

В. Д. Рудик, к. т. н., доц.; С. Ф. Гончар

КОМПЕНСАТОР НЕСТАЦИОНАРНЫХ ВРЕМЕННЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ

Рассмотрены вопросы подхода к определению нестационарных временных погрешностей, исследована природа их возникновения, проведен анализ погрешностей аналитическим методом с использованием моделей измерительных каналов. Приведены математические соотношения, которые могут использоваться для определения указанных погрешностей, а также графики, которые наглядно демонстрируют зависимость таких погрешностей от разных значений параметров канала и сигнала. Рассмотрен алгоритм обработки сигналов с целью компенсации нестационарной временной погрешности в широкополосных измерительных каналах и реализация этого алгоритма в аппаратном виде.

Ключевые слова: нестационарная временная погрешность (НВП), широкополосный измерительный канал, компенсатор НВП, алгоритм работы компенсатора НВП, структура компенсатора НВП.

Введение

Проблема улучшения динамических свойств измерительных каналов приобретает особое значение при измерениях параметров кратковременных сигналов, при исследовании нестационарных процессов, при быстром изменении исследуемой величины. Оценка динамических свойств измерительных каналов может быть произведена на основе исследования их АЧХ, ФЧХ или переходных характеристик при входном воздействии ступенчатого или гармонического сигналов, а также путем определения мгновенной разности значения входного сигнала, рассчитанного по выходному сигналу измерительного канала, значению номинальной статической характеристики канала и мгновенного значения входного сигнала в данный момент времени [1]. Но такое исследование не дает возможности оценить динамические погрешности при измерении фазовых сдвигов, временных интервалов или группового времени задержки, которые основаны на определении временных сдвигов характерных точек сигнала, которые соответствуют его нулевым, максимальным или минимальным значениям, и разработать на основе такого исследования устройства улучшения динамических свойств таких измерительных каналов.

Целью работы является разработка методов и средств компенсации нестационарной временной погрешности измерительных каналов для улучшения их динамических свойств.

1. Определение нестационарной временной погрешности

Для оценки динамических свойств отмеченных измерительных каналов целесообразным является исследование реакции измерительного канала на единичное гармоничное включение с последующим определением смещения временного положения характерных точек сигнала, в дальнейшем – абсолютной нестационарной временной погрешности (АНВП) [2].

Временное положение $t_{\text{вых}}$ характерных точек сигнала на выходе измерительного канала при воздействии гармоничного включения определяется как сумма следующих составляющих:

$$t_{\text{вых}} = t_{\text{ex}} + \Delta t_{\text{cm}} + \Delta t_{\text{nc}}, \quad (1)$$

где t_{ex} – временное положение характерных точек входного сигнала; Δt_{cm} – стационарная составляющая временного сдвига, которая вносится измерительным каналом в стационарном

режиме; Δt_{nc} – АНВП.

Нормированная к периоду нестационарная временная погрешность (ННВП) будет определяться из выражения:

$$\gamma = \frac{\Delta t_{nc}}{T_0}, \quad (2)$$

где T_0 – период сигнала гармонического включения.

АНВП определяется на основе анализа аргумента комплексной функции $\dot{U}_{вых}(t)$ отклика измерительного канала на входное единичное гармоничное воздействие, изображение которой находится из выражения:

$$U_{вых}(p) = K(p) \cdot U_{вх}(p), \quad (3)$$

где $K(p)$ – изображение передаточной характеристики соответствующего измерительного канала;

$U_{вх}(p) = U_m \cdot e^{j\varphi_0} / (p - j\omega_0)$ – изображение входного сигнала, U_m , ω_0 , φ_0 – соответственно амплитуда, частота и начальная фаза входного сигнала, p – оператор преобразования.

Для проведения необходимых исследований может быть использована модель широкополосного измерительного канала с передаточной характеристикой:

$$K(p) = \frac{K_0}{1 + \tau \cdot p},$$

где K_0 – коэффициент передачи канала при $\omega = 0$;

τ – постоянная времени канала.

После подстановки выражения для $U_{вх}(p)$ в соотношение (3) получим:

$$U_{вых}(p) = \frac{U_m \cdot e^{j\varphi_0} \cdot K(p)}{(p - j\omega_0)}. \quad (4)$$

Используя теорему разложения и учитывая соотношение $\Delta t = \frac{\Delta\varphi}{\omega_0}$, из (4) получим выражение АНВП для указанного случая:

$$\Delta t_{nc} = \frac{1}{\omega_0} \left\{ \arctg \left[\frac{B - A + C}{E - D} \right] - \omega_0 t - \varphi_0 + \arctg[\omega_0 \tau] \right\}, \quad (5)$$

где A, B, C, D, E – коэффициенты, которые равняются:

$$A = \omega_0 \tau \cos(\omega_0 t + \varphi_0);$$

$$B = \sin(\omega_0 t + \varphi_0);$$

$$C = e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot (\omega_0 \tau \cos \varphi_0 - \sin \varphi_0);$$

$$D = e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot (\cos \varphi_0 + \omega_0 \tau \sin \varphi_0);$$

$$E = \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + \omega_0 \tau \sin(\omega_0 t + \varphi_0).$$

Анализ зависимости ННВП от времени показывает (рис. 1), что ННВП в момент времени $t = 0$ составляет $\gamma_{t1}^0 = \frac{\Delta t_{nc1}^0}{T_0} = 0,125$, в $t = T_0/4$ составляет $\gamma_{t1}^{ext} = \frac{\Delta t_{nc1}^{ext}}{T_0} = 0,034$, а в момент

времени $t = T_0/2$ составляет $\gamma_{t2}^0 = \frac{\Delta t_{nc2}^0}{T_0} = 0,018$ при начальной фазе входного сигнала $\varphi_0 = 0$, где Δt_{nc1}^0 , Δt_{nc2}^0 , Δt_{nc1}^{ext} – АНВП соответственно в 1-й, 2-й точках пересечения нулевого уровня входного сигнала и в 1-й точке экстремума, рис. 1(х).

Исследование проведено для случая $\frac{f_s}{f_0} = 1$, где f_0 – частота входного сигнала, $f_s = \frac{1}{2\pi\tau}$ – верхняя частота полосы пропускания канала (частота среза).

При росте t ННВП изменяется по затухающему колебательному закону. Погрешность достигает максимума в точках с нулевым значением мгновенной амплитуды входного сигнала, то есть точках нуль-переходов и нулевых значений в точках близких к экстремальным значениям сигнала, и зависит от начальной фазы входного сигнала. Полученная зависимость позволяет определить временное положение точек сигнала, где ННВП достигает допустимых значений.

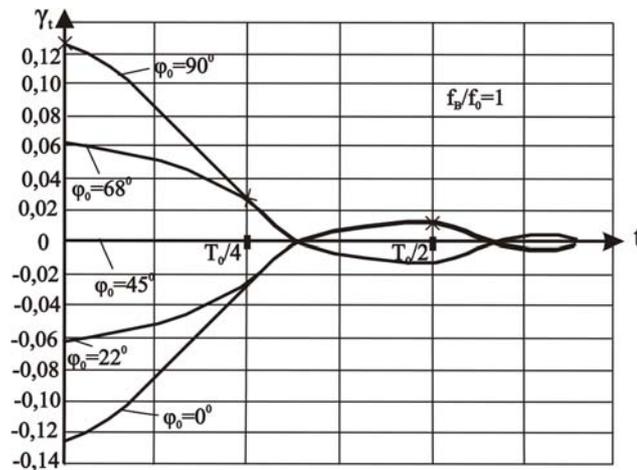


Рис. 1. Зависимость ННВП от времени для широкополосного измерительного канала

2. Компенсатор нестационарной временной погрешности

Компенсация отмеченной погрешности может быть осуществлена введением в измерительный канал компенсирующего звена, которое реализует обратный оператор измерительного канала $K^{-1}(p)$ в аппаратном или программном виде. При $K_0 = 1$ такая передаточная функция в случае широкополосного измерительного канала будет иметь вид:

$$K^{-1}(p) = 1 + p \cdot \tau,$$

что отвечает дифференциальному уравнению:

$$\tau \frac{dU_{вых}(t)}{dt} + U_{вых}(t) = U(t).$$

Для реализации компенсатора нестационарной временной погрешности (ННВП) широкополосного измерительного канала в аппаратном виде применяется устройство, изображенное на рис. 2 [3].

Узлы компенсатора могут быть как аналоговыми, так и цифровыми, в зависимости от вида сигналов $U_{вых}(t)$ и $U(t)$.

Подставив в выражение (4) передаточную функцию измерительного канала с компенсатором

$$K(p) = \frac{K_{01}}{1 + \tau_1 \cdot p} \cdot \frac{1 + \tau_2 \cdot p}{K_{02}},$$

где K_{01} , τ_1 – коэффициент передачи и постоянная времени измерительного канала;

K_{02} , τ_2 – коэффициент передачи и постоянная времени компенсатора,

получим выражение АНЧП для измерительного канала с компенсатором:

$$\Delta t_{нсК} = \frac{1}{\omega_0} \left\{ \arctg \left[\frac{D_K + E_K - F_K}{A_K - B_K - C_K} \right] - \omega_0 t - \varphi_0 - \arctg \left[\frac{\omega_0 (\tau_2 - \tau_1)}{1 + \omega_0^2 \tau_1 \tau_2} \right] \right\}, \quad (6)$$

где $A_K, B_K, C_K, D_K, E_K, F_K$ – коэффициенты, которые равняются:

$$A_K = (1 + \omega_0^2 \tau_1 \tau_2) \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0);$$

$$B_K = \omega_0 (\tau_2 - \tau_1) \cdot \sin(\omega_0 t + \varphi_0);$$

$$C_K = e^{-\frac{t}{\tau_1}} \cdot \left(1 - \frac{\tau_2}{\tau_1} \right) \cdot (\cos \varphi_0 + \omega_0 \tau_1 \sin \varphi_0);$$

$$D_K = (1 + \omega_0^2 \tau_1 \tau_2) \cdot \sin(\omega_0 t + \varphi_0);$$

$$E_K = \omega_0 (\tau_2 - \tau_1) \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0);$$

$$F_K = e^{-\frac{t}{\tau_1}} \cdot \left(1 - \frac{\tau_2}{\tau_1} \right) \cdot (\sin \varphi_0 - \omega_0 \tau_1 \cos \varphi_0).$$

где $\Delta t_{нсК}$ определяется из выражения (6).

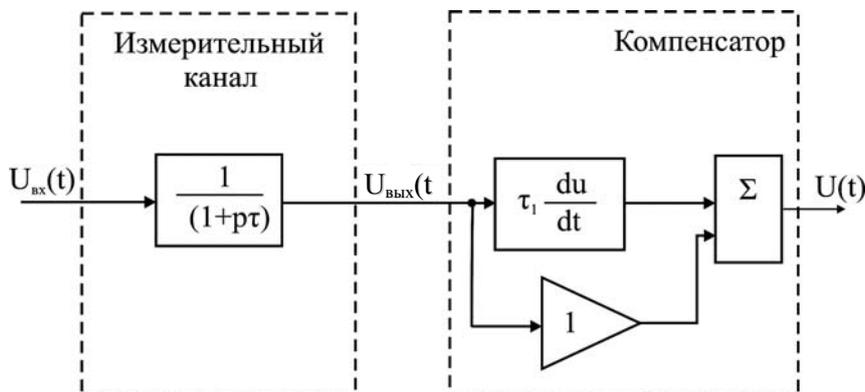


Рис. 2. Структура компенсатора НВП

Анализ зависимости ННВП измерительного канала с компенсатором от соотношения значений постоянных времени измерительного канала τ_1 и компенсатора τ_2 , рис. 3, показывает, что ННЧП не зависит от значений коэффициентов передачи. При $\frac{\tau_2}{\tau_1} = 1$ погрешность равняется нулю.

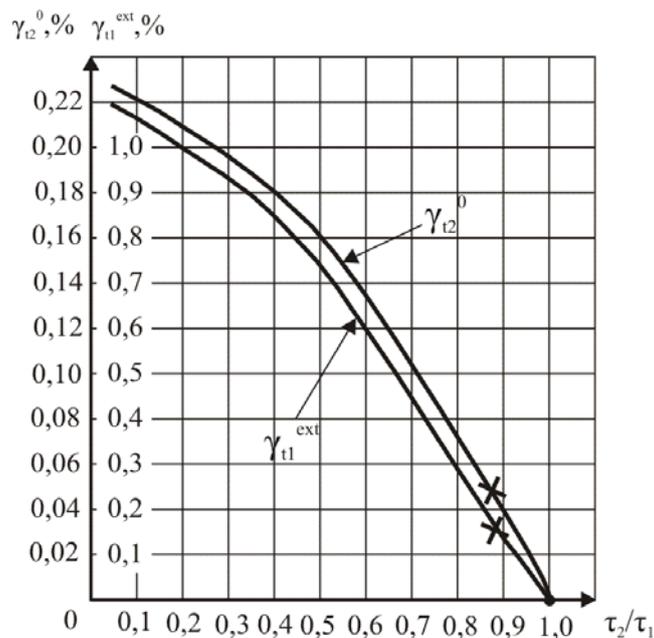


Рис. 3. Зависимость НВП от соотношения постоянных времени измерительного канала и компенсатора

3. Результаты экспериментальных исследований

На рис. 4 приведена общая структурная схема установки для экспериментальных исследований АНВП в измерительном канале с компенсатором погрешности.

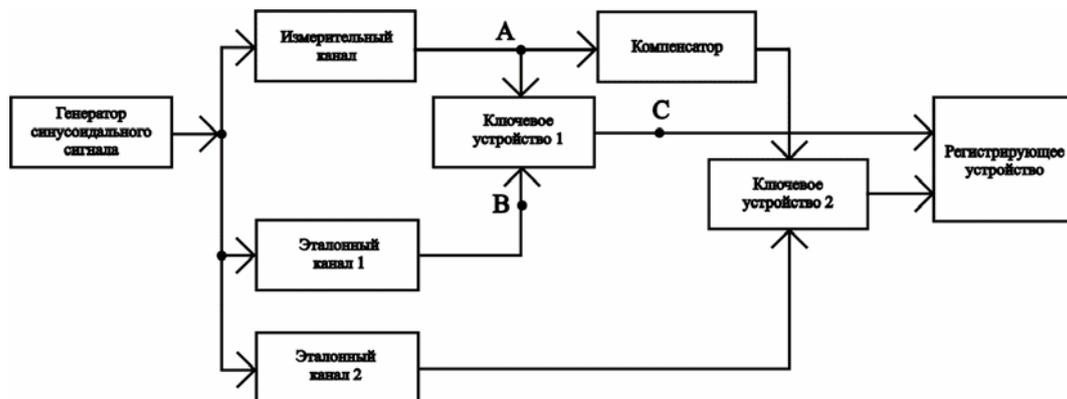


Рис. 4. Установка для исследования действия компенсатора НВП

Такая установка состоит из генератора синусоидального сигнала; двух образцовых каналов, компенсатора, двух ключевых устройств, которые формируют прямоугольные импульсы в моменты перехода сигналов через нулевые или экстремальные значения; регистрирующего устройства, которым может быть двулучевой осциллограф.

Временной сдвиг между сигналами определяется путем фиксации точек перехода исходных сигналов каналов через установленные уровни. На рис. 5 показаны осциллограммы сигналов на входах (точки А, В) первого ключевого устройства. На выходе ключевого устройства (точка С) сигнал будет в виде последовательности импульсов, (рис. 6).

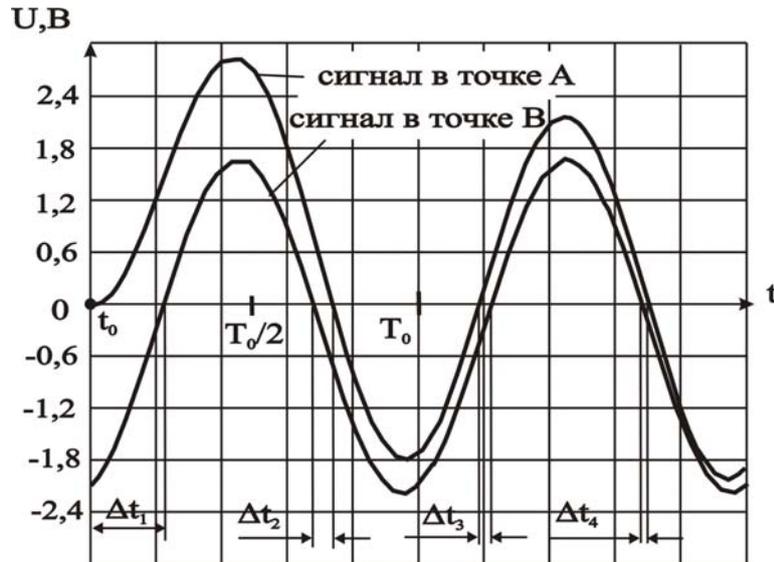


Рис. 5. Осциллограммы сигналов на входах ключевого устройства

Длительность сформированных импульсов отвечает АНВП сигнала, который прошел через исследуемый измерительный канал, относительно опорного непрерывного сигнала в точках пересечения сигнала нулевого уровня и в точках пересечения сигнала экстремальных значений.

Аналогичным образом формируются сигналы на входах и выходе второго ключевого устройства. В этом случае длительность сформированных импульсов отвечает абсолютным значением НВП сигнала, который прошел через исследуемый измерительный канал с компенсатором.

В качестве измерительного канала было исследовано усилительное устройство с частотой среза $f_e = 1$ МГц, который является элементом активной матрицы с m -входов и n -выходов.

Исследование проведено для случая $\frac{f_e}{f_0} = 1$ с начальной фазой $\varphi_0 = 0$.

Анализ длительности импульсов на выходе ключевого устройства (рис. 6) показывает, что применение компенсатора позволяет уменьшить влияние нестационарной временной погрешности. Выигрыш при этом для погрешности $\gamma_{i1}^0 = \frac{\Delta t_{nc1}^0}{T_0}$ составляет 3,5 раза, для

погрешности $\gamma_{i1}^{ext} = \frac{\Delta t_{nc1}^{ext}}{T_0} - 22,6$ раз, а для погрешности $\gamma_{i2}^0 = \frac{\Delta t_{nc2}^0}{T_0} - 36$ раз при частоте входного сигнала $f_0 = 1$ МГц и начальной фазе $\varphi_0 = 0$.

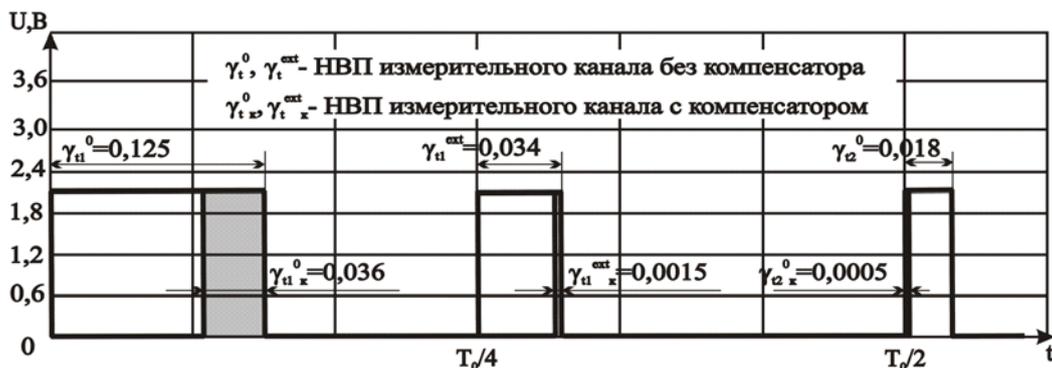


Рис. 6. Результаты экспериментальных исследований

Сравнительный анализ прогноза действия компенсатора в измерительном канале (рис. 4) с результатами экспериментальных исследований (рис. 6) показывает практическое совпадение результатов прогноза и эксперимента. Влияние паразитных емкостей, отклонение характеристик активных элементов и разброс параметров пассивных элементов измерительного канала и компенсатора приводит к несовпадению постоянных времени τ_1 и τ_2 . В рассмотренном случае отношение $\frac{\tau_2}{\tau_1}$ равняется 0,87 (рис. 3(х)). Более тщательный подбор элементов и настройка позволят улучшить полученные результаты.

Выводы

Нормируемая нестационарная временная погрешность в момент времени $t = 0$ составляет $\gamma_{t1}^0 = 0,125$, в $t = T_0/4$ составляет $\gamma_{t1}^{ext} = 0,034$, а в момент времени $t = T_0/2$ составляет $\gamma_{t2}^0 = 0,018$ при начальной фазе входного сигнала $\varphi_0 = 0$.

Применение компенсатора НВП позволяет уменьшить нестационарную временную погрешность и тем самым улучшить динамические свойства измерительного канала. Выигрыш при этом для погрешности γ_{t1}^0 составляет 3,5 раза, для погрешности γ_{t1}^{ext} составляет 22,6 раз, для погрешности γ_{t2}^0 составляет 36 раз при частоте входного сигнала $f_0 = 1$ МГц и начальной фазе сигнала $\varphi_0 = 0$.

Более тщательный подбор элементов компенсатора и настройка позволят улучшить полученные результаты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Орнатский П.П. Автоматические измерения и приборы. – Киев.: Вища школа, 1980. – 560 с.
2. Рудик В.Д., Гончар С.Ф. Нестационарні похибки вимірювачів часових зсувів // Вісник ВПІ. – 2005. – № 5. – С. 143 – 148.
3. Фазометр: Деклараційний патент на корисну модель № 17394. Україна, G 01 R 25/00 / В.Д. Рудик, С.Ф. Гончар. – Бюл. № 9, 15.09.2006.

Рудик Вадим Данилович – доцент кафедры радиотехники;

Гончар Сергей Феодосьевич – соискатель кафедры телекоммуникационных систем и телевидения.
Винницкий национальный технический университет