

---

---

# ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

---

---

УДК 621.373.121

А. И. Гулин

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ МНОГОЗВЕННЫХ RC-ГЕНЕРАТОРОВ

Представлены полученные с помощью функций преобразования аналитические выражения и алгоритмы для определения частот квазирезонанса многозвенных фазирующих RC-цепей всех возможных конфигураций.

*Ключевые слова:* генератор, квазирезонанс, функция преобразования, цепная структура, фазирующая цепочка.

Многозвенные частотно-зависимые цепи, представляющие собой цепную структуру (ЦС), широко используются в системах управления и связи в качестве фильтров, частотных корректоров, фазирующих четырехполюсников в генераторах, синтезаторах частот и т.д. Интерес к таким цепям объясняется возможностью использования в них не только емкостных и индуктивных, но и резистивных преобразователей для измерения различных физических величин (освещенности, состава вещества и т.д.). Типичным примером таких цепей являются датчики с RC-генераторами, выходная частота которых определяется квазирезонансом RC-цепи. Однако в настоящее время получены аналитические выражения для частоты и затухания сигналов в подобных ЦС лишь с числом звеньев не более восьми [1, 2]. Использование функций преобразования (ФП) позволило устранить этот пробел [3].

Рассмотрим генератор с фазирующим четырехполюсником [4], представляющий собой замкнутую систему с положительной цепью обратной связи и содержащий пассивную ЦС одного из четырех видов. Возможные структурные схемы генераторов с фазирующей ЦС приведены на рис. 1. Потенциальные ( $U/U$ ) либо токово-потенциальные ( $I/U$ ) ЦС (рис. 1, а, з) для построения генераторов требуют наличия усилителей напряжения (активных преобразователей), т.е. усилителей с высоким входным и низким выходным сопротивлениями. Такие цепи целесообразно выполнять на полевых транзисторах и электронных лампах. При использовании усилителей на биполярных транзисторах удобнее применять токовые ( $I/I$ ) или потенциально-токовые ( $U/I$ ) ЦС (рис. 1, в, б). В генераторе с токовой цепью усилитель должен иметь высокое выходное и низкое входное сопротивления (цепь включается, например, в качестве коллекторной нагрузки усилителя). В генераторе с потенциально-токовой цепью и входное, и выходное сопротивления усилителя должны быть низкими.

Активными преобразователями (АП), осуществляющими компенсацию потерь в пассивной ЦС, могут быть транзисторные либо электронные и операционные усилители, а также специальные устройства [5], например гираторы, конверторы отрицательного сопротивления и др.

Возникновение колебаний характеризуется условием

$$K'K \leq 1, \quad (1)$$

где  $K$  — ФП цепной структуры,  $K'$  — ФП активного преобразователя;

Так как ФП активного преобразователя является вещественной, то для выполнения условия (1) необходимо, чтобы ФП цепной структуры на частоте самовозбуждения была тоже вещественной. При этом обе ФП могут иметь одновременно либо положительные, либо отрицательные значения, иными словами, в зависимости от вида активного преобразователя с помощью ЦС осуществляется сдвиг фазы на четное или нечетное число  $\pi$  радиан, где  $i = 1, 2, 3, \dots$  — натуральный ряд чисел.

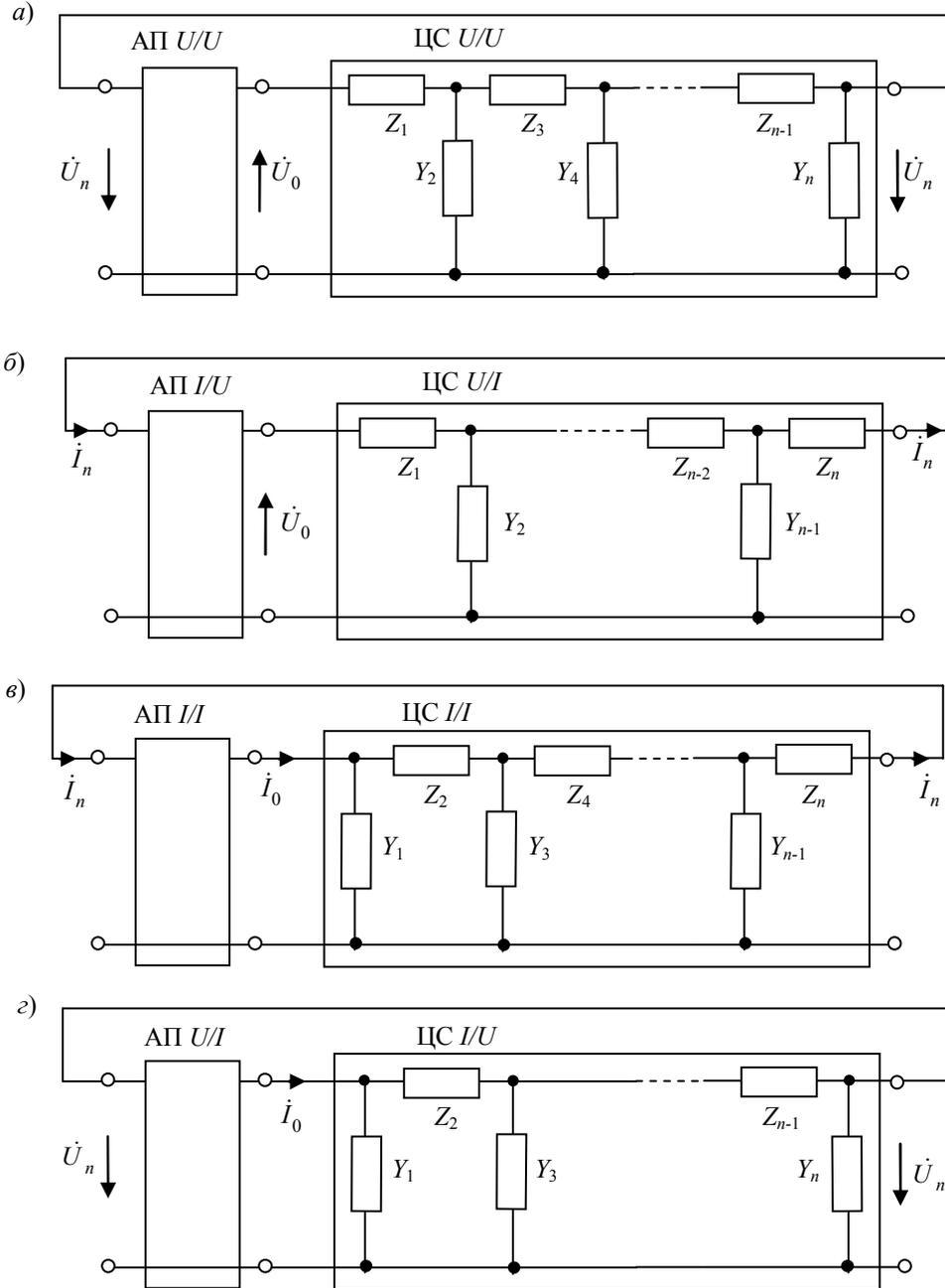


Рис. 1

Рассмотрим порядок определения частот квазирезонанса для наиболее часто используемых при построении генераторов на однокаскадных усилителях четырех видов  $n$ -звенных ЦС, составленных из RC-элементов и осуществляющих поворот фазы на  $180^\circ$ . Частота квазирезонанса определяется мнимой частью ФП фазирующего четырехполюсника при обращении ее в нуль, т.е.

$$\text{Im}(K) = 0, \tag{2}$$

и для ЦС  $U/U$  и  $I/I$  (рис. 2, а и б) характеризуется выражением [6]

$$\omega_0 = \frac{k_n}{RC}, \tag{3}$$

где коэффициент  $k_n$  определяется как

$$k_n = \sum_{i=0,1,\dots}^p (-1)^i k_n^{2i+1} C_{0,5n+1+2i}^{2+4i} = 0, \tag{4}$$

здесь  $C_{0,5n+1+2i}^{2+4i}$  — число сочетаний из  $2 + 4i$  элементов по  $0,5n + 1 + 2i$  элемента;  $p = 0,25n - 1$  — для четных значений  $0,5n$ ;  $p = 0,25(n + 2) - 1$  — для нечетных значений  $0,5n$ .

Для схем ЦС  $U/U$  и  $I/I$  (рис. 2, в и г) частота квазирезонанса определяется выражением

$$\omega_0 = \frac{1}{k_n RC}. \tag{5}$$

С увеличением числа звеньев  $n$  от 6 до бесконечности ФП фазирующих ЦС  $U/U$  и  $I/I$  изменяется от  $K_6 = -29$  до  $K_n = -11,6$ .

Значения коэффициентов  $k_n$  не превышают  $\sqrt{6}$  и для уравнений (4) определяются по программе [6].

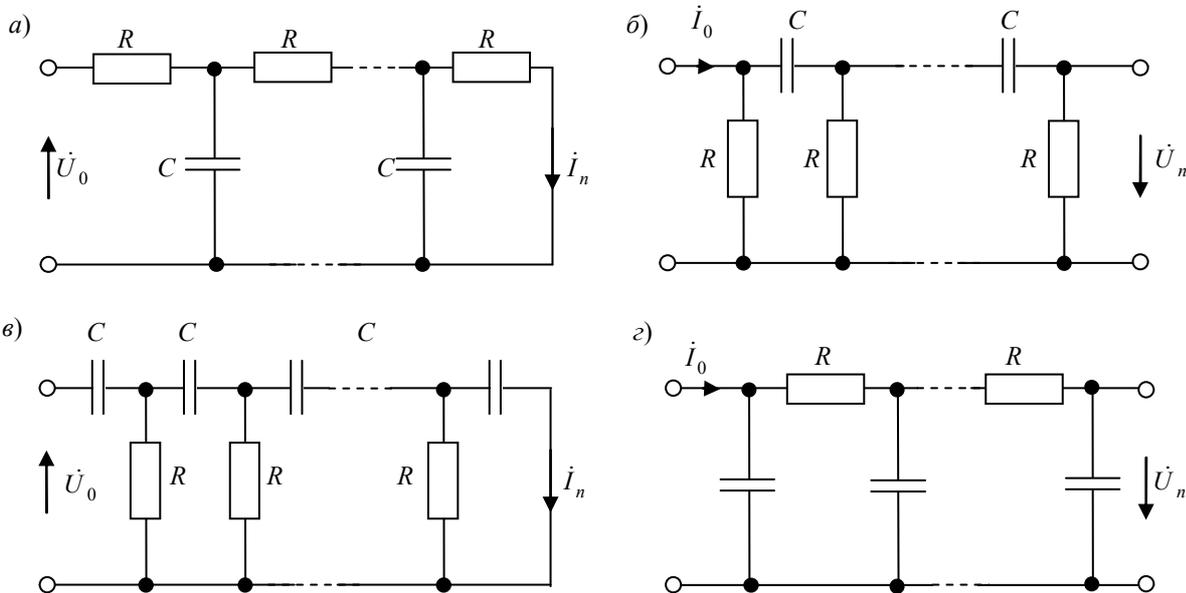


Рис. 2

Частота квазирезонанса для фазирующей ЦС  $U/I$  (рис. 3, а) определяется выражением

$$\omega_0 = \frac{b_n}{RC}, \tag{6}$$

а для ЦС  $I/U$  (рис. 3, б) — выражением

$$\omega_0 = \frac{1}{b_n RC}. \tag{7}$$

Здесь коэффициент  $b_n$  зависит от числа  $n$  и вычисляется как

$$b_n = \sum_{i=0,1,\dots}^l (-1)^i b_n^{2i+1} C_{0,5(n+3)+2i}^{3+4i} = 0, \tag{8}$$

где  $C_{0,5(n+3)+2i}^{3+4i}$  — число сочетаний из  $n-3+2i$  элементов по  $n-6+4i$  элемента;  $l = 0,25(n + 1) - 1$  — для четных значений  $0,5(n+1)$ ;  $l = 0,25(n - 1) - 1$  — для нечетных значений  $0,5(n+1)$ .

ФП таких ЦС не превышает  $56R$ , т.е.  $|K_n| \leq 56R$ . Так, для 9-звенной ЦС  $U/I$  (см. рис. 3, а) уравнение (8) для определения коэффициента  $b$  имеет вид:  $20b - 8b^3 = 0$ , откуда  $b = \sqrt{5/2}$ , а частота квазирезонанса для такой ЦС  $\omega_0 = \sqrt{5}/(\sqrt{2} \cdot RC)$ . ФП на частоте квазирезонанса имеет значение  $K_9 = -31,25R$ .

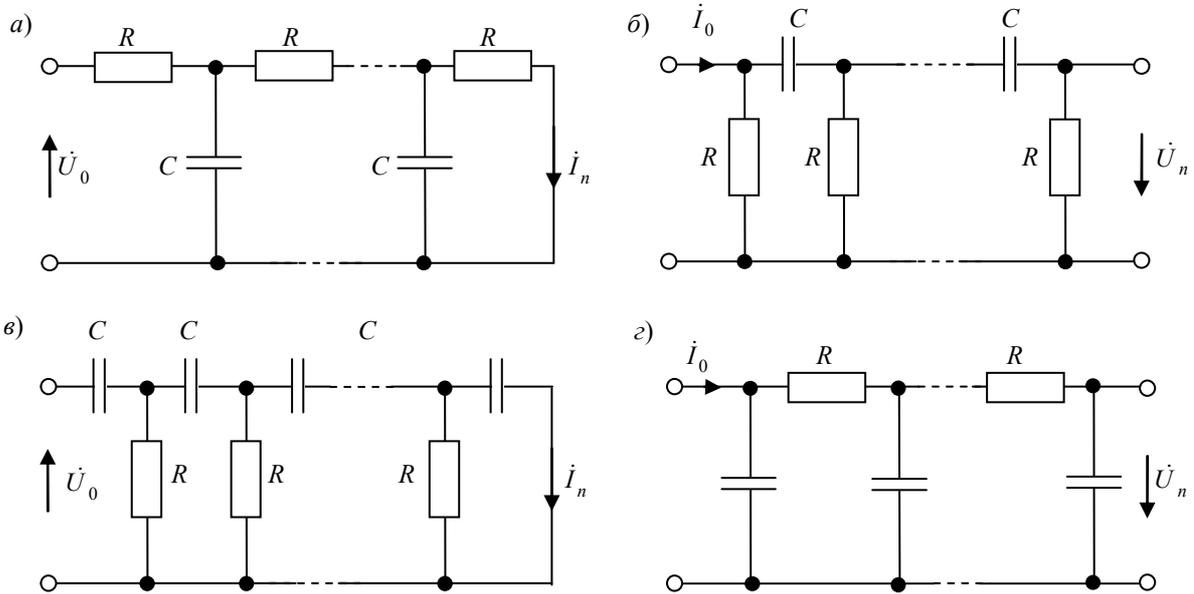


Рис. 3

Частоты квазирезонанса для ЦС  $U/I$  и  $I/U$  определяются выражениями, аналогичными уравнениям (6) и (7):

— для ЦС  $I/U$  (рис. 3, з)

$$\omega_0 = \frac{h_n}{RC}, \tag{9}$$

— для ЦС  $U/I$  (рис. 3, в)

$$\omega_0 = \frac{1}{h_n RC}. \tag{10}$$

Здесь коэффициент  $h_n$  также зависит от числа звеньев ЦС и определяется как

$$h_n = \sum_{i=0,1,\dots}^m (-1)^i h_n^{2i+1} C_{0,5(n+1)+2i}^{1+4i} = 0, \tag{11}$$

где  $C_{0,5(n+1)+2i}^{1+4i}$  — число сочетаний из  $0,5(n+1)+2i$  элементов по  $1+4i$  элемента;  $m = 0,25(n+1) - 1$  — для четных значений  $0,5(n+1)$ ;  $m = 0,25(n-1)$  — для нечетных значений  $0,5(n+1)$ .

Для осуществления сдвига фаз на  $180^\circ$  минимальное число емкостей  $C$  в таких ЦС должно быть не менее трех, и, следовательно, минимальное число звеньев равно 5 ( $n \geq 5$ ). Коэффициент  $h_n \leq \sqrt{3}$ , а ФП ЦС не превышает  $12/R$  (рис. 3, в) либо  $1/12R$  (рис. 3, з). Так, для 7-звенной ЦС (см. рис. 3, з) уравнение (11) имеет вид:  $4h - 6h^3 = 0$ , откуда  $h = \sqrt{4/3}$ , а частота квазирезонанса  $\omega_0 = 2/(\sqrt{3} \cdot RC)$ .

Из выражений (3), (5)—(7), (9) и (10) следует, что одну и ту же частоту квазирезонанса можно получить при бесчисленном множестве значений  $R$  и  $C$  при выполнении условия постоянства их произведения. Однако произвольный выбор значений элементов не всегда удовлетворяет требованиям, предъявляемым к пассивным ЦС при построении генераторов.

Для однозначного решения подобной задачи предлагается методика, основанная на расчете RC-генератора с ЦС  $U/U$ , который, как известно [4], реализуется с использованием схем двух видов.

Рассмотрим 6-звенную ЦС, состоящую из RC-звеньев. Полагаем, что она не нагружена. Такой режим характерен для большинства случаев ее применения. Из уравнения (4) для рассматриваемого случая получим выражение:  $k_6 - 6k_6^3 = 0$ , откуда  $k_n = \sqrt{6}$ . Подставив значение коэффициента  $k_n$  в формулу (5), получим выражение для частоты квазирезонанса:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{6} \cdot RC}.$$

Коэффициент усиления усилителя должен превышать значение ФП преобразователя на частоте квазирезонанса и с учетом  $\omega_0$  для 6-звенной ЦС, согласно работе [3], равен  $|K_6| = 29$ .

Для устранения потери энергии сигнала выполним условие согласования

$$R_{\text{вых}} = R_{\text{вх}}, \quad (12)$$

где  $R_{\text{вых}}$  — выходное сопротивление усилителя,  $R_{\text{вх}}$  — входное сопротивление ЦС.

Входное сопротивление однородной 6-звенной ЦС  $U/U$  определяется как [3]

$$Z_{\text{вх}} = \frac{Z^3 Y^3 + 5Z^2 Y^2 + 6ZY + 1}{Z^2 Y^3 + 4ZY^2 + 3Y} \quad (13)$$

и в рассматриваемом случае его модуль на частоте квазирезонанса  $\omega_0$  равен  $|Z_{\text{вх}}| = 2,8R$ . Используя выражения (12) и (13), определим значение сопротивления  $R$  звена ЦС:  $R = R_{\text{вых}}/2,8$ , а из выражения для частоты  $\omega_0$  — значение емкости:  $C = 1/(\sqrt{6} \cdot R\omega_0)$ .

Аналогичный подход применяется и для других схем, используемых при построении частотно-зависимых цепей.

Для расчета частот квазирезонанса и ФП многозвенных RC-схем любой сложности и конфигурации разработана программа [6].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новицкий П. В., Кнорринг В. Г., Гутников В. С. Цифровые приборы с частотными датчиками. Л.: Энергия, 1970. 424 с.
2. Гутников В. С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. Л.: Энергоатомиздат, 1988. 304 с.
3. Кольцов А. А., Гулин А. И. Коэффициенты преобразования цепных трехполюсных структур // Изв. вузов СССР. Приборостроение. 1975. Т. 17, № 9. С. 31—34.
4. Барсуков Ф. И., Русанов Ю. Б. Элементы и устройства радиотелеметрических систем. М.: Энергия, 1983.
5. Бондаренко В. Г. RC-генераторы синусоидальных колебаний. М.: Связь, 1988.
6. Свид. об официальной регистрации программы для ЭВМ, № 2003611147. Расчет частоты квазирезонанса и коэффициента передачи многозвенных RC-структур / А. И. Гулин, Ж. А. Сухинец, Д. Ф. Мударисов, И. Р. Хаников. М.: Роспатент, 2003.

#### Сведения об авторе

**Артур Игоревич Гулин** — канд. техн. наук, доцент; Уфимский государственный авиационный технический университет, кафедра телекоммуникационных систем;  
E-mail: Gulin\_tks@ugatu.ac.ru

Рекомендована кафедрой  
телекоммуникационных систем

Поступила в редакцию  
26.03.10 г.