

Т. И. ТОМСОН

(Таллин)

### КВАЗИЛИНЕЙНЫЙ РАЗВЕРТЫВАЮЩИЙ АНАЛОГО-ЦИФРОВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

В [1] приводятся общие требования к развертывающим функциям, по которым не исключено применение в качестве развертывающей нелинейной функции. Однако практическое применение нашли нелинейные развертывающие функции только в функциональных преобразователях или преобразователях с двухкратным преобразованием, где выходной величиной является линейно зависящая от входной величины аналоговая величина. Значительно чаще встречаются задачи линейного преобразования входной аналоговой величины в дискретную (цифровую) выходную величину, где нелинейные развертывающие функции не нашли применения, что, однако, является возможным.

Принцип квазилинейного аналого-дискретного преобразования заключается в следующем: входной сигнал  $x_{вх}$  сравнивается при помощи порогового устройства с развертывающим сигналом  $x_0$ . Временной интервал  $T$  от момента начала развертки до момента сравнения заполняется импульсами функционального генератора отсчетных импульсов (ФГОИ). Если частота импульсов ФГОИ отвечает условию

$$f_n = \frac{1}{T_n} = \frac{1}{\Delta x} \frac{dx_0(t)}{dt}, \quad (1)$$

то результат преобразования в виде  $N$  отсчетных импульсов пропорционален  $x_{вх}$  и независим от  $x_0$ . Здесь  $f_n$  — частота импульсов;  $T_n$  — период отсчетных импульсов;  $\Delta x$  — квант по уровню входного сигнала. Действительно, текущее значение входного сигнала может быть представлено как сумма квантов по уровню, прошедших развертывающим сигналом за соответствующие периоды ФГОИ:

$$x_{вх} = \sum_{i=1}^{i=N} v_{0i} T_{ni}, \quad (2)$$

где  $v_{0i} = \frac{dx_0(t_i)}{dt}$  — скорость нарастания тока опроса при  $i$ -м периоде ФГОИ. Подставляем в (2)  $T_{ni}$  по (1)

$$x_{вх} = \sum_{i=1}^{i=N} \frac{dx_0(t)}{dt} \Delta x \frac{dt}{dx_0(t)} = \sum_{i=1}^{i=N} \Delta x = N \Delta x,$$

откуда

$$N = \frac{1}{\Delta x} x_{\text{вх}}, \quad (3)$$

что и требовалось доказать.

Независимость результата преобразования от сигнала опроса, т. е. независимость от его крутизны, частоты, амплитудного значения и т. п., является весьма ценным свойством квазилинейного преобразователя. Нетрудно видеть, что общезвестные и широко распространенные преобразователи время-импульсного типа подобны «квазилинейным» преобразователям при  $x_0(t) = v_0 t$ ;  $v_0 = \text{const}$ ;  $f_{\text{и}} = \text{const}$ , однако отличаются от них отсутствием функциональной зависимости между развертывающим сигналом и частотой генератора импульсов. Введенная функциональная зависимость действует подобно отрицательной обратной связи, благодаря чему квазилинейный преобразователь представляет собой замкнутую систему, отличающуюся от разомкнутой системы метрологическими показателями.

Рассмотрим ниже некоторые принципиальные вопросы проектирования квазилинейного преобразователя.

Структурная схема квазилинейного преобразователя может быть построена с одним пороговым устройством (ПУ) и элементом, фиксирующим начало развертки, что соответствует схеме рис. 1, а. Также может быть использована структурная схема (см. рис. 1, б), содержащая два ПУ без элемента, фиксирующего начало развертки. С этой точки зрения структурные схемы квазилинейного преобразователя не отличаются от известных структурных схем обыкновенных время-импульсных преобразователей [2], и на них могут быть распространены приведенные в литературе ограничения и рекомендации.

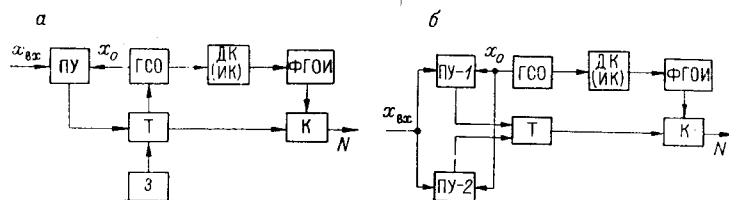


Рис. 1. Структурные схемы квазилинейного преобразователя:

ПУ — пороговое устройство; ГСО — генератор развертывающего сигнала; Т — триггер; К — ключ; ДК — дифференцирующий контур; ИК — интегрирующий контур; ФГОИ — функциональный генератор отсчетных импульсов; З — задатчик.

Рассмотрим выбор развертывающего сигнала. При выполнении (1) в качестве развертывающего сигнала применима любая функция, удовлетворяющая требованиям [1], однако нам кажется целесообразным ограничиваться тремя функциями.

А.  $x_0 = X_0 \sin \omega_0 t$ . Большинство из приборов работают на сетевом питании, и применение синусоиды позволяет реализовать преобразователь с минимальным числом элементов схемы. Недостатком синусоиды является привязанность к определенной частоте периодической развертки и, как показало исследование, наличие нестабильных гармонических составляющих и фазовых соотношений напряжения сети.

Б.  $x_0 = X_0 \left(1 - \exp - \frac{t}{\tau}\right)$ , или  $x_0 = X_0 \exp - \frac{t}{\tau}$ . Экспонента является функцией, которая при произвольной частоте развертки генерируется минимальным числом элементов схемы.

В.  $x_0 = a + v_0 t$ . Линейно нарастающий развертывающий сигнал позволяет осуществлять при определенных условиях строго линейное преобразование без присущей квазилинейному преобразователю методической погрешности, обусловленной невыполнением (1). Поскольку в преобразователе сохраняется главное отличие квазилинейного преобразователя — функциональная зависимость частоты ФГОИ от развертывающего сигнала, в дальнейшем применяем для него тот же термин, обозначив кавычками строгость линейного преобразования и нестрогость терминологии для данного частного случая. Недостатком «квазилинейного» преобразователя с линейно нарастающим сигналом опроса является его относительная сложность.

Реализация квазилинейного преобразователя заключается в разработке генератора импульсов, управляемого производным от сигнала опроса. Такой функциональный генератор может быть создан на базе релаксационного генератора, связанного с сигналом опроса дифференцирующим (интегрирующим) контуром и генератором тока. Один вариант квазилинейного преобразователя с синусоидальным развертывающим током приводится в качестве примера на рис. 2.

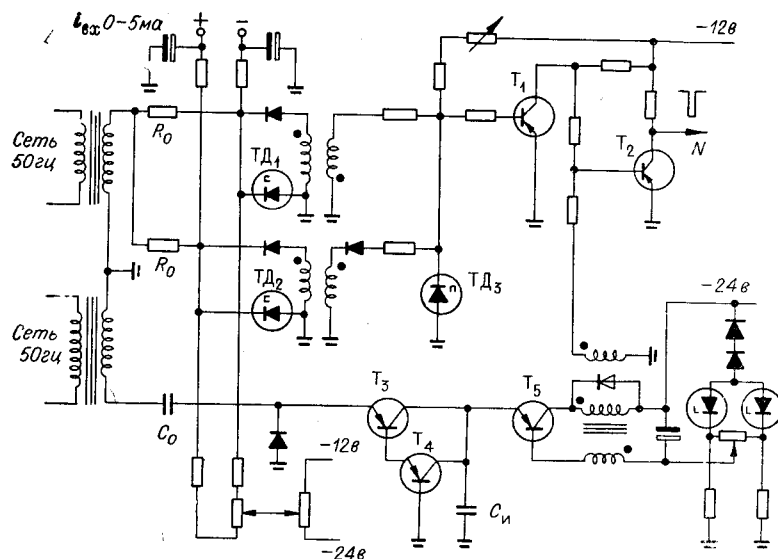


Рис. 2. Полная электрическая схема макета квазилинейного преобразователя с синусоидальным развертывающим током.

Методическая погрешность квазилинейного преобразователя заключается в нелинейности функции преобразования  $N = \frac{1}{\Delta x} x_{вх}$ , что возникает из-за нестрогого выполнения (1). Действительно, релаксационные генераторы позволяют обеспечивать длительность паузы  $T_n = T_n - t_n = \Delta x \frac{1}{\frac{dx_0(t)}{dt}}$  и отличающуюся от нуля длительность от

счетного импульса  $t_n \neq 0$ . Неравенство нулю  $t_n$  является физической причиной нелинейного характера функции преобразования квазилинейного преобразователя. Очевидно, что при  $t_n \rightarrow 0$  нелинейность функции преобразования стремится к нулю. По этой причине из всех

релаксационных генераторов наиболее перспективным является блокинг-генератор, работающий удовлетворительно при больших скважностях.

Количественные оценки методической погрешности могут быть получены на основе анализа конкретных схем и здесь не приводятся.

Далее здесь только общую методику для анализа схем квазилинейного преобразователя с емкостным накапливающим элементом в ФГОИ.

Генератор тока производит разряд накапливающего элемента ФГОИ, заряд которого произойдет за счет источника питания при каждом релаксационном процессе. Ток разряда связан с током опроса  $i_p = f_1(x_0)$ . Обозначим заряд, снимаемый током разряда за время преобразования  $T$ , от накапливающего элемента,  $Q$ , а заряд, переданный накапливающему элементу в каждом релаксационном процессе,  $Q_n$  (рис. 3). Заметим, что релаксационный генератор в стадии формирования импульса может быть представлен в виде замкнутого ключа и длительность импульса релаксационного генератора независима от тока разряда.

Поскольку снимаемый от накапливающего элемента заряд за время преобразования равен подводимому заряду, можем записать

$$N Q_n = Q = \int_0^T i_p(t) dt = \sum_{i=1}^{i=N} t_n i_p(t_i) = \int_0^T f_1(x_0) dt = \sum_{i=1}^{i=N} t_n i_p(t_i). \quad (4)$$

Поскольку обращение с суммой неудобно, введем замену

$$\sum_{i=1}^{i=N} t_n i_p(t_i) = \int_0^T t_n f_1 i_p(t) dt, \quad (5)$$

что допустимо, если считать  $i_p(t) = \text{const}$  за время  $t_n$ . Напомним, что из общих соображений нас интересует случай с  $t_n \rightarrow 0$ .

Учитывая (1),  $x_0 = f_2(x_{вх})$ , а также  $f_1 = f_3(x_{вх})$ , что позволяет из (4) и (5) получить

$$N = \frac{1}{Q_n} \int_0^T f_1[f_2(x_{вх})] dt = \frac{t_n}{Q_n} \int_0^T f_3(x_{вх}) f_1[f_2(x_{вх})] dt = f_5(x_{вх}). \quad (6)$$

Полученное выражение позволяет нам выразить результат преобразования в зависимости от входного сигнала, поскольку  $T = f_4(x_{вх})$ .

В общем случае

$$f_5(x_{вх}) = \frac{1}{\Delta x} x_{вх} \pm \sum_{i=1}^{i=\infty} (-1)^i f_i(x_{вх}),$$

где  $f_i(x_{вх})$  представляет собой нелинейную функцию от входного сигнала.

Сумма нелинейных функций является сходящейся и в зависимости от конкретных соотношений и выбранной схемы может иметь пренебрежимо малый удельный вес. При исследовании конкретных схем достаточно ограничиться первым членом суммы.

Методическая погрешность от нелинейности передаточной характеристики составляет

$$\Delta_g = f_5(x_{вх}) - \frac{1}{\Delta x} x_{вх} = \pm \sum_{i=1}^{i=k} (-1)^i f_i(x_{вх}). \quad (7)$$

Нелинейность функции преобразования исследованных автором конкретных схем с нелинейными развертывающими сигналами имеет порядок 0,1% при соотношении

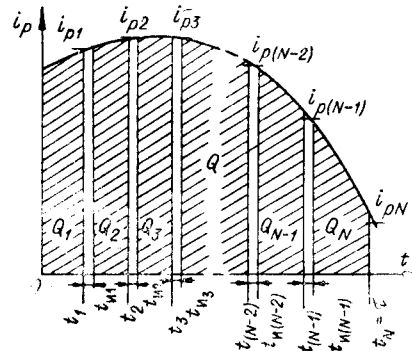


Рис. 3. Временная диаграмма работы квазилинейного преобразователя (заштрихованная площадь выражает  $Q$ ).

длительности отсчетного импульса к периоду их следования  $\alpha = \frac{t_{\text{и}}}{T_{\text{и}}} \approx 0,1$ . Поскольку при полупроводниковых схемах  $t_{\text{и}}$  ограничен снизу временем рассасывания в базе релаксационного генератора неосновных носителей, то при заданной градации и нелинейности преобразователя номинальное время преобразования  $T_{\text{и}}$  также ограничено снизу.

Инструментальная погрешность квазилинейного преобразователя зависит от постоянства параметров дифференцирующей цепи, ПУ, генератора тока и напряжения питания ФГОИ. Исследование инструментальной погрешности целесообразно провести, исходя из конкретных схем.

Погрешность от дискретности преобразователя зависит только от выбранного кванта по уровню  $\Delta x$  и фазовых соотношений ФГОИ аналогично обыкновенному преобразователю время-импульсного типа [2] и имеет минимальное значение  $\pm 0,5 \Delta x$ .

Под динамической погрешностью квазилинейного преобразователя подразумеваем несоответствие фиксированного значения входного сигнала значению входного сигнала при фиксированной временной отметке.

Динамическая погрешность первого рода вызывается инерционностью ПУ и принципиально отличается от такового при обыкновенном время-импульсном преобразовании, поскольку все известные ПУ чувствительны к  $\frac{d}{dt}(x_{\text{вх}} - x_0)$ , а последняя не является постоянной даже при преобразовании постоянного входного сигнала. Практически большинство из преобразуемых и развертывающих сигналов могут быть рассмотрены как медленно меняющиеся сигналы, при которых динамическая погрешность первого рода пренебрежимо мала.

Динамическая погрешность второго рода вызвана изменением входного сигнала за время преобразования. Ограничивая допустимую динамическую погрешность второго рода в размере кванта по уровню  $\Delta x$  за цикл преобразования [2], убедимся, что при равных временах преобразования  $T_{\text{и}}$  (при номинальном входном сигнале  $x_{\text{вх.н}}$ ) квазилинейный преобразователь и обыкновенный преобразователь время-импульсного типа равноценны. Однако различие может быть обнаружено, если придерживаться первоначального определения динамической погрешности второго рода. При этом допустимая скорость изменения входного сигнала зависит от уровня входного сигнала в момент сравнения и при прямоугольном распределении плотности вероятности входного сигнала  $P[x_{\text{вх}}]$  динамическая погрешность квазилинейного преобразователя окажется меньшей для выпуклых развертывающих функций и большей для вогнутых по сравнению с обыкновенным время-импульсным преобразователем.

В качестве примера реализации квазилинейного преобразователя приводится принципиальная схема макета квазилинейного преобразователя с синусоидальным развертывающим сигналом и токовыми ПУ, выполненными на туннельных диодах (см. рис. 2). По структуре данная схема соответствует схеме рис. 1, б.

При нарастании развертывающего тока первым переключается в высоковольтное состояние ТД<sub>1</sub>, для которого выполняется условие  $i_{\text{вх}} + i_0 + i_{\text{см1}} = i_{p1}$ , где  $i_{\text{см}}$  — ток смещения;  $i_p$  — пиковый ток туннельного диода. Переключение ТД<sub>1</sub> фиксирует в низковольтное положение ТД<sub>3</sub>, который отпирает через нелинейный усилительный каскад  $T_1$  ключ  $T_2$ .

При дальнейшем нарастании развертывающего тока переключается в высоковольтное положение ТД<sub>2</sub>, для которого выполняется условие  $i_{\text{вх}} + i_0 + i_{\text{см2}} = i_{p2}$ . При этом восстанавливается исходное высоковольтное состояние ТД<sub>3</sub> и запирается ключ  $T_2$ .

Развертывающий ток задается активными сопротивлениями  $R_0$ , ток разряда — дифференцирующим конденсатором  $C_0$  и генератором тока, выполненным в виде составного транзистора  $T_3, T_4$ . Релаксационный генератор выполнен в виде блокинг-генератора с эмиттерным конденсатором. Питание цепей развертывания и разряда отдельными трансформаторами необязательно; в данном макете отдельное питание было необходимо в целях экспериментального исследования фазовых соотношений между развертывающим током и током разряда.

Экспериментальное исследование макета показало, что нелинейность передаточной характеристики  $\Delta_e < 1\%$ . Точное значение не установлено, поскольку при повышении  $N_n$  существенно сказываются случайные погрешности ПУ, вызванные высокочастотными помехами в развертывающем токе. Результат преобразования мало зависит от изменения частоты или амплитуды развертывающего тока, что подтверждает теоретические выкладки.

### Выводы

Применение принципа квазилинейного преобразования расширяет выбор развертывающих сигналов при линейном преобразовании входного аналогового сигнала в дискретный (цифровой) выходной сигнал.

Произвольный выбор развертывающего сигнала позволяет применять токовые пороговые элементы, избегая задачи разработки генератора линейно нарастающего развертывающего тока.

Квазилинейному преобразователю с нелинейным развертывающим сигналом присуща методическая погрешность, вызванная малой, но конечной нелинейностью функции преобразования. Последняя принципиально отсутствует в «квазилинейном» преобразователе с линейным развертывающим сигналом.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ф. Е. Темников. Теория развертывающих систем. М., Госэнергоиздат, 1963.
2. В. Н. Хлистунов. Основы цифровой электроизмерительной техники. М., «Энергия», 1966.

*Поступила в редакцию  
28 февраля 1968 г.*