияющие на измерительное устройство, второй — помехи проверочного устройства.

Мощность случайных помех получается при подстановке (2) в (1)

$$P = \frac{A_1}{\alpha} (e^{-\alpha\omega_1} - e^{-\alpha\omega_2}) + \frac{A_2}{\beta} (e^{\beta\omega_2} - e^{\beta\omega_1}). \quad (3)$$

Для случая $\omega_{из} > \omega_c$ имеем $\omega_1 = \frac{1}{3} \omega_{пр}$ и $\omega_2 = 10\omega_{пр}$.

Благодаря выполнению условий

$$\frac{A_1}{\alpha} e^{-\alpha\omega_1} \gg \frac{A_2}{\beta} e^{\beta\omega_1} \quad \text{и} \quad \frac{A_2}{\beta} e^{\beta\omega_2} \gg \frac{A_1}{\alpha} e^{-\alpha\omega_2}$$

выражение для мощности помех принимает вид

$$P = \frac{A_1}{\alpha} e^{-\frac{1}{3} \alpha \omega_{пр}} + \frac{A_2}{\beta} e^{10 \beta \omega_{пр}}. \quad (4)$$

Оптимальная частота проверок, соответствующая минимальной энергии помех, легко определяется

$$\omega_{пр \text{ опт}} = \frac{\ln \frac{A_1}{30 A_2}}{\frac{\alpha}{3} + 10\beta}. \quad (5)$$

Выражение (5) получено для случая аппроксимации спектра помех в виде суммы экспонент и в предположении, что влияние двух соседних проверок друг на друга ничтожно, если полоса про-

пускания измерителя в 10 раз больше частоты проверок. В случае иных аналитических представлений спектра и иных допущений, очевидно, получатся другие выражения для оптимальной частоты проверок. Однако всегда целесообразно определить частоту проверок, при которой случайная погрешность минимальна.

Таким образом, из приведенных рассуждений видно, что точность измерений теснейшим образом связана с частотой проверок. При наличии быстродействующего проверочного устройства может быть значительно повышена точность нестабильных (с большой амплитудой низкочастотных помех) измерительных преобразователей.

ЛИТЕРАТУРА

1. П. В. Новицкий. Возможности кибернетического пути повышения точности электроизмерительных устройств. Измерительная техника, № 4, 1962.
2. М. А. Земельман. Точный аналого-цифровой преобразователь на грубых элементах. Измерительная техника, № 5, 1964.
3. Ю. С. Быховский. Использование методов теории связи в измерениях. Сборник «Автоматические измерительные и регулирующие устройства», выпуск III, Куйбышев, 1967.
4. М. А. Земельман. Общие принципы повышения точности измерительных устройств. Измерительная техника, № 5, 1968.
5. С. М. Мандельштам. Об информационной теории измерений. Труды ЛИАП, вып. 48, Ленинград, 1966.
6. Г. И. Кавалеров, С. М. Мандельштам. О критериях оценки средств и качество измерений. Измерительная техника, № 12, 1965.
7. А. А. Харкевич. Борьба с помехами. Изд-во «Наука», Москва, 1965.
8. С. Ф. Маликов, Н. И. Тюрин. Введение в метрологию. Изд-во стандартов, Москва, 1966.