ПОВЫШЕНИЕ ПОРЯДКА АСТАТИЗМА УСИЛИТЕЛЕЙ КЛАССА D С КОМБИНИРОВАННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Андреев А.И.
Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова, г. Одесса
Кафедра безопасности производственных процессов и электропитания систем связи
E-mail:aia2003@ukr.net

Abstract
Andreev A.I. The increase of boost the astatism of an of amplifiers class D with combined control. *The amplifiers of class D with pulse width modulation which work in the mode of tracing are analysed. The disrete trasfer functions of closed and combined systems are obtained. Application amplifiers with combined control allow the astatism order of an.*

Общая постановка проблемы.

Своим вторым рождением усилители класса D обязаны возросшему спросу на усилители с высоким КПД и последним достижениям в полупроводниковой технологии.

КПД усилителя класса АВ при усилении синусоидального сигнала составляет приблизительно 67%, а класса D (при тех же условиях) – 80%. Возникает вопрос об оправдоности повышенного интереса к классу D. Но если рассмотреть эти же усилители при работе с реальным звуковым сигналом, коэффициент амплитуды которого составляет 10…15 дБ, то ситуация меняется кардинальным образом. При этом условии КПД усилителя класса АВ падает до 30..45%, а КПД усилителя класса D поднимается до 90%[1].

Усилители класса D могут работать в режиме усиления аналоговых или цифровых сигналов (без их предварительного преобразования в аналоговые). Усиление аналоговых сигналов осуществляется с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Для усиления цифровых сигналов на входе нужно использовать преобразователь “цифра-цифра”. Входной цифровой сигнал преобразуется в последовательность одноразрядных сигналов импульсно-кодовой модуляции (ИКМ), которые подаются непосредственно на усилитель мощности.

На выходе усилителя класса D обычно включают фильтр нижних частот (ФНЧ), представляющий собой Г-образной LC – фильтр 2-го порядка, для защиты нагрузки от действия частот коммутации и высокочастотных помех. К сожалению, фильтр значительно увеличивает габариты и стоимость усилителя, поэтому производители борются за снижение габаритов компонентов фильтра. Так в усилителе TPA005D02 фирмы Texas Instruments применен фильтр Butterworth второго порядка, который позволяет сократить стоимость усилителя на 30% [2].

В усилителях третьего поколения TPA2001D2 применен оригинальный метод ШИМ, позволяющий использовать фильтр 1-го порядка, а, в ряде случаев, вообще отказаться от ФНЧ на выходе усилителя [3].

Постановка задачи исследований.

Помимо энергетических и стоимостных показателей важным направлением является улучшение качественных (точностных) показателей усилителей. В публикациях, посвященных этой тематике основное внимание уделяется схемотехническим решениям в классе замкнутых систем усилителей без использования методов автоматического управления, в частности, теории инвариантности. Более широким возможностями обладают усилители, использующие принцип комбинированного управления, т.е. сочетания принципа управления по отклонению и принципа управления по возмущению. В статье решаются вопросы повышения точности усилителей класса D в классе комбинированных систем с использованием метода расчета связи по задающему воздействию из условия повышения порядка астатизма.

Решение задачи и результаты.

Рассмотрим структурную схему замкнутой системы усилителя класса D, работающего в следящем режиме (рис. 1), где $\alpha(p)$ – задающее воздействие, $\Theta(p)$ – отклонение управляющей величины от требуемого значения, $\beta(p)$ – управляемая величина, $К_{ФЭ}(p)$, $К_{НЧ}(p)$ – передаточные функции формирующего элемента и непрерывной части с фильтром нижних частот 1-го порядка и интегратором соответственно; Σ_1 – элемент сравнения.

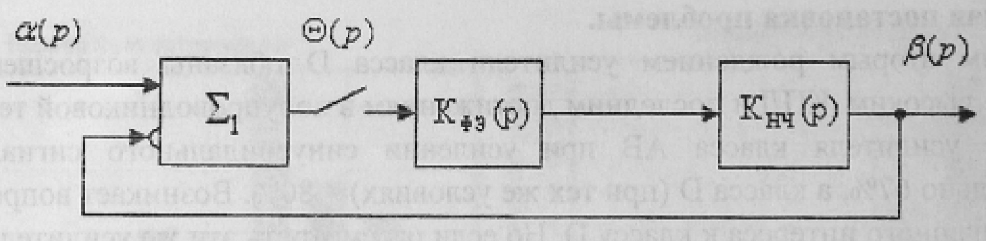

Рис. 1 - Структурная схема замкнутой следящей системы усилителя класса D

В соответствии с рис. 1. можно записать

$$\Theta(p) = \alpha(p) - \beta(p),$$

$$\beta(p) = К_{ФЭ}(p)К_{НЧ}(p)\Theta(p).$$

Передаточные функции звеньев следующие:

$$K_{ФЭ}(p) = k_и \frac{1 - e^{-\gamma T_0 p}}{p};$$

$$K_{НЧ}(p) = k_ф \frac{1}{p(T_ф p + 1)},$$

где T_0 – период повторения импульсов; $T_Ф$ – постоянная времени фильтра; γ – относительная длительность; $k_ф, k_Ф$ – коэффициенты усиления соответствующих звеньев; $p = d/dt$ – символ дифференцирования.

В качестве основных методов анализа и расчета дискретных систем применяются методы пространства состояний (во временной области), частотные (с билинейным преобразованием), алгебраические (z-преобразования) и их различные сочетания. Z – преобразование обеспечивает высокую точность представления объектов. С его помощью находят передаточные функции системы, проводят расчеты переходных процессов, исследуют условия устойчивости, выполняют математические и полунатурное моделирование [4].

Для удобства анализа системы формирующей элемент и непрерывную часть объединим в приведенную непрерывную часть (ПНЧ)

$$K_{ПНЧ}(p) = K_{ФЭ}(p)K_{НЧ}(p).$$

В этом случае импульсная передаточная функция ПНЧ (разомкнутой системы) принимает вид

$$K_{ПНЧ}(z,\varepsilon)=Z_\varepsilon\{K_{ПНЧ}(p)\}=Z_\varepsilon\{\frac{k_И(1-e^{-\gamma T_0 p})}{p}\frac{k_Ф}{p(T_Ф p+1)}\}=K_{ПНЧ1}(z,\varepsilon)-K_{ПНЧ1\gamma}(z,\varepsilon),$$

где $K_{ПНЧ1}(z,\varepsilon)=Z_\varepsilon\{\frac{k_И k_Ф}{p^2(T_Ф p+1)}\}$;

$$K_{ПНЧ1\gamma}(z,\varepsilon)=Z_\varepsilon\{\frac{k_И k_Ф}{p^2(T_Ф p+1)}e^{-\gamma T_0 p}\}.$$

Передаточную функцию $K_{ПНЧ1\gamma}(z,\varepsilon)$ можно выразить через передаточную функцию $K_{ПНЧ1}(z,\varepsilon)$, применив теорему смещения из теории Z-преобразования [5]. В результате получим

$$K_{ПНЧ1\gamma}(z,\varepsilon)=\begin{cases}z^{-1}K_{ПНЧ1}(z,1+\varepsilon-\gamma), \text{если } 0\le\varepsilon<\gamma;\\ K_{ПНЧ1}(z,\varepsilon-\gamma), \text{если } \gamma\le\varepsilon<1.\end{cases}$$

Тогда

$$K_{ПНЧ1}(z,\varepsilon)=k_И k_Ф[\frac{T_0 z}{(z-1)^2}+\frac{T_0\varepsilon z}{z-1}-\frac{T_Ф z}{z-1}+\frac{T_Ф z}{z-d}d^\varepsilon], \text{ где } d=e^{-\frac{T_0}{T_Ф}}.$$

$$K_{ПНЧ1\gamma}(z,\varepsilon)=k_И k_Ф z^{-1}[\frac{T_0 z}{(z-1)^2}+\frac{T_0(1+\varepsilon-\gamma)z}{z-1}-\frac{T_Ф z}{z-1}+\frac{T_Ф z}{z-d}d^{1+\varepsilon-\gamma}], \text{ если } 0\le\varepsilon<\gamma;$$

$$K_{ПНЧ1\gamma}(z,\varepsilon)=k_И k_Ф[\frac{T_0 z}{(z-1)^2}+\frac{T_0(\varepsilon-\gamma)z}{z-1}-\frac{T_Ф z}{z-1}+\frac{T_Ф z}{z-d}d^{\varepsilon-\gamma}], \text{ если } \gamma\le\varepsilon<1.$$

Вследствие невысокого порядка рассматриваемой системы вычисления не представляют принципиальных трудностей, но отличаются значительной громоздкостью. В этой связи получим выражения для $\varepsilon=0$

$$K_{ПНЧ1}(z)=k_И k_Ф[\frac{T_0 z}{(z-1)^2}-\frac{T_Ф z}{z-1}+\frac{T_Ф z}{z-d}];$$

$$K_{ПНЧ1\gamma}(z)=k_И k_Ф[\frac{T_0}{(z-1)^2}+\frac{T_0(1-\gamma)}{z-1}-\frac{T_Ф}{z-1}+\frac{T_Ф}{z-d}d^{1-\gamma}].$$

тогда

$$K_{ПНЧ}(z)=K_{ПНЧ1}(z)-K_{ПНЧ1\gamma}(z)=k_И k_Ф\frac{[T_0\gamma+T_Ф d(1-d^{-\gamma})]z^{-1}-[T_0\gamma d+T_Ф d(1-d^{-\gamma})]z^{-2}}{1-(d+1)z^{-1}+dz^{-2}}=$$

$$=\frac{c_1 z^{-1}+c_2 z^{-2}}{(1-z^{-1})(1-dz^{-1})},$$

где $c_1=k_И k_Ф[T_0\gamma+T_Ф d(1-d^{-\gamma})]$;

$c_2=-k_И k_Ф[T_0\gamma d+T_Ф d(1-d^{-\gamma})]$.

Определим дискретную передаточную функцию замкнутой системы по ошибке, вызываемой задающим воздействием

$$K_3(z)=\frac{\Theta(z)}{\alpha(z)}=\frac{1}{1+K_{ПНЧ}(z)}=\frac{F_{ПНЧ}(z)}{F_{ПНЧ}(z)+D_{ПНЧ}(z)},$$

где $K_{ПНЧ}(z)=\dfrac{D_{ПНЧ}(z)}{F_{ПНЧ}(z)}$.

После подстановки значений передаточной функции приведенной непрерывной части получаем

$$K_3(z)=\frac{\Theta(z)}{\alpha(z)}=(1-z^{-1})^{\nu=1}\frac{1-dz^{-1}}{(1-z^{-1})(1-dz^{-1})+c_1z^{-1}+c_2z^{-2}}.$$

Порядок астатизма дискретной системы определяется степенью ν оператора конечной разности $(1-z^{-1})$, являющегося общим множителем дискретной передаточной функции по ошибке. Замкнутая система усилителя класса D имеет астатизм первого порядка: при ступенчатом изменении задающего воздействия ошибка в установившемся режиме равна нулю; при воздействии, меняющемся по линейному закону ошибка равна постоянной величине; при воздействии, изменяющемуся по закону квадратичной функции – растет до бесконечности.

Повышение порядка астатизма может быть достигнуто за счет применения комбинированной системы, которая характеризуется наличием связи по задающему воздействию (рис. 2). Дискретная передаточная функция этой связи на структурной схеме обозначена $K_K(z)$, Σ_2 -сумматор.

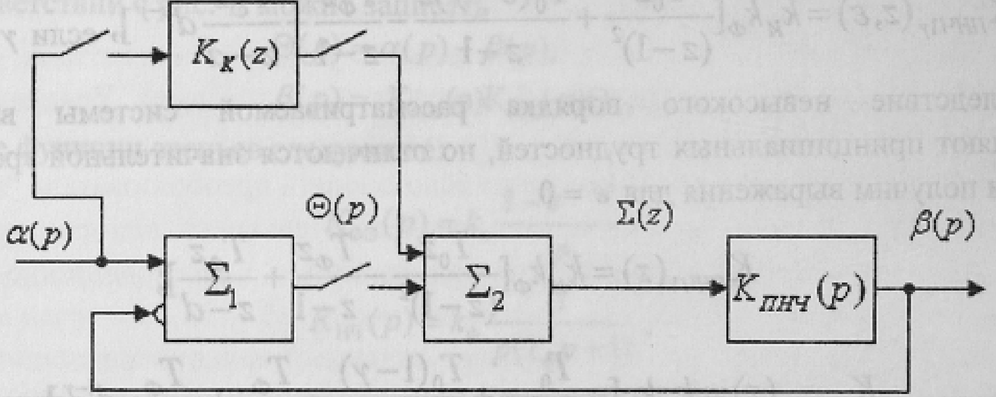

Рис. 2 - Структурная схема комбинированной следящей системы усилителя класса D

В соответствии с рис. 2 уравнения элементов имеют вид

$$\Theta(p)=\alpha(p)-\beta(p),$$
$$\Sigma(z)=K_K(z)\alpha(p)+\Theta(p),$$
$$\beta(p)=K_{ПНЧ}(p)\Sigma(z).$$

Исключив промежуточные переменные получим дискретную передаточную функцию комбинированной системы по ошибке

$$K_{КОМБ}(z)=\frac{\Theta(z)}{\alpha(z)}=\frac{1-K_K(z)K_{ПНЧ}(z)}{1+K_{ПНЧ}(z)}=\frac{F_{ПНЧ}(z)-K_K(z)D_{ПНЧ}(z)}{F_{ПНЧ}(z)+D_{ПНЧ}(z)}.$$

В соответствии с рекомендациями [6] выберем дискретную передаточную функцию звена связи вида

$$K_K(z) = k_1(1 - z^{-1}).$$

После подставки значений передаточных функций звеньев получаем

$$K_{КОМБ}(z) = \frac{\Theta(z)}{\alpha(\rho)} = (1 - z^{-1})^{\nu=1} \frac{(1 - dz^{-1}) - k_1(c_1 z^{-1} + c_2 z^{-})}{(1 - z^{-1})(1 - dz^{-1}) + (c_1 z^{-1} + c_2 z^{-})}.$$

Как видно полученного выражения передаточной функции комбинированной системы введение корректирующего звена связи по задающему воздействию еще не приводит к повышению порядка астатизма системы. Для того чтобы повысить порядок астатизма необходимо выбрать значение коэффициента передачи [7]

$$k_1 = \frac{1 - d}{c_1 + c_2}.$$

Это выражение является условием повышения порядка астатизма с первого до второго и дискретная передаточная функция комбинированной системы имеет вид

$$K_{КОМБ}(z) = (1 - z^{-1})^{\nu=2} \frac{c_1 + c_2(1 + z^{-1}) - c_2 dz^{-1}}{(1 - z^{-1})(1 - dz^{-1}) + (c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2})}.$$

Выводы.

Установившиеся ошибки усилителя класса D с комбинированным управлением, имеющим астатизм 2-го порядка при ступенчатом и линейном изменениях задающего воздействия равны нулю, а при квадратичном законе изменения $\alpha(t)$ являются конечной величиной.

Дальнейшее увеличение порядка астатизма усилителей класса D требует усложнения корректирующего звена связи.

Литература

1. Дуплин Е. Усилители класса D второе рождение // Электронные компоненты. – 2000. – №5. – С. 14-18.

2. TPA005D02 class D stereo audio power amplifier evalution module. User`s Guide. Texas Instruments.

3. Schweber B. Class D IC amps: ready for audio prime time // EDN. – 1999. – January. – P. 79.

4. Дискретные нелинейные системы / А.Д. Аверина, А.Н. Герасимов, С.П. Забродин и др.; Под ред. Ю.И. Топчеева. – М.: Машиностроение, 1982. – 312 с.

5. Дёч Г. Руководство к практическому применению преобразователю Лапласа и Z – преобразования. – М.: Наука, 1971. – 288 с.

6. Кунцевич В.М. Импульсные самонастраивающиеся и экстремальные системы автоматического управления. – К.: Техніка, 1966. – 282 с.

7. Andreev A., Kochetkov A., Kupratsevich A. Increasing of order astatism in amplifiers of D class with combined control // Proceding of the VIII International conf. TCSET 2006. – Lviv – Slavko, 2006. – P. 534.