УДК 621.3.01:621.375

Условия существования и классификация обратных связей в электронных цепях

Сташук В. Д.

Открытый международный университет развития человека "Украина", г. Киев, Украина

E-mail: *vds36@mail.ru*

В статье проанализировано состояние вопроса о существовании и классификации обратных связей в электронных цепях. Показана необходимость, но недостаточность присутствия зависимых источников для реализации обратных связей. Предложено критериями существования обратных связей (ОС) в электронной цепи рассматривать возможность получения режима самовозбуждения в схеме замещения при варьировании параметров схемы и изменении направления зависимых источников, а также характер влияния ОС на схемные функции. При определении вида ОС в электронных цепях нужно анализировать их влияние на все функции цепи, входные и передаточные, характеризуя режим на входе и выходе как напряжениями, так и токами.

Ключевые слова: электронная цепь; обратная связь; зависимый источник; функции цепи; режим самовозбуждения; схема замещения

Введение

Обратные связи (ОС) в электронных цепях имеют особенности, которые не позволяют безоговорочно применять положения классической теории ОС, а именно:

1. Режим на входе и выходе определяется не одной физической величиной, а двумя — током и напряжением;
2. Канал обратной передачи обычно является двусторонним, передающим сигнал в обоих направлениях.

Поэтому вопрос о существовании ОС в электронных цепях широко обсуждался в технической литературе. В одной из первых работ Боде предложил оценивать ОС по возвратной разности. Возражение против такой оценки находим в [1], поскольку этот критерий формально применим к любому элементу пассивной цепи, не содержащей управляемых (зависимых) источников, в которой физически невозможно реализовать ОС. В качестве необходимого и достаточного условий существования ОС в [1, 2] предлагается следующая формулировка: «обратная связь между двумя зависимыми переменными — физическое явление, возникающее при охвате этих переменных замкнутым контуром с односторонней передачей воздействий в контуре». Поскольку в электронных цепях компоненты с односторонней передачей сигналов моделируются зависимыми источниками, можно утверждать в соответствии с этой формулировкой, что для существования ОС в электронной цепи необходимо и достаточно, чтобы в каналах прямой и (или) обратной передачи присутствовали управляемые источники [1, 2]. Необходимость этого условия не вызывает возражений, так как в пассивной цепи, не содержащей зависимых источников, физически невозможно реализовать ОС. Однако, достаточность этого условия не очевидна.

В литературе также находим противоречивые толкования ОС в эмиттерном повторителе и усилительном каскаде с общей базой. Обычным является утверждение, что в эмиттерном повторителе реализована 100%-ая ОС по напряжению, а в [1] утверждается, что в эмиттерном повторителе ОС как таковой нет. Это утверждение противоречит приведенному выше условию существования ОС, поскольку транзистор моделируется схемой замещения, содержащей зависимый источник и, следовательно, в схеме замещения эмиттерного повторителя канал прямой передачи образован зависимым источником.

В каскаде с общей базой выходное напряжение не инвертируется. Поэтому ОС по напряжению формально является положительной, но такой каскад устойчив и влияние ОС на коэффициент усиления напряжения, такое как при отрицательной ОС [1, 2].

1 Постановка задачи

Рассмотрим линейную схему, содержащую независимые источники и пассивные элементы и не содержащую зависимых источников. Выделим в ней произвольный пассивный двухполюсник П, рис. 1а. Остальная часть схемы, содержащая независимые источники, является активным двухполюсником А. Заменим пассивный двухполюсник эквивалентным сопротивлением $R2$, а активный двухполюсник эквивалентным генератором, рис. 1б. Сопротивление $R2$ заменим двухполюсником, содержащим зависимые источники, как показано на рис. 1в. Источник тока J управляется токам i с коэффициентом передачи 1, а источник напряжения $\mathrm{E}_{\text{ос}}$ управляется напряжением u также с коэффициентом передачи 1. Такая замена эквивалентна, поскольку электрическое состояние (режим) в остальной части схемы осталось неизменным. Более того, режим в обеих схемах, рис. 1б и рис. 1в определяется одними и теми же токами и напряжениями. При этом, в пассивной схеме, рис. 1б, ОС нет, а в схеме, рис. 1в, ОС формируется зависимыми источниками: в канале прямой передачи источником J и в канале обратной передачи источником $\mathrm{E}_{\text{ос}}$.

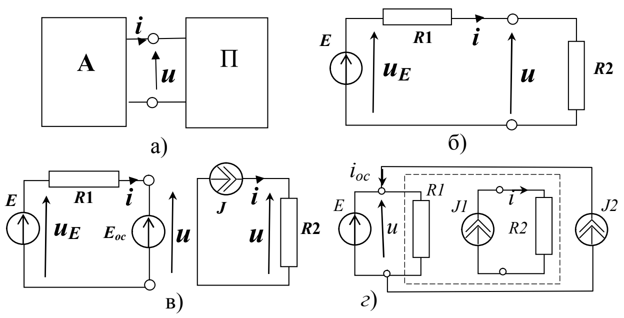

Рис. 1

Рассмотрим еще один пример, рис. 1г. В этой схеме канал прямой передачи образован зависимым источником тока $J1$, управляемым напряжением u, а канал обратной передачи — зависимым источником тока $J2$, управляемым током i. В этой схеме в каналах прямой и обратной передачи включены зависимые источники, но ОС отсутствует, потому что переменная на выходе канала обратной связи (ток i_{oc}) не влияет на входную переменную (напряжение u).

Таким образом, 1) любую пассивную схему формально можно эквивалентно заменить схемой с обратной связью; 2) существуют схемы с зависимыми источниками, но в которых нет ОС как физического процесса. Приведенные выше примеры показывают недостаточность наличия зависимых источников для существования ОС в электронных цепях.

Цель настоящей статьи предложить критерии (признаки) существования ОС в электронных цепях.

2 Критерии существования обратных связей

Любое определение должно содержать отличительный признак (критерий), присущий только определяемому объекту. Таким признаком для электронной цепи, содержащей обратные связи, может быть возможность получения режима неустойчивости (самовозбуждения). Здесь можно возразить, что цепь с отрицательной ОС устойчива. Поэтому, критерий наличия ОС в электронной цепи можно сформулировать так:

В электронной цепи присутствует ОС, если в ее схеме замещения можно получить неустойчивость (самовозбуждение) при изменении параметров элементов в физически реализуемых пределах и при перемене направления (полярности) зависимых источников.

Например, если в схеме, рис. 1в изменить направление источника $\mathrm{E}_{\text{ос}}$, схема станет неустойчивой, потому что при флуктуационном возрастании тока i, вырастет и напряжении u, что приведет к еще большему возрастанию тока. В соответствии с приведенным критерием в схеме, рис. 1в, существует ОС и она не эквивалентна схеме, рис. 1б. К тому же, эти схемы можно рассматривать как эквивалентные в смысле электрического состояния только тогда, когда коэффициенты передачи обоих зависимых источников в схеме, рис. 1в, равны единице.

Рассмотрим схему, рис. 1г. Эта схема устойчива при любых параметрах и направлениях зависимых источников, потому что выходная величина канала обратной связи (ток $i_{\text{ос}}$) не влияет на входную величину (напряжение u). Следовательно, в этой схеме отсутствует ОС как физический процесс.

Косвенным признаком существования ОС в электронной цепи может быть характер ее влияние на схемные функции (СФ), передаточные и входные [3, 4]. Рассмотрим систему, охваченную ОС с односторонними каналами прямой и обратной передачи, и характеризуемую двумя величинами на входе и выходе, которую можно описать системой уравнений:

$$
\begin{aligned}
&x_{\text{вых}} = \mu x_{\text{вх}}, \quad x_{\text{вх}} = x_{\text{г}} + x_{\text{ос}}, \quad x_{\text{ос}} = \beta x_{\text{вых}}, \\
&y_{\text{вых}} = w_{\text{н}} x_{\text{вых}}, \quad y_{\text{вх}} = w_{\text{вх}} x_{\text{вх}},
\end{aligned}
\tag{1}
$$

где μ, β — коэффициенты передачи прямого и обратного каналов, $w_{\text{вх}}$, $w_{\text{н}}$ — входной иммитанс и иммитанс нагрузки. Уравнениям (1) соответствует граф, рис. 2.

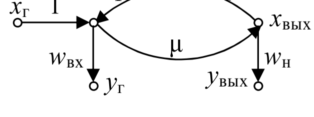

Рис. 2

Из (1) можно получить следующие функции:

$$
\begin{aligned}
K_x^{\text{ос}} &= \frac{x_{\text{вых}}}{x_{\text{г}}} = \frac{\mu}{1-\beta\mu},\\
K_y^{\text{ос}} &= \frac{y_{\text{вых}}}{y_{\text{вх}}} = \mu\frac{w_{\text{н}}}{w_{\text{вх}}} = K_y,\\
W_{\text{пер}}^{\text{ос}} &= \frac{y_{\text{вых}}}{x_{\text{г}}} = \frac{\mu w_{\text{н}}}{1-\beta\mu},\\
W_{\text{вх}}^{\text{ос}} &= \frac{y_{\text{вх}}}{x_{\text{г}}} = \frac{w_{\text{вх}}}{1-\beta\mu},\\
V_{\text{пер}}^{\text{ос}} &= \frac{x_{\text{вых}}}{y_{\text{вх}}} = \frac{\mu}{w_{\text{вх}}} = V_{\text{пер}},\\
V_{\text{вх}}^{\text{ос}} &= \frac{x_{\text{г}}}{y_{\text{вх}}} = v_{\text{вх}}\left(1-\beta\mu\right),
\end{aligned}
\tag{2}
$$

где $v_{\text{вх}} = 1/w_{\text{вх}}$. Верхний индекс “ос” обозначает функцию при наличии ОС, а без этого индекса — функцию при отсутствии ОС, т.е. при $\beta = 0$. Переменные $x_{\text{вх}}$, $x_{\text{г}}$, $x_{\text{ос}}$ являются токами при параллельной ОС на входе или напряжениями при последовательной ОС; $x_{\text{вых}}$ — напряжение или ток при ОС по напряжению или по току на выходе. Заменяя в (1) и (2) х и у на токи и напряжения, см. табл. 1, получим все виды ОС согласно принятой классификации и соответствующие им выражения функций цепи, приведенные в табл. 2. Как видим, каждый вид ОС оказывает влияние на две из четырех передаточных СФ, причем разные виды ОС влияют на разные передаточные СФ, в то время как в пассивной цепи каждый элемент влияет на все передаточные и входные СФ. Отметим также, что передаточные функции каналов прямой и обратной передачи μ и β при разных видах ОС имеют смысл коэффициентов передачи напряжения или тока, передаточного сопротивления или передаточной проводимости, см. табл. 1.

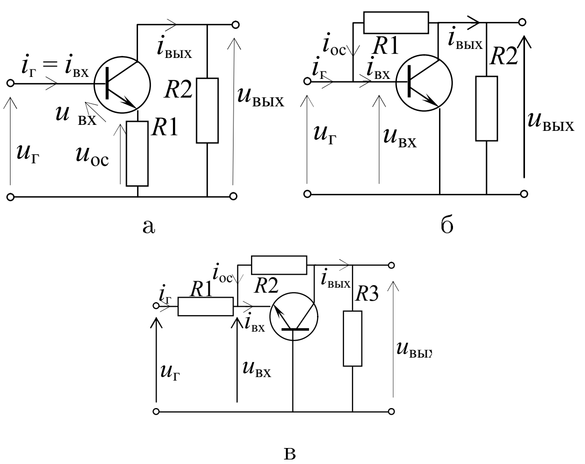

Рис. 3

Рассмотрим примеры. Для схемы (рис. 3а) находим входную и передаточные функции (здесь и далее при выводе схемных функций пренебрегаем малой проводимостью h_{22e} и полагаем $h_{21e}+1 \approx h_{21e}$):

$$
Z_{\text{вх}}^{\text{ос}} = h_{11e}\left(1+\frac{h_{21e}}{h_{11e}}R_1\right),
$$

$$
\begin{aligned}
K_U^{\text{ос}} &= \frac{-\frac{h_{21e}}{h_{11e}}R_2}{1+\frac{h_{21e}}{h_{11e}}R_1}, \quad Y_{\text{пер}}^{\text{ос}} = -\frac{\frac{h_{21e}}{h_{11e}}}{1+\frac{h_{21e}}{h_{11e}}R_1},\\
K_i^{\text{ос}} &= -h_{21e} = K_i, \quad Z_{\text{пер}}^{oc} = -h_{21e}R_2 = Z_{\text{пер}}.
\end{aligned}
\tag{3}
$$

Полагая в (3) $\mu_y = -h_{21e}/h_{11e}$, $\beta_z = R_1$, $Z = h_{11e}$, $Z_{\text{н}} = R_2$, получим

$$
\begin{aligned}
Z_{\text{вх}}^{\text{ос}} &= Z_{\text{вх}}\left(1-\beta_z\mu_y\right), \quad K_U^{\text{ос}} = \frac{\mu_y Z_{\text{н}}}{1-\beta_z\mu_y},\\
Y_{\text{пер}}^{\text{ос}} &= \frac{\mu_y}{1-\beta_z\mu_y}, \qquad K_i^{\text{ос}} = \mu_y Z_{\text{вх}},\\
Z_{\text{пер}}^{\text{ос}} &= \mu_y Z_{\text{пер}},
\end{aligned}
\tag{4}
$$

что соответствует последовательно — последовательной ОС. Полное совпадение ФЦ (4) с формулами табл. 2 объясняется тем, что в схеме, рис. 3а, канал прямой и канал обратной передачи являются односторонними. Действительно, выходная переменная $i_{\text{вых}} = \frac{h_{21e}}{h_{11e}}u_{\text{вх}}$ зависит только от входной $u_{\text{вх}}$, а переменная обратной связи $u_{\text{ос}} = R_3 i_{\text{вых}}$ только от $i_{\text{вых}}$.

В схеме (рис. 3б) имеем:

$$
\begin{aligned}
Z_{\text{вх}}^{\text{ос}} &= \frac{h_{11e}\left(R_1+R_2\right)}{R_1+R_2h_{21e}+h_{11e}},\\
K_U^{\text{ос}} &= \frac{R_2\left(h_{11e}-R_1h_{21e}\right)}{h_{11e}\left(R_1+R_2\right)},\\
K_i^{\text{ос}} &= \frac{h_{11e}-R_1h_{21e}}{R_1+R_2h_{21e}+h_{11e}},\\
Z_{\text{пер}}^{\text{ос}} &= \frac{R_2\left(h_{11e}-R_1h_{21e}\right)}{R_1+R_2h_{21e}+h_{11e}},\\
Y_{\text{пер}}^{\text{ос}} &= \frac{h_{11e}-R_1h_{21e}}{h_{11e}\left(R_1+R_2\right)}.
\end{aligned}
\tag{5}
$$

Как видим, функции (5) не сводятся к формулам табл. 2, так как канал обратной передачи через сопротивление R_1 является обратимым. Выражение для $K_U^{\text{ос}}$ в (5) можно преобразовать к виду

$$
K_U^{\text{ос}} = -\frac{h_{21e}}{h_{11e}}R_{\text{н}} + \frac{R_2}{R_1+R_2},
$$

где $R_{\text{н}} = R_1R_2/(R_1+R_2)$, так что выходное напряжение

$$
\begin{aligned}
u_{\text{вых}} &=\\
&= -\frac{h_{21e}}{h_{11e}}R_{\text{н}}u_{\text{вх}} + \frac{R_2}{R_1+R_2}u_{\text{вх}} =\\
&= u_{\text{вых}1} + u_{\text{вых}2}
\end{aligned}
\tag{6}
$$

состоит из напряжения $u_{\text{вых}1}$, поступающего по одностороннему каналу прямой передачи, и напряжения $u_{\text{вых}2}$, передаваемого с входа на выход через делитель R_1, R_2, образованный обратимым каналом обратной передачи. Однако, если принять $R_1 >>$

Табл. 1

Переменные и параметры	Виды обратных связей			
	Посл. — Пар.	Посл. — Посл.	Пар. — Пар.	Пар. — Посл.
$x_г$	$u_г$	$u_г$	$i_г$	$i_г$
$x_{вх}$	$u_{вх}$	$u_{вх}$	$i_{вх}$	$i_{вх}$
$y_{вх}$	$i_{вх}$	$i_{вх}$	$u_{вх}$	$u_{вх}$
$x_{вых}$	$u_{вых}$	$i_{вых}$	$u_{вых}$	$i_{вых}$
$y_{вых}$	$i_{вых}$	$u_{вых}$	$i_{вых}$	$u_{вых}$
x_{oc}	u_{oc}	u_{oc}	i_{oc}	i_{oc}
μ	$\mu_U = u_{вых}/u_{вх}$	$\mu_Y = i_{вых}/u_{вх}$	$\mu_z = u_{вых}/i_{вх}$	$\mu_i = i_{вых}/i_{вх}$
β	$\beta_U = u_{oc}/u_{вых}$	$\beta_Z = i_{oc}/u_{вых}$	$\beta_Y = i_{oc}/u_{вых}$	$\beta_i = i_{oc}/i_{вых}$
$W_{вх}$	$Y_{вх} = i_{вх}/u_{вх}$	$Y_{вх} = i_{вх}/u_{вх}$	$Z_{вх} = u_{вх}/i_{вх}$	$Z_{вх} = u_{вх}/i_{вх}$
$W_н$	$Y_н = i_{вых}/u_{вых}$	$Z_н = u_{вых}/i_{вых}$	$Y_н = i_{вых}/u_{вых}$	$Z_н = u_{вых}/i_{вых}$

Табл. 2

Схемные функции	Вид обратной связи			
	Посл. — Пар.	Посл. — Посл.	Пар. — Пар.	Пар. — Посл.
$Z_{вх}^{oc}$	$Z_{вх}(1-\beta_U\mu_U)$	$Z_{вх}(1-\beta_Z\mu_Y)$	$Z_{вх}/(1-\beta_Y\mu_Z)$	$Z_{вх}/(1-\beta_i\mu_i)$
K_U^{oc}	$\mu_U/(1-\beta_U\mu_U)$	$\mu_Y Z_н/(1-\beta_Z\mu_Y)$	$\mu_Z/Z_{вх}$	$\mu_i Z_н Y_{вх}$
K_i^{oc}	$\mu_U Y_н Z_{вх}$	$\mu_Y Z_н$	$\mu_Z Y_н/(1-\beta_Y\mu_Z)$	$\mu_i/(1-\beta_i\mu_i)$
$Z_{пер}^{oc}$	$\mu_U Z_{вх}$	$\mu_Y Z_н Z_{вх}$	$\mu_Z/(1-\beta_Y\mu_Z)$	$\mu_i Z_н/(1-\beta_i\mu_i)$
$Y_{пер}^{oc}$	$\mu_U Y_н/(1-\beta_U\mu_U)$	$\mu_Y/(1-\beta_Z\mu_Y)$	$\mu_Z Y_н Y_{вх}$	$\mu_i Y_{вх}$

h_{11e} и $R_1 >> R_2$, формулы (5) можно привести к виду

$$
\begin{aligned}
&Z_{вх}^{ос} \approx \frac{h_{11e}}{1+\frac{h_{21e}R_2}{R_1}}, \qquad Z_{пер}^{ос} \approx \frac{h_{21e}R_2}{1+\frac{h_{21e}R_2}{R_1}},\\
&K_i^{ос} \approx -\frac{h_{21e}}{1+\frac{h_{21e}R_2}{R_1}}, \quad K_U^{ос} \approx -\frac{h_{21e}R_2}{h_{11e}},\\
&Y_{пер}^{ос} \approx -\frac{h_{21e}}{h_{11e}}.
\end{aligned} \tag{7}
$$

Функции (7) соответствуют формулам табл. 2 для параллельно — параллельной ОС, если принять $\mu_z = -h_{21e}R_2$, $\beta_y = 1/R_1$, $Z_{вх} = h_{11e}$, $Z_{вх} = h_{11e}$, $Y_н = 1/R_2$. Отметим, что условие $R_1 >> R_2$ равносильно пренебрежению $u_{вых2}$ слагаемым в (6), т.е. напряжением, поступающим на выход через канал обратной передачи, по сравнению с напряжением, передаваемым через канал прямой передачи. А условие $R_1 >> h_{11e}$ означает, что переменная обратной связи i_{oc} зависит главным образом от $u_{вых}$. Итак, ОС в схеме (рис. 3б), можно лишь условно отнести к параллельно — параллельной отрицательной ОС при условии $R_1 >> R_2$ и $R_1 >> h_{11e}$.

Функции схемы (рис. 3в) имеют вид:

$$
\begin{aligned}
&Z_{вх}^{ос} = \frac{R_1R_2(h_{21e}+1)+R_1R_3+(R_1+R_2+R_3)h_{11e}}{R_2(h_{21e}+1)+R_3+h_{11e}},\\
&K_U^{ос} = \frac{(R_2h_{21e}+h_{11e})R_3}{R_1R_2(h_{21e}+1)+R_1R_3+(R_1+R_2+R_3)h_{11e}},\\
&K_i^{ос} = \frac{R_2h_{21e}+h_{11e}}{R_2(h_{21e}+1)+R_3+h_{11e}},\\
&Z_{пер}^{ос} = \frac{(R_2h_{21e}+h_{11e})R_3}{R_2(h_{21e}+1)+R_3+h_{11e}},\\
&Y_{пер}^{ос} = \frac{R_2h_{21e}+h_{11e}}{R_1R_2(h_{21e}+1)+R_1R_3+(R_1+R_2+R_3)h_{11e}},
\end{aligned} \tag{8}
$$

и также не сводятся к формулам табл. 2, соответствующим какому-либо виду ОС. Это объясняется тем, что в схеме (рис. 3в) присутствуют два канала обратной передачи, образованные соответственно сопротивлениями R_1 и R_2, причем второй из них является обратимым. Действительно, исключая ОС через R_2, приняв в (8) $R_2 \to \infty$, получим:

$$
\begin{aligned}
&Z_{вх}^{ос} = \frac{h_{11e}}{(h_{21e}+1)}\left(1+\frac{h_{21e}}{h_{11e}}R_1\right),\\
&K_U^{ос} = \frac{\frac{h_{21e}}{h_{11e}}R_3}{1+\frac{h_{21e}}{h_{11e}}R_1}, \quad K_i^{ос} = \frac{h_{21e}}{h_{21e}+1},\\
&Z_{пер}^{ос} = \frac{h_{21e}R_3}{h_{21e}+1}, \quad Y_{пер}^{ос} = \frac{\frac{h_{21e}}{h_{11e}}}{1+\frac{h_{21e}}{h_{11e}}R_1}.
\end{aligned} \tag{9}
$$

Функции (9) соответствуют формулам табл. 2 для последовательно — последовательной ОС при $\mu_y = h_{21e}/h_{11e}$, $\beta_z = -R_1$, $Z_{вх} = h_{11e}/(h_{21e}+1)$, $Z_н = R_3$ как и в схеме (рис. 3а). Если же в (8) принять $R_1 = 0$, получим:

$$
\begin{aligned}
&Z_{вх}^{ос} = \frac{(R_2+R_3)\,h_{11e}}{R_2\,(h_{21e}+1)+R_3+h_{11e}},\\
&K_U^{ос} = \frac{(h_{21e}R_2+h_{11e})\,R_3}{h_{11e}\,(R_2+R_3)},\\
&K_i^{ос} = \frac{h_{21e}R_2+h_{11e}}{(h_{21e}+1)\,R_2+R_3+h_{11e}},\\
&Z_{пер}^{ос} = \frac{(h_{21e}R_2+h_{11e})\,R_3}{(h_{21e}+1)\,R_2+R_3+h_{11e}},\\
&Y_{пер}^{ос} = \frac{h_{21e}R_2+h_{11e}}{(R_2+R_3)\,h_{11e}}.
\end{aligned} \tag{10}
$$

При условии $R_2 >> R_3$, $R_2 >> h_{11e}$ выражения (10) сводятся к виду

$$\begin{aligned}
&Z_{\text{вх}}^{\text{ос}} \approx \frac{\frac{h_{11e}}{(h_{21e}+1)}}{1+\frac{1}{h_{21e}R_2}\cdot\frac{h_{21e}R_3}{(h_{21e}+1)}},\\
&K_i^{\text{ос}} \approx \frac{\frac{h_{21e}}{(h_{21e}+1)}}{1+\frac{1}{h_{21e}R_2}\cdot\frac{h_{21e}R_3}{(h_{21e}+1)}},\\
&Z_{\text{пер}}^{oc} \approx \frac{\frac{h_{21e}}{(h_{21e}+1)}R_3}{1+\frac{1}{h_{21e}R_2}\cdot\frac{h_{21e}R_3}{(h_{21e}+1)}},\\
&K_U^{\text{ос}} \approx \frac{h_{21e}R_3}{h_{11e}}, \qquad Y_{\text{пер}}^{\text{ос}} \approx \frac{h_{21e}}{h_{11e}}.
\end{aligned} \tag{11}$$

Полагая в (11)

$$\begin{aligned}
&\mu_z = h_{21e}R_3/(h_{21e}+1), \quad \beta_y = -1/h_{21e}R_2,\\
&Z_{\text{вх}} = h_{11e}/h_{21e}+1, \qquad Y_{\text{н}} = 1/R_3.
\end{aligned}$$

получим формулы табл. 2 для параллельно — параллельной отрицательной ОС. Смысл условий $R_2 >> R_1$, $R_2 >> h_{11e}$ такой же, что и для схемы (рис. 3б). Таким образом, в схеме (рис. 3в) действуют две отрицательные ОС: последовательно — последовательная и параллельно — параллельная. О характере ОС в схеме (рис. 3в) в 60-е годы велась дискуссия. Приводились такие рассуждения: напряжение $u_{\text{вых}}$ синфазно с $u_{\text{вх}}$, а ток i_{oc} синфазный с $u_{\text{вых}}$, значит ОС положительна. Однако известно, что каскад с общей базой устойчив. Ошибочность таких рассуждений состоит не только в том, что не учитывается обратимость канала обратной связи через R_2, но и в том, что при параллельно — параллельной ОС канал прямой передачи характеризуется не коэффициентом передачи напряжения, а передаточным сопротивлением, канал же обратной связи — передаточной проводимостью (см. табл. 1). Из (11) видим, что коэффициент передачи напряжения $K_U^{oc} = K_U$ — положителен, но не зависит от ОС и не влияет на ОС. Передаточное сопротивление канала прямой передачи μ_z также положительно. Однако передаточная проводимость канала обратной передачи $\beta_y = -1/(h_{21e}R_2)$ отрицательна. Это объясняется тем, что ток обратной связи направлен к эмиттеру, следовательно, противофазен току базы. По этой же причине проводимость уменьшается в h_{21e} раз. Для сравнения отметим, что в схеме (рис. 3б) передаточная проводимость канала обратной передачи $\beta_y = 1/R_1$ положительна, однако передаточное сопротивление $\mu_z = -h_{21e}R_1$ отрицательно, поэтому ОС в схеме (рис. 3б) отрицательна, что никогда и не оспаривалось.

Отметим также, что если в (3), (7), (9), (11) изменить знак параметра h_{21e}, что соответствует изменению направления зависимого источника тока в цепи коллектора схемы замещения транзистора, то знаменатель в выражениях передаточных функций можно обратить в нуль, т.е. получить режим самовозбуждения. Это еще раз доказывает, что в рассмотренных схемах существует ОС.

Выводы

Изложенное выше позволяет сделать следующие заключения:

- критериями существования ОС в электронной цепи может быть возможность получения режима самовозбуждения в схеме замещения при варьировании параметров схемы и изменении направления зависимых источников, а также характер влияния ОС на СФ;
- выводы классической теории обратной связи нельзя безоговорочно применять к электронным цепям, имеющим обратимые каналы обратной передачи;
- при определении вида ОС в электронных цепях нужно анализировать их влияние на все функции цепи, входные и передаточные, характеризуя режим на входе и на выходе как напряжениями, так и токами;
- необходимо определять условия, когда можно пренебречь прямым прохождением сигнала через канал обратной передачи;
- в различных видах ОС каналы прямой и обратной передачи нужно характеризовать соответствующими передаточными функциями;
- знак ОС определяется знаками только тех передаточных функций, которые характеризуют каналы прямой и обратной передачи при данном виде ОС.

Перечень ссылок

1. Трохименко Я. К. Условия существования обратной связи // Известия вузов. Радиоэлектроника. — 1997. — Т. 40, № 9. — с. 3-11.
2. Трохименко Я. К. Символьный анализ сложных линейных электронных цепей. — К. : НТУУ КПИ, 1999. — 208 с.
3. Сташук В. Д. До питання про класифікацію зворотних зв‘язків у радіоелектронних колах / В.Д. Сташук // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування. — 2006. — № 33. — с. 24-31.
4. Сташук В. Д. Теорія і комп'ютерне моделювання зворотних зв'язків у радіоелектронних колах // Вісник університету "Україна". Серія "Сучасні інженерні технології". — № 1. — 2011. — с. 110-116.

References

[1] Trokhimenko Ya.K. (1997) Usloviya sushchestvovaniya obratnoi svyazi [Conditions for the existence of feedback]. *Izvestiya vuzov. Radioelektronika*, Vol. 40, No 9, pp. 3-11.

[2] Trokhimenko Ya. K. (1999) *Simvol'nyi analiz slozhnykh lineinykh elektronnykh tsepei* [Symbolic analysis of complex linear electronic circuits], Kyiv, NTUU KPI, 208 p.

[3] Stashuk V. D. (2006) To a question on classification of feedback in radioelectronic circuits. *Visn. NTUU KPI, Ser. Radioteh. radioaparatobuduv.*, no. 33, pp. 24-31. (in Ukrainian)

[4] Stashuk V. D. (2011) Teoriia i komp'iuterne modeliuvannia zvorotnykh zv'iazkiv u radioelektronnykh kolakh [Theory and computer modeling of feedback in electronic circuits]. *Visnyk universytetu "Ukraina". Seriia "Suchasni inzhenerni tekhnolohii"*, No 1, pp. 110-116.

Умови існування і класифікація зворотних зв'язків в електронних колах

Сташук В. Д.

У статті проаналізовано стан питання про існування і класифікацію зворотних зв'язків в електронних колах. Показано необхідність, але недостатність присутності залежних джерел для реалізації зворотних зв'язків. Запропоновано умовами існування зворотних зв'язків в електронних колах розглядати можливість отримання режиму самозбудження в схемі заміщення при варіюванні параметрів схеми і зміні напрямку залежних джерел, а також характер впливу зворотних зв'язків на схемні функції. При визначенні виду зворотних зв'язків в електронних колах потрібно аналізувати їх вплив на всі функції кола, вхідні і передавальні, характеризуючи режим на вході і виході як напругами, так і струмами.

Ключові слова: електронне коло; зворотний зв'язок; залежне джерело; функції кола; режим самозбудження; схема заміщення

Conditions of existence and classification of the feedback in electronic circuits

Stashuk, V. D.

The article analyzes the state of matter on existence and classification of feedback in electronic circuits. It is shown that the presence of dependent sources is a necessary but not sufficient condition for the implementation of feedback. As a criterion for the existence of feedback in electronic circuit it is proposed to consider the possibility of instability when changing the circuit parameters and changing of direction of dependent sources, as well as the feedbacks affect the circuit functions. In determining the type of feedback in electronic circuits it's necessary to analyze their influence on all the functions of the circuit, the input and transmission, describing the mode of the input and output both voltage and current.

Key words: electronic circuit; the feedback; the dependent source; circuit function; equivalent circuit