

Буславский В.Т., Леншин А.В.
 ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»
 г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а
 andrey-lenshin@yandex.ru

Использование ФНЧ 4-го порядка в каналах компенсации паразитной угловой модуляции выходного сигнала синтезатора частот

Анализ вооруженных конфликтов и специальных военных операций последнего десятилетия показывает, что для успешного ведения современных боевых действий в сложных и непрерывно изменяющихся условиях необходим надежный высокоскоростной информационный обмен. Современные бортовые комплексы средств связи используют цифровые способы модуляции и многочастотные сигнально-кодовые конструкции, что накладывает достаточно жесткие требования к фазовым искажениям выходного сигнала синтезаторов частот, используемых в качестве возбудителей радиопередающих устройств и гетеродинов радиоприемных устройств [1].

Применение ФНЧ Чебышева 1-рода и Баттерворта в каналах компенсации паразитной угловой модуляции (ПУМ) синтезаторов частот (СЧ) способствует эффективному подавлению паразитных шумовых составляющих в выходном сигнале СЧ [2]. С целью улучшения динамических и спектральных характеристик выходного сигнала СЧ с широкополосным автокомпенсатором ПУМ следует рассмотреть использование ФНЧ 4-го порядка (Баттерворта или Чебышева 1-го рода) с передаточной функцией

$$H_{\text{ФНЧ-4}}(p) = \frac{h}{(T^2 p^2 + ATp + B)(T^2 p^2 + CTp + D)}, \quad (1)$$

где $h=1$, $A=0,7653$, $B=1$, $C=1,8477$, $D=1$ – ФНЧ Баттерворта; $h=0,125$, $A=0,1703$, $B=0,9031$, $C=0,4112$, $D=0,1959$ – ФНЧ Чебышева 1-го рода (показатель пульсаций $\varepsilon=1$).

Характеристическое уравнение при использовании ФНЧ 4-го порядка имеет вид

$$a_0 p^5 + a_1 p^4 + a_2 p^3 + a_3 p^2 + a_4 p + a_5 = 0, \quad (2)$$

где $a_0 = T_B T^4$; $a_1 = (C + A)T_B T^3 + T^4$; $a_2 = (AC + B + D)T_B T^2 + (C + A)T^3$; $a_3 = BD + K_{\text{PO}}h$; $a_4 = (AD + BC)T_B T + (AC + B + D)T^2$; $a_5 = (BD + K_{\text{PO}}h)T_B + (AD + BC)T$; T_B – постоянная времени ФВЧ; K_{PO} – коэффициент регулировки по возмущению [2].

Согласно критерию устойчивости Гурвица для уравнения пятого порядка [3], кроме положительности всех коэффициентов характеристического уравнения, т.е.

$$T_B T^4 > 0, \quad [(C + A)T_B T^3 + T^4] > 0, \quad [(AC + B + D)T_B T^2 + (C + A)T^3] > 0, \\ [(AD + BC)T_B T + (AC + B + D)T^2] > 0, \quad [(BD + K_{\text{PO}}h)T_B + (AD + BC)T] > 0, \quad [BD + K_{\text{PO}}h] > 0,$$

требуется выполнение еще двух условий

$$\begin{cases} a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0, \\ (a_1 a_2 - a_0 a_3)(a_3 a_4 - a_2 a_5) - (a_1 a_4 - a_0 a_5)^2 > 0. \end{cases} \quad (3)$$

При использовании ФНЧ 4-го порядка Баттерворта: $a_{0_Б} = T_B T^4$; $a_{1_Б} = 2,613 \cdot T_B T^3 + T^4$; $a_{2_Б} = 3,414 \cdot T_B T^2 + 2,613 \cdot T^3$; $a_{3_Б} = 2,613 \cdot T_B T + 3,414 \cdot T^2$; $a_{4_Б} = (1 + K_{\text{PO}})T_B + 2,613 \cdot T$; $a_{5_Б} = 1 + K_{\text{PO}}$. В случае ФНЧ 4-го порядка Чебышева: $a_{0_Ч} = T_B T^4$; $a_{1_Ч} = 0,582 \cdot T_B T^3 + T^4$; $a_{2_Ч} = 1,169 \cdot T_B T^2 + 0,582 \cdot T^3$; $a_{3_Ч} = 0,405 \cdot T_B T + 1,169 \cdot T^2$; $a_{4_Ч} = 0,177 + 0,125 \cdot K_{\text{PO}}$; $a_{5_Ч} = (0,177 + 0,125 \cdot K_{\text{PO}})T_B + 0,405 \cdot T$.

Проанализируем случай $T_B = T$. Коэффициенты характеристического уравнения будут следующие: 1) для ФНЧ 4-го порядка Баттерворта: $a_{0_Б} = T^5$; $a_{1_Б} = 3,613 \cdot T^4$; $a_{2_Б} = 6,027 \cdot T^3$; $a_{3_Б} = 6,027 \cdot T^2$; $a_{4_Б} = (3,613 + K_{\text{PO}}) \cdot T$; $a_{5_Б} = 1 + K_{\text{PO}}$; 2) для ФНЧ 4-го порядка Чебышева:

$a_{0_ч} = T^5$; $a_{1_ч} = 1,582 \cdot T^4$; $a_{2_ч} = 1,751 \cdot T^3$; $a_{3_ч} = 1,574 \cdot T^2$; $a_{4_ч} = (0,582 + 0,125 \cdot K_{PO}) \cdot T$; $a_{5_ч} = 0,177 + 0,125 \cdot K_{PO}$. Условие устойчивости для ФНЧ Баттерворта 4-го порядка имеет вид

$$\begin{cases} 15,749 \cdot T^7 > 0, \\ T^{10} \cdot (102,732 - 62,994 \cdot K_{PO} - 6,828 \cdot K_{PO}^2) > 0. \end{cases} \quad (4)$$

В случае использования ФНЧ Чебышева 4-го порядка условие устойчивости имеет вид

$$\begin{cases} 1,196 \cdot T^7 > 0, \\ T^{10} \cdot (0,171 - 0,135 \cdot K_{PO} - 0,005 \cdot K_{PO}^2) > 0. \end{cases} \quad (5)$$

Анализ выражения (5) приводит к заключению, что применение ФНЧ 4-го порядка наталкивается на достаточно жесткие ограничения коэффициента регулирования по отклонению K_{PO} : $K_{PO} < 1,39$ – для ФНЧ Баттерворта; $K_{PO} < 1,25$ – для ФНЧ Чебышева 1 рода. На рисунке 1 представлена схема реализации ФНЧ 4-го порядка из двух звеньев (с положительной обратной связью), используемых при реализации функций 2-го порядка.

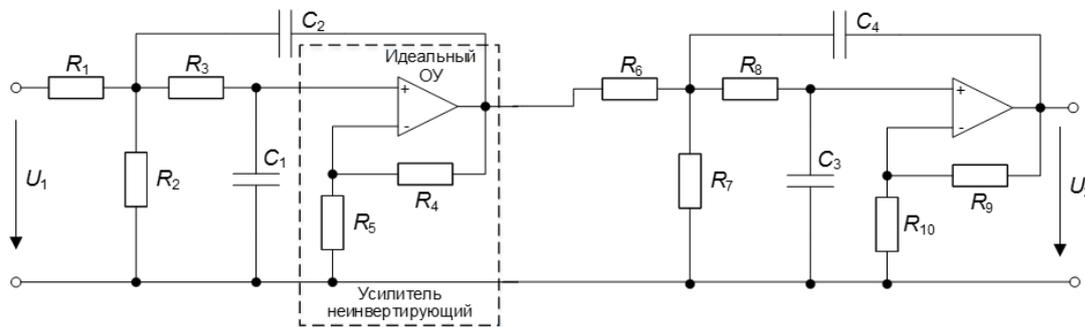


Рисунок 1 – Реализация ФНЧ 4-го порядка

Передаточная функция 1-го звена имеет вид

$$H_1(p) = \frac{R_2^2 R_5 + R_1^2 R_5 + R_2^2 R_4 + R_1^2 R_4 + 2R_1 R_2 R_5 + 2R_1 R_2 R_4}{R_1^2 R_2 R_3 R_5 C_1 C_2} \cdot \frac{1}{p^2 + \left[\frac{2R_2 R_3 R_5 C_1 + R_1 R_3 R_5 C_1 - R_1 R_2 R_4 C_2}{R_1 R_2 R_3 R_5 C_1 C_2} \right] p + \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 R_5 C_1 C_2}}. \quad (6)$$

В работе проанализированы возможности использования ФНЧ 4-го порядка в каналах компенсации ПУМ выходного сигнала СЧ. Определены условия устойчивости для ФНЧ Баттерворта и Чебышева 1-го рода, рассмотрен вариант реализации ФНЧ 4-го порядка из двух звеньев.

Литература

1. Бортовые радиоэлектронные системы. Основы построения: учебное пособие / А.В. Леньшин, Н.М. Тихомиров, С.А. Попов; под ред. А.В. Леньшина. – 2 изд., перераб. и доп. – Воронеж: «Научная книга», 2021. – 486 с.
2. Лебедев В.В., Мушин А.Д., Буславский В.Т. Функциональные модели и архитектуры каналов компенсации паразитной угловой модуляции цифровых синтезаторов частот // Радиолокация, навигация, связь: сборник трудов XXVIII Международной научно-технической конференции. Т. 2. / ВГУ; АО «Концерн «Созвездие». – Воронеж: Изд. дом ВГУ, 2022. – С. 307–318.
3. Бессекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. – 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Профессия, 2004. – 747 с.