

В. Н. ПАНТЕЛЕЕВ, А. Г. РЫЖЕВСКИЙ, В. М. ШЛЯНДИН

(Пенза)

О ФОРМЕ НАПРЯЖЕНИЯ РАЗВЕРТКИ ВРЕМЯ-ИМПУЛЬСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Аналого-цифровые преобразователи с промежуточным преобразованием измеряемого параметра в интервал времени имеют простое схемное решение, обеспечивают достаточно высокую точность, обладают высоким быстродействием и надежностью и поэтому получили широкое распространение при измерении напряжения, сопротивления, емкости и индуктивности.

В то же время в имеющейся литературе отсутствуют обобщающие работы по выбору формы напряжения развертки таких преобразователей в зависимости от вида преобразуемого параметра и характеристики преобразования.

В статье сделана попытка найти обобщенный подход к выбору формы напряжения развертки, что может обнаружить новые области применения время-импульсных преобразователей.

Как известно, во время-импульсных преобразователях исследуемый параметр X выражается через соответствующее напряжение $u_x(t)$ и осуществляется преобразование этого напряжения в интервал времени t_x , который обычно затем заполняется импульсами опорной частоты для получения цифрового кода. Началу интервала t_x в преобразователях с развертывающим напряжением соответствует момент запуска датчика напряжения развертки, а концу — момент равенства мгновенных значений преобразуемого напряжения u_x и напряжения развертки u_p .

Очевидно, что в результате преобразования устанавливается однозначная зависимость между интервалом времени t_x и значением измеряемого параметра X :

$$t_x = f(X). \quad (1)$$

Таким образом, выбор формы напряжения развертки определяется задачей получения определенной функциональной зависимости между искомым значением параметра X и интервалом времени t_x , соответствующей выражению (1).

Математическое выражение для напряжения развертки может быть получено из следующих соображений: для любого время-импульсного преобразователя* справедливо равенство

$$u_p(t = t_x) = u_x(t = t_x), \quad (2)$$

* Имеются в виду преобразователи, в которых осуществляется сравнение мгновенных значений u_x и u_p .

где $u_p(t=t_x)$ и $u_x(t=t_x)$ — мгновенные значения соответственно напряжения развертки и измеряемого напряжения в момент окончания временного интервала t_x . С другой стороны, в момент $t = t_x$ имеет место равенство (1), откуда может быть получено выражение

$$X = F(t_x). \quad (3)$$

Следовательно, если преобразуемое напряжение имеет вид

$$u_x = \xi(X, t) \quad (4)$$

(т. е. является функцией не только X , но и времени t), то, подставляя (3) в (4), с учетом (2) получим значения напряжения развертки в момент $t = t_x$:

$$u_p(t=t_x) = \xi[F(t_x), t_x]. \quad (5)$$

Выражение (5) при $t = \text{вар}$ представляет собой общее уравнение напряжения развертки:

$$u_p = \xi[F(t), t]. \quad (6)$$

Рассмотрим, какую форму должно иметь напряжение развертки, сформированное в соответствии с уравнением (6), при преобразовании различных электрических параметров.

1. В случае пропорциональной зависимости между значением измеряемого параметра X и полученным в результате преобразования временным интервалом t_x выражение (1) имеет вид

$$t_x = kX, \quad (7)$$

где $k = \text{const}$.

1. Преобразование постоянного напряжения U_x . Так как $X = U_x$, то, согласно (7), $t_x = kU_x$, используя уравнение (6), получим выражение для напряжения развертки

$$u_p = \frac{1}{k}t.$$

2. Преобразование пассивных электрических параметров R, L, C . Как указывалось выше, эти параметры должны быть предварительно преобразованы в соответствующее напряжение u_x . Это достигается включением преобразуемого элемента в RC (или RL)-цепь и подключением этой цепи к источнику постоянного напряжения U_0 . Постоянная времени τ_x полученной цепи пропорциональна среднему значению измеряемого параметра, который поэтому и определяется по постоянной времени τ_x :

$$t_x = k\tau_x. \quad (8)$$

В качестве u_x используется напряжение, снимаемое со средней точки RC (RL)-цепи:

$$u_x = U_0(1 - e^{-t/\tau_x}). \quad (9)$$

Подставляя в это выражение значение τ_x из (8) и используя уравнение (6), получим

$$u_p = U_0(1 - e^{-k}),$$

т. е., сохраняя единую терминологию, можно утверждать, что в данном случае в качестве напряжения развертки должно использоваться постоянное напряжение.

Таким образом, напряжение развертки, определенное по рассмотренной методике, совпадает с используемым на практике при измерении указанных электрических параметров. Вместе с тем общее уравнение напряжения развертки дает возможность легко определить форму напряжения развертки для таких измерений, которые ранее время-импульсным методом не производились, либо не давали требуемых результатов. Это относится, в частности, к вариантам измерения амплитуды переменного напряжения, рассмотренным ниже.

3. Преобразование переменного напряжения. При преобразовании переменного напряжения обычно интересуются или его амплитудой, или средним и действующим значениями. При измерении амплитуды в качестве напряжения $u_x(t)$ может использоваться непосредственно измеряемое напряжение.

Использование напряжения развертки различной формы для определения амплитуды переменного напряжения известно. Так, в [1] предлагается в качестве напряжения развертки использовать постоянное напряжение. В [2] при преобразовании синусоидального напряжения напряжение развертки изменяется также по синусоидальному закону с некоторым сдвигом по фазе относительно преобразуемого напряжения. Отсутствие анализа зависимости между формами преобразуемого напряжения и напряжения развертки и выбора на этой основе формы последнего привело к тому, что шкала указанных преобразователей оказалась нелинейной.

Определим форму напряжения развертки для линейного преобразователя амплитуды переменного напряжения, используя общее уравнение для напряжения развертки (6). Подставляя в выражение для преобразуемого напряжения значение X из исходного условия (7), получим

$$u_x = \frac{1}{k} t_x \varphi(t_x).$$

Следовательно, согласно (6), выражение для напряжения развертки должно иметь вид

$$u_p = \frac{1}{k} t \varphi(t). \quad (10)$$

Итак, при преобразовании амплитуды переменного напряжения напряжение развертки имеет сложную форму, определяемую законом изменения измеряемого напряжения. Как видно из (10), такое напряжение может быть получено умножением напряжения, изменяющегося по тому же закону, что и преобразуемое напряжение, но имеющего постоянное значение параметра X , на коэффициент, изменяющийся пропорционально времени преобразования t . Вариант время-импульсного преобразователя, реализующего такой способ, приведен на рис. 1 [3]*.

Формирователь опорного напряжения (ФОН) формирует из измеряемого напряжения u_x напряжение вида $u_\phi = k_1 \varphi(t)$. Синхронизатор (С) осуществляет синхронизацию момента включения генератора функций (ГФ) и управляющего триггера (УТ) с началом периода исследуемого напряжения. Управляющий триггер открывает ключ К, и импульсы генератора ГИ поступают в счетчик Сч. Генератор функций вырабатывает сигнал, мгновенное значение которого пропорционально времени t . Этот сигнал поступает в множительное устройство (МУ), где пере-

* Подобный способ время-импульсного преобразования амплитуды переменного напряжения параллельно и независимо от авторов был разработан группой сотрудников Бакинского института нефти и химии под руководством канд. техн. наук И. Л. Шайна.

множается с напряжением u_ϕ . В результате с выхода устройства умножения на схему сравнения (СС) подается напряжение развертки $u_p = kt \varphi(t)$. На другой вход схемы сравнения поступает исследуемое напряжение $u_x = X \varphi(t)$. В момент равенства этих напряжений сигналом с выхода схемы сравнения выключается управляющий триггер и ключ К закрывается. Количество импульсов, зафиксированное в счетчике Сч, пропорционально интервалу времени $t_x = \frac{X}{k}$, а следовательно, и величине исследуемого параметра X .

Преобразование может быть осуществлено за время, не превышающее полупериода измеряемого периодического напряжения (без учета времени работы ФОН), что исключает потери информации в моменты прохождения измеряемого напряжения через нуль и обеспечивает высокое быстродействие преобразователя.

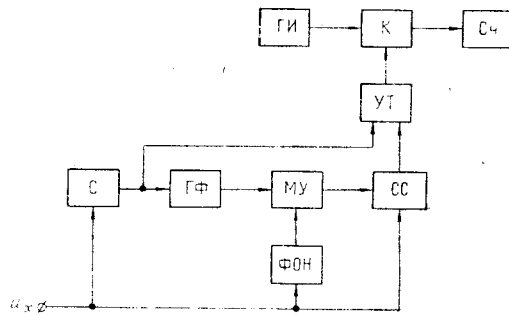


Рис. 1.

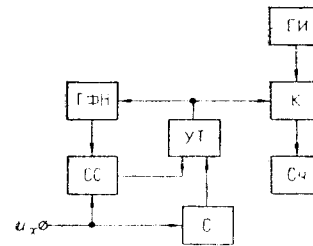


Рис. 2.

Очевидно, что к формирователю опорного напряжения в приведенной схеме предъявляются высокие требования в отношении точности, коэффициента искажений и быстродействия. В частных случаях, например при преобразовании синусоидального напряжения фиксированной частоты выходных сигналов датчиков и мостовых схем, можно обойтись без формирования опорного напряжения из исследуемого. Схема такого преобразователя (рис. 2) отличается от предыдущей тем, что вместо формирователя опорного напряжения, устройства умножения и генератора функций в ней использован генератор функционального напряжения (ГФН), вырабатывающий напряжение заданной постоянной формы.

Работа схемы иллюстрируется рис. 3. Преобразуемое синусоидальное напряжение поступает на один из входов схемы сравнения СС и синхронизатор С. С целью уменьшения погрешностей и упрощения формы напряжения развертки синхронизатор осуществляет запуск управляющего триггера УТ через четверть периода после прохождения преобразуемого напряжения через нуль, т. е. в момент максимального значения синусоидального напряжения. Управляющий триггер открывает ключ К, через который импульсы генератора ГИ поступают на счетчик Сч, и запускает генератор функционального напряжения ГФН, с которого и снимается напряжение развертки

$$u_p = k_1 t \cos \omega t, \quad (11)$$

где ω — круговая частота преобразуемого напряжения. В момент равенства напряжений u_p и $u_x = U_{xm} \cos \omega t$ имеет место соотношение

$$k_1 t_x \cos \omega t_x = U_{xm} \cos \omega t_x, \quad (12)$$

а следовательно, $t_x = U_{xm}/k_1$. В этот момент срабатывает схема сравнения СС, включая управляющий триггер, и ключ К закрывается. Количество импульсов опорной частоты генератора ГИ, зафиксированное в счетчике Сч за время t_x , пропорционально амплитудному значению U_{xm} измеряемого напряжения.

Нетрудно заметить, что схема (см. рис. 2) незначительно отличается от схемы обычного время-импульсного преобразователя постоянного напряжения. Это дает возможность создать простой универсальный прибор для преобразования как постоянного, так и переменного напряжения фиксированной (например, промышленной) частоты.

II. Зададимся логарифмической зависимостью между величиной исследуемого параметра X и временным интервалом t_x на выходе преобразователя. Тогда выражение (1) будет выглядеть так:

$$t_x = k_1 \lg \frac{X}{X_0}, \quad (13)$$

где $k_1 = \text{const}$; X_0 — значение параметра X , принятое за базовое.

Рассмотрим общий случай преобразования напряжения u_x , имеющего вид

$$u_x = X \varphi(t). \quad (14)$$

Прежде чем найти выражение для напряжения развертки, несколько видоизменим (13), а именно: так как в электрических цепях широко распространены экспоненциальные процессы, то для облегчения получения напряжения развертки имеет смысл перейти от десятичных логарифмов к натуральным:

$$t_x = k \ln \frac{X}{X_0},$$

где $k = k_1 \lg e$; отсюда следует, что $X = X_0 e^{t_x/k}$. Подставив это значение X в выражение для преобразуемого напряжения (14), согласно (6), можно записать уравнение для напряжения развертки:

$$u_p = X_0 e^{t_x/k} \varphi(t). \quad (15)$$

Получение напряжения такого вида затруднительно, так как в нем содержится экспоненциальная составляющая с положительным показателем степени, поэтому коэффициент k в этом выражении должен быть отрицательным:

$$u_p = X_0 e^{-t_x/k} \varphi(t). \quad (16)$$

При $X < X_0$ $t_x > 0$; при $X > X_0$ $t_x < 0$; при $X = X_0$ $t_x = 0$ [см. (13)]. Это надо понимать, очевидно, так: момент t_0 , соответствующий равенству мгновенных значений напряжения развертки и измеряемого напряжения при $X = X_0$, следует принять за начало отсчета интервала t_x ; тогда положительному значению t_x соответствует измерение интервала времени от t_0 до момента t_x' равенства измеряемого и развертывающего напряжений, а отрицательному значению t_x — наоборот, от момента t_x' равенства напряжений до момента t_0 (рис. 4).

Из выражения (16) видно, что при преобразовании постоянных напряжений ($\varphi(t) = \text{const}$) в качестве напряжения развертки может быть использовано экспоненциальное напряжение. При преобразовании синусоидального напряжения в качестве напряжения развертки может быть использовано напряжение, возникающее при переходных процессах в

RLC-цепях, которое при определенных условиях соответствует выражению (16). При преобразовании переменных напряжений другой формы напряжение развертки может быть получено так же, как в рассмотренном ранее линейном преобразователе переменного напряжения (см. рис. 1).

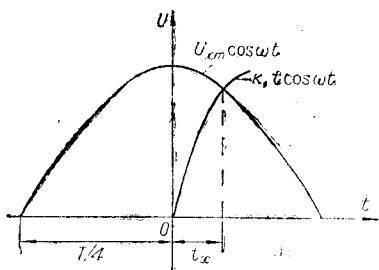


Рис. 3.

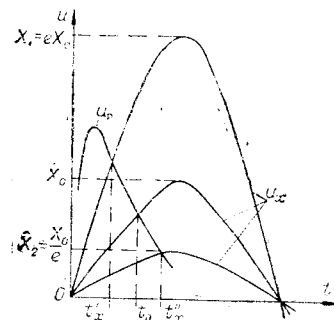


Рис. 4.

Рассмотрим кратко некоторые погрешности преобразователей переменного напряжения, форма напряжения развертки которого выбрана в соответствии с общим уравнением (6).

В преобразователях, использующих формирователь опорного напряжения ФОН (см. рис. 1), погрешность преобразования определяется в основном погрешностями ФОН и устройства умножения. В таких преобразователях напряжение развертки представляется в виде произведения напряжений $u_p = U_{pm} \varphi(t)$ и $u_p = bt$, т. е. $u_p = bt U_{pm} \varphi(t)$, что соответствует выражению (10). При преобразовании напряжения $u_x = U_{xm} \varphi(t)$ временной интервал на выходе преобразователя равен

$$t_x = \frac{1}{b U_{pm}} U_{xm}.$$

Погрешности ФОН и устройства умножения приводят к отклонениям ΔU_{pm} и Δb значений напряжения U_{pm} и крутизны b от номинальных; при этом соответственно вносятся погрешности γ_p и γ_b :

$$\gamma_p = - \frac{\delta U_{pm}}{1 + \delta U_{pm}}; \quad (17)$$

$$\gamma_b = - \frac{\delta b}{1 + \delta b}, \quad (18)$$

где $\delta U_{pm} = \frac{\Delta U_{pm}}{U_{pm}}$; $\delta b = \frac{\Delta b}{b}$. Кроме того, фазовая погрешность ФОН приводит к появлению относительной погрешности формирования напряжения развертки γ_φ , пропорциональной фазовому сдвигу.

В преобразователях с искусственным формированием напряжения развертки (см. рис. 2), предназначенных для работы на фиксированной частоте, к погрешностям отдельных узлов преобразователя добавляются погрешность γ_f из-за нестабильности частоты измеряемого напряжения и погрешность γ_ϕ , вызванная отклонением формы измеряемого напряжения от синусоидальной при наличии в нем высших гармоник.

При изменении частоты преобразуемого напряжения на величину $\Delta \omega$ в момент равенства преобразуемого напряжения и напряжения развертки имеет место соотношение, аналогичное (12):

$$k t_x \cos \omega t_x = U_{xm} \cos (\omega \pm \Delta \omega) \left(t_x \pm \frac{\pi}{2 \Delta \omega} \right).$$

Графики напряжений для этого случая приведены на рис. 5.

Погрешность γ_f , вызванная изменением частоты ω , равна

$$\gamma_f = \frac{\cos (\omega \pm \Delta \omega) \left(t_x \pm \frac{\pi}{2 \Delta \omega} \right)}{\cos \omega t_x}.$$

Эта погрешность возрастает при увеличении t_x , т. е. при измерении больших напряжений. Можно показать, что если максимальное значение ωt_x не превышает $\pi/8$, то погрешность из-за изменения частоты γ_f меньше относительного изменения частоты исследуемого напряжения.

Что касается погрешности γ_ϕ , вызванной отклонением формы преобразуемого напряжения от синусоидальной, то она составляет

$$\gamma_\phi = \frac{\sum a_n (-1)^{\frac{n-1}{2}} \cos n \omega t_x + \sum a_m (-1)^{\frac{m}{2}} \sin m \omega t_x}{\cos \omega t_x} - 1,$$

где $n=1, 3, 5 \dots$ и $m=2, 4, 6 \dots$ — порядковые номера гармоник; $a_{m(n)}$ — отношение амплитуды m -й (n -й) гармоники к амплитуде 1-й гармоники. Величина этой погрешности колеблется по диапазону примерно от $-\Theta$ до $+\Theta$, где Θ — коэффициент нелинейных искажений.

Таким образом, преобразователи с искусственным формированием напряжения развертки могут обеспечить высокую точность только при преобразовании напряжений стабильной формы и частоты. Преобразователи с формированием опорного напряжения из измеряемого обеспечивают высокую точность преобразования в широком диапазоне изменения формы и частоты измеряемого напряжения при условии малых погрешностей ФОН.

В заключение следует заметить, что выбор формы напряжения развертки по описанной методике в некоторых случаях может привести к сложным в отношении реализации решениям. В этих случаях, видимо, целесообразно прибегать к искусственным приемам при поиске оптимальной развертки. Наконец, приведенную методику выбора развертки можно применять при проектировании преобразователей, в которых в качестве развертывающей величины используются другие физические величины — заряд, давление и т. д.

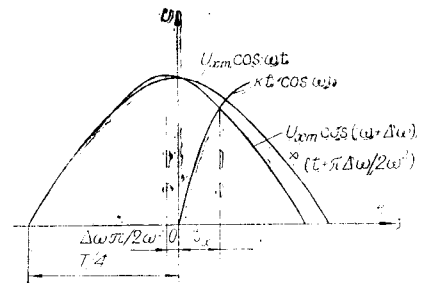


Рис. 5.

ВЫВОДЫ

Показано, что форма напряжения развертки время-импульсных преобразователей определяется видом преобразуемого параметра, искомой характеристикой преобразователя.

Получено общее уравнение напряжения развертки, из которого при заданной характеристике преобразователя может быть получено выра-

жение для напряжения развертки применительно к конкретному виду преобразуемого параметра.

Приведены возможные варианты построения время-импульсных преобразователей переменного напряжения и рассмотрены некоторые погрешности таких преобразователей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. М. Горский, В. А. Ушаков. Быстродействующий полупроводниковый преобразователь гармонического напряжения в цифровой код.— ПНТПО, № 4—66—1132/61. М., ГОСИНТИ, 1966.
2. А. М. Лучук. Способ преобразования амплитуды переменного синусоидального напряжения в цифровой код. Авторское свидетельство № 178180.— ИПОТЗ, 1966, № 2.
3. В. Н. Пантелеев, А. Г. Рыжевский, В. М. Шляндин. Способ измерения напряжения переменного тока. Авторское свидетельство № 252464.— ОИПОТЗ, 1969, № 29.

*Поступила в редакцию
20 октября 1969 г.,
окончательный вариант —
1 июля 1970 г.*
