

В. Н. АЛЕХИН
(Москва)

ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ ПОСТРОЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ

Основной задачей, возникающей при построении функциональных преобразователей напряжения в код, является создание генераторов, воспроизводящих в общем случае произвольную функцию напряжения от времени. Для этой цели может быть использована аппроксимация исходной функции специальным экспоненциальным полиномом*.

В данной статье рассматривается воспроизведение специального экспоненциального полинома второй степени с помощью двухзвенной RC-цепи без применения суммирующих схем. Специальный экспоненциальный полином второй степени имеет вид

$$U^*(t) = C_0^* + C_1^* e^{-\frac{t}{\tau}} + C_2^* e^{-2\frac{t}{\tau}} \quad (\tau > 0). \quad (1)$$

Изображение по Лапласу, соответствующее (1), описывается выражением

$$F(p) = \frac{B_0 p^2 + B_1 p + B_2}{p [p^2 + (T_1 + T_2)p + T_1 T_2]}, \quad (2)$$

где

$$B_0 = C_0^* + C_1^* + C_2^*, \quad B_1 = C_0^* (T_1 + T_2) + C_1^* T_2 + C_2^* T_1; \quad B_2 = T_1 T_2 C_0^*;$$

$$T_1 = \frac{1}{\tau}; \quad T_2 = \frac{2}{\tau}.$$

На рис. 1, а представлена принципиальная схема RC-цепи, предназначенная для формирования (1). Схема действует следующим образом. В исходном состоянии

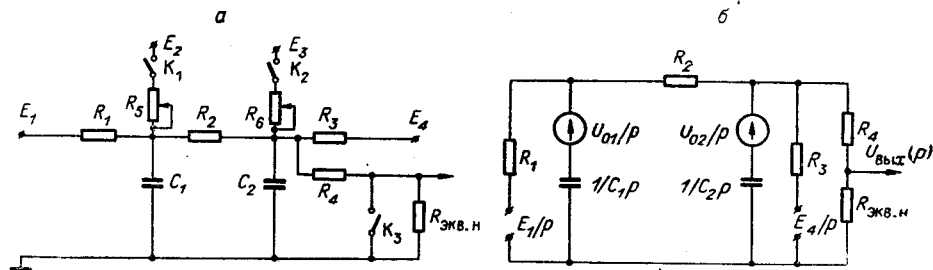


Рис. 1. Схема двухзвенной коммутуемой RC-цепи (а) и эквивалентная схема для переходного процесса (б).

ключи K_1 , K_2 , K_3 замкнуты. При этом на конденсаторах C_1 и C_2 устанавливаются значения потенциалов, определяемые следующими выражениями:

$$U_{01} = \frac{(E_{\text{экв} 2} - E_{\text{экв} 1}) R_{\text{экв} 1}}{R_{\text{экв} 1} + R_{\text{экв} 2} + R_2} + E_{\text{экв} 1}; \quad (3)$$

$$U_{02} = \frac{(E_{\text{экв} 2} - E_{\text{экв} 1}) (R_2 + R_{\text{экв} 1})}{R_{\text{экв} 1} + R_{\text{экв} 2} + R_2} + E_{\text{экв} 1}, \quad (4)$$

где

$$E_{\text{экв} 1} = \frac{E_1 R_5 + E_2 R_1}{R_1 + R_5}; \quad E_{\text{экв} 2} = \frac{(E_3 R_3 + E_4 R_6) R_4}{R_3 R_4 + R_6 R_4 + R_3 R_6};$$

* В. Н. Алехин. О методах функционального преобразования напряжения в код.— Автометрия, 1966, № 2.

$$R_{\text{ЭКВ. 1}} = \frac{R_1 R_5}{R_1 + R_5}; \quad R_{\text{ЭКВ. 2}} = \frac{R_3 R_4 R_6}{R_3 R_4 + R_4 R_6 + R_3 R_6}$$

Значения величин U_{01} , U_{02} могут регулироваться сопротивлениями R_5 и R_6 при неизменных прочих параметрах схемы. В момент начала переходного процесса, соответствующего рабочему циклу схемы, ключи K_1 , K_2 , K_3 размыкаются. Эквивалентная схема для этого режима представлена на рис. 1, б. Выходное напряжение в схеме имеет следующее выражение в операторной форме:

$$U_{\text{ВЫХ}}(p) = \frac{(b_0 p^2 + b_1 p + b_2) R_{\text{ЭКВ. н}}}{p(p^2 + a_1 p + a_2)(R_{\text{ЭКВ. н}} + R_4)}, \quad (5)$$

где

$$a_1 = \frac{R_2 R_3 (R_{\text{ЭКВ. н}} + R_4) C_2}{R_2 R_3 (R_{\text{ЭКВ. н}} + R_4) C_2} + \frac{1}{R_1 R_2 C_1},$$

$$a_2 = \frac{1}{C_1 C_2} \left[\frac{R_2 R_3 + (R_2 + R_3)(R_{\text{ЭКВ. н}} + R_4)}{R_1 R_2 R_3 (R_{\text{ЭКВ. н}} + R_4)} + \frac{R_3 + R_4 + R_{\text{ЭКВ. н}}}{R_2 R_3 (R_4 + R_{\text{ЭКВ. н}})} \right]$$

Напряжение $U_{\text{ВЫХ}}(t)$ будет равно заданному полиному $U^*(t)$, если (2) и (5) совпадают. Приравнявая значения коэффициентов при соответствующих степенях p в числителях и знаменателях выражений (2) и (5), получаем систему уравнений, из которой определяем величины R_3 , C_1 , C_2 , U_{01} , U_{02} :

$$R_3 = \frac{(R_1 + R_2) [B_2 (R_{\text{ЭКВ. н}} + R_4) - E_4 T_1 T_2 R_{\text{ЭКВ. н}}]}{R_{\text{ЭКВ. н}} E_1 T_1 T_2 - (R_1 + R_2 + R_{\text{ЭКВ. н}} + R_4) B_2}; \quad (6)$$

$$C_2 = \frac{A_1 A_2 (T_1 + T_2) \pm \sqrt{A_1^2 A_2^2 (T_1 + T_2)^2 - 4 A_1 A_2 A_3 T_1 T_2}}{2 A_2 A_3 T_1 T_2}; \quad (7)$$

$$C_1 = \frac{1}{C_2 A_3 T_1 T_2}, \quad (8)$$

где

$$A_1 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}; \quad A_2 = \frac{R_2 R_3 (R_{\text{ЭКВ. н}} + R_4)}{R_2 R_3 + (R_2 + R_3)(R_{\text{ЭКВ. н}} + R_4)}$$

$$A_3 = \frac{A_2 R_1 R_2 R_3 (R_{\text{ЭКВ. н}} + R_4)}{A_2 R_1 R_3 + (R_{\text{ЭКВ. н}} + R_4)(A_2 R_1 + R_2 R_3)}$$

$$U_{01} = B_0 \frac{R_{\text{ЭКВ. н}} + R_4}{R_{\text{ЭКВ. н}}}; \quad (9)$$

$$U_{02} = \left[B_1 \frac{R_{\text{ЭКВ. н}} + R_4}{R_{\text{ЭКВ. н}}} - E_4 \frac{1}{R_3 C_2} - U_{02} \left(\frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_2 C_2} \right) \right] R_2 C_2. \quad (10)$$

В момент окончания интервала времени, на котором формируется напряжение $U^*(t)$, ключи K_1 , K_2 , K_3 замыкаются и схема возвращается в исходное состояние.

Таким образом, обеспечение в схеме (см. рис. 1) параметров в соответствии с выражениями (6)–(10) позволяет формировать аппроксимирующий полином (1) с произвольными коэффициентами. В качестве переключающих элементов могут быть использованы, например, полупроводниковые триоды. В исходном состоянии они открыты до насыщения. При переходе в рабочее состояние транзисторы запираются за счет подачи в их базы прямоугольных импульсов, полярность которых зависит от типа используемого триода. В качестве управляющего элемента может быть использован полупроводниковый триггер.

Наличие ключа K_3 не является принципиально необходимым для реализации полинома (1) с помощью рассматриваемой двухзвенной RC -цепи. Этот ключ позволяет скачком менять напряжение на выходе цепи в моменты начала и окончания рабочего цикла. В исходном состоянии, когда ключ K_3 замкнут, с выхода схемы выдается напряжение, близкое к нулевому. В момент начала переходного процесса ключ K_3 размыкается и с выхода схемы выдается напряжение конденсатора C_2 , определяемое делителем $R_1, R_{\text{экв. в.}}$. Замыкание ключа в момент окончания рабочего цикла обеспечивает на выходе схемы напряжение, близкое к нулевому. Такая особенность работы схемы, представленной на рис. 1, позволяет использовать ее для построения комбинированных аппроксиматоров с применением схемы выбора максимального напряжения*. Следует отметить, что такой метод приближения обеспечивает заданную методическую погрешность при меньшем количестве интервалов по сравнению с кусочно-линейной аппроксимацией.

Рассмотрим применение двухзвенной формирующей цепи для воспроизведения полинома (1), аппроксимирующего функцию

$$\Phi(t) = -5 \cdot 10^6 t^2, \quad (11)$$

где $0 \leq t \leq 10^{-3}$. Для приближения функции (11) полиномом (1) использован метод наименьших квадратов. Параметры аппроксимирующего полинома определяются из системы уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned} C_0^* \int_0^{10^{-3}} dt + C_1^* \int_0^{10^{-3}} e^{-\frac{t}{10^{-3}}} dt + C_2^* \int_0^{10^{-3}} e^{-2\frac{t}{10^{-3}}} dt &= - \int_0^{10^{-3}} 5 \cdot 10^6 t^2 dt; \\ C_0^* \int_0^{10^{-3}} e^{-\frac{t}{10^{-3}}} dt + C_1^* \int_0^{10^{-3}} e^{-2\frac{t}{10^{-3}}} dt + C_2^* \int_0^{10^{-3}} e^{-3\frac{t}{10^{-3}}} dt &= \\ &= - \int_0^{10^{-3}} 5 \cdot 10^6 t^2 e^{-\frac{t}{10^{-3}}} dt; \\ C_0^* \int_0^{10^{-3}} e^{-2\frac{t}{10^{-3}}} dt + C_1^* \int_0^{10^{-3}} e^{-3\frac{t}{10^{-3}}} dt + C_2^* \int_0^{10^{-3}} e^{-4\frac{t}{10^{-3}}} dt &= \\ &= - \int_0^{10^{-3}} 5 \cdot 10^6 t^2 e^{-2\frac{t}{10^{-3}}} dt. \end{aligned} \right. \quad (12)$$

В результате решения системы получен полином

$$U^*(t) = -14,312 + 33,26 e^{-\frac{t}{10^{-3}}} - 19,415 e^{-2\frac{t}{10^{-3}}}. \quad (13)$$

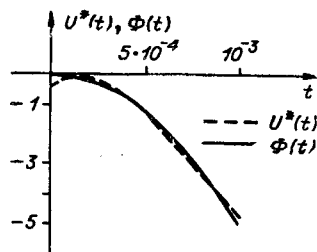


Рис. 2. Исходная и аппроксимирующая функции.

На рис. 2 приведены исходная и аппроксимирующая функции. Для полинома (13) в соответствии с (2) имеем

$$\begin{aligned} T_1 &= 10^3; T_2 = 2 \cdot 10^3; B_0 = -0,457; B_1 = 4,169 \cdot 10^3; \\ B_2 &= -28,624 \cdot 10^6. \end{aligned}$$

В таблице приведены рассчитанные параметры двухзвенной RC -цепи, обеспечивающие воспроизведение полинома (13).

Результаты расчёта были использованы для моделирования полинома (13), для чего была применена формирующая RC -цепь, в которой в качестве переключающих элементов были использованы ключи на полу-

* В. Н. Алехин. См. указ. соч.

$R_1, \text{ом}$	$R_2, \text{ом}$	$R_3, \text{ом}$	$R_4, \text{ом}$	$R_{\text{экв. н.}} \text{ом}$	$C_1, \text{ф}$	$C_2, \text{ф}$	$E_1, \text{в}$	$E_2, \text{в}$	$U_{01}, \text{в}$	$U_{02}, \text{в}$
500	3725	∞	200	$2 \cdot 10^4$	$1,688 \cdot 10^{-6}$	$0,1908 \cdot 10^{-6}$	-17,5	-17,5	3,467	-0,4715

проводниковых триодах типа П402, П501. Управление ключами осуществлялось триггером на полупроводниках. Сравнение теоретической и экспериментальной кривых показало их практически полное совпадение.

Выводы

С помощью полученных выражений могут быть рассчитаны параметры двухзвенных RC-цепей, воспроизводящих полиномы вида

$$U^*(t) = C_0^* + C_1^* e^{-\frac{t}{\tau}} + C_2^* e^{-2\frac{t}{\tau}}.$$

Использование комбинированных аппроксиматоров с применением двухзвенных RC-цепей позволяет строить генераторы напряжения, в которых воспроизведение исходной функции осуществляется с заданной методической погрешностью.

Поступило в редакцию
15 июля 1967 г.,
окончательный вариант —
15 декабря 1967 г.

УДК 621.317.715

К. Л. КУЛИКОВСКИЙ, О. П. РУСТАМ-ЗАДЕ
(Куйбышев)

МЕТОД КОМПЕНСАЦИИ МЕХАНИЧЕСКОГО МОМЕНТА РАСТЯЖЕК ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ГАЛЬВАНОМЕТРИЧЕСКОГО УСИЛИТЕЛЯ

Гальванометрические усилители (ГУ) находят широкое распространение в измерительной технике и практике автоматического контроля и управления благодаря их высокой чувствительности, надежности и стабильности характеристик.

Недостатком указанных устройств является значительная погрешность, обусловленная наличием противодействующего момента растяжек [1]. В связи с этим в ГУ применяются чувствительные элементы, имеющие минимальный противодействующий момент, что достигается применением безмоментных токоподводов. Противодействующий момент может быть также скомпенсирован различными методами:

1) через рамку гальванометра пропускают дополнительный ток, пропорциональный углу поворота подвижной системы; при этом создается момент, противоположный моменту растяжек [2];

2) на подвижную систему чувствительного элемента укрепляют ферромагнитную пластинку, находящуюся в магнитном поле; при повороте системы возникает момент магнитных сил, компенсирующий момент растяжек [3];

3) на подвижную систему помещают дополнительный груз, который при отклонении подвижной системы от начального положения создает момент, уравновешивающий момент растяжек [1];

4) подвижная система гальванометра состоит из двух рамок, укрепленных на оси под углом друг к другу и включенных в плечи моста, питаемого вспомогательным напряжением; при повороте системы вследствие нелинейного изменения магнитного поля в воздушном зазоре возникает дополнительный момент, компенсирующий момент растяжек [4].