

ЗАМКНУТАЯ СИСТЕМА ФАП В УСИЛИТЕЛЕ С РЕГУЛИРУЕМЫМ ИСТОЧНИКОМ ПИТАНИЯ

Андреев А.И., канд. техн. наук, доц.,

Украинская государственная академия связи им. А.С. Попова

Рассматривается замкнутая система ФАП в усилителе с регулируемым источником питания. Приводятся основные соотношения и анализ точности в установившихся режимах.

The closed phase lock loop system in amplifier with regulated power is possibility, The basis correlation and analysis of precision in install conditions is tring.

При построении усилителей проводного вещания с регулируемым источником питания возникает задача устранения взаимного запаздывания напряжения питания и выходного напряжения усилителя, влияющего на величину нелинейных искажений. Как показано в [1–3], коэффициент нелинейных искажений увеличивается при увеличении запаздывания (фазового рассогласования). Для уменьшения этого запаздывания необходимо принимать специальные меры.

В настоящей работе предлагается для уменьшения запаздываний использовать систему фазовой автоподстройки с управлением по отклонению.

Функциональная схема усилителя с системой фазовой автоподстройки изображена на рис. 1,а. Схема содержит предварительный усилитель ПУ, управляемый фазовращатель ФВ, усилитель мощности УМ и контур системы фазовой автоподстройки, содержащий узкополосные фильтры УФ1, УФ2, усилители-ограничители УО1, УО2, фазовый дискриминатор ФД для измерения фазовых рассогласований между напряжением питания и выходным напряжением усилителя мощности, фильтр Ф, усилитель У, интегратор И и фазовращатель ФВ. ПУ, СУ, В – предварительный усилитель, схема управления выпрямителем, выпрямитель соответственно.

С учетом необходимых элементов упрощенную функциональную схему системы ФАП можно представить в виде, изображенном на рис. 1,б. На входы 1 и 2 системы ФАП поступают напряжение источника питания $u_n(t) = u_{nm} \cos[\omega t + \varphi_1(t)]$ и управляемое выходное на-

пряжение усилителя мощности $u_{\text{вых}}(t) = u_{\text{выхм}} \cos[\omega t + \varphi_2(t)]$ одинаковой частоты, сдвинутые по фазе на угол

$$\alpha(t) = \varphi_1(t) - \varphi_2(t),$$

в общем случае изменяющийся во времени. Задача состоит в обеспечении равенства фаз этих напряжений. При равенстве фаз напряжений $u_{\text{п}}(t)$ и $u_{\text{вых}}(t)$ напряжение на выходе Ф фазового дискриминатора ФД $u_{\text{ф}}(t) = 0$. При появлении же угла $\alpha(t)$ между фазами этих напряжений на выходе фильтре Ф возникает напряжение $u_{\text{ф}}(t)$, которое поступает на последовательно соединенные усилитель У и интегратор И. Выходной сигнал интегратора в виде сигнала управления $\mu(t)$ поступает на фазовращатель ФВ, который под влиянием $\mu(t)$ должен сдвигать напряжение $u_{\text{вых}}(t)$ по фазе, уменьшая разность фаз $\Delta\varphi(t)$ между напряжениями $u_{\text{п}}(t)$ и $u'_{\text{вых}}(t)$ на выходе усилителя мощности УМ.

При прохождении напряжения $u_{\text{вых}}(t) = u_{\text{выхм}} \cos[\omega t + \varphi_2(t)]$ через фазовращатель ФВ фаза его сдвигается в общем случае на угол $\beta(t)$ и поэтому $u'_{\text{вых}}(t)$ будет определяться выражением

$$u'_{\text{вых}}(t) = u_{\text{выхм}} \cos[\omega t + \varphi_2(t) + \beta(t)],$$

а разность фаз между напряжениями $u_{\text{п}}(t)$ и $u_{\text{вых}}(t)$ будет

$$\Delta\varphi(t) = \varphi_1(t) - [\varphi_2(t) + \beta(t)] = \alpha(t) - \beta(t).$$

При $\beta(t) = \alpha(t)$ разность фаз $\Delta\varphi(t) = 0$, т.е. $u'_{\text{вых}}(t)$ и $u_{\text{п}}(t)$ совпадают по фазе, напряжение на выходе фильтра Ф фазового дискриминатора $u_{\text{ф}}(t) = 0$ и система ФАП находится в состоянии равновесия. При $\beta(t) \neq \alpha(t)$ значение $\Delta\varphi(t) \neq 0$, а следовательно и управляющее напряжение $\mu(t)$ на выходе интегратора, поступая на управляемый фазовращатель будет сдвигать фазу напряжения $u_{\text{вых}}(t)$ таким образом, чтобы уменьшить сигнал ошибки $\Delta\varphi(t)$.

Функциональной схеме рис. 1,б соответствует структурная схема системы, изображенная на рис. 1,в.

Уравнения ее элементов определяются выражениями

$$\left. \begin{aligned} \Delta\varphi(t) &= \alpha(t) - \beta(t); \\ \beta(t) &= W_p(p) \cdot \Delta\varphi(t), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $W_p(p) = W_{\text{ф}}(p)W_y(p)W_{\text{и}}(p)W_{\text{ФВ}}(p)W_{\text{УМ}}(p) = D_p(p)/F_p(p)$;

$$W_{\text{ф}}(p) = \frac{D_{\text{ф}}(p)}{F_{\text{ф}}(p)} = \frac{K_{\text{ф}}}{T_{\text{ф}}p + 1}; \quad W_y(p) = \frac{D_y(p)}{F_y(p)} = K_y;$$

$$W_{и}(p) = \frac{D_{и}(p)}{F_{и}(p)} = \frac{K_{и}}{p}; \quad W_{\Phi B}(p) = 1;$$

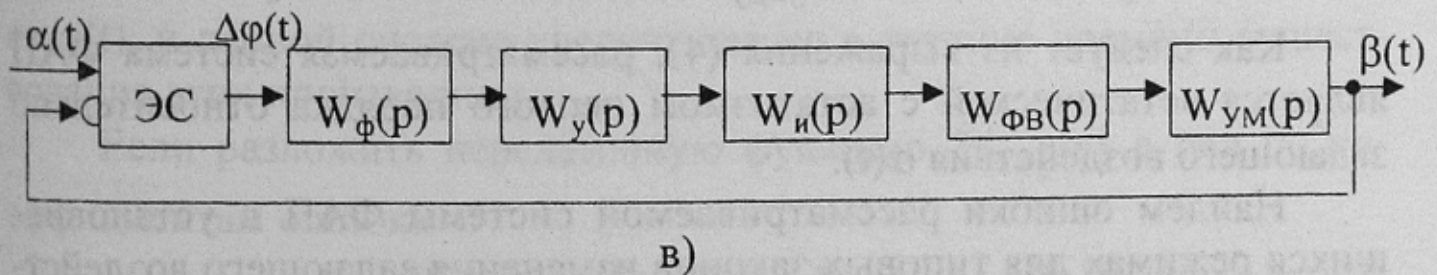
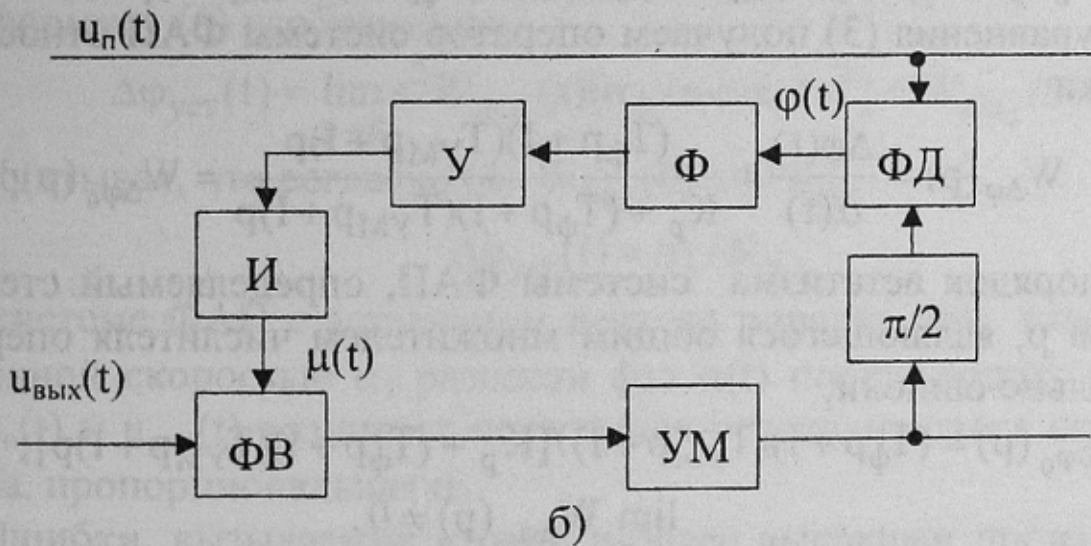
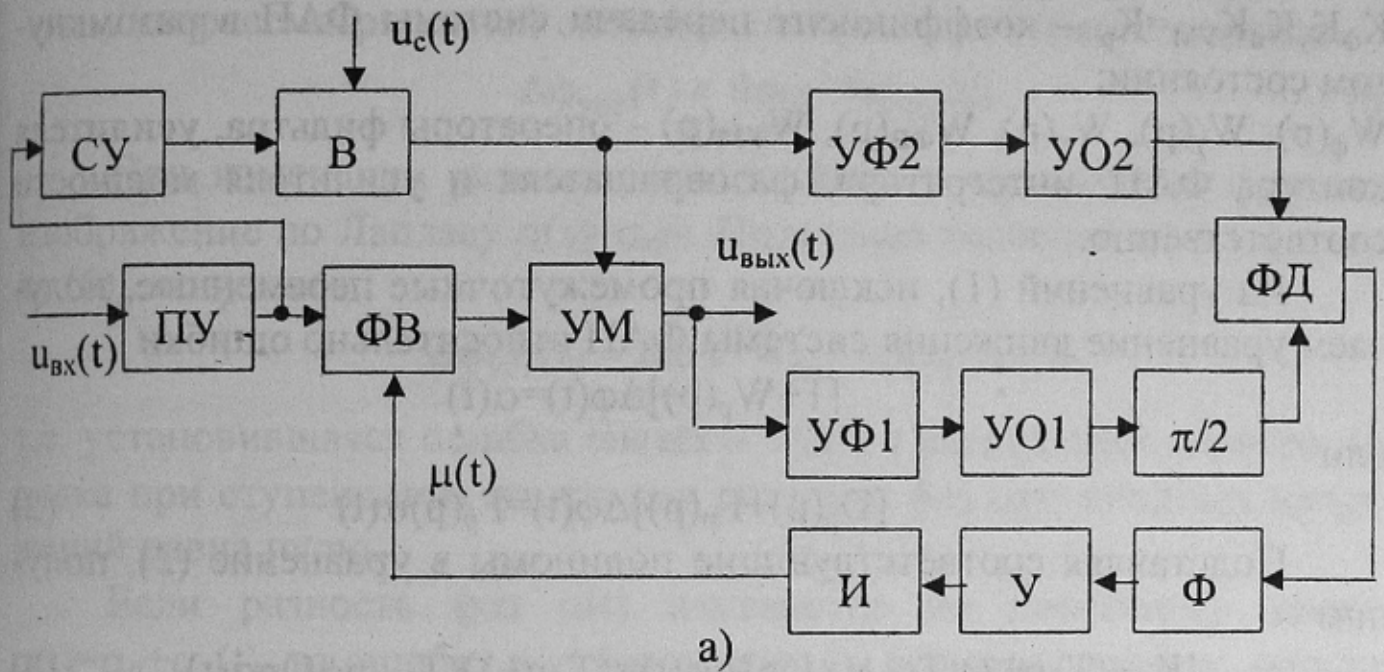


Рисунок 1. – Функциональные (а, б) и структурная (в) схемы замкнутой системы ФАП в усилителе с РИП

$$W_{УМ}(p) = \frac{D_{УМ}(p)}{F_{УМ}(p)} = \frac{K_{УМ}}{T_{УМ}p + 1};$$

$$D_{\Phi}(p) = K_{\Phi}; \quad F_{\Phi}(p) = T_{\Phi}p + 1; \quad D_{y}(p) = K_y; \quad F_y(p) = 1;$$

$$D_{и}(p) = K_{и}; \quad F_{и}(p) = p; \quad D_{УМ}(p) = K_{УМ}; \quad F_{УМ}(p) = T_{УМ}p + 1;$$

$$D_p(p) = D_\phi(p)D_y(p)D_i(p)D_{yM}(p);$$

$$F_p(p) = F_\phi(p)F_y(p)F_i(p)F_{yM}(p); \quad p = d/dt;$$

$K_\phi K_y K_i K_{yM} = K_p$ – коэффициент передачи системы ФАП в разомкнутом состоянии;

$W_\phi(p)$, $W_y(p)$, $W_i(p)$, $W_{\phi B}(p)$, $W_{yM}(p)$ – операторы фильтра, усилителя контура ФАП, интегратора, фазовращателя и усилителя мощности соответственно.

Из уравнений (1), исключая промежуточные переменные, получаем уравнение движения системы ФАП относительно ошибки

$$[1 + W_p(p)]\Delta\varphi(t) = \alpha(t)$$

или

$$[D_p(p) + F_p(p)]\Delta\varphi(t) = F_p(p)\alpha(t) \quad (2)$$

Подставляя соответствующие полиномы в уравнение (2), получим

$$[K_p + (T_\phi p + 1)(T_{yM} p + 1)p]\Delta\varphi(t) = (T_\phi p + 1)(T_{yM} p + 1)p\alpha(t). \quad (3)$$

Из уравнения (3) получаем оператор системы ФАП относительно ошибки

$$W_{\Delta\varphi}(p) = \frac{\Delta\varphi(t)}{\alpha(t)} = \frac{(T_\phi p + 1)(T_{yM} p + 1)p}{K_p + (T_\phi p + 1)(T_{yM} p + 1)p} = W_{\Delta\varphi_0}(p)p^{\gamma=1} \quad (4)$$

где γ – порядок астатизма системы ФАП, определяемый степенью оператора p , являющегося общим множителем числителя оператора относительно ошибки;

$$W_{\Delta\varphi_0}(p) = (T_\phi p + 1)(T_{yM} p + 1) / [K_p + (T_\phi p + 1)(T_{yM} p + 1)p];$$

$$\lim_{p \rightarrow 0} W_{\Delta\varphi_0}(p) \neq 0.$$

Как следует из выражения (4), рассматриваемая система ФАП является астатической с астатизмом первого порядка относительно задающего воздействия $\alpha(t)$.

Найдем ошибки рассматриваемой системы ФАП в установившихся режимах для типовых законов изменения задающего воздействия: ступенчатого $\alpha(t) = \alpha_0$ и линейного $\alpha(t) = \alpha_0 + \alpha_1 t$.

С учетом выражения (4), переходя к изображениям по Лапласу, находим

$$\Delta\varphi(s) = W_{\Delta\varphi}(s)\alpha(s)$$

Согласно теореме операционного исчисления о конечном значении оригинала имеем

$$\Delta\varphi_{уст}(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s\Delta\varphi(s) = \lim_{s \rightarrow 0} sW_{\Delta\varphi_0}(s)s^{\gamma}\alpha(s). \quad (5)$$

Для рассматриваемой системы с астатизмом первого порядка

$$\Delta\varphi_{уст}(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s^2 W_{\Delta\varphi_0}(s). \quad (6)$$

При изменении разность фаз по закону ступенчатой функции изображение по Лапласу $\alpha(s) = \alpha_0/s$. Подставив значение $\alpha(s)$ в формулу (6), получаем

$$\Delta\varphi_{уст}(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s^2 W_{\Delta\varphi_0}(s)\alpha_0/s = 0,$$

т.е. установившаяся ошибка системы ФАП с астатизмом первого порядка при ступенчатом изменении разности фаз $\alpha(t)$ входных напряжений равна нулю.

Если разность фаз $\alpha(t)$ изменяется по линейному закону $\alpha(t) = \alpha_0 + \alpha_1(t)$, то ошибку в установившемся режиме получим, подставив в формулу (6) изображение

$$\Delta\varphi_{уст}(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s^2 W_{\Delta\varphi_0}(s)[\alpha_0/s + \alpha_1/s^2] = W_{\Delta\varphi_0}(0)\alpha_1.$$

Учитывая, что согласно (4) $W_{\Delta\varphi_0}(0) = 1/K_p$,

$$\Delta\varphi_{уст}(t) = \alpha_1/K_p,$$

т.е. в системе ФАП с астатизмом первого порядка при изменении с постоянной скоростью α_1 разности фаз $\alpha(t)$ поступающих напряжений $u_{п}(t)$ и $u_{вых}(t)$ возникает постоянная установившаяся скоростная ошибка, пропорциональная α_1 .

Ошибки, вызываемые второй и более высокими производными от $\alpha(t)$, в данной системе увеличиваются в течение времени существования этих производных.

Если разложить передаточную функцию $W_{\Delta\varphi_0}(s)$ в ряд по коэффициентам ошибки

$$W_{\Delta\varphi_0}(s) = D_0 + D_1s + D_2s^2 + \dots + D_ns^n, \quad (7)$$

сходящегося при $s < s_{гр}$, то переходя к оригиналу функции $\Delta\varphi(s) = W_{\Delta\varphi}(s)\alpha(s)$, получим (при нулевых начальных условиях)

$$\Delta\varphi(t) = D_0\alpha(t) + D_1 \frac{d\alpha(t)}{dt} + D_1 \frac{d^2\alpha(t)}{dt^2} + \dots, \quad (8)$$

где коэффициенты D_0, D_1, D_2, \dots носят названия коэффициентов ошибки.

Согласно методике Л.Г. Кинга, приведенной в [4] могут быть получены следующие выражения для коэффициентов ошибки

$$D_0 = \lim_{s \rightarrow 0} [W_{\Delta\varphi}(s)];$$

.....; (9)

$$D_n = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{s^n} \left[W_{\Delta\varphi}(s) - \sum_{l=0}^{l-1} D_l p^l \right].$$

Применяя соотношения (9) к передаточной функции системы ФАП, записанной в виде

$$W_{\Delta\varphi}(s) = \frac{D_{\Delta\varphi}(s)}{F_{\Delta\varphi}(s)} = \frac{d_0 + d_1 s + d_2 s^2 + \dots + d_n s^n}{n_0 + n_1 s + n_2 s^2 + \dots + n_n s^n}, \quad (10)$$

получим следующие коэффициенты для расчета коэффициентов ошибки

$$D_0 = \lim_{s \rightarrow 0} [W_{\Delta\varphi}(s)] = d_0 / n_0;$$

.....; (11)

$$D_n = \left(d_n - \sum_{l=0}^{l-1} D_l p^l \right).$$

Запишем передаточную функцию системы ФАП относительно ошибки, определяемую выражением (4) в виде

$$W_{\Delta\varphi}(s) = \frac{d_0 + d_1 s + d_2 s^2 + d_3 s^3}{n_0 + n_1 s + n_2 s^2 + n_3 s^3}, \quad (12)$$

где

$$\begin{aligned} d_0 &= 0; & d_1 &= 1; & d_2 &= T_\phi + T_{\text{УМ}}; & d_3 &= T_\phi T_{\text{УМ}}; \\ n_0 &= K_p; & n_1 &= 1; & n_2 &= d_2 = T_\phi + T_{\text{УМ}}; & n_3 &= d_3 = T_\phi T_{\text{УМ}}. \end{aligned}$$

Тогда значение коэффициентов ошибки

$$\begin{aligned} D_0 &= \frac{d_0}{n_0} = \frac{0}{K_p} = 0; & D_1 &= \frac{1}{n_0} (d_1 - D_0 n_1) = \frac{1}{K_p}; \\ D_2 &= \frac{1}{n_0} (d_2 - D_0 n_2 - D_1 n_1) = \frac{T_\phi + T_{\text{УМ}}}{K_p} - \frac{1}{K_p^2}; \\ D_3 &= \frac{1}{n_0} (d_3 - D_0 n_3 - D_1 n_2 - D_2 n_3) = \frac{T_\phi T_{\text{УМ}}}{K_p} - 2 \frac{T_\phi + T_{\text{УМ}}}{K_p} - \frac{1}{K_p^3}. \end{aligned} \quad (13)$$

Если задающее воздействие

$$\alpha(t) = \alpha_0 + \alpha_1 t + \alpha_2 t^2 + \dots + \alpha_r t^r,$$

то установившееся значение ошибки

$$\Delta\varphi_{уст}(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s^{\gamma-1} W_{\Delta\varphi_0}(s) \left(\frac{\alpha_0}{s} + \frac{\alpha_1}{s^2} + \frac{2' \alpha_2}{s^3} + \dots + \frac{r' \alpha_r}{s^{r+1}} \right), \quad (14)$$

где γ – порядок астатизма; $\lim_{s \rightarrow 0} W_{\Delta\varphi_0}(s) \neq 0$; $W_{\Delta\varphi_0}(s) = W_{\Delta\varphi_0}(s) s^\gamma$.

Из выражения (14) следует, что если $\gamma > r$, то $\Delta\varphi_{уст}(t) = 0$, т.е. если порядок астатизма системы ФАП больше, чем порядок r высшей производной задающего воздействия, то ошибка системы ФАП в установившемся режиме $W_{\Delta\varphi_0(0)} r' \alpha_r$ равна нулю. Если $\gamma < r$, то $\Delta\varphi_{уст}(t) = W_{\Delta\varphi_0}(0) r' \alpha_r$, т.е. если порядок астатизма системы ФАП равен порядку высшей производной задающего воздействия, то ошибка ее в установившемся режиме будет иметь определенное значение. Эта ошибка, как видно из выражения (14), будет вызвана только действием высшей производной задающего воздействия. Составляющие же ошибки от других производных задающего воздействия и начального значения скачка самого воздействия в этом случае равны нулю. Если $\gamma = r$, то $\Delta\varphi_{уст}(t) = \infty$, т.е. если порядок астатизма системы ФАП ниже, чем порядок высшей производной задающего воздействия, то ошибка системы с течением времени будет увеличиваться до бесконечности.

Как следует из изложенного выше для повышения точности системы ФАП в установившихся режимах необходимо повышать ее порядок астатизма. Поскольку система ФАП является астатической системой, то повышение порядка астатизма возможно одним из известных способов: использование изодромных корректирующих звеньев; применение масштабирования и неединичных обратных связей и др.

Список источников

1. Кибакин В.М. Основы ключевых методов усиления. – М.: Энергия, 1980. – 232 с.
2. Кибакин В.М. Основы теории и расчета транзисторных низкочастотных усилителей мощности. – М.: Радио и связь, 1988. – 240 с.
3. Андреев А.И., Бутенко Г.Г., Ивашко В.В. Анализ САУ РИП с управлением по отклонению // Наукові праці УДАЗ ім. О.С. Попова. – 1999. – № 1. – С. 59-63.
4. Зайцев Г.Ф., Стеклов В.К. Радиотехнические системы управления высокой точности. – К.: Техніка, 1988. – 208 с.