

В. В. ЕМЕЛЬЯНОВ, О. И. ГУБЕРНАТОРОВ, канд. техн. наук

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННЫХ КОЛЕБАНИЙ

В [1] для получения фазоманипулированных колебаний предлагается использовать принцип цифровых синтезаторов частот. В данной работе приводится математическое описание принципа формирования фазоманипулированных (ФМ) колебаний.

Система формирования ФМ колебаний (рис. 1) относится к классу дискретных импульсных систем автоматического управления. На основании выполнения соотношений

$$\begin{aligned}\omega_n &\geq 3\omega_{\text{нп}}, \\ \omega_f &\leq \omega_n - 2\omega_{\text{нп}},\end{aligned}\quad (1)$$

представляющих собой известную теорему Котельникова—Шеннона применительно к системам автоматического управления с ШИМ или ВИМ [2], система формирования рассматривается как непрерывная система авторегулирования. Здесь ω_n — частота повторения импульсов на выходе импульсного элемента:

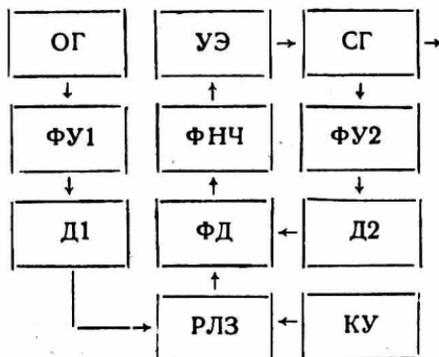


Рис. 1. Функциональная схема системы формирования ФМ сигналов: ОГ — опорный генератор; СГ — синхронизируемый генератор; ФУ1, ФУ2 — формирующие устройства; Д1, Д2 — делители частоты; РЛЗ — регулируемая линия задержки; ФД — фазовый детектор; ФНЧ — фильтр нижних частот; УЭ — управляющий элемент; КУ — кодирующее устройство.

$\omega_{\text{нп}}$ — полоса пропускания непрерывной части системы; ω_f — наибольшая частота внешнего воздействия, приведенного ко входу фазового детектора.

В рассматриваемой системе $\omega_{\text{нп}}$ определяется практически амплитудно-частотной характеристикой фильтра нижних частот.

Разность фаз входных сигналов фазового детектора не превышает значения 2π , что позволяет анализировать систему формирования как линейную систему авторегулирования. Структурная схема системы формирования ФМ сигналов представлена на рис. 2. В качестве фазового детектора (ФД) используется триггер с раздельным запуском, длительность импульсов на вы-

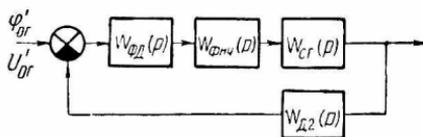


Рис. 2. Структурная схема системы.

ходе которого определяется разностью фаз сигналов, подаваемых на его входы. Постоянная составляющая напряжения на выходе ФД может быть выражена в функции разности фаз (временных сдвигов) [3]:

$$U_{\text{фд}} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\varphi} A d\varphi = \frac{A}{2\pi} \varphi = K_{\text{фд}} \varphi,$$

где A — амплитуда импульсов на выходе ФД;
 $\varphi = \varphi_{\text{ог}} - \varphi_{\text{сг}}$ — разность фаз импульсов опорного и синхронизируемого генераторов;

$$K_{\text{фд}} = \frac{A}{2\pi}.$$

Так как напряжение на выходе открытого транзистора не равно нулю, к постоянной составляющей $U'_{\text{фд}}$ добавляется остаточное напряжение на коллекторе $U'_{\text{фд-}}$ и полная постоянная составляющая на выходе ФД определится выражением

$$U_{\text{фд}} = U'_{\text{фд-}} + U'_{\text{фд}} = K_{\text{фд}} \varphi + U'_{\text{фд-}}. \quad (2)$$

Выражение (2) справедливо для изменений фазы в пределах от 0 до 2π . В этих пределах фазовый детектор можно считать линейным. Для линейного звена справедливо соотношение

$$\Delta U_{\text{фд}} = K_{\text{фд}} \Delta \varphi.$$

Инерционностью ФД можно пренебречь, ибо она значительно меньше инерционности ФНЧ. При таком предположении уравнение динамики ФД по форме совпадает с уравнением статики

$$U_{\text{фд-}}(t) = K_{\text{фд}} \varphi(t). \quad (3)$$

Считая входным сигналом ФД разность фаз между импульсами опорного и синхронизируемого генераторов, после преобразования выражения (3) по Лапласу получаем выражение для передаточной функции ФД:

$$W_{\text{ФД}}(p) = \frac{U_{\text{ФД}}(p)}{\varphi(p)} = K_{\text{ФД}}.$$

Фильтр нижних частот предназначен для выделения постоянной составляющей напряжения на выходе ФД; он определяет быстродействие систем автоматического управления. Для нормальной работы необходимо, чтобы фильтр обладал максимальным затуханием на частоте сравнения и ее гармониках. Обозначим передаточную функцию ФНЧ через $W_{\text{ФНЧ}}(p)$, не конкретизуя в данном случае тип фильтра. Это позволит в дальнейшем, имея общую передаточную функцию системы, оценить качества регулирования для различных типов ФНЧ.

Фаза синхронизируемого генератора (СГ) регулируется при помощи управляющего элемента (УЭ) за счет изменения вносимой им реактивности. Поэтому динамические свойства СГ будем рассматривать совместно с УЭ. В качестве УЭ наиболее часто используется управляемая полупроводниковая емкость. Реальная характеристика управляемого генератора нелинейна за счет нелинейности характеристики УЭ, но может быть линеаризована вблизи некоторой рабочей точки с координатами $(e_{y0}, \omega_{\text{ср}0})$. В этом случае линеаризованное уравнение статики СГ имеет вид

$$\Delta\omega_{\text{ср}} = S_{\text{ср}} \Delta e_y,$$

где

$$\Delta\omega_{\text{ср}} = \omega_{\text{ср}} - \omega_{\text{ср}0},$$

$$\Delta e_y = e_y - e_{y0},$$

$S_{\text{ср}}$ — крутизна перестройки СГ в рабочей точке.

Считаем, что СГ имеет малую инерционность. Тогда уравнение динамики СГ совпадает с уравнением статики:

$$\omega_{\text{ср}}(t) = S_{\text{ср}} e_y(t).$$

Фаза синхронизируемого генератора определится выражением

$$\varphi_{\text{ср}}(t) = \int_0^t \omega_{\text{ср}}(t) dt = S_{\text{ср}} \int_0^t e_y(t) dt$$

или в преобразованиях Лапласа

$$\varphi_{\text{ср}}(p) = \frac{S_{\text{ср}} E_y(p)}{p}.$$

Передаточная функция СГ по фазе имеет вид

$$W_{\text{ср}}(p) = \frac{S_{\text{ср}}}{p}.$$

Хотя формирующие устройства являются устройствами порогового типа, срабатывающими при определенном уровне сигнала, будем считать, что вносимая задержка за счет этого достаточно мала и может быть сведена до минимума за счет увеличения амплитуды входного сигнала. Вследствие этого передаточная функция ФУ

$$W_{\text{фУ}}(p) = 1.$$

В канале СГ и ОГ применяются делители частоты с постоянными коэффициентами деления, собранные на триггерных ячейках. В настоящее время разработаны делители частоты, обладающие высоким быстродействием, в силу чего их можно считать безынерционными элементами. Тогда передаточная функция делителя частоты равна

$$W_{\text{д2}}(p) = \frac{1}{K_{\text{д2}}},$$

где $K_{\text{д2}}$ — коэффициент деления делителя Д2.

Имея выражение для передаточных функций отдельных звеньев, можно получить передаточную функцию системы в целом:

$$W(p) = \frac{K_1 W_{\text{фнч}}(p)}{p + K_2 W_{\text{фнч}}(p)}, \quad (4)$$

где $K_1 = K_{\text{фд}} S_{\text{сг}}$, $K_2 = \frac{K_1}{K_{\text{д2}}}$.

Полученное выражение (4) позволяет произвести оценку качества регулирования системы (оценить быстродействие системы) и определить закон трансформации изменения фазы ОГ на выход СГ. Из выражения (4) определим фазу СГ:

$$\varphi_{\text{сг}}(p) = \varphi'_{\text{ог}}(p) \frac{K_1 W_{\text{фнч}}(p)}{p + K_2 W_{\text{фнч}}(p)}, \quad (5)$$

где $\varphi'_{\text{ог}}(p) = \frac{\varphi_{\text{ог}}(p)}{K_{\text{д1}}}$ — фаза опорного генератора, приведенная ко входу ФД.

Уравнение (5) справедливо и для конечных приращений. Тогда

$$\Delta\varphi_{\text{сг}}(p) = \Delta\varphi'_{\text{ог}}(p) \frac{K_1 W_{\text{фнч}}(p)}{p + K_2 W_{\text{фнч}}(p)}.$$

Если изменить фазу импульсной последовательности канала ОГ скачком на величину $\Delta\varphi'_{\text{ог}}$, то

$$\Delta\varphi_{\text{сг}}(p) = \frac{\Delta\varphi'_{\text{ог}}}{p} \cdot \frac{K_1 W_{\text{фнч}}(p)}{p + K_2 W_{\text{фнч}}(p)}. \quad (6)$$

Положим, что коэффициент передачи ФНЧ в области возможных изменений фазы равен единице, а вносимые им фазовые сдвиги нулю. Тогда $W_{\text{ФНЧ}}(p) = 1$ и выражение (6) будет иметь вид

$$\Delta\varphi_{\text{сг}}(p) = \frac{K_1 \Delta\varphi'_{\text{ог}}}{p(p + K_2)}.$$

Применив, согласно [4], обратное преобразование Лапласа и теорему о вычетах, имеем

$$\Delta\varphi_{\text{сг}}(t) = K_1 \Delta\varphi'_{\text{ог}} \Sigma \text{res}, \quad (7)$$

где Σres — сумма вычетов в полюсах подынтегральной функции.

Полюса подынтегральной функции имеют место при

$$p_1 = 0, \quad p_2 = -K_2.$$

Соответственно вычеты равны

$$\text{res}_1 = \frac{1}{K_2};$$

$$\text{res}_2 = -\frac{1}{K_2} e^{-K_2 t}. \quad (8)$$

Подставив значения вычетов из (8) в (7), имеем

$$\Delta\varphi_{\text{сг}}(t) = \Delta\varphi'_{\text{ог}} \frac{K_1}{K_2} (1 - e^{-K_2 t}).$$

При изменении фазы импульсной последовательности канала ОГ с помощью управляемой линии задержки по закону

$$\Delta\varphi'_{\text{ог}} = f[M(t)],$$

где $M(t)$ — функция, управляющая линией задержки, изменение приращения фазы СГ происходит, согласно выражению

$$\Delta\varphi_{\text{сг}}(t) = \Delta\varphi'_{\text{ог}} [M(t)] \frac{K_1}{K_2} (1 - e^{-K_2 t}). \quad (9)$$

Выражение (9) подтверждает, что закон изменения времени задержки трансформируется системой в закон изменения фазы СГ.

Проведенный математический анализ показывает, что рассматриваемая система позволяет формировать фазоманипулируемые колебания с однократной и многократной фазовыми манипуляциями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Емельянов В. В., Зеленин А. Н., Губернаторов О. И. Устройство формирования высокостабильных фазоманипулированных колебаний. Авт. свид. № 372671. «Бюллетень изобретений», № 13, 1973.
2. Юревич Е. И. Теория автоматического управления. М., «Энергия», 1969. 320 с.
3. Губернаторов О. И., Пивовар В. Т. К выбору и расчету некоторых параметров синтезаторов частот.—«Изв. вузов. Радиоэлектроника», 1969, 12, № 5, с. 489—493.
4. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. М., «Советское радио», 1963. 450 с.