

УДК 621.314 + 004.387:621.3.087.92 + 621.314.5

## **ИНТЕГРИРУЮЩИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ АНАЛОГОВОГО СИГНАЛА В ЧАСТОТУ ИМПУЛЬСОВ**

*Л.И. Цытович, М.М. Дудкин, А.С. Нестеров*

Рассматриваются динамические характеристики интегрирующего преобразователя напряжения в частоту импульсов с амплитудно-частотной модуляцией синфазного и противофазного типов. Показано, что синфазная модуляция обеспечивает высокий уровень помехоустойчивости преобразователей данного класса, обладающих высокой температурной стабильностью характеристик.

Ключевые слова: интегрирующий развертывающий преобразователь, аналого-цифровой преобразователь, динамические характеристики, синфазная модуляция, температурная стабильность характеристик.

### **Введение**

При число-импульсном методе аналого-цифрового преобразования (АЦП), применяемого, в частности, при построении систем импульсно-фазового управления тиристорными преобразователями, существуют два базовых способа представления аналоговой величины в код. Первый из них основан на подсчете за фиксированный интервал времени количества импульсов, частота которых пропорциональна контролируемой величине [1]. Во втором случае входной сигнал преобразуется в пропорциональный ему интервал времени, в течение которого осуществляется счет импульсов стабильной частоты [2]. Основу каждого из перечисленных вариантов АЦП составляют преобразователи аналогового сигнала, например напряжения, в частоту импульсов (ПНЧ) с линейно нарастающей или спадающей в функции входного сигнала частотой выходных импульсов. При этом ПНЧ однозначно определяют метрологические характеристики, в том числе и помехоустойчивость, АЦП. Поэтому представляет интерес сравнительный анализ динамических показателей ПНЧ с различной функцией преобразования для широкого частотного диапазона входного гармонического воздействия, затрагивающего также область частот, выходящую за пределы частоты несущих колебаний ПНЧ. Это позволяет выявить наиболее благоприятный для систем управления с высоким уровнем и широким частотным спектром помех вид модуляции, реализуемой в ПНЧ.

Ниже рассматривается автоколебательный интегрирующий развертывающий преобразователь аналогового сигнала в частоту импульсов с различными законами амплитудно-частотной модуляции [3] и дается анализ его статических и динамических характеристик.

### Динамические характеристики ПНЧ

Структурная схема ПНЧ (рис. 1а) содержит амплитудный модулятор АМ, сумматор  $\Sigma$ , интегратор И с постоянной времени  $T_{ИР}$  и релейный элемент РЭ с неинвертирующей петлей гистерезиса и порогами переключения  $\pm b$ .

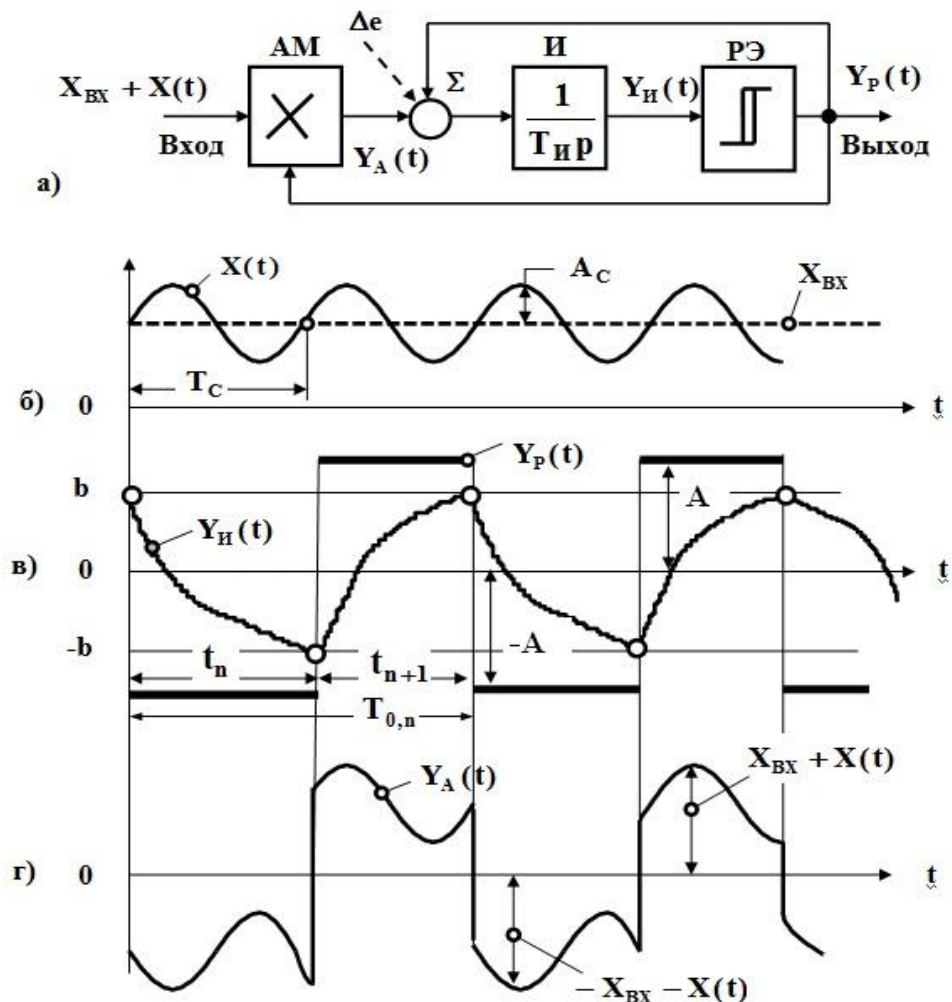


Рис. 1. Структурная схема (а) и временные диаграммы сигналов (б–г) развертывающего преобразователя «напряжение (ток) – частота» с синфазной амплитудной модуляцией

Выходной сигнал  $Y_P(t)$  РЭ меняется дискретно в пределах  $\pm A$ . АМ осуществляет преобразование входного постоянного сигнала  $X_{BX}$  в биполярные импульсы  $Y_A(t)$  с частотой выходного сигнала РЭ и с амплитудой, равной  $X_{BX}$ . ПНЧ может работать в режиме синфазной амплитудной модуляции (АМС), когда фазовый сдвиг  $\Delta\varphi$  между импульсами  $Y_A(t)$  и  $Y_P(t)$  равен нулю, и в режиме противофазной амплитудной модуляции (АМП), при которой  $\Delta\varphi = 180$  электрических градусов.

При АМС в ПНЧ реализуется закон модуляции вида  $\bar{f}_0 = f_0 / f_{0|\bar{X}_{BX}=0} = 1 + \bar{X}_{BX}$ , а в случае АМП –  $\bar{f}_0 = 1 - \bar{X}_{BX}$ . Здесь:  $\bar{f}_0$  – нормированное значение частоты  $f_0$  импульсов  $Y_P(t)$ ;  $\bar{X}_{BX} = |X_{BX} / A|$  – нормированная величина входного сигнала  $X_{BX}$ , для которого при АМП накладывается ограничение  $\bar{X}_{BX} < 1,0$ .

Рассмотрим работу ПНЧ с учетом динамической составляющей  $X(t) = A_C \sin(2\pi t / T_C)$  входного сигнала при следующих условиях:

- коэффициент передачи АМ и автоколебательного каскада  $\Sigma$ , И, РЭ равен единице;
- суммарный входной сигнал  $X_{BX} + X(t)$  прикладывается на вход ПНЧ в момент времени  $t = 0$ , совпадающим с началом очередного цикла развертывающего преобразования;
- для АМП результирующая амплитуда входного сигнала удовлетворяет условию  $(\bar{X}_{BX} + \alpha_C) \leq 0,8$ , где  $\alpha_C = |A_C / A|$  – нормированная величина амплитуды  $A_C$  сигнала  $X(t)$ ;
- время переключения РЭ и АМ равно нулю.

Звенья  $\Sigma$ , И, РЭ в совокупности образуют автоколебательную систему с собственной частотой выходных импульсов  $f_{0|(\bar{X}_{BX} + \alpha_C)=0} = (4\bar{b}T_{II})^{-1}$ , играющих функцию сигнала несущей частоты для АМ ( $\bar{b} = |b / A| < 1,0$  – нормированная величина порогов переключения РЭ). Амплитуда сигнала развертки  $Y_{II}(t)$  (рис. 1в) ограничена величиной порогов переключения РЭ, а темп его нарастания определяется параметрами  $A$ ,  $T_{II}$ , амплитудой входного воздействия  $X_{BX} + X(t)$  и частотой сигнала  $X(t)$  (рис. 1б). Смена знака импульсов  $Y_A(t)$  с выхода АМ происходит синхронно с моментами времени переключения РЭ (рис. 1в, г). При этом на вход И подается либо сумма сигналов  $Y_A(t) + Y_P(t)$  (АМС) (рис. 1б–г), либо их разность (АМП), в результате чего частота автоколебаний ПНЧ изменяется пропорционально величине входного сигнала.

Динамические режимы работы ПНЧ при наличии сигнала  $X(t)$  описываются системой трансцендентных уравнений в рекуррентной форме:

$$t_n = \frac{T_0 \left[ 0,5 \mp \frac{\alpha_C}{\pi F} \sin \left( \pi F \frac{t_n + 2 \sum_{i=0}^{i=n-1} t_i}{0,5 T_0} \right) \sin \left( \pi F \frac{t_n}{0,5 T_0} \right) \right]}{1 \pm \bar{X}_{BX}};$$

$$f_0[nT] = (t_n + t_{n+1})^{-1};$$

$$\Delta f[nT] = 1 - \frac{f_0[nT]}{f_{0|\alpha_C=0}}; t_0 = 0; n = 1, 2, 3...$$

где, кроме ранее принятых, введены обозначения:  $F = 4\bar{b}T_{\Pi} / T_C = T_0 / T_C$  – нормированная частота сигнала  $X(t)$ ;  $\Delta f[nT]$  – нормированная динамическая ошибка частоты  $f_0[nT]$  выходных импульсов ПНЧ на  $n$ -ом интервале дискретизации  $T_{0,n}$  (рис.1 в), обусловленная составляющей  $X(t)$  входного сигнала;  $t_n, t_{n+1}$  – интервалы разворачивающего преобразования. В приведенных уравнениях верхний знак при  $\bar{X}_{\text{вх}}$  и  $\alpha_c$  соответствует работе ПНЧ в режиме АМС.

На рис. 2 и 3 представлены пространства динамического состояния ПНЧ  $\Delta f = f(F, \bar{X}_{\text{вх}}, \alpha_c = 0, 1)$  на первом интервале дискретизации импульсов  $Y_p(t)$  и их проекции на плоскость переменных  $(F, \bar{X}_{\text{вх}})$  для АМС (рис. 2) и АМП (рис. 3), анализ которых позволяет сделать следующие выводы.

Частотная область «F» ПНЧ, как и любой другой импульсной системы [4], делится на область достоверной передачи информации (ОДП) и область частот замедленной дискретизации (ОЗД), где дискретные выборки из динамической составляющей входного сигнала берутся медленнее, чем это необходимо для последующего достоверного восстановления тех процессов, которые происходят в контролируемой цепи. В результате режима замедленной дискретизации высокочастотный сигнал помехи преобразуется в низкочастотный, который зачастую не поддается фильтрации вследствие его расположения в полосе рабочих частот системы управления.

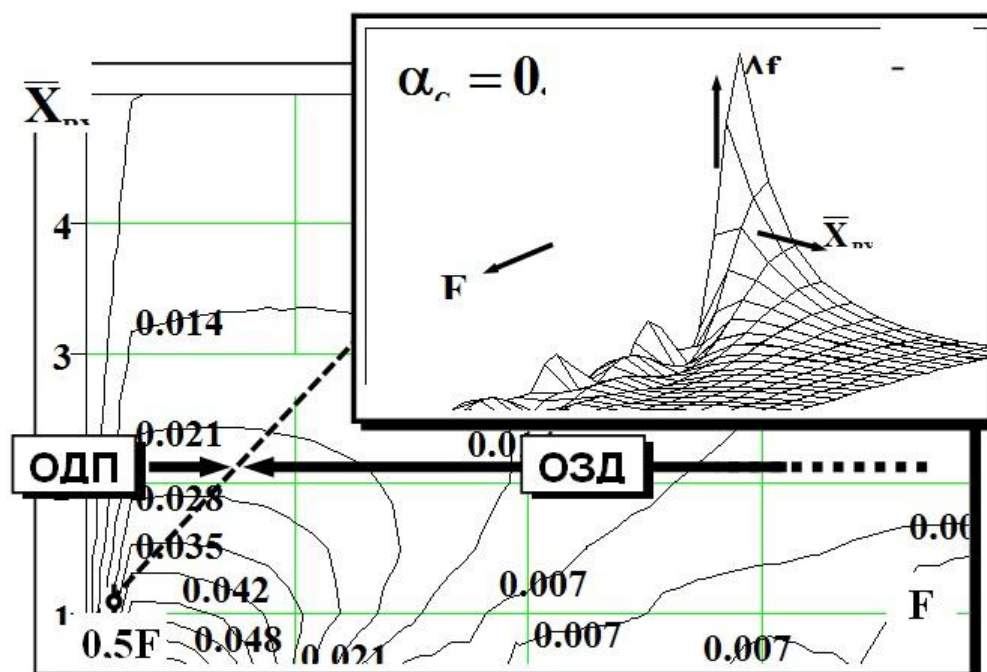


Рис. 2. Пространство динамического состояния  $\Delta f = f(F, \bar{X}_{\text{вх}}, \alpha_c = 0, 1)$  и его проекция на плоскость переменных  $(F, \bar{X}_{\text{вх}})$  для ПНЧ с синфазной амплитудной модуляцией

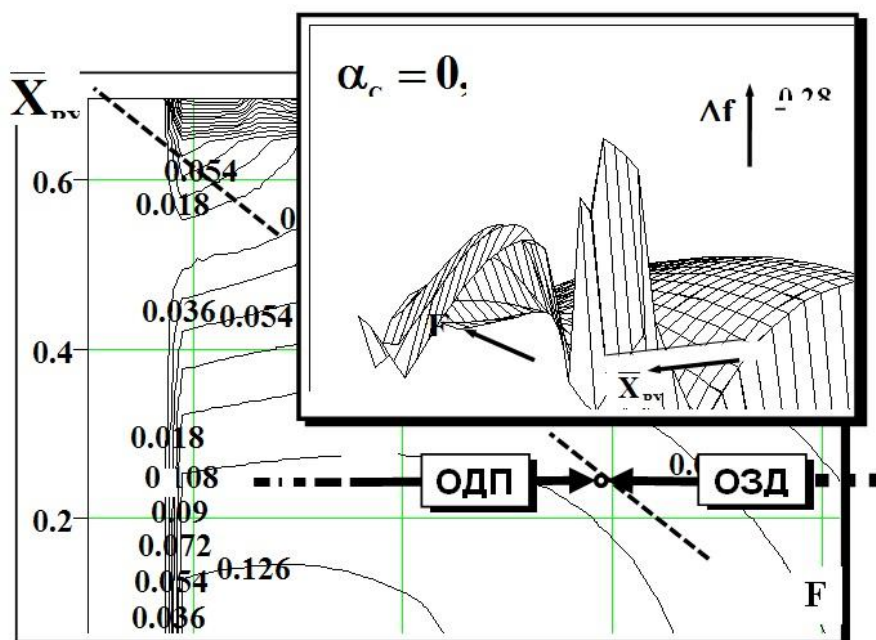


Рис. 3. Пространство динамического состояния  $\Delta f = f(F, \bar{X}_{BX}, \alpha_C = 0,1)$  и его проекция на плоскость переменных  $(F, \bar{X}_{BX})$  для ПНЧ с противофазной амплитудной модуляцией

В области «малых» входных сигналов граница раздела ОДП и ОЗД лежит в окрестностях с координатой  $F=0,5$  независимо от вида амплитудной модуляции, реализуемой в ПНЧ, так как частота его несущих автоколебаний практически соответствует начальному значению при  $\bar{X}_{BX} = \alpha_C = 0$ . При АМС (рис. 2) с ростом  $\bar{X}_{BX}$  динамическая ошибка  $\Delta f$  уменьшается при одновременном смещении вправо границы раздела ОДП и ОЗД, что является результатом повышения частоты автоколебаний ПНЧ и снижения соотношения  $X(t)/X_{BX}$ , когда за интервал дискретизации импульсов  $Y_p(t)$  интегральная величина от  $X(t)$  за период автоколебаний падает. В ОЗД наибольший уровень  $\Delta f$  (порядка 1 %) наблюдается в зоне  $\bar{X}_{BX} < 2,0$ , который затем с ростом  $\bar{X}_{BX}$  уменьшается до пренебрежимо малой величины.

Для АМП (рис. 3) характерным является смещение влево по оси  $F$  границы раздела ОДП и ОЗД из-за уменьшения частоты несущих колебаний ПНЧ по мере увеличения  $X_{BX}$ . С ростом  $X_{BX}$  ошибка  $\Delta f$  вначале падает, достигая нулевого значения при  $\bar{X}_{BX} \approx 0,5$ , затем резко возрастает до уровня, исчисляемого десятками процентов. Режим, при котором наступает  $\Delta f = 0$ , является следствием того, что при определенном соотношении  $\bar{X}_{BX}$ ,  $\alpha_C$  и  $F$  ошибки преобразования на интервалах  $t_n, t_{n+1}$  (рис. 1в), вызванные сигналом  $X(t)$ , имеют разные знаки и взаимно компенсируются за период автоколебаний  $T_{0,n}$ . Резкий рост  $\Delta f$  в области «больших» для АМП

сигналов происходит по причине увеличения соотношения  $X(t)/(A - X_{BX})$ , когда чувствительность ПНЧ к динамической составляющей входного сигнала существенно повышается. К числу неблагоприятных для АМП факторов следует отнести более высокий, чем при АМС (примерно в 1,5–2,5 раза), уровень ошибок ПНЧ в ОЗД. Здесь также следует учитывать тот фактор, что при АМП с ростом  $\alpha$  вероятность того, что сигнал  $X(t)$  окажется в ОЗД гораздо выше по сравнению с АМС из-за уменьшения частоты несущих автоколебаний ПНЧ.

Таким образом, АМС обеспечивает более низкую погрешность при работе с высокочастотными сигналами и является наиболее приемлемым видом модуляции в интегрирующих развертывающих ПНЧ, предназначенных для систем управления с высоким уровнем помех в линиях связи

### Температурная стабильность характеристик ПНЧ

Структура на рис. 1а представляет также значительный интерес с позиций температурной стабильности характеристик ПНЧ.

Рассмотрим работу ПНЧ с учетом сигнала  $\pm \Delta e$  дрейфа «нуля» АМ или интегратора И. Считаем, что сигнал  $\Delta e$  имеет положительный знак (рис. 4в) и независимо от причин его возникновения, прикладывается к входу сумматора  $\Sigma$  (рис. 1а).

Тогда в интервале времени  $t_1 = 2\bar{b}T_{II} / (1 + \bar{X}_{BX} + \Delta e)$  (рис. 4г) скорость изменения развертки  $Y_{II}(t)$  будет определяться суммой сигналов  $Y_A(t) + Y(t) + \Delta e$ , а в интервале времени  $t_2 = 2\bar{b}T_{II} / (1 + \bar{X}_{BX} - \Delta e)$  – зависеть от разности воздействий  $-Y_A(t) - Y(t) + \Delta e$  (рис. 4а–в).

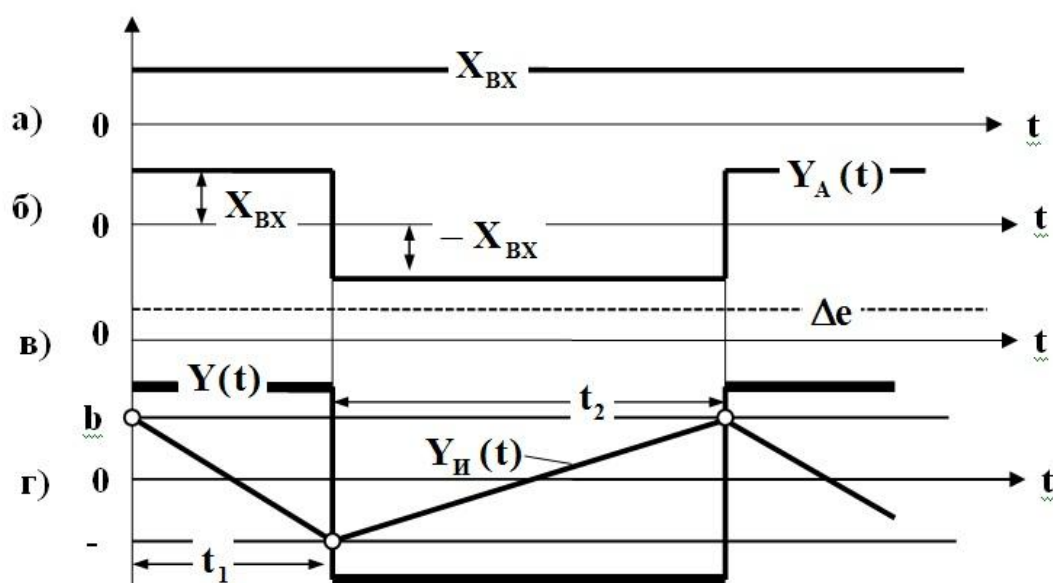


Рис. 4. Временные диаграммы сигналов интегрирующего ПНЧ с синфазной амплитудной модуляцией с учетом влияния сигнала дрейфа «нуля» интегратора (амплитудного модулятора)

В результате, частота автоколебаний ПНЧ уменьшается по сравнению с требуемым значением, причем независимо от знака сигнала  $\Delta e$ :

$$f_0^* = (t_1 + t_2)^{-1} = \frac{1 + \bar{X}_{BX}}{4\bar{b}T_{II}} \left[ 1 - \frac{\Delta \bar{e}^2}{(1 + \bar{X}_{BX})^2} \right].$$

Относительная ошибка преобразования ПНЧ:

$$\Delta \bar{f} = 1 - \frac{f_0^*}{f_0} = \frac{\Delta \bar{e}^2}{(1 + \bar{X}_{BX})^2},$$

определяется квадратичными значениями сигнала дрейфа «нуля» интегратора (амплитудного модулятора) и входного воздействия  $X_{BX}$ . Учитывая, что  $\Delta \bar{e} \ll 1,0$ , нетрудно убедиться в том, что температурная и временная стабильность ПНЧ по схеме на рис. 1а значительно превосходит стабильность характеристик известных преобразователей, где  $\Delta \bar{f} \equiv \Delta \bar{e}$  [1, 2].

#### Библиографический список

1. Прянишников, В.А. Интегрирующие цифровые вольтметры постоянного тока / В.А. Прянишников. – Л.: Энергия, 1976. – 315 с.
2. Мартяшин, А.И. Преобразователи электрических параметров для систем контроля и измерения / А.И. Мартяшин, Э.К. Шахов, В.М. Шлядин. – М.: Энергия, 1967. – 390 с.
3. А.с. 1798870 СССР, H02M1/08. Устройство для управления тиристорным преобразователем / Цытович Л.И., Маурер В.Г., Гафиятуллин Р.Х. и др.(СССР). – № 4801048/07; Заявлено 30.01.90; Оpubл. 28.02.93, Бюл. № 8.
4. Хьюлсман, Л.П. Активные фильтры / Л.П. Хьюлсман. – М.: Мир, 1972. – 516 с.

[К содержанию](#)