

# ТОЧНОСТЬ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

*У статті сформульована задача оцінки точності широтно-імпульсних перетворювачів для поширених випадків застосування цих перетворювачів*

*Ключові слова: широтно-імпульсна модуляція (ШИМ), широтно-імпульсний перетворювач*

---

*В статье сформулирована задача оценки точности широтно-импульсных преобразователей для распространенных случаев использования этих преобразователей*

*Ключевые слова: широтно-импульсная модуляция (ШИМ), широтно-импульсный преобразователь*

---

*The problem of accuracy estimation of pulse-width transformers is formulated in the article for the widespread cases of these transformers using*

*Keywords: pulse-width modulation (PWM), pulse-width transformer*

**В. И. Шевченко**  
 Кандидат технических наук, доцент\*  
 Контактный тел.: 095-47-744-00  
 E-mail: speceffect@list.ru

**В. А. Кныш**  
 Кандидат технических наук, доцент\*  
 Контактный тел.: 095-17-303-75  
 E-mail: valek-k@yandex.ru

**А. П. Потыльчак**  
 Кандидат технических наук, доцент\*  
 Контактный тел.: 050-301-29-80  
 E-mail: cabanist@ukr.net

\*Кафедра авиационных приборов и измерений  
 Национальный аэрокосмический университет  
 им. Н.Е. Жуковского  
 «Харьковский авиационный институт»  
 ул. Чкалова, 17, г. Харьков, Украина, 61070

## 1. Введение

Широтно-импульсные (ШИМ) преобразователи очень широко применяются в различных устройствах измерения и управления, чаще всего там, где частотный диапазон исходных сигналов велик [1].

При обработке высокочастотных сигналов применение ШИМ может внести в работу системы большую погрешность, вплоть до полной неработоспособности. Для оценки этих погрешностей необходимо рассмотреть две схемы включения ШИМ:

Первая схема включения в составе измерительной системы без последующего детектирования изображена на рис. 1.



Рис. 1. Схема включения ШИМ без восстановления сигнала, где:  $x_{непер.}$  - исходный непрерывный сигнал;  $x_{шмм.}$  - модулированный сигнал;  $x_{дискр.}$  - дискретизированный по времени сигнал;  $удискр.$  - дискретизированный по времени выходной сигнал

Вторая схема включения в составе системы управления (СУ) с детектированием изображена на рис. 2.

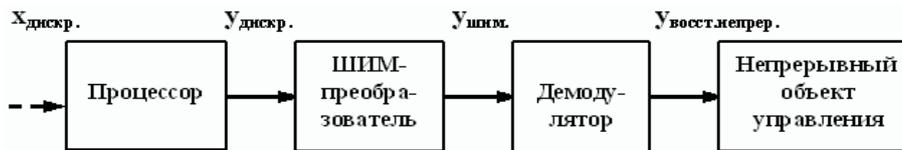


Рис. 2. Схема включения ШИМ с последующим восстановлением сигнала, где:  $x_{дискр.}$  - дискретизированный по времени входной сигнал;  $удискр.$  - дискретизированный по времени выходной сигнал;  $ушмм.$  - модулированный сигнал;  $увосст.непер.$  - восстановленный, демодулированный, детектированный непрерывный сигнал

## 2. Постановка проблемы

В первом случае погрешность можно определить как разность между исходным непрерывным и гипотетически восстановленным (который можно было бы получить путем восстановления с помощью идеального фильтра) идеальным выходным сигналами:

$$\Delta_{x1} = x_{непер.} - u_{восст.непер.ид.} \quad (1)$$

Во втором случае погрешность зависит от способа детектирования. Детектированием модулированного сигнала называют его преобразование в сигнал, пропорциональный исходному измеряемому сигналу. В процессе детектирования происходит восстановление информации, содержащейся в исходном сигнале. Каждому виду модуляции соответствует определенный способ детектирования. Детектирование большинства видов импульсной модуляции чаще всего выполняют с помощью фильтров низких частот (ФНЧ), что и обусловило простоту реализации и широту применения различных видов импульсной модуляции, ШИМ в

частности [2-4]. При такой распространенной схеме погрешность можно определить как разность между гипотетическим идеальным исходным непрерывным и восстановленным, демодулированным сигналами:

$$\Delta_{x2} = x_{\text{непрер.ид.}} - u_{\text{восст.непрер.}} \quad (2)$$

Задачей данной статьи является оценка названных погрешностей для распространенных способов детектирования.

### 3. Решение проблемы

Погрешности преобразования сигналов в рассмотренных двух вариантах включения ШИМ-преобразователей имеет несколько общих слагаемых и несколько различий. В общем случае при случайном входном сигнале (каким является сигнал, содержащий информацию) погрешность можно представить как сумму трех составляющих (см. рис. 3.). При первой схеме включения ШИМ погрешность определяется как сумма первых двух составляющих, при второй схеме погрешность содержит все составляющие.



Рис. 3. Структура погрешности

Рассмотрим отдельно каждую из названных выше составляющих.

1. Погрешность квантования по уровню, которая появляется при обработке ШИМ-сигнала, оценим для самого распространенного метода, связанного с заполнением измеряемого периода импульсами эталонного генератора. Если частота этого эталонного генератора неизменна, то имеем дело с равномерной дискретизацией измеряемого периода, который при широтно-импульсной модуляции пропорционален уровню входного сигнала. Появляющуюся при этом погрешность можно назвать погрешностью дискретизации по уровню с максимальным количеством уровней (см. рис. 4).

$$N = T_{\text{ШИМ}}/T_c = f_c/f_{\text{ШИМ}} \quad (3)$$

где:

- N - количество уровней дискретизации;
- T<sub>ШИМ</sub> - период модулированного сигнала;
- T<sub>c</sub> - период поступления счетных импульсов;
- f<sub>c</sub> - частота генератора счетных импульсов;
- f<sub>ШИМ</sub> - частота колебаний модулированного сигнала.

Возможно, также привести эту погрешность к размерности входного сигнала, определив ее абсолютное значение так:

$$\Delta_{x_{\text{max}}} = x_{\text{max}}/N = x_{\text{max}} \cdot f_{\text{ШИМ}}/f_c \quad (4)$$

а относительное значение так:

$$\gamma1 \approx \frac{\Delta_{x_{\text{max}}}}{x_{\text{max}}} = \frac{f_{\text{ШИМ}}}{f_c} \quad (5)$$

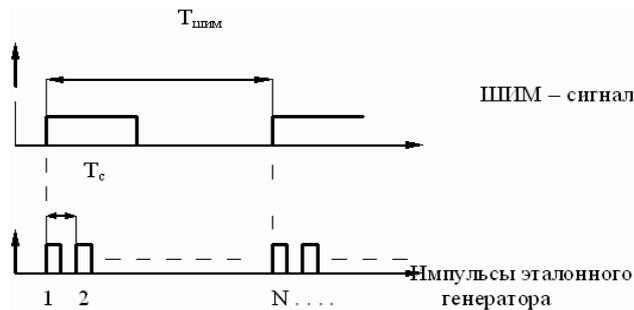


Рис. 4. Определение количества уровней квантования при заполнении ШИМ – сигнала импульсами эталонного генератора

Эта составляющая погрешности может изменяться в широких пределах (см. табл. 1.).

Таблица 1

Зависимость первой составляющей от соотношения частот сигналов

f <sub>c</sub> /f <sub>ШИМ</sub>	10	100	1000	10000
γ1	10%	1%	0.1%	0.01%

Таким образом, для уменьшения составляющей погрешности от дискретизации по уровню важно увеличивать частоту счетных импульсов вплоть до максимальной частоты работы счетчиков.

2. Погрешность квантования по времени возникает в связи с тем, что непрерывная по аргументу функция x<sub>непрер.</sub>(t), описывающая сигнал, преобразуется в функцию x<sub>дискр.</sub>(t) дискретного аргумента. В процессе модуляции происходит замена множества значений исходного непрерывного сигнала x<sub>непрер.</sub>(t) в течение периода модуляции T одним значением скважности выходного сигнала x<sub>ШИМ.</sub>(t), то есть происходит дискретизация исходного сигнала по времени с периодом T.

При таком предположении для оценки точности ШИМ можно воспользоваться математическим аппаратом, изложенным в [1]. Искомая погрешность может быть оценена отношением:

$$\gamma2 = \frac{\int_{f_c}^{\infty} G(f)df}{\int_0^{\infty} G(f)df} \quad (6)$$

где  $\int_{f_c}^{\infty} G(f)df$  - спектральная плотность мощности невозстанавливаемой высокочастотной части сигнала;

$\int_0^{\infty} G(f)df$  - спектральная плотность мощности всего сигнала.

Эта составляющая погрешности может изменяться в широких пределах (см. табл. 2).

Таблица 2

Зависимость второй составляющей от площадей спектров сигналов

П/П <sub>выс</sub>	10	100	1000	10000
γ2	30%	10%	3%	1%

Таблица 3

Зависимость третьей составляющей от соотношения частот сигналов

$f_{\text{ШИМ}}/f_{\text{max}}$	10	100	1000	10000
$\gamma_3$	60%	6%	0.6%	0.06%

В табл. 2:  $\Pi$  – полная площадь спектра исходного сигнала;  $\Pi_{\text{выс}}$  – высокочастотная часть площади спектра исходного сигнала, ограниченная частотой модуляции.

Таким образом, для уменьшения составляющей погрешности от дискретизации по времени важно увеличивать частоту модуляции.

3. Погрешность восстановления зависит в первую очередь от способа восстановления, причем широко известно множество таких способов, например методы ступенчатой, линейной, параболической аппроксимации, методы Ньютона, Лагранжа, функций отсчетов Котельникова и т.д. Соответственно разные погрешности будут наблюдаться при использовании разных способов восстановления.

Имеет смысл рассмотреть самый простой и широко употребляемый из этих способов, который практически реализуется в цифро-аналоговом преобразователе – это метод ступенчатой экстраполяции.

Для оценки погрешности восстановления при ступенчатой экстраполяции  $\gamma_3$  рассмотрим интервал  $\Delta$ , в котором погрешность восстановленного сигнала  $\Delta x_{\text{max}}$  максимальна. В этом случае погрешность восстановления равна

$$\gamma_3 = \frac{\Delta x_{\text{max}}}{x_{\text{max}}}, \quad (7)$$

где  $x_{\text{max}}$  – часть сигнала в интервале  $\Delta$ .

$$\begin{aligned} \Delta x_{\text{max}} &= x'_{\text{max}} \times T = [x_{\text{max}} \sin(2\pi f_{\text{max}} t)]' \times T = \\ &= x_{\text{max}} 2\pi f_{\text{max}} \cos(2\pi f_{\text{max}} t) \times T \end{aligned} \quad (8)$$

В это выражение можно подставить максимальное значение  $\cos(2\pi f_{\text{max}} t) = 1$ . Тогда оно примет вид

$$\Delta x_{\text{max}} = x_{\text{max}} 2\pi f_{\text{max}} \times T. \quad (9)$$

Подставим полученное выражение (9) в формулу (7):

$$\gamma_3 = \frac{x_{\text{max}} 2\pi f_{\text{max}} T}{x_{\text{max}}} = 2\pi f_{\text{max}} T = 2\pi \frac{f_{\text{max}}}{f_{\text{ШИМ}}}. \quad (10)$$

Значит, максимальная погрешность восстановления равна:

$$\gamma_3 = 2\pi \frac{f_{\text{max}}}{f_{\text{ШИМ}}}, \quad (11)$$

где  $f_{\text{max}}$  – максимальная частота исходного сигнала;

$$f_{\text{ШИМ}} = \frac{1}{T_{\text{ШИМ}}} \text{ – частота дискретизации.}$$

Эта составляющая погрешности может изменяться в широких пределах (см. табл. 3).

Таким образом, для уменьшения составляющей погрешности от восстановления важно увеличивать частоту модуляции.

#### 4. Выводы

При использовании ШИМ-преобразователей в цифровых измерительных и управляющих устройствах возникает специфическая погрешность, в которой можно выделить три составляющие:

погрешность измерения скважности ШИМ, которую при самом распространенном методе измерения можно оценить как погрешность дискретизации по уровню;

погрешность дискретизации исходного непрерывного сигнала по времени;

погрешность восстановления модулированного сигнала в непрерывный.

Полное выражение относительной погрешности выглядит следующим образом:

$$\gamma_{\Sigma} = \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3, \quad (12)$$

$$\gamma_{\Sigma} = \frac{f_{\text{ШИМ}}}{f_{\text{сч.им.}}} + \frac{\int_0^{f_c} G(f) df}{\int_0^{\infty} G(f) df} + 2\pi \frac{f_{\text{max}}}{f_{\text{ШИМ}}}. \quad (13)$$

Соотношение этих составляющих в итоговой погрешности зависит от места включения ШИМ-преобразователя в схеме обработки сигнала. В измерительных схемах присутствуют первые две составляющие, в схемах управления – все три составляющие.

Для уменьшения первой составляющей необходимо повышать частоту генератора счетных импульсов и понижать частоту модуляции. Для уменьшения второй и третьей составляющей необходимо повышать частоту модуляции.

При разработке схем точных информационных систем с использованием ШИМ-преобразователей должна решаться задача оптимизации при выборе частоты ШИМ для минимизации итоговой суммарной погрешности.

#### Литература

1. Темников, Теоретические основы информационной техники [Текст]: уч. пособие для вузов / Ф.Е. Темников, В.А. Афонин, В.Н. Дмитриев. – М.: Энергия, 1979. – 512 с.
2. Орнатский, П.П. Теоретические основы информационной измерительной техники [Текст] / П.П. Орнатский. – К.: Вища школа, 1976. – 432 с.
3. Кузьмин, И.В. Основы теории информации и кодирования [Текст] / И.В. Кузьмин, В.А. Кедрус. 2-е изд. перераб. и доп. – К.: Вища шк., 1986. – 238 с.
4. Браславский, Д.А. Точность измерительных устройств [Текст] / Д.А. Браславский, В.В.Петров. – М.: Машиностроение, 1976. – 311 с.