

Доцент, кандидат технических наук
Л. Н. ЩЕЛОВАНОВ, Е. М. ДОРОНИН

МОДЕЛИРОВАНИЕ НА ЦВМ ИМПУЛЬСНО-ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ

Система импульсно-фазовой автоподстройки частоты (ИФАПЧ) представляет собой замкнутую импульсную систему автоматического регулирования с переменными параметрами (рис. 1). Звеном с переменными параметрами является импульсно-фазовый дискриминатор. Вопросу исследования систем ИФАПЧ посвящен ряд работ [1, 2], в которых аналитическим путем найдены приближенные выражения для расчета процессов при некоторых типовых воздействиях. Основная трудность при выводе уравнения замкнутой системы ИФАПЧ заключается в сложности «сопряжения» звена с переменными параметрами с остальной частью системы. Приходится делать значительные приближения, а это приводит к понижению точности результатов исследования.

Весьма эффективно для исследования динамических процессов в системах ИФАПЧ может быть использован разностный метод [3]. С помощью этого метода находятся рекуррентные соотношения (математические модели звеньев), позволяющие определить выходные переменные звеньев при произвольном входном воздействии.

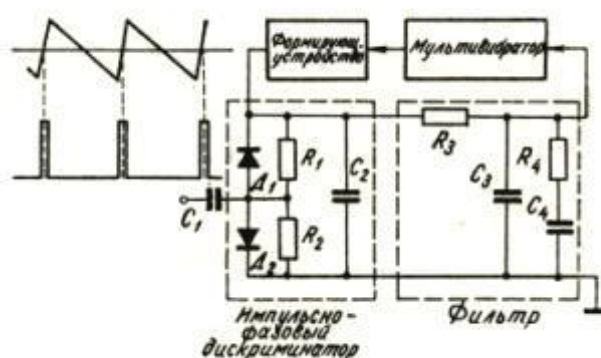
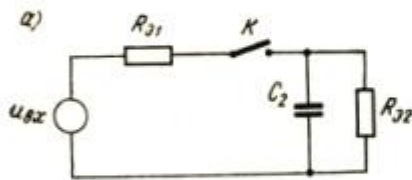


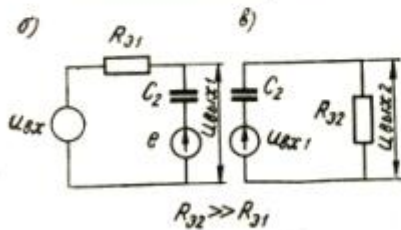
Рис. 1.

Рекуррентное соотношение импульсно-фазового дискриминатора

При поступлении импульса (замыкании ключа, рис. 2а) будет иметь место операторная схема (рис. 2б), и для выходной переменной операторное уравнение равно



$$U_{\text{вых1}}(p) = U_{\text{вх}}(p) \frac{p^{-1}}{T_1 + p^{-1}} + e(p) \frac{T_1}{T_1 + p^{-1}} \quad (1)$$



Подставляя в (1) $p^{-1} \approx \frac{T}{2} \cdot \frac{1+z^{-1}}{1-z^{-1}}$ [4],

находим

$$U_{\text{вых1}}(p) [(2T_1 + T) - (2T_1 - T)z^{-1}] = U_{\text{вх}}(p) [T(1+z^{-1})] + e(p) [2T_1(1-z^{-1})],$$

Рис. 2.

где $z = e^{pT}$.

Переходя от изображения к оригиналу, получаем рекуррентное соотношение

$$u_{\text{вых1}}[nT] = \frac{1}{2T_1 + T} \{ Tu_{\text{вх}}[nT] + Tu_{\text{вх}}[nT - T] + (2T_1 - T)u_{\text{вых1}}[nT - T] + 2T_1e[nT] - 2T_1e[nT - T] \} \text{ при } 0 < nT < \delta, \quad (2)$$

где $T = \frac{T_k}{N}$ (T_k — период ключевых импульсов, N — число выборок на один период);

$$T_1 = R_{21}C_2;$$

δ — длительность ключевых импульсов.

Если ввести безразмерные коэффициенты, то выражение (2) примет вид

$$u_{\text{вых1}}[n] = \frac{1}{A_1} \{ (u_{\text{вх}}[n] + u_{\text{вх}}[n-1]) + A_0 u_{\text{вых1}}[n-1] + 2\eta_1 e[n] - 2\eta_1 e[n-1] \}, \quad (3)$$

где

$$A_0 = 2\eta_1 - 1; \quad A_1 = 2\eta_1 + 1; \quad \eta_1 = \frac{T_1}{T}.$$

Входная переменная, фигурирующая в схеме замещения рис. 2, имеет физический смысл—напряжение. Это напряжение пропорционально разности фаз сравниваемых колебаний (синхроимпульсов и пилообразных импульсов мультивибратора):

$$u_{\text{вх}} = k (\theta_0 - \theta_{\text{вых}}) = k \theta_{\text{вх}}. \quad (4)$$

Коэффициент k зависит от размаха синхроимпульсов и крутизны пилообразного напряжения (рис. 1).

В паузе между синхроимпульсами (ключ разомкнут) в цепи рис. 2а происходит разряд конденсатора.

Согласно операторной схеме рис. 2в находим операторное уравнение

$$U_{\text{вых2}}(p) = U_{\text{вх1}}(p) \frac{T_2}{T_2 + p^{-1}}. \quad (5)$$

Подставив в (5) $p^{-1} \approx \frac{T}{2} \cdot \frac{1+z^{-1}}{1-z^{-1}}$, получим операторное уравнение эквивалентной импульсной цепи

$$B_1 U_{\text{вых2}}(p) = U_{\text{вх1}}(p) - U_{\text{вх1}}(p) z^{-1} + B_0 U_{\text{вых2}}(p) z^{-1}. \quad (6)$$

Переходя к оригиналу, определяем рекуррентное соотношение

$$u_{\text{вых2}}[n] = \frac{1}{B_1} (u_{\text{вх1}}[n] - u_{\text{вх1}}[n-1] + B_0 u_{\text{вых2}}[n-1]), \quad (7)$$

где $B_0 = 1 - \frac{1}{2\tau_{i2}}$; $B_1 = 1 + \frac{1}{2\tau_{i2}}$; $\tau_{i2} = \frac{T_2}{T}$; $T_2 = R_{э2} C_2$.

Рекуррентное соотношение пропорционально-интегрирующего фильтра

В соответствии со схемой пропорционально-интегрирующего фильтра (рис. 1) операторное уравнение фильтра имеет вид:

$$U_{\text{вых ф}}(p) = U_{\text{вх ф}}(p) \frac{p^{-2} + a_1 p^{-1}}{p^{-2} + b_1 p^{-1} + b_2}, \quad (8)$$

где $a_1 = R_4 C_4$; $b_1 = R_3 (C_3 + C_4) + R_4 C_4$; $b_2 = R_3 R_4 C_3 C_4$.

Находим уравнение эквивалентной импульсной цепи, для чего в (8) подставляем p^{-1} и $p^{-2} \approx \frac{T^2}{4} \left[\left(\frac{1+z^{-1}}{1-z^{-1}} \right)^2 - \frac{2}{3} \right]$ [4]:

$$\begin{aligned} D_2 U_{\text{вых ф}}(p) + D_1 U_{\text{вых ф}}(p) z^{-1} + D_0 U_{\text{вых ф}}(p) z^{-2} = \\ = C_2 U_{\text{вх ф}}(p) + C_1 U_{\text{вх ф}}(p) z^{-1} + C_0 U_{\text{вх ф}}(p) z^{-2}. \end{aligned} \quad (9)$$

Переходя к оригиналу, получаем рекуррентное соотношение

$$u_{\text{вых ф}}[n] = \frac{1}{D_2} (C_2 u_{\text{вх ф}}[n] + C_1 u_{\text{вх ф}}[n-1] + C_0 u_{\text{вх ф}}[n-2] - D_1 u_{\text{вых ф}}[n-1] - D_0 u_{\text{вых ф}}[n-2]), \quad (10)$$

где $C_0 = \frac{1}{12} - \frac{1}{2} k_1 k_2 \eta_3$; $C_1 = \frac{5}{6}$; $C_2 = \frac{1}{12} + \frac{1}{2} k_1 k_2 \eta_3$;

$$D_0 = \frac{1}{12} - \frac{1}{2} \eta_3 (1 + k_2 + k_1 k_2) + \eta_3^2 k_1 k_2; \quad D_1 = \frac{5}{6} - 2\eta_3^2 k_1 k_2;$$

$$D_2 = \frac{1}{12} + \frac{1}{2} \eta_3 (1 + k_2 + k_1 k_2) + \eta_3^2 k_1 k_2;$$

$$k_1 = \frac{R_4}{R_3}; \quad k_2 = \frac{C_4}{C_3}; \quad \eta_3 = \frac{T_3}{T}; \quad T_3 = R_3 C_3.$$

Алгоритм объекта регулирования (мультивибратора)

Для объекта регулирования (мультивибратора) входной переменной является напряжение, подаваемое с выхода фильтра, а выходной переменной — изменение фазы. Можно считать, что частота мультивибратора линейно зависит от входного напряжения:

$$\omega = k_m u. \quad (11)$$

В свою очередь, частота и фаза связаны соотношением:

$$\omega = \frac{d\theta}{dt}, \quad \text{или} \quad k_m u = \frac{d\theta}{dt}. \quad (12)$$

Преобразуя (12) по Лапласу, получаем:

$$k_m U(p) = p\theta(p), \quad \text{или} \quad \theta(p) = k_m p^{-1} U(p). \quad (13)$$

Уравнение эквивалентной импульсной цепи имеет вид:

$$\theta(p)(1 - z^{-1}) = k_m \frac{T}{2} U(p) \cdot (1 + z^{-1}). \quad (14)$$

Переходя к оригиналу, находим рекуррентное соотношение

$$\theta_{\text{вых}}[n] = \frac{1}{2\eta_4} (u_{\text{вх м}}[n] + u_{\text{вх м}}[n-1]) + \theta_{\text{вых}}[n-1], \quad (15)$$

где $\eta_4 = \frac{1}{k_m T}$.

Алгоритм замкнутой системы ИФАПЧ

Изобразим алгоритм замкнутой системы ИФАПЧ в виде логической схемы, содержащей алгоритмы отдельных звеньев и отражающей связь между ними (рис. 3).

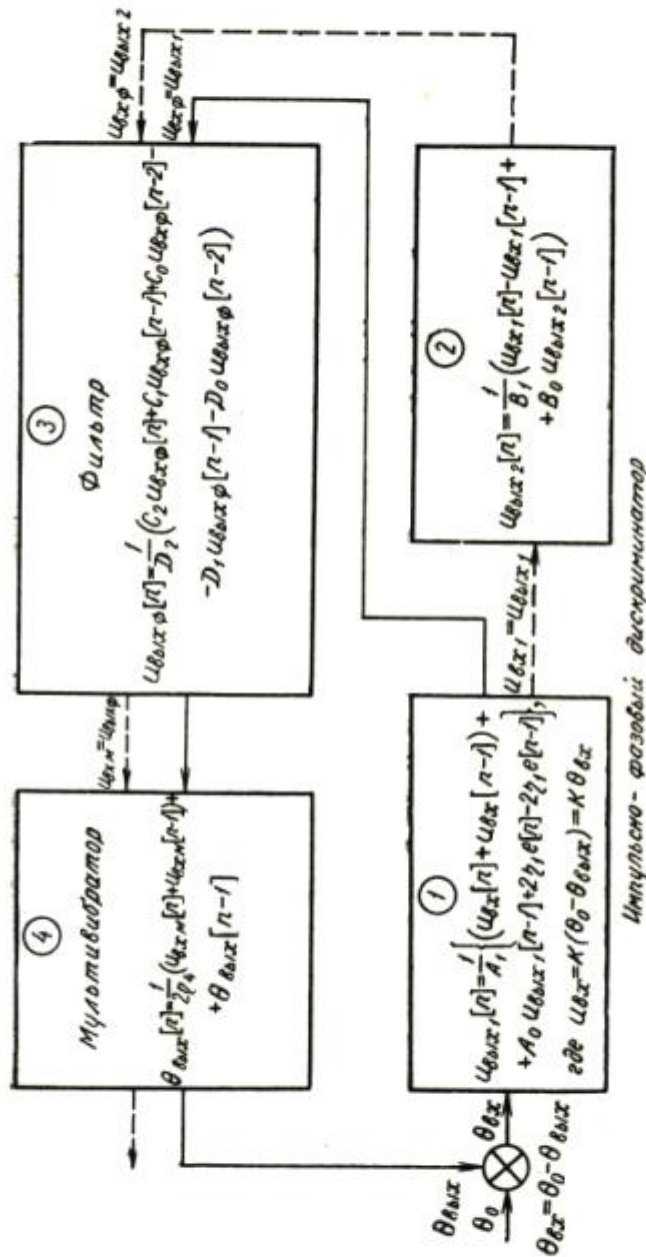


Рис. 3.

Во время действия синхроимпульсов (ключ замкнут) образуется замкнутый контур, состоящий из 1, 3 и 4-го звеньев (соединены сплошной линией), а во время паузы имеет место разомкнутый контур, состоящий из 2, 3 и 4-го звеньев (пунктирная линия).

Входной переменной второго звена являются значения выходной величины 1-го звена в конце соответствующих импульсов.

В качестве начальных условий $e[n]$ и $e[n-1]$ для рекуррентного соотношения 1-го звена берутся значения выходной переменной 2-го звена в конце соответствующих пауз.

Входной переменной 3-го звена являются поочередно поступающие выходные величины 1-го (во время действия импульсов) и 2-го (во время действия паузы) звеньев.

Остальные переходы, которые следует производить при расчете процессов по логической схеме рис. 3, очевидны. Возмущающим воздействием θ_0 задаются, оно может быть произвольного вида. Между воздействием θ_0 , выходной переменной $\theta_{\text{вых}}$ и входной переменной $\theta_{\text{вх}}$ существует зависимость

$$\theta_{\text{вх}} = \theta_0 - \theta_{\text{вых}}. \quad (16)$$

Предложенный метод позволяет одновременно производить съем переменных в различных точках сложной многозвенной системы, т. е. можно проследить процесс, происходящий на различных ее участках.

Исследование процессов в системе ИФАПЧ при различных возмущениях

Рассмотренным выше методом на ЦВМ «Минск-22» были исследованы процессы, происходящие в ИФАПЧ строчной развертки телевизионного приемника при двух возмущениях:

- 1) скачкообразном изменении фазы;
- 2) скачкообразном изменении частоты.

Число выборок на один период синхросигнала строк $N=400$. Из них на синхроимпульс было взято 20, а на паузу 380 выборок. Такое распределение выборок произведено на основании того, что синхроимпульс после селекции составляет приблизительно 5% периода строк.

Скачкообразное изменение фазы

Скачкообразному изменению фазы соответствует мгновенный сдвиг сравниваемых по фазе колебаний. Математически это возмущение запишется в виде

$$\theta_0 = 1 [t].$$

Начиная с $n=0$ во время действия синхроимпульсов будет существовать зависимость

$$\theta_{\text{вх}} = 1 - \theta_{\text{вых}}.$$

На рис. 4 изображены графики изменения напряжения на выходе ключевого звена и фильтра, а также зависимость изменения фазы колебаний мультивибратора $\theta_{\text{вых}}$.

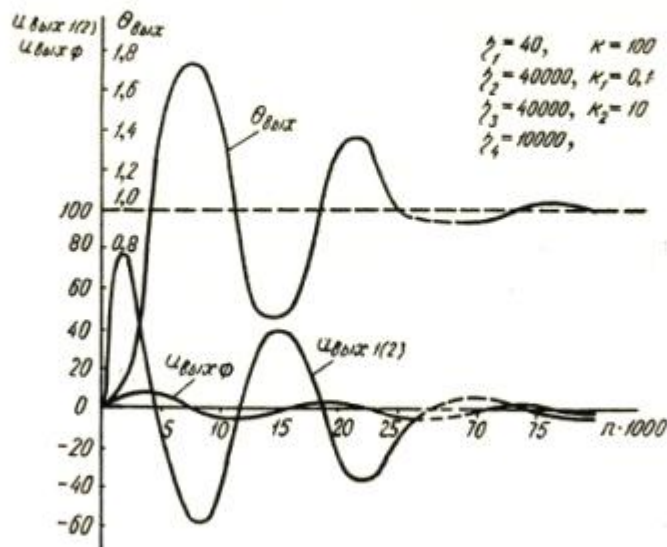


Рис. 4.

Скачкообразное изменение частоты

При скачкообразном изменении частоты сдвиг сравниваемых по фазе колебаний линейно возрастает с момента начала возмущения:

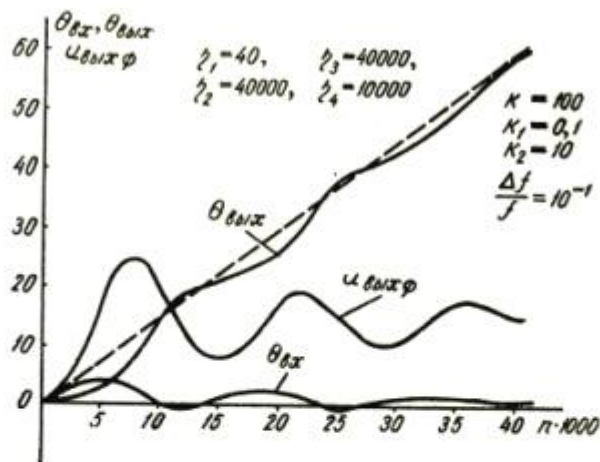


Рис. 5.

$$\theta_0 = k_0 n,$$

где $k_0 = \frac{2\pi}{N} \cdot \frac{\Delta f}{f}$;

$\frac{\Delta f}{f}$ — взаимная относительная расстройка частот мультивибратора и синхроимпульсов.

Тогда во время действия синхроимпульсов

$$\theta_{\text{вх}} = k_0 n - \theta_{\text{вых}}.$$

Эпюры, иллюстрирующие поведение системы при данном виде возмущения, представлены на рис. 5.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. Н. Щелованов. Приближенные методы исследования электронных схем корректирования фазы с переменными параметрами. Труды ВКИАС, № 52, 1956.
2. Л. Н. Щелованов. Исследование автоматических регулировок в телевизионном приемнике. «Техника кино и телевидения» № 6, 1967.
3. Я. З. Цыпкин. Теория линейных импульсных систем. Физматгиз, 1963.
4. Л. Н. Щелованов. О применении дискретного преобразования Лапласа для анализа процессов в телевизионной системе. Труды ВАС, № 123, 1969.

Статья поступила
в редакцию
11 мая 1970 года