

## ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПЕРВИЧНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ (ДАТЧИКИ)

УДК 621.088.2

Л. Д. ГИК, А. Г. КОЗАЧОК,  
Ю. Н. СОЛОДКИН, А. В. ЯКИМЕНКО

(Новосибирск)

### ИСКАЖЕНИЯ ФОРМЫ СИГНАЛОВ ДАТЧИКАМИ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ИМПУЛЬСНЫХ ВЕЛИЧИН

Измерение импульсных сигналов является важной задачей. Теоретический подход к ее решению известен. Он заключается в том, что по известной передаточной функции преобразователя определяют выходной сигнал, чаще всего используя интегральное преобразование Лапласа. В этом случае, чтобы оценить искажения сигналов, вносимые датчиком, необходимо для каждой конкретной формы сигнала проводить довольно сложные и громоздкие вычисления. Поэтому и решение, записанное в общем виде, оказывается практически мало полезным.

В данной работе проводится анализ динамической погрешности, характеризующей искажение формы сигналов, для типовых измеряемых импульсов. В результате получена взаимосвязь между погрешностью, параметрами датчика и длительностью измеряемых импульсов.

Прежде всего остановимся на вопросе о критериях оценки искажения формы сигналов. Наибольшее распространение в качестве критериев получили усредненное относительное отклонение выходного сигнала [1] и среднеквадратичная погрешность [2].

Физический смысл первого из них заключается в том, что искажения формы оцениваются по разности площадей между входным сигналом и откликом. Искажения формы при использовании среднеквадратичного критерия оцениваются по энергии разностного сигнала. Критерий среднеквадратичной погрешности является более удобным для использования. Исходя из минимума среднеквадратичной погрешности, можно сравнительно просто определять оптимальные параметры датчиков. Недостаток критерия, на наш взгляд, заключается в том, что он не позволяет выявить полную степень сходства сигналов между собой. За истинное значение сигнала на выходе датчика принимается входной сигнал, умноженный на коэффициент передачи в полосе пропускания датчика. Для выявления же полной степени сходства сигналов между собой более правильно поставить вопрос о таком выборе коэффициента передачи датчика, при котором получается минимум среднеквадратичной погрешности, и относительно этого коэффициента следует отсчитывать погрешность. Коэффициент передачи, определенный таким образом, называется нормированным коэффициентом корреляции и равен

$$c = \frac{\int_0^{\tau_{\text{и}}} |f_{\text{ист}}(t) f_{\text{изм}}(t + \Delta t)| dt}{\sqrt{\int_0^{\tau_{\text{и}}} [f_{\text{ист}}(t)]^2 dt} \sqrt{\int_0^{\tau_{\text{и}}} [f_{\text{изм}}(t + \Delta t)]^2 dt}}, \quad (1)$$

где  $f_{\text{изм}}(t)$  и  $f_{\text{ист}}(t)$  — соответственно измеренный и истинный сигналы;  $\Delta t$  — сдвиг во времени между сигналами;  $\tau_{\text{и}}$  — длительность сигнала. Коэффициент корреляции является удобной мерой, характеризующей подобие сигналов [3, 4]. Из выражения (1) следует, что если сигнал не искажается датчиком,  $c=1$ . Поэтому естественно погрешность формы определить так:

$$\gamma = 1 - c. \quad (2)$$

Значение коэффициента  $\gamma$  и будет в дальнейшем использовано в качестве критерия оценки искажения формы сигналов.

Перейдем к анализу искажений формы типовых сигналов. Выбор типовых сигналов произведен таким образом, чтобы эти сигналы и близкие к ним по виду часто встречались в практике измерений и в то же время обладали характерными спектральными свойствами. Это позволит получить решение, справедливое для широкого класса входных воздействий. В данной работе приведены результаты для трех типовых импульсов: прямоугольного, полусинусоидального и колокольного.

Весьма существенным при анализе искажений сигналов датчиком с ограниченной полосой пропускания является определение ширины спектра измеряемых импульсов. Найдем зависимость между шириной спектра измеряемых сигналов и коэффициентом формы  $\gamma$ . В этом случае  $f_{\text{изм}}(t)$  — это сигнал на выходе датчика, когда датчик рассматривается как идеальный фильтр нижних частот. Для получения  $f_{\text{изм}}(t)$  необходимо произвести обратное преобразование Лапласа, задавая различные пределы интегрирования. Вычисление функций  $f_{\text{изм}}(t)$  было произведено на вычислительной машине М-20. На рис. 1 изображены временные функции  $f_{\text{изм}}(t)$  соответственно для прямоугольного (а), полусинусоидального (б) и колокольного (в) импульсов при трех зна-

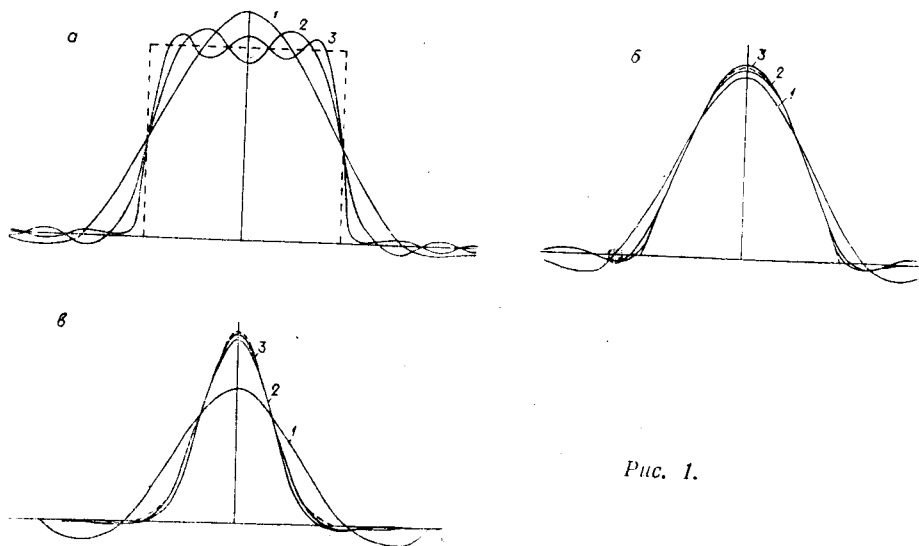


Рис. 1.

чениях  $f_{гр} \tau_n$ , где  $f_{гр}$  — верхняя граничная частота полосы пропускания датчика. Кривые 1 изображают отклик датчика при  $f_{гр} \tau_n = 1$ , кривые 2 — при  $f_{гр} \tau_n = 2$  и кривые 3 — при  $f_{гр} \tau_n = 3$ . Длительность колокольного импульса определена на уровне 1% от его пикового значения.

Реакция датчика как идеального фильтра на импульсный сигнал представляет практический интерес, так как если площади, ограниченные зависимостями  $\gamma = \varphi(f \tau_n)$ , изображенные на рис. 2 (кривые 1—3) соответственно для колокольного, полусинусоидального и прямоугольного импульсов. Графики рис. 2 позволяют оценить, как влияет ограничение спектра на форму импульсов. Колокольный импульс значительно искажается при  $f \tau_n < 1,5$ , а при более высоких частотах срез его искажения минимальны по сравнению с другими импульсами. Так как прямоугольный импульс имеет наиболее широкий спектр, а колокольный — наиболее узкий, то по приведенным графикам можно оценить погрешность формы для многих других измеряемых сигналов.

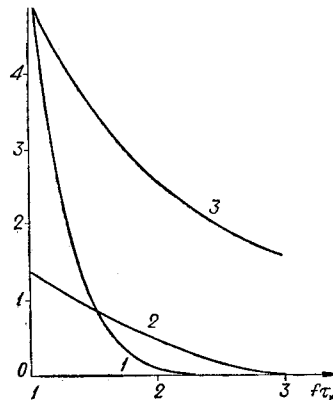


Рис. 2.

Как было отмечено, ограничение спектра эквивалентно пропусканию через идеальный фильтр нижних частот. Поэтому спектральный подход в случае измерения одиночных импульсов оправдан только тогда, когда коэффициент передачи преобразователя выражается сложной функцией, но имеется область частот, которая может быть определена как полоса пропускания датчика. Сигналы на выходе реальных датчиков отличаются по форме от тех, которые получаются на выходе идеального фильтра.

Рассмотрим в качестве примера датчик, динамические свойства которого могут быть описаны дифференциальным уравнением второго порядка. Исследование искажений формы сигналов в этом случае связано с существенными трудностями. Динамические искажения, вносимые датчиком второго порядка, определяются двумя параметрами: периодом собственных колебаний  $T_0$  и степенью успокоения  $\beta$ . Поэтому зависимость между погрешностью измерения и параметрами датчика представляет собой некоторую поверхность в трехмерном пространстве. Аналитический подход при решении задачи об искажении формы типовых импульсов в этом случае приводит к сложным и громоздким расчетам. Наиболее удобным является метод моделирования, позволяющий с помощью генератора импульсов произвольной формы и модели датчика получить отклик на практически любой сигнал.

В качестве функционального генератора, формирующего измеряемый импульс, в данной работе использовался электронно-оптический генератор [6]. Поверх экрана трубки электронного осциллографа помещалась маска, имеющая профиль требуемой функции. Рядом устанавливался фотоэлемент, и все это закрывалось тубусом, так что на фото-

элемент мог попадать свет только от электронного луча. Фотоэлемент был включен в мостовую цепь, выходной сигнал которой усиливался и подавался на схему вертикальной развертки осциллографа. Под действием горизонтальной развертки луч перемещался поперек трубки, а система отклонения луча по вертикали заставляла луч двигаться только по части экрана, незатемненной маской. Фотоэлемент определял присутствие светового пятна на трубке и инвертировал сигнал, что вызывало движение луча вниз. Таким образом, электронный луч при движении по горизонтали всегда перемещается по профилю маски. Сигнал, вызывающий вертикальное отклонение луча, пропорционален функции, соответствующей профилю маски, и используется как выходной сигнал генератора.

С выхода функционального генератора импульс подавался на электронное моделирующее устройство типа МН-7, на котором набиралась модель датчика. Сигнал с выхода МН-7, представляющий собой отклик датчика, и входной импульс поступали на двухлучевой осциллограф. Сравнивая сигнал и отклик, можно было оценить искажения, вносимые датчиком.

На рис. 3 для иллюстрации приведены отклики датчика на полусинусоидальные импульсы при разных параметрах датчика  $T_0$  и  $\beta$ . По рис. 3 можно судить о степени приближения измеряемого импульса к истинному. Например, при малых степенях успокоения сигнал сильно искажается за счет резонансных свойств датчика, которые вызывают появление в отклике колебаний, имеющих резонансную частоту. Амплитуда этих колебаний тем больше, чем меньше степень успокоения. Однако при  $\beta < 0,1 \div 0,2$  степень успокоения практически не влияет на форму отклика.

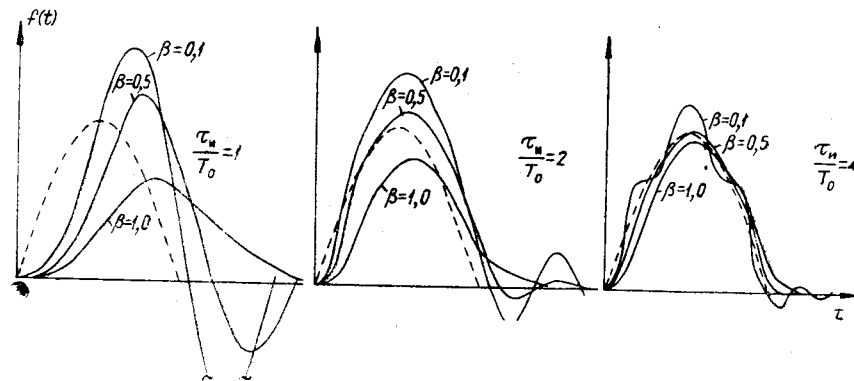


Рис. 3.

Оценивая, как и прежде, искажения сигнала по величине погрешности формы, получим зависимости, изображенные на рис. 4. Сплошные кривые соответствуют оптимальной степени успокоения  $\beta = 0,7$ ; штриховыми линиями показаны зависимости при  $\beta = 0,1$ ; кривые 1 определяют искажения колокольного импульса, 2 — полусинусоидального, 3 — прямоугольного. Из рис. 4 следует, что при более узкой полосе пропускания преобразователя ( $\frac{\tau_n}{T_0} < 4 \div 5$ ) искажения колокольного импульса возрастают более резко, чем искажения импульсов других форм. Это объясняется тем, что в области низких частот колокольный импульс имеет более равномерный спектр. Отметим, что графики

построены для колокольного импульса, длительность которого определена на уровне 1% от пикового значения. При другом определении длительности импульса зависимость погрешности формы от параметров преобразователя будет иметь другой вид. Если определять длительность на более высоком уровне чем 1%, искажения уменьшаются, а на более низком — возрастают.

Погрешность формы в значительной степени зависит от вида сигнала. Например, для синусоидального импульса при  $\gamma \ll 1\%$  отношение  $\frac{\tau_n}{T_0}$  должно быть не меньше 3, а для прямоугольного импульса при таких же искажениях  $\frac{\tau_n}{T_0} \gg 6$ , т. е. в 2 раза больше. Поэтому при определении необходимой полосы пропускания датчика существенно знать примерную форму измеряемого сигнала.

Таким образом, полученные зависимости позволяют определить или приблизительно оценить искажения типовых импульсов и близких к ним по форме, если известны параметры датчика  $T_0$  и  $\beta$ . И наоборот, по заданной погрешности формы можно найти допустимые значения параметров  $T_0$  и  $\beta$ .

Типовые импульсы выбраны так, что решение, полученное для них, позволяет оценить искажения других, реально встречающихся сигналов.

Результаты работы были использованы для оценки искажений, вносимых вибродатчиком при измерении импульсных ускорений. Однако они остаются справедливыми во многих аналогичных случаях, например при оценке искажений шлейфового осциллографа.

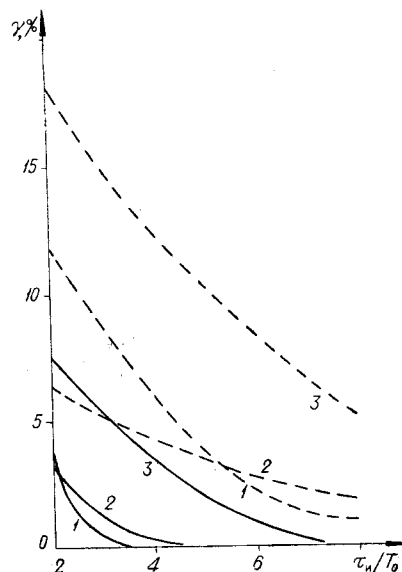


Рис. 4.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. М. И. Субботин. Измерение импульсных ускорений. Реф. канд. дисс. М., 1965.
2. А. А. Харкевич. О применении критерия квадратичной погрешности к оценке линейных искажений.— ЖТФ, 1967, т. VII, вып. 5.
3. С. Мэзон, Г. Циммерман. Электронные цепи, сигналы и системы. М., Изд-во иностр. лит., 1963.
4. Л. Д. Гик. Измерение импульсных ускорений.— ИВУЗ, Приборостроение, 1968, т. XI, № 5.
5. С. Черри. Переходные процессы в электрических цепях при передаче импульсов. М., «Советское радио», 1951.
6. D. E. Sunstein. Photoelectric waveform generator.— Electronics, 1949, v. 22, p. 100.

Поступила в редакцию  
23 октября 1968 г.