

## ВЫБОР ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ПО ФАКТИЧЕСКОЙ ФОРМЕ СИГНАЛОВ

Светличный А.В., Володин В.В.

Донецкий государственный технический университет

olga@pandora.kita.dgtu.donetsk.ua

*The problems of assortment of operating characteristics of input-output isolation modules as well as analog-to-digital converters, are considered. The design procedure of replacement of accidental signal with the sinusoidal one is proposed. Such approach makes it easier to estimate the desired pass band of modules in measuring and controlling systems.*

При проектировании систем автоматики перед разработчиками часто встает вопрос, какой из модулей гальванической развязки и преобразования аналог-код выбрать. Обширный перечень модулей преобразования, предлагаемый изготовителями, с одной стороны дает возможность подобрать наиболее отвечающий требованиям вашей системы, а с другой затрудняет выбор.

Предлагаемый в настоящей статье подход позволяет подобрать модули гальванической развязки и преобразования аналог-код непосредственно под динамические характеристики конкретного объекта.

За основу выбора приняты частотные характеристики сигналов, которые подлежат преобразованию. Так как реальные законы изменения преобразуемых сигналов обычно отличаются от синусоидальных, то для их приведения к сумме гармонических составляющих используются различные методы, наибольшее распространение из которых в настоящее время получило быстрое преобразование Фурье. Однако для предварительной оценки необходимой полосы пропускания преобразователя достаточно заменить исследуемый сигнал эквивалентным синусоидальным, совпадающим с ним по максимальному значению первой производной.

Для однозначности понимания в дальнейшем изложении будем использовать следующие основные понятия.

Частота - количество колебаний периодически изменяющейся величины в единицу времени. Буквенное обозначение  $f$ . Единица измерения  $1/С = 1Гц$ . Взаимосвязь частоты с периодом выражается формулой  $f = 1/T$ , где  $T$  - длительность периода изменения величины.

Частота граничная - характеристика диапазона рабочих частот активных и пассивных четырехполюсников.

Нижняя и верхняя граничные частоты определяют рабочий участок частотной характеристики - зависимости коэффициента передачи от частоты.

Поскольку большинство гальванических развязок для аналоговых сигналов являются фильтрами высоких частот, то нижняя граничная частота для них равна 0 Гц, а за верхнюю граничную частоту принимают такую, при которой выходной сигнал ослабляется в  $1/\sqrt{2}$  раз (около 0.707) или на 3 дБ.

Область между нижней и верхней граничными частотами называется полосой пропускания.

Задачей разработчика является приведение сигнала произвольной формы, подлежащего преобразованию, к синусоидальному и выбор подходящего по полосе пропускания модуля.

Для определения амплитуды и частоты эквивалентной синусоиды необходимо иметь осциллограмму изменения во времени сигнала, подлежащего преобразованию. В качестве примера на рис. 1 приведены осциллограммы изменения выходных сигналов датчиков тока и скорости в электроприводе постоянного тока.

Сущность перехода к эквивалентному синусоидальному сигналу заключается в следующем.

Имеющемуся фактическому графику изменения контролируемого сигнала с параметрами  $U_{\max}$ ,  $U_{\min}$  и максимальным значением производной на контролируемом интервале  $\frac{dU}{dt}_{\max}$ , ставится в соответствие синусоидальный сигнал вида

$$U = U_m \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) + U_c,$$

производная которого имеет вид

$$U = U_m \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)$$

Для расчета эквивалентного синусоидального сигнала на осциллограмме выделяются:

1. Максимальное значение сигнала  $U_{\max}$ ;
2. Минимальное значение сигнала  $U_{\min}$ ;
3. Участок, на котором происходит наиболее резкое изменение сигнала с координатами  $U_1, t_1$ ;  $U_2, t_2$ .

Рассчитываются:

1. Максимальное значение производной контролируемого сигнала

$$\frac{dU}{dt}_{\max} = \frac{|U_1 - U_2|}{t_1 - t_2};$$

2. Амплитуда эквивалентного синусоидального сигнала

$$U_M = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{2};$$

3. Частота эквивалентного синусоидального сигнала

$$f = \frac{dU/dt_{\max}}{U_M \cdot 2 \cdot \pi}$$

4. Постоянное смещение

$$U_c = (U_{\min} + U_{\max}) / 2;$$

Для идеального преобразователя уравнение выходного сигнала имеет вид

$$U_n = K_{\text{ном}} \cdot (U_M \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) + U_c),$$

где  $K_{\text{ном}}$  - коэффициент передачи преобразователя, когда  $\omega = 0$ .

Фактическое значение выходного сигнала преобразователя

$$U_{\phi} = K' \cdot K_{\text{ном}} \cdot (U_M \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \varphi) + U_c),$$

где  $K'$  - коэффициент ослабления сигнала на частоте  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ .

По значению коэффициента ослабления  $K'$  может быть оценена погрешность преобразования, обусловленная фильтрующими свойствами преобразователя. Для измерительных систем допустимым значением  $K'$  принимается 0.9 (10% погрешность), для систем автоматического регулирования 0.707 (30% погрешность).

Рассмотрим пример:

Для осциллограммы напряжения в электроприводе после датчика напряжения (рис.1) максимальное и минимальное значение сигнала  $U_{\max} = 5.08\text{В}$ ,  $U_{\min} = -4.89\text{В}$ .

Максимальное значение производной сигнала

$$\frac{dU_u}{dt}_{\max} = \frac{\Delta U}{\Delta t} = \frac{5.080}{2.43} = 2.09\text{В/с}.$$

Эквивалентное значение частоты синусоидального сигнала

$$f_{\text{э}} = \frac{dU_u/dt_{\max}}{U_{\max} \cdot 2 \cdot \pi} = \frac{2.09}{5.08 \cdot 2 \cdot 3.14} = 0.065\text{Гц}.$$

Период эквивалентного синусоидального сигнала

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{0.065} = 15.384\text{с}.$$

Амплитудное значение и напряжение смещения эквивалентного синусоидального сигнала соответственно составят:

$$U_M = \frac{5.080 - (-4.894)}{2} = 4.987\text{В}, \quad U_c = \frac{5.080 + 4.894}{2} = 0.093\text{В}.$$

Уравнение эквивалентного синусоидального сигнала для оценки частотной характеристики масштабного преобразователя в канале напряжения

$$U_u(t) = 4.987 \cdot \sin(2 \cdot 3.14 \cdot 0.065 \cdot t) + 0.093.$$

Аналогичный для токового канала эквивалентный синусоидальный сигнал

$$U_i(t) = 6.315 \cdot \sin(2 \cdot 3.14 \cdot 0.473 \cdot t) - 0.118.$$

Таким образом, в канале преобразования напряжения должен быть установлен преобразователь с диапазоном по напряжению 5,08 В и полосой пропускания не менее 0,07 Гц. В канале преобразования по току должен использоваться преобразователь с диапазоном по напряжению не менее 6,4 В и полосой пропускания не менее 0,473 Гц. При спектральном анализе токового сигнала, наиболее выраженной явилась гармоническая составляющая частотой 0,47 Гц и амплитудой 3,02 В, для сигнала напряжения соответственно амплитудой 4,12 В и частотой 0,1 Гц. Таким образом предлагаемый подход позволяет достаточно просто выделить наиболее ярко выраженную гармоническую составляющую сигнала произвольной формы и по ней произвести предварительную оценку необходимой полосы пропускания преобразователя.

Объект: Блюминг 1050 РБЦ

$U_d$

5.080V

0

0

2.509V

-6.197V

0.25c

-2.273V

0

5.080V

$U_d$

2.430c

-4.894V

2.509V

6.433V

155c

-2.273V

160c

-6.197V

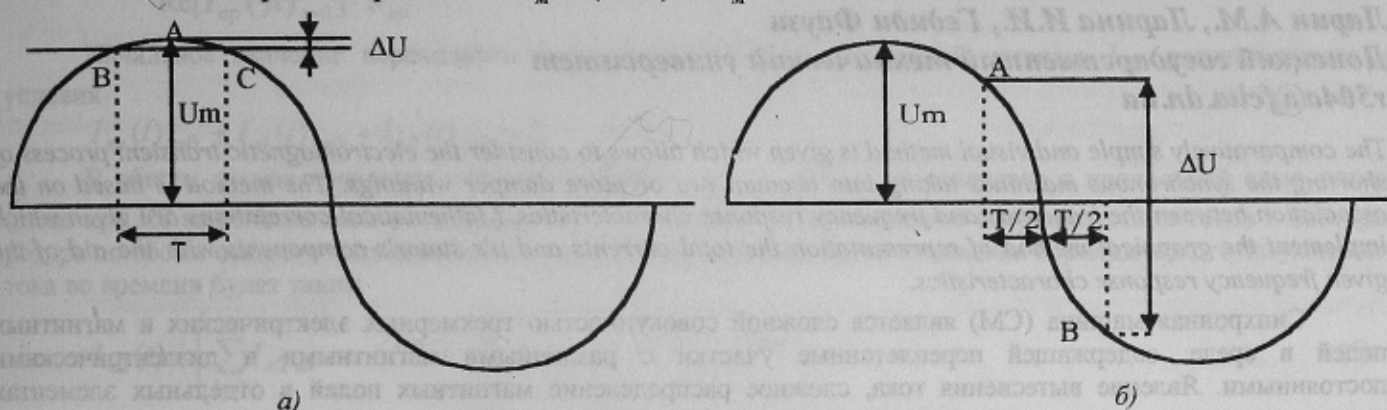
165c

$I_d$

Рисунок 1 - Осциллограмма изменения напряжения и тока в электроприводе

Помимо оценки необходимой полосы пропускания преобразовательных устройств, метод эквивалентных синусоид может быть также использован для выбора периода дискретизации по времени при записи аналоговых сигналов для последующей обработки. В этом случае необходимо задаться допустимой погрешностью считывания информации, например 1% или 10%. На рис.2а представлен вид эквивалентной синусоиды, с параметрами  $U_m, f$ .

В точке А напряжение равно  $U = U_m \sin(\pi / 2) = U_m$ .



а)

б)

Рисунок 2 - К выбору частоты съема информации:

а) при измерении амплитудного значения синусоидального сигнала;

б) при максимально приближенном воспроизведении синусоидального сигнала.

Примем, что максимальная погрешность, обусловленная дискретностью съема информации во времени составляет 10% амплитуды. В наихудшем случае, когда съем информации осуществлен в симметричные относительно достижения синусоидальным напряжением максимального значения  $U_m$  что соответствует точкам В и С на рисунке, в точке В, отстоящей во времени на половину периода опроса  $T$  значение напряжения равно

$$U = U_m \sin(\pi / 2 - 2 \cdot \pi \cdot f \cdot (T / 2)) \quad (1)$$

Отсюда  $\sin(\pi / 2 - 2 \cdot \pi \cdot f \cdot (T / 2)) = 0.9$ .

Подставляя в уравнение (1) вместо периода дискретизации по времени частоту съема информации  $F = 1/T$  и решая его относительно  $F/f$  имеем

$$\pi / 2 - 2 \cdot \pi \cdot f \cdot (1 / (2 \cdot F)) = \arcsin 0.9,$$

$$f / F = \frac{\pi / 2 - \arcsin 0.9}{\pi}, \quad F / f = 6.96$$

Таким образом, для обеспечения ошибки в определении амплитудного значения сигнала не более 10%, частота съема информации должна в 7 раз, превышать частоту эквивалентного синусоидального сигнала. Аналогичный расчет для максимальной ошибки не более 1% приводит к соотношению  $F / f = 22$ .

Если ставится требование не измерения амплитудного значения, а наиболее точного воспроизведения в цифровой форме синусоидального сигнала, то анализ необходимо вести для участка с наибольшим значением производной (рис.2б). Примем наихудший случай, когда точки съема информации находятся симметрично относительно момента перехода синусоиды через ноль, как показано на рис. 2б. В момент времени, соответствующий точке А на синусоиде, происходит запоминание значения сигнала, которое сохраняется в течение периода дискретизации  $T$  до момента, когда синусоидальный сигнал примет значение, соответствующее точке В. Таким образом, максимальная ошибка к концу периода дискретизации будет равна  $U_A - U_B$ . Выразим эту разность через параметры синусоидального сигнала  $U = U_m \sin(2\pi f t)$ .

В точке А значение синусоидального сигнала равно  $U_A = U_m \cdot \sin(\pi - \pi \cdot T \cdot f)$ .

В точке В значение синусоидального сигнала равно  $U_B = U_m \cdot \sin(\pi + \pi \cdot T \cdot f)$ .

Разность напряжений  $U_A - U_B = U_m \cdot (\sin \pi(1 + T \cdot f) - \sin \pi(1 - T \cdot f))$ .

Для  $T = 1 / 2f$  ошибка составит  $U_m \cdot ((\sin 3 / 2\pi) - \sin 1 / 2\pi) = 2U_m$ .

Для  $T = 1 / 64f$  ошибка составит  $U_m \cdot ((\sin 65 / 64\pi) - \sin 63 / 64\pi) = 0.098U_m$ .

Для  $T = 1 / 132f$  ошибка составит  $U_m \cdot ((\sin 133 / 132\pi) - \sin 131 / 132\pi) = 0.0476U_m$ .

Таким образом, для получения 5% погрешности в воспроизведении синусоидального сигнала частота дискретизации во времени должна в 132 раза превышать частоту синусоидального сигнала.

Предлагаемый подход может быть использован для оценки требуемых динамических характеристик элементов цифровых и цифроаналоговых систем измерения и регулирования.