

УДК 621.314

**А.И. Андреев, А.С. Семенов**

Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова,  
кафедра безопасности производственных процессов и электропитания систем связи  
E-mail: [aia2003@ukr.net](mailto:aia2003@ukr.net)

## СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ КЛЮЧЕВЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ КЛАССА D НА ОСНОВЕ ИНВАРИАНТНОЙ МОДЕЛИ

### *Abstract*

*Andreev A.I., Semenov A.S. The structural synthesis of swithed amplifiers of class D on basis invariant model. The amplifiers of class D with pulse width modulation (PWM) which work in the mode of tracing are analysed. The transfer functions of closed, combined, two – connected and iterated systems are obtained. Application amplifiers with combined, two – connected, iterated control allow the astatism order of an.*

**Key words:** *amplifier of class D, closed, combined, two-connected, iterated system, order of astatism, static error.*

### *Анотація*

*Андреев А.И., Семенов А.С. Структурний синтез ключових підсилювачів класу D на основі інваріантної моделі. Аналізуються підсилювачі класу D з широтно-імпульсною модуляцією. Отримані передавальні функції замкненої, комбінованої, двозв'язної та ітераційної систем. Розроблені міри по зменшенню статичної помилки підсилювачів класу D.*

**Ключові слова:** *підсилювач класу D, замкнена, комбінована, двозв'язна, ітераційна система, порядок астатизму, статична помилка.*

### *Аннотация*

*Андреев А.И., Семенов А.С. Структурный синтез ключевых усилителей класса D на основе инвариантной модели. Анализируются усилители класса D с широтно-импульсной модуляцией. Получены передаточные функции замкнутой, комбинированной, двухсвязной и итерационной систем. Разработаны меры по уменьшению статической ошибки усилителей класса D. Ключевые слова: усилитель класса D, замкнутая, комбинированная, двухсвязная, итерационная система, порядок астатизма, статическая ошибка.*

### **Общая постановка проблемы**

В последние годы вновь увеличился спрос на усилители класса D, благодаря их высокому КПД и достижениям в полупроводниковой технологии.

Возникает вопрос об оправданности интереса к ключевым усилителям. Если рассмотреть усиление синусоидального сигнала усилителями различных классов, то при использовании усилителя класса АВ КПД составляет 67%, а класса D (при тех же условиях) — 80%. Ситуация кардинально меняется при работе усилителей с реальным звуковым сигналом, коэффициент амплитуды которого составляет 10...15 дБ, КПД усилителя класса АВ падает до 30.. 45%, а КПД класса D возрастает до 90%[1].

Разработка эффективных ключевых усилителей требует не только повышения энергетических параметров, снижения массо-габаритных показателей, ослабления электромагнитных помех, но и улучшения рабочих статических и динамических характеристик.

**Постановка задачи исследования.**

Исследование рабочих статических и динамических характеристик усилителей ведется по двум направлениям [2]:

- усилитель рассматривается как дискретная (импульсная) модель [3];
- усилитель представлен в виде непрерывной модели.

Второй подход представляется более приемлемым, так как, во-первых, в связи с ростом частоты коммутации силового транзистора (с сотен герц до сотен килогерц) усилитель все больше приближается к непрерывной модели, во-вторых, анализ и синтез усилителей с заданными свойствами проводится с помощью достаточно простого математического аппарата. Переход к непрерывной линейной модели усилителя в целом основывается на представлении силовой части, содержащей регулирующий транзистор и Г-образный LC сглаживающий фильтр, в виде непрерывных звеньев [4] и на представлении схемы управления, включая широтно-импульсный модулятор (ШИМ) также в виде непрерывных звеньев [5].

Среди рабочих характеристик особое место занимает статическая ошибка при воспроизведении входного сигнала усилителя.

В публикациях, посвященных повышению точности (уменьшению статической ошибки) ключевых усилителей, основное внимание уделяется различным схемотехническим решениям в классе замкнутых систем.

В статье предлагается решать вопрос уменьшения статической ошибки ключевых усилителей в классах комбинированных, двухсвязных и итерационных систем на основе теории инвариантности [6], в частности, метода повышения порядка астатизма [7].

**Решение задачи и результаты исследования.**

Рассмотрим математическую модель усилителя класса D с принципом управления по отклонению (рис. 1), где  $\alpha(t)$  — задающее воздействие (входной сигнал);  $\beta_1(t)$  — управляемая величина (выходной сигнал);  $\theta_1(t)$  — отклонение управляемой величины от требуемого значения;  $K_y(p)$ ,  $K_m(p)$ ,  $K_{ps}(p)$ ,  $K_{сф}(p)$  — передаточные функции усилителя, широтно-импульсного модулятора, регулирующего элемента (транзистора), сглаживающего фильтра соответственно;  $\Sigma_1$  — элемент сравнения.

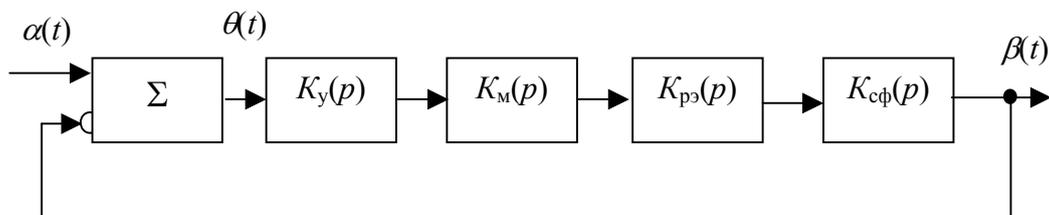


Рисунок 1 — Математическая модель усилителя класса D с принципом управления по отклонению

Согласно математической модели составим систему уравнений

$$\begin{cases} \theta(p) = \alpha(p) - \beta(p); \\ \beta(p) = K_y(p)K_m(p)K_{ps}(p)K_{сф}(p)\theta(p), \end{cases} \quad (1)$$

где  $\alpha(p)$ ,  $\beta(p)$ ,  $\theta(p)$  — изображения по Лапласу соответствующих величин.

Отсюда получаем передаточную функцию замкнутой системы усилителя по ошибке

$$K_{ош}(p) = \frac{\theta(p)}{\alpha(p)} = \frac{1}{1 + K_y(p)K_m(p)K_{ps}(p)K_{сф}(p)} = \frac{1}{1 + K_p(p)}, \quad (2)$$

где  $K_p(p)$  — передаточная функция усилителя в разомкнутом состоянии.

Передаточные функции элементов усилителя, согласно [8], определяются следующими выражениями:

$$K_y(p) = k_y; K_M(p) = k_M; K_{p\gamma}(p) = \gamma = \frac{t_n}{T_0}; K_{сф}(p) = \frac{k_\phi}{T_\phi^2 p^2 + 2\xi T_\phi p + 1},$$

где  $k_y, k_M, k_\phi$  — коэффициенты передачи усилителя, широтно-импульсного модулятора, сглаживающего фильтра соответственно;  $\gamma$  — коэффициент заполнения;  $T_\phi$  — постоянная времени фильтра;  $\xi$  — коэффициент демпфирования.

Подставив в (2) значения передаточных функций элементов получаем

$$K_{\text{ош}}(p) = \frac{\theta(p)}{L(p)} = \frac{T_\phi^2 p^2 + 2\xi T_\phi p + 1}{T_\phi^2 p^2 + 2\xi T_\phi p + 1 + k_y k_M \gamma k_\phi} = \frac{a_0 p^2 + a_1 p + a_2}{b_0 p^2 + b_1 p + b_2} = K_{\text{ош ст}}(p) p^{\nu=0} = K_{\text{ош ст}}(p), \quad (3)$$

где  $a_0 = T_\phi^2$ ;  $a_1 = 2\xi T_\phi$ ;  $a_2 = 1$ ;  $b_0 = T_\phi^2$ ;  $b_1 = 2\xi T_\phi$ ;  $b_2 = 1 + k_y k_M \gamma k_\phi$ ;  $\nu$  — степень астатизма;  $K_{\text{ош ст}}(p)$  — передаточная функция по ошибке статической системы.

Из (3) видно, усилитель класса D с принципом управления по отклонению является статической системой с астатизмом нулевого порядка.

Определим статическую ошибку системы при разных законах изменения задающего воздействия: ступенчатом  $\alpha(t) = \alpha_0 \cdot 1(t)$ , линейном  $\alpha(t) = \alpha_0 + \alpha_1 t$  и квадратичном  $\alpha(t) = \alpha_0 + \alpha_1 t + \alpha_2 t^2$ .

Изображение ошибки системы в соответствии с (2) определяется выражением

$$\theta(p) = K_{\text{ош}}(p) \cdot \alpha(p). \quad (4)$$

Статическая ошибка системы в соответствии с теоремой операционного исчисления о конечном значении функции описывается следующим образом [6]

$$\theta(t) = \lim_{p \rightarrow 0} p \theta(p), \quad (5)$$

после подстановки в (5) выражения (4) имеем

$$\theta(t) = \lim_{p \rightarrow 0} p K_{\text{ош}}(p) \alpha(p). \quad (6)$$

При изменении задающего воздействия по закону ступенчатой функции статическую ошибку получим, подставив в (6) изображение задающего воздействия  $\alpha(t) = L[\alpha_0 \cdot 1(t)] = \alpha_0 / p$  и значение передаточной функции системы по ошибке (3)

$$\theta(t) = \lim_{p \rightarrow 0} p \frac{a_0 p^2 + a_1 p + a_2}{b_0 p^2 + b_1 p + b_2} \cdot \frac{\alpha_0}{p} = \frac{a_2}{b_2} \cdot \alpha_0. \quad (7)$$

Если задающее воздействие изменяется по линейному закону, то для определения статической ошибки нужно подставить в (6) изображение задающего воздействия

$$\alpha(t) = L[\alpha_0 + \alpha_1 t] = \frac{\alpha_0}{p} + \frac{\alpha_1}{p^2};$$

тогда

$$\theta(t) = \lim_{p \rightarrow 0} p \frac{a_0 p^2 + a_1 p + a_2}{b_0 p^2 + b_1 p + b_2} \cdot \left[ \frac{\alpha_0}{p} + \frac{\alpha_1}{p^2} \right] = \infty. \quad (8)$$

Если задающее воздействие изменяется по закону квадратичной функции (с постоянным ускорением), изображение которого имеет вид

$$\alpha(p) = \frac{\alpha_0}{p} + \frac{\alpha_1}{p^2} + \frac{2! \alpha_2}{p^3},$$

то статическая ошибка

$$\theta(t) = \lim_{p \rightarrow 0} p \frac{a_0 p^2 + a_1 p + a_2}{b_0 p^2 + b_1 p + b_2} \cdot \left[ \frac{\alpha_0}{p} + \frac{\alpha_1}{p^2} + \frac{2! \alpha_2}{p^3} \right] = \infty. \quad (9)$$

Повышения порядка астатизма можно добиться за счет внедрения интегральной широтно-импульсной модуляции (ИШИМ) в схему управления [9] усилителя класса D.

Тогда передаточная функция по ошибке принимает вид

$$K_{om}(p) = \frac{T_\phi^2 p^3 + 2\xi T_\phi p^2 + p^2}{T_\phi^2 p^3 + 2\xi T_\phi p^2 + p + k_y k_n k_m \gamma k_\phi} = \frac{a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p}{b_0 p^3 + b_1 p^2 + b_2 p + b_3} = K_{om\text{ ст}}(p) \cdot p^{\nu=1}, \quad (10)$$

где  $a_0 = T_\phi^2$ ;  $a_1 = 2\xi T_\phi$ ;  $a_2 = 1$ ;  $b_0 = T_\phi^2$ ;  $b_1 = 2\xi T_\phi$ ;  $b_2 = 1$ ;  $b_3 = k_y k_n k_m \gamma k_\phi$ .

Из (10) видно, что замкнутая система усилителя класса D с ИШИМ является астатической с астатизмом первого порядка.

Определим статическую ошибку усилителя с ИШИМ при разных законах изменения задающего воздействия

– при изменении по закону ступенчатой функции

$$\theta(t) = \lim_{p \rightarrow 0} p \frac{a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p}{b_0 p^3 + b_1 p^2 + b_2 p + b_3} \cdot \frac{\alpha_0}{p} = 0; \quad (11)$$

– при изменении по линейному закону

$$\theta(t) = \lim_{p \rightarrow 0} p \frac{a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p}{b_0 p^3 + b_1 p^2 + b_2 p + b_3} \cdot \left[ \frac{\alpha_0}{p} + \frac{\alpha_1}{p^2} \right] = \frac{a_2}{b_3} \cdot \alpha_1; \quad (12)$$

– при изменении по закону квадратичной функции

$$\theta(t) = \lim_{p \rightarrow 0} p \frac{a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p}{b_0 p^3 + b_1 p^2 + b_2 p + b_3} \cdot \left[ \frac{\alpha_0}{p} + \frac{\alpha_1}{p^2} + \frac{2! \alpha_2}{p^3} \right] = \infty. \quad (13)$$

Усилителю класса D с принципом управления по отклонению присуще противоречие между условиями повышения статической точности и устойчивости [2].

Затруднения, встречающиеся при решении задачи повышения точности усилителей класса D, устраняются в случае применения комбинированного управления, т.е. сочетания принципа по отклонению и принципа управления по задающему воздействию. Математической основой усилителей класса D с комбинированным управлением, в которых может быть достигнуто точное воспроизведение задающего воздействия, является теория инвариантности [6].

Комбинированная система усилителя класса D отличается от системы по отклонению наличием связи по задающему воздействию. Передаточная функция компенсационной связи в математической модели (рис. 2) обозначена  $K_{kc}(p)$ .

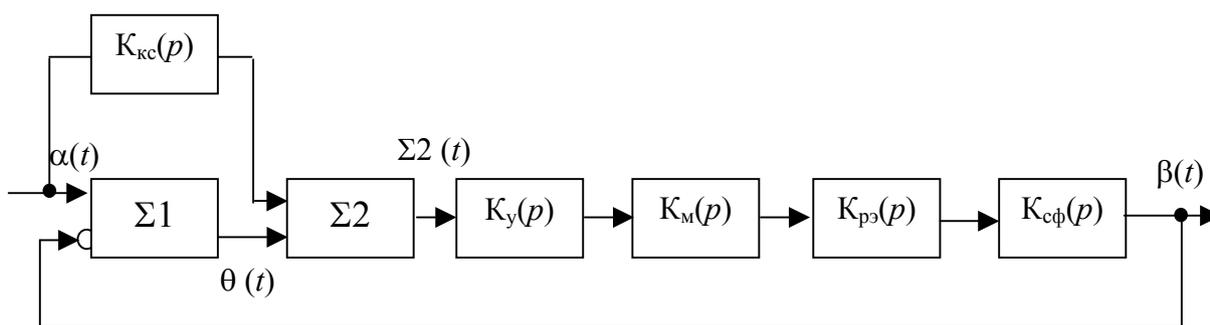


Рисунок 2 — Математическая модель усилителя класса D с комбинированным управлением

В соответствии с рис. 2 уравнения элементов имеют вид

$$\begin{cases} \theta(p) = \alpha(p) - \beta(p); \\ \Sigma 2(p) = K_{kc}(p)\alpha(p) + \theta(p); \\ \beta(p) = K_y(p)K_m(p)K_{pr}(p)K_{сф}(p)\Sigma 2(p). \end{cases} \quad (14)$$

Исключив из этих уравнений  $\beta(p)$  и  $\Sigma 2(p)$ , получим уравнение системы для ошибки

$$[1 + K_y(p)K_m(p)K_{p3}(p)K_{c\Phi}(p)]\theta(p) = [1 - K_{kc}(p)K_y(p)K_m(p)K_{p3}(p)K_{c\Phi}(p)]\alpha(p). \quad (15)$$

Условие абсолютной инвариантности  $\theta(p)$  относительно  $\alpha(p)$

$$1 - K_{kc}(p)K_y(p)K_m(p)K_{p3}(p)K_{c\Phi}(p) = 0, \quad (16)$$

откуда

$$K_{kc}(p) = \frac{1}{K_y(p)K_m(p)K_{p3}(p)K_{c\Phi}(p)}. \quad (17)$$

Из выражения (17) следует, что передаточная функция компенсационной связи по задающему воздействию комбинированной системы класса D, соответствующая абсолютной инвариантности, физически не реализуема.

Однако отсутствие возможности достижения абсолютной инвариантности не означает, что в усилителе с комбинированным управлением нельзя получить высокую точность воспроизведения с помощью метода повышения порядка астатизма [7].

Для повышения порядка астатизма с первого (замкнутая модель усилителя класса D с ИШИМ) до второго (комбинированная модель усилителя класса D с ИШИМ) необходимо с помощью разомкнутой связи по задающему воздействию (рис. 2) ввести первую производную от  $\alpha(t)$  [6].

В соответствии с этим требованием физически реализуемая передаточная функция  $K_{kc}(p)$  должна иметь вид

$$K_{kc}(p) = \frac{\tau p}{T_{kc}p + 1}. \quad (18)$$

После подстановки значений передаточных функций элементов получим передаточную функцию комбинированной системы усилителя класса D с ИШИМ по ошибке

$$K_{out}(p) = \frac{\theta(p)}{\alpha(p)} = \frac{a_0 p^4 + a_1 p^3 + a_2 p^2 + a_3 p}{(T_{kc}p + 1)(b_0 p^3 + b_1 p^2 + b_2 p + b_3)}, \quad (19)$$

где  $a_0 = T_{kc}T_{\Phi}^2$ ;  $a_1 = T_{\Phi}(2\xi T_{kc} + T_{\Phi})$ ;  $a_2 = T_{kc} + 2\xi T_{\Phi}$ ;  $a_3 = 1 - k_y k_n k_m \gamma k_{\Phi} \tau$ ;  $b_0, b_1, b_2, b_3$  определены в (10).

Необходимо отметить, что параметр  $T_{kc}$  компенсационной связи по задающему воздействию не входит в характеристическое уравнение замкнутой части (19), которое аналогично (10) и, следовательно, устойчивость комбинированной системы определяется устойчивостью замкнутой системы. Однако введение компенсационной связи вносит новый корень в характеристическое уравнение (19).

Из (19) следует, что комбинированная система в общем случае (при произвольном значении  $\tau$ ) так же, как замкнутая система (10) имеет астатизм первого порядка.

Условием повышения порядка астатизма комбинированной системы с первого до второго является

$$1 - k_y k_n k_m \gamma k_{\Phi} \tau = 0, \quad (20)$$

откуда

$$\tau = \frac{1}{k_y k_n k_m \gamma k_{\Phi}}. \quad (21)$$

При выполнении условия (21) передаточная функция по ошибке комбинированной системы усилителя класса D с ИШИМ приобретает астатизм второго порядка

$$K_{out}(p) = \frac{\theta(p)}{\alpha(p)} = \frac{a_0 p^4 + a_1 p^3 + a_2 p^2}{b_0 p^4 + b_1 p^3 + b_2 p^2 + b_3 p + b_4} = K_{ост}(p) \cdot p^{\nu=2}, \quad (22)$$

где  $b_0 = T_{kc}T_{\Phi}^2$ ;  $b_1 = T_{\Phi}(2\xi T_{kc} + T_{\Phi})$ ;  $b_2 = T_{kc} + 2\xi T_{\Phi}$ ;  $b_3 = T_{kc}k_y k_n k_m \gamma k_{\Phi} + 1$ ;  $b_4 = k_y k_n k_m \gamma k_{\Phi}$ .

Определим установившуюся ошибку при разных законах изменения задающего воздействия

– при изменении по закону ступенчатой функции

$$\theta(t) = \lim_{p \rightarrow 0} p \frac{a_0 p^4 + a_1 p^3 + a_2 p^2}{b_0 p^4 + b_1 p^3 + b_2 p^2 + b_3 p + b_4} \cdot \frac{\alpha_0}{p} = 0; \tag{23}$$

– при изменении по линейному закону

$$\theta(t) = \lim_{p \rightarrow 0} p \frac{a_0 p^4 + a_1 p^3 + a_2 p^2}{b_0 p^4 + b_1 p^3 + b_2 p^2 + b_3 p + b_4} \cdot \left[ \frac{\alpha_0}{p} + \frac{\alpha_1}{p^2} \right] = 0; \tag{24}$$

– при изменении по квадратичному закону

$$\theta(t) = \lim_{p \rightarrow 0} p \frac{a_0 p^4 + a_1 p^3 + a_2 p^2}{b_0 p^4 + b_1 p^3 + b_2 p^2 + b_3 p + b_4} \cdot \left[ \frac{\alpha_0}{p} + \frac{\alpha_1}{p^2} + \frac{2! \alpha_2}{p^3} \right] = \frac{a_2 2! \alpha_2}{b_4}. \tag{25}$$

Одним из способов уменьшения статической ошибки систем автоматического управления является метод многоконтурных систем, в частности, двухсвязных [7]. Применительно к аналоговым и ключевым усилителям двухсвязные системы не применялись. На рис. 3 приведена математическая модель двухсвязной системы усилителя класса D, где  $K_{\text{кy}}(p)$  — передаточная функция корректирующего устройства, выходной сигнал которого поступает на вход основной системы.

Согласно рис. 3 составим систему уравнений

$$\begin{cases} \theta_1(p) = \alpha(p) - \beta_1(p); \\ \Sigma 2(p) = \theta_1(p) + K_{\text{кy}}(p)\theta_2(p); \\ \beta_1(p) = K_{y1}(p)K_{m1}(p)K_{p\phi 1}(p)K_{c\phi 1}(p)\Sigma 2(p) = Kp_1(p)\Sigma 2(p); \\ \theta_2(p) = \alpha(p) - \beta_2(p); \\ \beta_2(p) = K_{y2}(p)K_{m2}(p)K_{p\phi 2}(p)K_{c\phi 2}(p)\theta_2(p) = Kp_2(p)\theta_2(p). \end{cases} \tag{26}$$

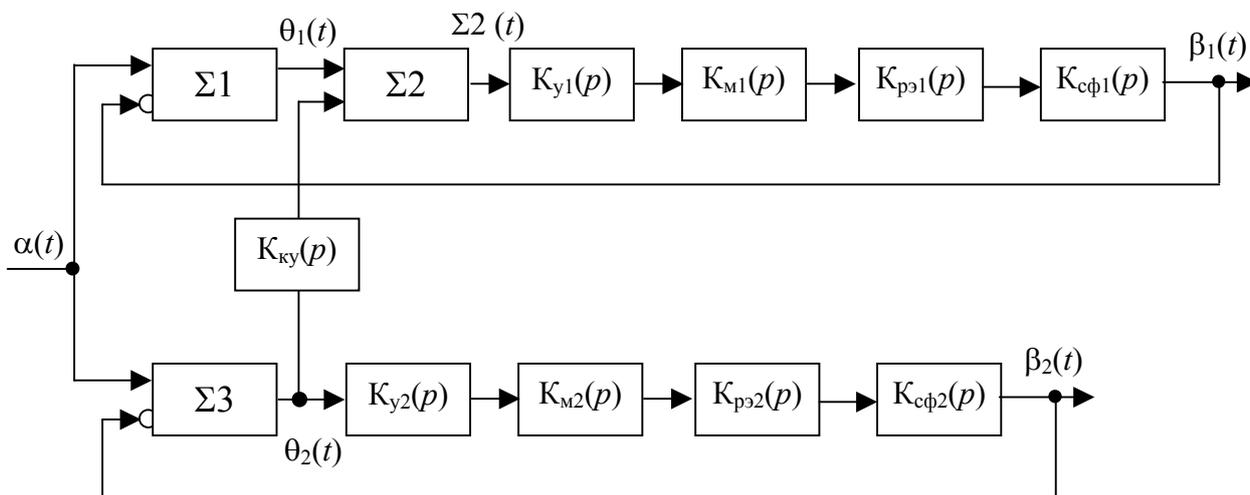


Рисунок 3 — Математическая модель двухсвязной системы усилителя класса D

Исключив промежуточные переменные, находим уравнение основной системы для ошибки

$$[1 + Kp_1(p)]\theta_1(p) = \left[ 1 - \frac{Kp_1(p)K_{\text{кy}}(p)}{1 + Kp_2(p)} \right] \alpha(p). \tag{27}$$

Учитывая, что согласно (2)  $K_{ou2}(p) = \frac{1}{1 + Kp_2(p)}$ , выражение (27) можно представить

в виде

$$[1 + Kp_1(p)]\theta_1(p) = [1 - Kp_1(p)K_{ou2}(p)K_{ky}(p)]\alpha(p). \tag{28}$$

Таким образом, (28) отличается от (15) наличием множителя  $K_{ou2}(p)$  в выражении изображения задающего воздействия  $\alpha(p)$ .

Отсюда получаем передаточную функцию двухсвязной системы усилителя класса D по ошибке

$$K_{ou2}(p) = \frac{\theta(p)}{\alpha(p)} = \frac{1 - K_{ky}(p)Kp_1(p)K_{ou2}}{1 + Kp_1(p)}, \tag{29}$$

которая аналогична передаточной функции усилителя класса D с комбинированным управлением.

Одним из перспективных направлений построения систем автоматического управления является разработка структур по принципу итераций [7]. В усилителях итерационные системы ранее не применялись. На рис. 4 приведена итерационная модель усилителя класса D. Отличительной особенностью которой является использование ошибки первого канала в качестве задающего воздействия второго канала.

В соответствии с математической моделью составим систему уравнений

$$\begin{cases} \theta_1(p) = \alpha(p) - \beta_1(p); \\ \beta_1(p) = K_{y1}(p)K_{m1}(p)K_{p\pi1}(p)K_{c\phi1}(p)\theta_1(p) = Kp_1(p)\theta_1(p); \\ \theta_2(p) = \theta_1(p) - \beta_2(p); \\ \beta_2(p) = K_{y2}(p)K_{m2}(p)K_{p\pi2}(p)K_{c\phi2}(p)\theta_2(p) = Kp_2(p)\theta_2(p); \\ \beta(p) = \beta_1(p) + \beta_2(p); \\ \theta(p) = \alpha(p) - \beta(p). \end{cases} \tag{30}$$

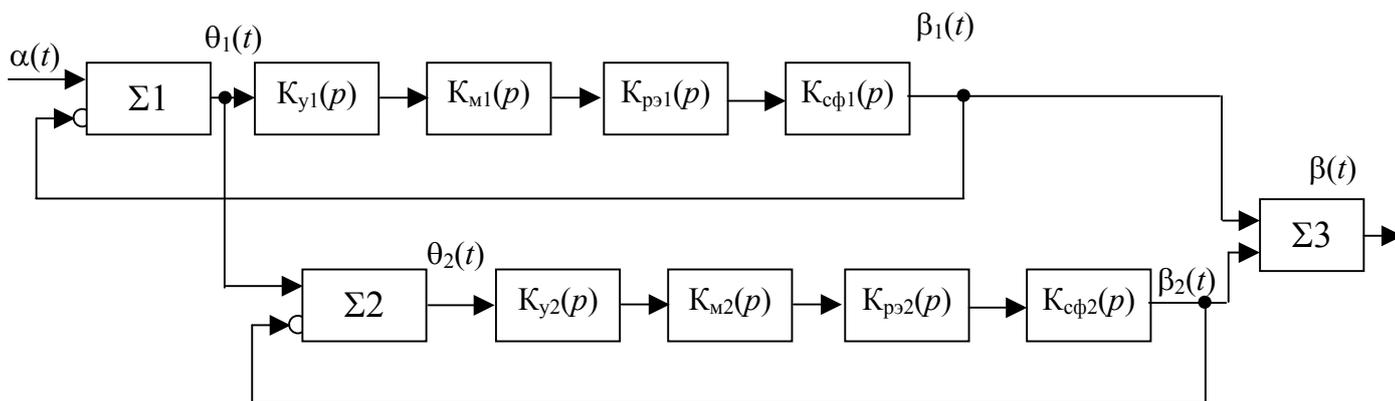


Рисунок 4 — Математическая модель итерационной системы усилителя класса D

Из (30) определим значения управляемых величин

$$\beta_1(p) = \frac{Kp_1(p)}{1 + Kp_1(p)}\alpha(p); \tag{31}$$

$$\beta_2(p) = \frac{Kp_2(p)}{(1 + Kp_1(p))(1 + Kp_2(p))}\alpha(p); \tag{32}$$

$$\beta(p) = \frac{Kp_1(p)(1 + Kp_2(p)) + Kp_2(p)}{(1 + Kp_1(p))(1 + Kp_2(p))} \alpha(p). \quad (33)$$

Тогда передаточная функция итерационной системы усилителя класса D по ошибке, с учетом (2), (3), (10), (22), равна

$$K_{\text{ош2}}(p) = \frac{\theta(p)}{\alpha(p)} = \frac{1}{(1 + Kp_1(p))(1 + Kp_2(p))} = K_{\text{ош1}}(p)K_{\text{ош2}}(p) = K_{\text{ош1ст}}(p)K_{\text{ош2ст}}(p)p^{\nu_1 + \nu_2}. \quad (34)$$

При  $\nu_1 \geq 1, \nu_2 \geq 1$  порядок астатизма усилителя класса D, построенного по принципу итераций, повышается. Очевидно, что при  $\nu_1 = 0$  и  $\nu_2 = 0$  внедрение итерационной системы нецелесообразно.

### Выводы

В усилителе класса D с принципом управления по отклонению, имеющим астатизм нулевого порядка, статическая ошибка при ступенчатом изменении задающего воздействия ограничена конечным значением, при линейном и квадратичном — стремится к бесконечности.

Введение интегрального широтно-импульсного модулятора (ИШИМ) в схему управления замкнутого усилителя класса D повышает порядок астатизма до первого и тем самым уменьшает статическую ошибку при ступенчатом изменении задающего воздействия до нуля, при линейном — ограничена конечным значением, а при квадратичном стремится к бесконечности.

Синтез разомкнутой компенсационной связи по задающему воздействию усилителя с комбинированным управлением позволил поднять порядок астатизма до второго, и следовательно, статическая ошибка при изменении задающего воздействия по ступенчатому и линейному законам равна нулю, а при квадратичном ограничена конечным значением.

Значительных результатов повышения точности ключевых усилителей класса D следует ожидать от внедрения систем, сочетающих комбинированные (в том числе двухсвязные) и итерационные структуры.

### Литература

1. Дуплин Е. Усилители класса D — второе рождение / Е. Дуплин // Электронные компоненты. — 2000. — № 5. — С. 14–18.
2. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника. — М.: Техносфера, 2005. — 632 с.
3. Андреев А.И. Повышение порядка астатизма усилителей класса D с комбинированным управлением / А.И. Андреев // Наукові праці Донецького нац. техн. університету. — 2007. — Вип. 13 (121). — С. 59–63.
4. Мелешин В.И. Получение непрерывной линейной модели силовой части импульсного преобразователя как начальный этап проектирования его динамических свойств / В.И. Мелешин // Электричество. — 2002. — № 10. — С. 38–43.
5. Мелешин В.И. Широтно-импульсный модулятор в непрерывной модели преобразователя / В.И. Мелешин // Электричество. — 2004. — № 3. — С. 46–52.
6. Стеклов В.К. Проекування систем автоматичного керування. — К.: Вища школа, 1995. — 231 с.
7. Стеклов В.К. Системи автоматичного керування регульованими джерелами живлення підсилювачів / В.К. Стеклов, А.І. Андреев. — К.: Техніка, 2001. — 232 с.
8. Гейтенко Е.Н. Источники вторичного электропитания. Схемотехника и расчет / Е.Н. Гейтенко. — М.: Солон-пресс, 2008. — 448 с.
9. Андреев А.И. Сравнительный анализ принципов управления СПН с интегральной ШИМ / А.И. Андреев // Збірник наукових праць Донецького нац. техн. університету. — 2008. — Вип. 8 (140). — С. 58–60.

Здано в редакцію:  
23.02.2009р.

Рекомендовано до друку:  
д.т.н, проф. Воронцов О.Г.