

А. Б. КМЕТЬ, М. А. РАКОВ

(Львов)

РАДИОИМПУЛЬСНЫЕ МНОГОУСТОЙЧИВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Среди различных типов многоустойчивых элементов весьма перспективными являются элементы, использующие кратное преобразование частоты и связанные с этим явлением преобразования фазовых сдвигов. Эти элементы наряду с традиционным использованием в качестве счетчиков импульсов могут найти эффективное применение при разработке статистических анализаторов, автоматически вычисляющих средние характеристики случайных процессов, законы распределений, функции корреляции и т. п.

В литературе [1—4] широко освещены многоустойчивые элементы, использующие преобразование спектров видеоимпульсов. Между тем большой практический интерес представляют и элементы, в которых используется механизм радиоимпульсного преобразования частоты и которые при прочих равных возможностях могут обеспечивать значительно более высокие энергетические показатели. Назовем первые видеоимпульсными, а вторые радиоимпульсными многоустойчивыми элементами. В дальнейшем с целью упрощения изложения будем писать вместо «видеоимпульсные многоустойчивые элементы» и «радиоимпульсные многоустойчивые элементы» просто «видеоимпульсные и радиоимпульсные элементы» соответственно.

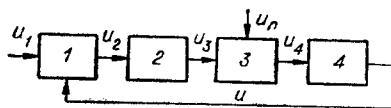


Рис. 1.

Блок-схема радиоимпульсных элементов совпадает с блок-схемой видеоимпульсных (рис. 1), на которой, однако, для радиоимпульсных элементов справедливы обозначения: 1 — модулятор; 2 — радиоимпульсный генератор; 3 — фазовый детектор; 4 — фильтр нижних частот. Характерным для этих элементов является наличие радиоимпульсного генератора, выходное напряжение которого имеет вид прямоугольных радиоимпульсов с частотой заполнения ω_0 (рис. 2). Выражение такого радиоимпульсного процесса может быть записано

$$\begin{cases} \sum_{-\infty}^{\infty} \cos [\omega_0 (t - k T_1) + \varphi_{0, k}] & \text{для } k T_1 + \frac{\varphi}{\omega_1} \leq t \leq k T_1 + \frac{\varphi}{\omega_1} + \tau; \\ 0 & \text{для } k T_1 + \frac{\varphi}{\omega_1} + \tau < t < (k+1) T_1 + \frac{\varphi}{\omega_1}. \end{cases} \quad (1)$$

При использовании радиоимпульсного генератора начальные фазы отдельных импульсов $\varphi_{0, k}$ одинаковы и постоянны (в частности, равны нулю). В этом случае в соответствии с [5] выражение спектра радиоимпульсного процесса, представленного (1), будет иметь вид

$$u_3 = \sum_{r=0}^{\infty} U_r \cos r (\omega_1 t + \varphi), \quad (2)$$

где

$$U_r = U \frac{\tau}{T_1} \frac{\sin (\omega_0 - r \omega_1) \tau / 2}{(\omega_0 - r \omega_1) \tau / 2}. \quad (3)$$

Рассмотрев это выражение, нетрудно видеть, что мы имеем здесь умножение частоты следования радиоимпульсов ω_1 со всеми сопутствующими эффектами, в том числе — умножением исходного фазового сдвига и периодической зависимостью амплитуды r -й гармоники от длительности радиоимпульса. Указанное обстоятельство и позволяет реализовать частотный, широтный и фазовый радиоимпульсные элементы. Вместе с тем, поскольку энергия спектра радиоимпульсной последовательности группируется вблизи частоты заполнения, здесь оказывается возможным существенно повысить эффективность преобразования частоты, что и отличает указанные элементы.

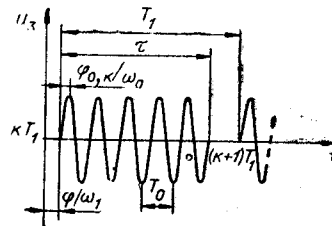


Рис. 2.

Запишем уравнения отдельных звеньев, предварительно обозначив обобщенный динамический признак (фаза, частота следования, длительность радиоимпульсов) через Θ : 1) $\Theta' = Su$ (модулятор); 2) $\Theta = K_2 \Theta'$ (радиоимпульсный генератор) (здесь и в дальнейшем будем считать радиоимпульсный генератор безынерционным звеном, так что $K_2 = 1$ и $\Theta' = \Theta$); 3) $u_4 = K_3 F(\Theta)$ (фазовый детектор); 4) $u = \frac{K_4}{T_{\Phi p} + 1} u_4$ (фильтр нижних частот).

Исключая промежуточные переменные, можем записать полное уравнение для радиоимпульсных элементов

$$(T_{\Phi p} + 1) \Theta = KF(\Theta). \quad (4)$$

Соответственно уравнение для определения стационарных значений Θ будет иметь вид

$$\Theta = KF(\Theta), \quad (5)$$

где $K = SK_3 K_4$, а $F(\Theta)$ — характеристика, связывающая постоянную составляющую напряжения на выходе фазового детектора с величиной обобщенного динамического признака Θ .

Для получения этой характеристики воспользуемся представлением фазового детектора в виде умножающего звена. Произведем перемножение спектра радиоимпульсного процесса (2) на спектр

$$u_n = \sum_{s=0}^{\infty} U_s \cos s \omega_2 t,$$

где для практически важного случая импульсов прямоугольной формы

$$U_s = \frac{2 U_n}{\pi s} \sin \pi s \frac{\tau_n}{T_2}, \quad (6)$$

найдем

$$u_3 u_n = \frac{1}{2} \sum_{r=0}^{\infty} \sum_{s=0}^{\infty} U_r U_s \{ \cos [r (\omega_1 t + \varphi) + s \omega_2 t] + \\ + \cos [r (\omega_1 t + \varphi) - s \omega_2 t] \}. \quad (7)$$

Очевидно, что для получения многогорбой зависимости необходимо наложить условие, связывающее частоты сигналов возбуждения u_1 и u_n : $\omega_1 = \frac{1}{n} \omega_2$.

Применяя это условие к (7), получим

$$u_3 u_n = \frac{1}{2} \sum_{r=0}^{\infty} \sum_{s=0}^{\infty} U_r U_s \{ \cos [(r + sn) \omega_1 t + r \varphi] + \\ + \cos [(r - sn) \omega_1 t + r \varphi] \},$$

откуда можно записать выражение для постоянной составляющей

$$F(\Theta) = \frac{1}{2} \sum_{s=0}^{\infty} U_{sn} U_s \cos n s \varphi. \quad (8)$$

Перейдем далее к конкретным типам элементов, различающимся по динамическому признаку. Остановимся в первую очередь на основных соотношениях, характерных для фазового радиоимпульсного элемента [6]. С этой целью положим $\Theta = \varphi$ и $F(\Theta) = F(\varphi)$. Учитывая, что при $\omega_0 \approx \omega_2$ энергия спектра радиоимпульсов будет группироваться вблизи первой гармоники частоты возбуждения ω_2 , величина суммы (8) будет определяться членом с $s=1$, так что окончательно запишем

$$F(\varphi) = \frac{1}{2} U_n U_1 \cos n \varphi. \quad (9)$$

После подстановки этого выражения в (4) и (5) найдем

$$(T_{\Phi} p + 1) \varphi = A \cos n \varphi; \quad \varphi = A \cos n \varphi, \quad (10)$$

где

$$A = \frac{K}{2} U_n U_1; \quad U_n = U \frac{\tau}{T_1} \frac{\sin (\omega_0 - n \omega_1) \tau / 2}{(\omega_0 - n \omega_1) \tau / 2}; \quad U_1 = \frac{2 U_n}{\pi} \sin \pi \frac{\tau_n}{T_2}.$$

Приведенные выше соотношения позволяют полностью описать процессы в фазовом радиоимпульсном элементе.

Рассмотрим теперь случай широтного радиоимпульсного элемента [7]. В этом случае $\Theta = \tau$ и $F(\Theta) = F(\tau)$. Кроме того, для широтного элемента нас не интересует зависимость u_3 от фазы, и поэтому можно положить φ равным нулю:

$$F(\tau) = \frac{1}{2} \sum_{s=0}^{\infty} U_{sn} U_s. \quad (11)$$

Рассматривая выражение (3), где $r = sn$, нетрудно прийти к выводу о том, что в широтном радиоимпульсном элементе образование многогорбой характеристики может иметь место только при наличии некоторой расстройки между частотой ω_2 и частотой заполнения радиоимпульса ω_0 . Необходимость такой расстройки приводит к тому, что в выражении (11) мы уже не можем пренебрегать всеми членами суммы, кроме одного (подобно тому, как это было выполнено для фазового радиоимпульсного элемента). По этой причине функция $F(\tau)$ имеет вид

$$F(\tau) = \frac{U U_n}{\pi T_1} \tau \sum_{s=0}^{\infty} \frac{1}{s} \frac{\sin(\omega_0 - sn\omega_1)\tau/2}{(\omega_0 - sn\omega_1)\tau/2} \sin \pi s \frac{\tau_n}{T_2}. \quad (12)$$

Подставляя это выражение в (4) и (5), можно получить уравнения динамики и статики широтного радиоимпульсного элемента. Очевидно, при отсутствии расстройки зависимость $F(\tau)$ перестает быть многогорбой и превращается в линейную. С другой стороны, при наличии такой расстройки наблюдается зависимость числа максимумов многогорбой характеристики от ее величины, причем число этих максимумов увеличивается с увеличением расстройки и в пределе стремится к n . В то же время величина постоянной составляющей, определяющая размах многогорбой характеристики, уменьшается с ростом расстройки, стремясь в пределе к величине, соответствующей видеоимпульсному элементу.

Таким образом, в данном элементе не проявляются в полной мере основные достоинства радиоимпульсных элементов — независимость числа состояний от параметров и улучшенные энергетические соотношения.

Для частотного радиоимпульсного элемента [8] положим $\Theta = T_1$ и $F(\Theta) = F(T_1)$. При этом, однако, будем иметь в виду, что для частотного радиоимпульсного элемента, в отличие от фазового и широтного, величина n уже не является неизменной. Кроме того, при рассмотрении частотного элемента основной практический интерес представляет случай, когда сигнал возбуждения u_n является гармоническим, т. е. $s=1$, $U_s = U_1$ и $r=n$. Тогда из (7) и (8) имеем

$$F(T_1) = \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{\infty} U_n U_1 \cos n \varphi, \quad (13)$$

или, используя (3), окончательно

$$F(T_1) = U U_1 \frac{1}{T_1} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sin\left(\omega_0 - n \frac{2\pi}{T_1}\right) \tau/2}{\left(\omega_0 - n \frac{2\pi}{T_1}\right)} \cos n \varphi. \quad (14)$$

Уравнения частотного радиоимпульсного элемента получаем при подстановке (14) в (4) и (5).

Нетрудно видеть, что частотный радиоимпульсный элемент может работать только на субгармониках частоты возбуждения. Выходное напряжение частотного модулятора в нем имеет вид прямоугольных импульсов, при помощи которых запускается радиоимпульсный генератор. Радиоимпульсы на выходе последнего имеют частоту следования, определяемую частотой модулятора, и частоту заполнения, близкую к частоте возбуждения элемента. В результате на фазовый детектор поступает частота, являющаяся n -й гармоникой от n -й субгармоники частоты возбуждения элемента ω_2 , т. е., по существу, в каждом случае — первой гармоникой частоты возбуждения.

Сравнение энергетических показателей видеоимпульсного и радиоимпульсного элементов производилось для фазового элемента, питаемого опорными напряжениями с частотами $\omega_1=10$ кГц, $\omega_2=100$ кГц. При исследовании схем элементов с разомкнутой обратной связью из сопоставления амплитуд многогорбой характеристики на выходе фильтра установлено, что в радиоимпульсном элементе амплитуда многогорбой характеристики в меньшей степени зависит от нагрузки (кривые 1 и 2 на рис. 3).

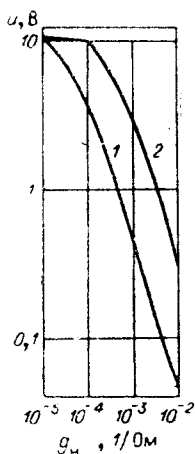


Рис. 3.

Сопоставление замкнутых схем видеоимпульсного и радиоимпульсного элементов показало, что нагрузочная способность последнего в n раз превышает нагрузочную способность видеоимпульсного элемента при условии, что длительность радиоимпульсов τ составляет 0,9 от периода их следования T_1 . В общем случае для $\tau \leq 0,9 T_1$ эта величина равна $\frac{T_1}{T_1 - \tau}$ и для $\tau \gg 0,9 T_1$ равна n .

Коэффициент обратной связи в схеме был выбран таким образом, чтобы использовать всю амплитуду многогорбой характеристики. Такой элемент имеет максимально возможные расстояния между уровнями напряжения, соответствующими его состояниям, что довольно часто требуется на практике. С другой стороны, вследствие влияния нагрузки на амплитуду многогорбой характеристики в этом случае элементы становятся критичными к нагрузке. Для видеоимпульсного элемента допустимой оказалась нагрузка 100 кОм, в то время как радиоимпульсный элемент сохранял все 10 устойчивых состояний при нагрузке 10 кОм. Изменив коэффициент обратной связи, можно сильно увеличить нагрузочную способность обоих элементов; соотношение между предельными нагрузками сохраняется.

Эксперимент подтвердил, что при сохранении прочих равных показателей в радиоимпульсных элементах достигается значительный энергетический выигрыш, что особенно важно для построения элементов с большим количеством устойчивых состояний.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. С. Верховцев, М. А. Раков. Многоустойчивый элемент политрон.— Приборостроение, 1966, № 5.
2. В. С. Верховцев, М. А. Раков. Многоустойчивые элементы с широтным и фазовым динамическими признаками.— Приборы и системы управления, 1969, № 8.
3. В. С. Верховцев, М. А. Раков. Широтно-импульсный многоустойчивый элемент.— В сб. «Отбор и передача информации», вып. 21. Киев, «Наукова думка», 1969.
4. В. С. Верховцев, М. А. Раков. Многоустойчивый элемент фазоимпульсной модуляции. В сб. «Отбор и передача информации», вып. 21. Киев, «Наукова думка», 1969.
5. В. И. Григулевич, И. Я. Иммореев. Радиоимпульсные преобразователи частоты. М., «Советское радио», 1966.
6. М. А. Раков. Фазо-радиоимпульсный многоустойчивый элемент. Авторское свидетельство № 228720.— ИПОТЗ, 1968, № 32.
7. М. А. Раков. Широтно-радиоимпульсный многоустойчивый элемент. Авторское свидетельство № 228078.— ИПОТЗ, 1968, № 31.
8. В. С. Верховцев, М. А. Раков. Частотный многоустойчивый элемент. Авторское свидетельство № 248338.— ОИПОТЗ, 1969, № 23.

Поступила в редакцию
8 апреля 1970 г.