

УДК 621.374

Л. Б. Лищинская, к. т. н., доц.; Я. С. Рожкова; Н. А. Филинюк, д. т. н., проф.

## АНАЛИЗ «КАЧЕСТВА» ОДНОКРИСТАЛЬНЫХ КОНВЕРТОРОВ ИММИТАНСА

В статье разработаны математические модели ОПИ, которые учитывают зависимости их преобразованных иммитансов от физических параметров транзисторов, а также проведено исследование зависимостей качества  $S_{ai}^{Tk}$  от физических параметров вышеобозначенных транзисторов.

**Ключевые слова:** обобщённый преобразователь иммитанса, однопереходной транзистор, биполярный транзистор, полевой транзистор, коэффициент чувствительности, качество.

### Введение

Одним из требований, которые выдвигаются к обобщенным преобразователям иммитанса (ОПИ), является стабильность коэффициента преобразования. Нестабильность этого коэффициента принято характеризовать чувствительностью к изменению параметров ОПИ, которая получила название "качество" ОПИ [1]. Чем меньше чувствительность ОПИ, тем выше его качество.

### Постановка задач исследований

С целью определения зависимости качества ОПИ от физических параметров однопереходного (ОТ), биполярного (БТ) и полевого (ПТ) транзисторов, которые обеспечивают возможность управления качеством  $S_{ai}^{Tk}$  с помощью изменения физических параметров и схем включения. При этом необходимо решить такие задачи:

- разработать математические модели конверторов иммитанса на базе ОТ, БТ и ПТ, которые учитывают зависимость их преобразованных иммитансов от физических параметров транзисторов;
- провести исследование зависимостей качества  $S_{ai}^{Tk}$  от физических параметров транзисторов для реального и идеального конвертора иммитанса.

### Разработка математических моделей

Рассмотрим три вида конверторов, основанных на базе однопереходного транзистора, включенного по схеме с общей базой 1 ( $\delta I$ ), биполярного транзистора, включенного по схеме с общим коллектором ( $\kappa$ ) и на базе полевого транзистора, включенного по схеме с общим стоком ( $c$ ).

Для построения математических моделей таких конверторов, которые учитывают физические параметры транзисторов, используем их физические эквивалентные схемы [2 – 4].

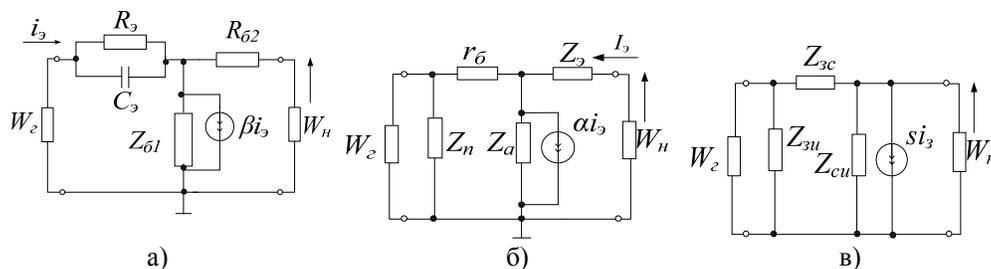


Рис. 1. Эквивалентные схемы однокристалльных конверторов на базе: а) ОТ; б) БТ; в) ПТ

На схеме (рис. 1 а):  $\beta$  – коэффициент передачи ОТ по току;  $Z_{\delta 1}$ ,  $R_{\delta 2}$  – сопротивление

базы 1 и базы 2;  $C_3$  и  $R_3$  – барьерная емкость и дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода. На схеме (рис. 1 б):  $\alpha$  – коэффициент передачи БТ по току;  $r_6$  – омическое сопротивление базы,  $Z_3$  – полное сопротивление эмиттерного перехода, который определяется как  $Z_3 = r_3 / (1 + j\omega r_3 C_3)$ ;  $Z_a = 1 / j\omega C_{k1}$ ,  $Z_n = 1 / j\omega C_{k2}$ , где  $C_{k1}$  и  $C_{k2}$  – активная и пассивная емкости коллекторного перехода. На схеме (рис. 1 в):  $Z_{3и}$ ,  $Z_{3с}$  и  $Z_{сн}$  – комплексные сопротивления затвор-исток, затвор-сток и сток-исток ПТ соответственно;  $s$  – крутизна ПТ.

Физические эквивалентные схемы получены без учета паразитных элементов, корпуса и выводов, так как исследования проводятся на относительно невысоких частотах. Параметры физических эквивалентных схем определённые по методике, описанной в [5].

Для упрощения расчетов сделаем определенные предположения, а именно: в однопереходном транзисторе при больших токах сопротивление эмиттера  $R_3 \rightarrow 0$ , а  $Z_{61} = 1 / j\omega C_{61}$ .

С учетом этих допущений, получим математические выражения для  $Y$ -параметров трёх физических эквивалентных схем ОПИ.

Матрица проводимости схемы (рис. 1 а) будет выглядеть:

$$[Y_{61}] = \begin{bmatrix} \frac{R_{62} + Z_{61}}{R_{62} \cdot (1 - \beta) + Z_{61}} & \frac{-1}{R_{62} \cdot (1 - \beta)} \\ \frac{-1}{R_{62}} & \frac{1}{R_{62}} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Матрица проводимости схемы (рис. 1 б) будет выглядеть:

$$[Y_{\kappa}] = \begin{bmatrix} \frac{Z_3 + Z_a \cdot (1 - \alpha)}{Z_3 \cdot r_6 + Z_a \cdot [r_3 + r_6 \cdot (1 - \alpha)]} & -\frac{Z_3}{Z_3 \cdot r_6 + Z_a \cdot [r_3 + r_6 \cdot (1 - \alpha)]} \\ \frac{Z_a}{Z_3 \cdot r_6 + Z_a \cdot [r_3 + r_6 \cdot (1 - \alpha)]} & \frac{r_6 + Z_a}{Z_3 \cdot r_6 + Z_a \cdot [r_3 + r_6 \cdot (1 - \alpha)]} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Матрица проводимости схемы (рис. 1 в) будет выглядеть:

$$[Y_c] = \begin{bmatrix} \frac{\Omega_s \cdot (\Omega_s + j)}{R_e} & -\frac{\Omega_s \cdot (\Omega_s + j)}{R_e} \\ -\frac{\Omega_s + s \cdot R_3 + j\Omega_s \cdot (1 - sR_3)}{R_3} & \frac{\Omega_s + s \cdot R_3 + j\Omega_s \cdot (1 - sR_3)}{R_3} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где  $\Omega_s = \frac{\omega}{\omega_s}$ ,  $\omega_s = \frac{1}{R_3 C_{3и}}$ ;  $R_3$  – сопротивление истока,  $C_{3и}$  – ёмкость затвор-исток;

$$\dot{\alpha} = \frac{\alpha_0}{1 + j\Omega_T}, \quad \dot{\beta} = \frac{\beta_0}{1 + j\Omega_\beta}, \quad \dot{s} = \frac{s_0}{1 + j\Omega_s}.$$

Входящая и исходящая преобразованные проводимости рассматриваемых схем, равны [6]:

$$Y_{вх.} = Y_{11} - Y_{12} \cdot Y_{21} / (Y_{22} + Y_n), \quad (4)$$

$$Y_{исх.} = Y_{22} - Y_{12} \cdot Y_{21} / (Y_{11} + Y_c). \quad (5)$$

где  $Y_n$  и  $Y_c$  – преобразуемые проводимости.

Системы уравнений образуют математические модели однокристалльных ОПИ и позволяют провести исследование зависимостей качества от основных параметров физических эквивалентных схем ОТ, БТ и ПТ.

Для определения качества однокристалльных конверторов иммитанса на основе (1) – (3) находим коэффициент конверсии иммитанса  $T_{\kappa}$ . Для всех случаев при идеальном ОПИ прямой  $T_{\kappa,и}$  и обратный  $T'_{\kappa,и}$  коэффициенты конверсии будут описываться

выражениями [7]:

$$T_{\kappa.i} = \frac{Y_{11}}{Y_{22}}, \quad T'_{\kappa.i} = \frac{Y_{22}}{Y_{11}}. \quad (6)$$

При реальном ОПИ прямой  $T_{\kappa.p}$  и обратный  $T'_{\kappa.p}$  коэффициенты конверсии с учётом (4) и (5) будут равны:

$$T_{\kappa.p} = \frac{Y_{ex.}}{Y_n}, \quad T'_{\kappa.p} = \frac{Y_{исх.}}{Y_2}. \quad (7)$$

Используя (6) и (7) находим аналитические выражения для качества однокристалльных преобразователей иммитанса при прямом и обратном преобразовании:

$$S_{\alpha_i T_\kappa} = \frac{\partial T_\kappa}{\partial \alpha_i} \cdot \frac{\alpha_i}{T_\kappa}, \quad S_{\alpha_i T'_\kappa} = \frac{\partial T'_\kappa}{\partial \alpha_i} \cdot \frac{\alpha_i}{T'_\kappa}, \quad (8)$$

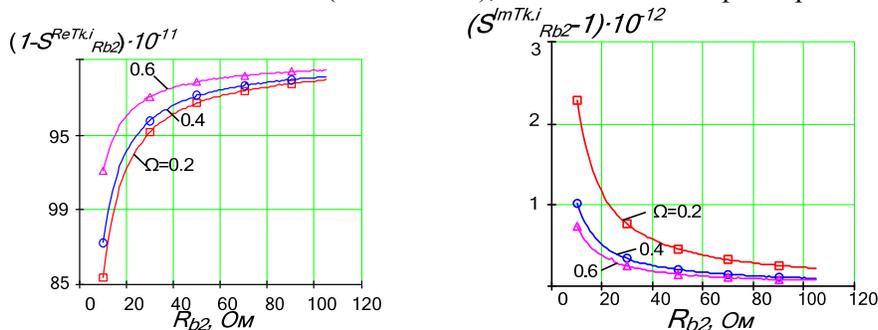
где  $\alpha_i$  – выбранный физический параметр транзистора.

### Результаты исследования

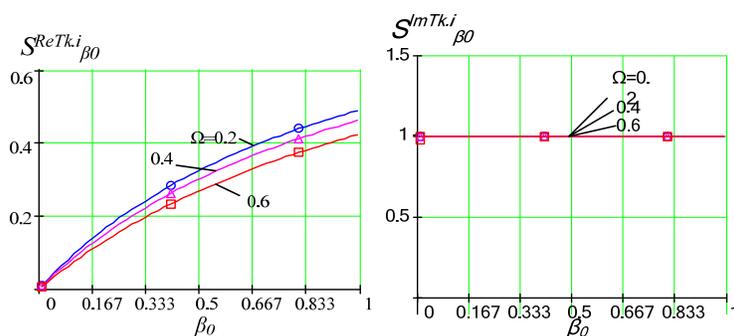
Зависимости коэффициентов качества от параметров физических эквивалентных схем вышеобозначенных ОПИ рассматривались для двух случаев: идеального и реального конверторов.

Для идеального конвертора зависимости чувствительности прямого  $T_{\kappa.u}$  и обратного  $T'_{\kappa.u}$  коэффициентов конверсии от основных физических параметров эквивалентной схемы ОТ представлены на рис. 2 и 3.

Зависимость реальной части качества от сопротивления базы 2 ( $R_{\delta 2}$ ) носит нарастающий характер, а мнимой части – нисходящий характер, но влияние изменения  $R_{\delta 2}$  является незначительным. Увеличение коэффициента передачи транзистора по току  $\beta_0$  приводит к росту реальной части чувствительности, а следовательно падение качества конвертора (рис. 2б), причем увеличение приведенной частоты  $\Omega$  уменьшает  $S_{\beta_0 T_\kappa}$ . Из графика мнимой части зависимости можно сделать вывод, что ни изменение коэффициента передачи транзистора по току  $\beta_0$ , ни изменение приведенной частоты  $\Omega$  не влияют на качество. Зависимости чувствительности от сопротивления ( $R_{\delta 1}$ ) и емкости ( $C_{\delta 1}$ ) базы 1 являются настолько незначительными ( $10^{-14} - 10^{-15}$ ), что ими можно пренебречь.

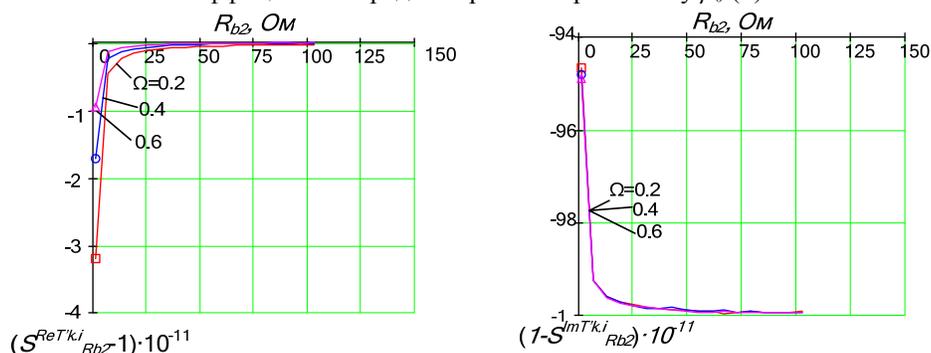


а)

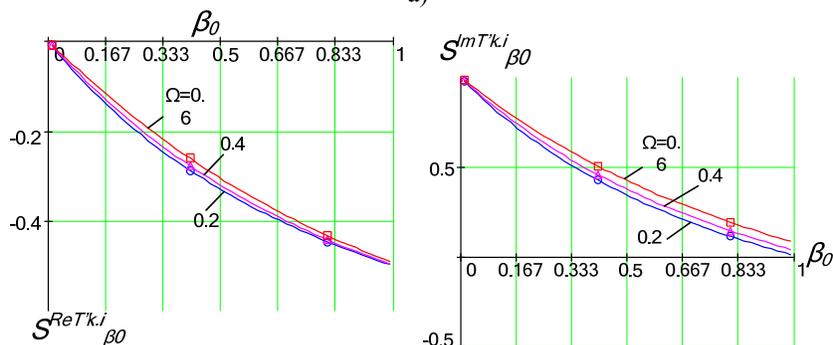


б)

Рис. 2. Зависимость чувствительности для прямого коэффициента преобразования  $T_{к.и}$  для идеального ОПИ на базе ОТ при разной приведённой частоте  $\Omega=f/f_T$  от сопротивления базы  $2 R_{\delta 2}$  (а); коэффициента передачи транзистора по току  $\beta_0$  (б)



а)



б)

Рис. 3. Зависимость чувствительности для обратного коэффициента преобразования  $T_{к.и}$  для идеального ОПИ на базе ОТ при разной приведённой частоте  $\Omega=f/f_T$  от сопротивления базы  $2 R_{\delta 2}$  (а); коэффициента передачи транзистора по току  $\beta_0$  (б)

Качество для выбранного коэффициента конверсии зависит от изменения сопротивления  $R_{\delta 2}$  в незначительной мере (рис. 3а), причем изменение приведенной частоты практически не влияет на качество. Как реальная, так и мнимая часть зависимости качества от  $\beta_0$  имеют нисходящий характер, при этом располагаются в разных четвертях: реальная часть имеет отрицательные значения чувствительности, а мнимая – положительные.

Анализ зависимостей качества для прямой и обратной конверсии для идеального конвертора от основных физических параметров схемы биполярного транзистора, представленный на рисунках. 4 и 5. Реальная часть чувствительности существенно растет, уменьшая качество конвертора, (рис. 4а) как с увеличением сопротивления базы  $r_{\delta}$ , так и с увеличением приведенной частоты  $\Omega$ . Мнимая же часть носит противоположный характер и является отрицательной, уменьшаясь с ростом  $r_{\delta}$  и  $\Omega$ . Увеличение емкости коллектора увеличивает чувствительность (как для реальной, так и для мнимой части), но рост

приведенной частоты приводит к уменьшению качества для реальной части, и ее увеличения для мнимой (рис. 4 б).

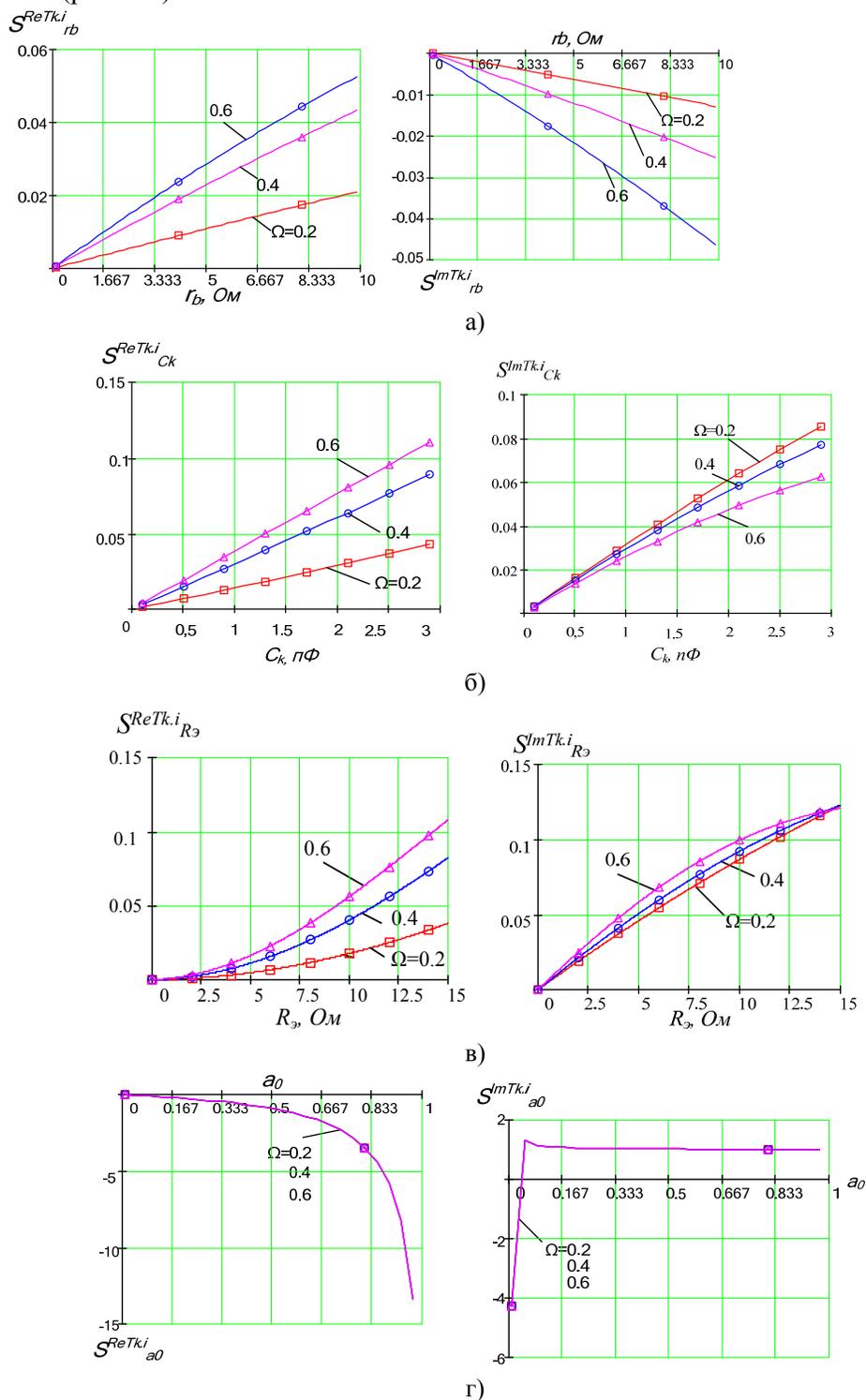
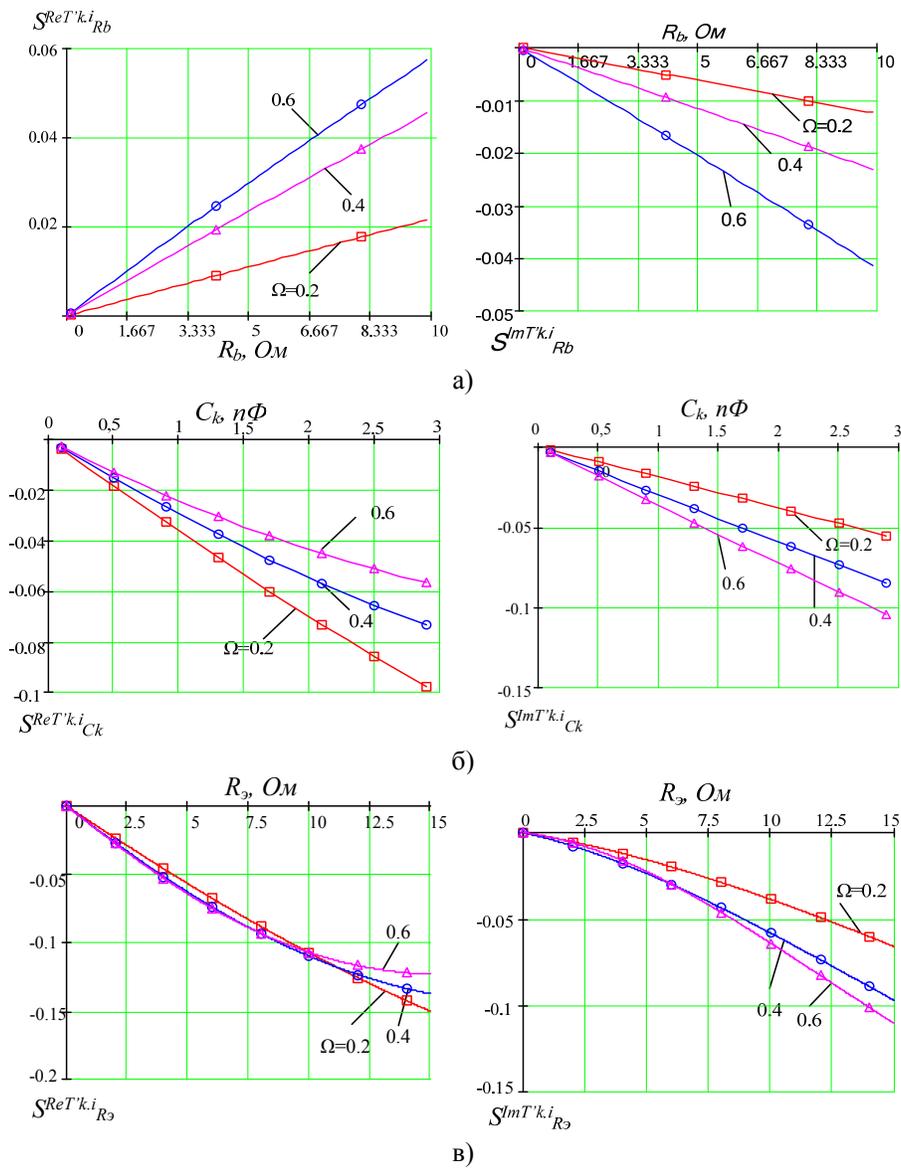


Рис. 4. Зависимость качества прямого преобразования идеального ОПИ на базе БТ при приведённой частоте  $\Omega=f/f_T$  от сопротивления базы  $r_b$  (а); ёмкости коллектора  $C_k$  (б); сопротивления эмиттера  $r_e$  (в); коэффициента передачи транзистора по току  $a_0$  (г)

Увеличение сопротивления эмиттера  $r_e$  и приведенной частоты положительно влияет на изменение качества (рис. 4в). Зависимости имеют одинаковые числовые пределы, но

характер графиков свидетельствует о разных знаках первых производных. Изменение в сторону увеличения коэффициента передачи БТ по току уменьшает значение чувствительности, увеличивая качество (рис. 4г); реальная часть графика этих зависимостей является сугубо отрицательной. Мнимая часть носит смешанный характер: до  $\alpha_0 = 0,038$  качество является отрицательным, а после этого значения – положительным. При значении  $\alpha_0 = 0,05$  наблюдается пик роста  $S_{\alpha_0}^{T_{k,u}}$ , дальнейшее увеличение коэффициента передачи, как и изменение приведенной частоты, не влияет на изменение качества.

При обратном превращении чувствительности коэффициента конверсии  $T'_{k,u}$  реальная часть зависимости качества от сопротивления базы  $r_b$  (рис. 5а) растет и лежит в области положительных значений, а влияние приведенной частоты  $\Omega$  является таким же, как и при прямом коэффициенте конверсии. Зависимость в мнимой части носит нисходящий характер, имеет отрицательные значения и уменьшается.



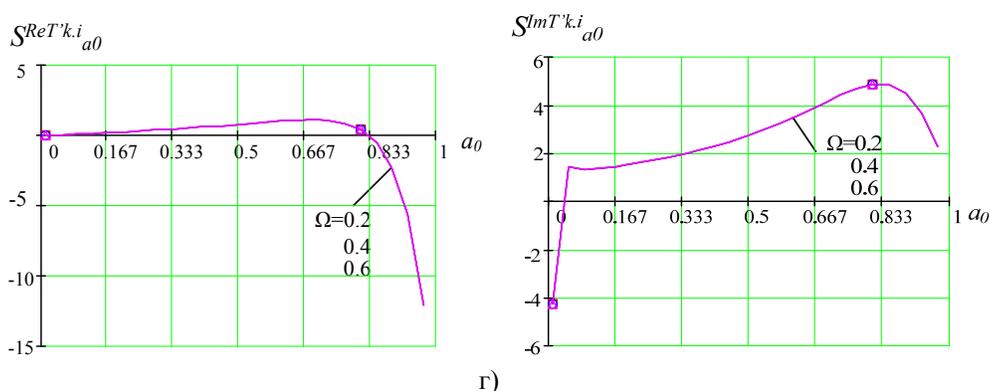


Рис. 5. Зависимость качества обратного преобразования идеального ОПИ на базе БТ при приведённой частоте  $\Omega=f/f_T$  от сопротивления базы  $r_b$  (а); ёмкости коллектора  $C_k$  (б); сопротивления эмиттера  $r_e$  (в); коэффициента передачи транзистора по току  $a_0$  (г)

Для полевого транзистора при прямом и обратном преобразовании, зависимости чувствительности от основных его физических параметров является незначительными ( $10^{-14} - 10^{-15}$ ).

Следующим шагом исследования было выявление тех же зависимостей, но уже для реального конвертора. Рассмотрим их при прямом и обратном преобразовании для ОТ. Результаты численных расчетов чувствительности  $S_{ai}^{Tk}$  представлены на рисунках 6 и 7.

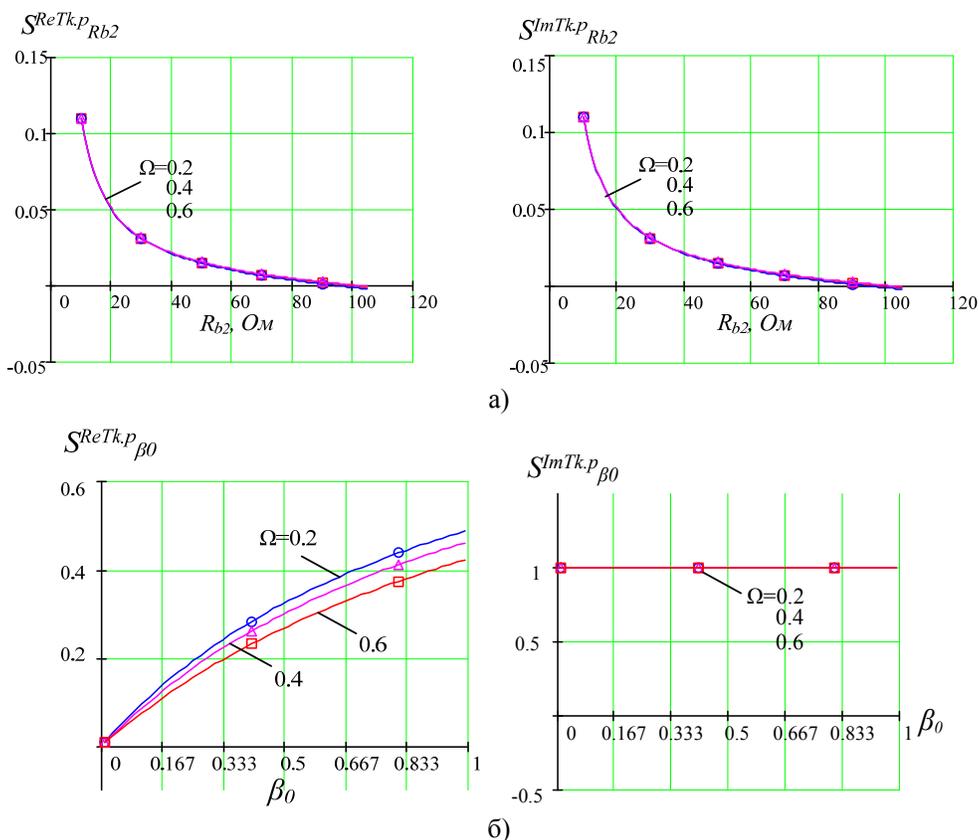


Рис. 6. Зависимость чувствительности для прямого коэффициента преобразования  $T_{ki}$  для реального ОПИ на базе ОТ при разной приведённой частоте  $\Omega=f/f_T$  от сопротивления базы  $2R_{b2}$  (а); коэффициента передачи транзистора по току  $\beta_0$  (б)

Сопротивление базы  $2R_{b2}$  при росте уменьшает значение качества конвертора (рис. 6 а), для реальной и увеличивает для мнимой части, имеет одинаковые числовые

пределы и не поддается влиянию изменения приведенной частоты. Коэффициент передачи транзистора по току (рис. 6 б) в случае реального конвертора имеет такое же влияние на качество, как и при идеальном конверторе.

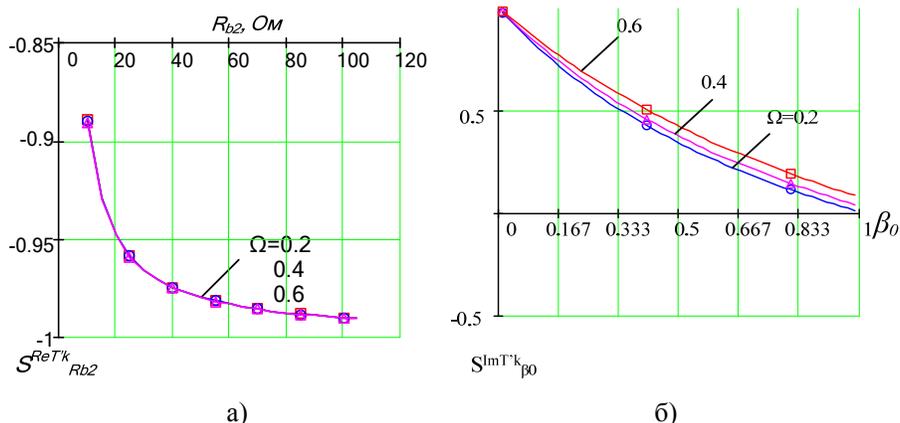
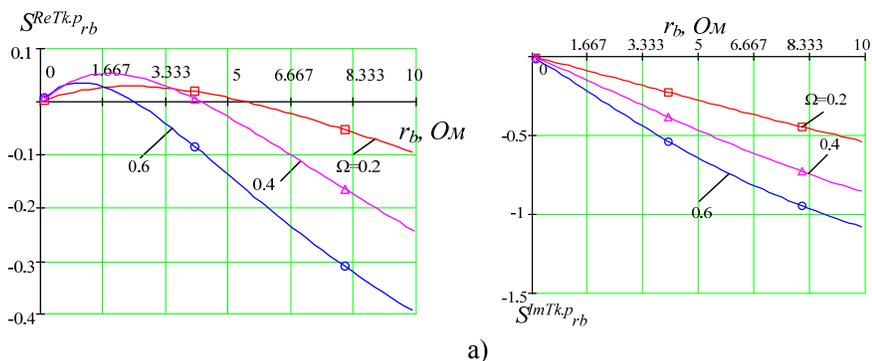


Рис. 7. Зависимость чувствительности для обратного коэффициента преобразования  $T'_{ki}$  для реального ОПИ на базе ОТ при разной приведённой частоте  $\Omega=f/f_T$  от сопротивления базы  $2 R_{b2}$  (а); коэффициента передачи транзистора по току  $\beta_0$  (б)

Неоднозначная картина наблюдается для обратного коэффициента конверсии  $T'_k$ : числовые значения  $S_{R_{b2}}^{Tk,p}$  являются отрицательными (рис. 7 а), и уменьшаются с ростом сопротивления базы  $2 R_{b2}$ . Коэффициент передачи транзистора по току  $\beta_0$  (рис. 7 б) не влияет на размер реальной части качества конвертора, и уменьшает чувствительность в его мнимой части.

Зависимости качества при прямом и обратном преобразовании для реального конвертора на базе БТ представлены на рисунках 8 и 9. График дает основания утверждать, что влияние  $r_b$  на качество БТ носит неоднозначный характер (рис. 8 а): на реальной части наблюдается пик роста при  $r_b = 0,5 - 1,66$  Ом, после чего увеличение  $r_b$  уменьшает чувствительность, причем после значения  $r_b = 3,33 - 4$  Ом коэффициент приобретает отрицательные значения. Емкость коллектора  $C_k$  (рис. 9 б) при ее росте негативно влияет на качество. Но на мнимой части при увеличении приведенной частоты до  $\Omega = 0,6$  наблюдается уменьшение  $S_{C_k}^{Tk}$  и он становится отрицательным. При всех значениях сопротивления эмиттера реальная часть качества имеет отрицательные числовые значения (рис. 8 в) и носит нисходящий характер. Мнимая часть также спадает, но к значению  $r_e = 2 - 4,5$  Ом (в зависимости от размера  $\Omega$ ) качество имеет позитивные значения, а в следующем – негативные. Чувствительность при увеличении  $\alpha_0$  на реальной части графика (рис. 8 г) имеет нисходящий характер, а на мнимой – растущий. Увеличение приведенной частоты больше значения  $\Omega=0,4$  не влияет на качество.



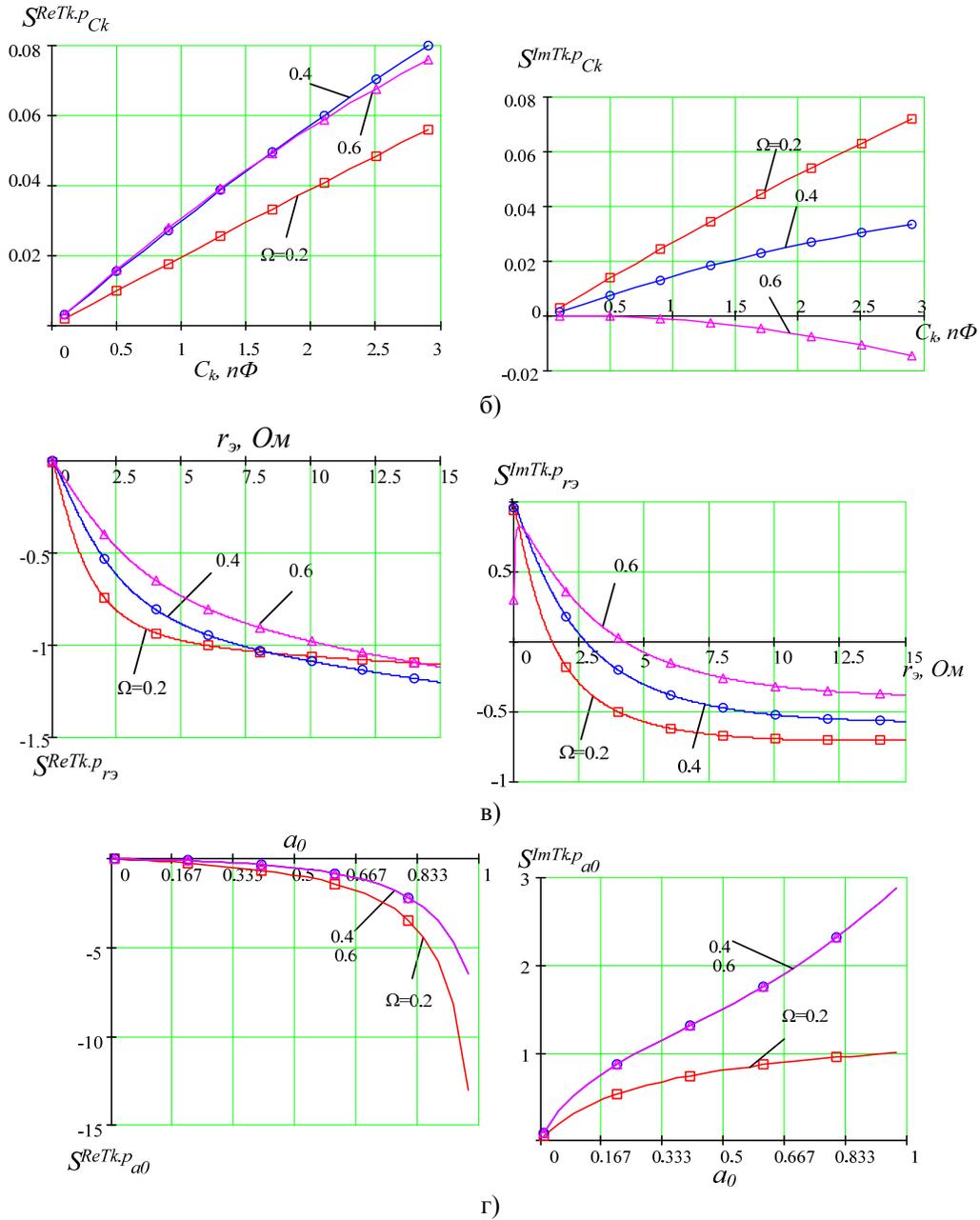
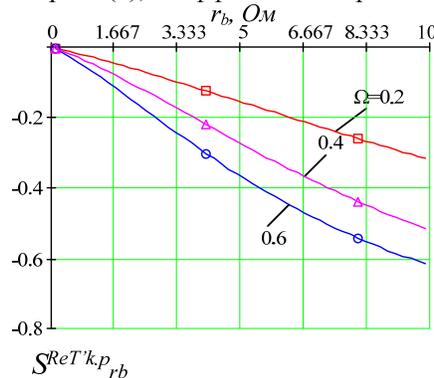


Рис. 8. Зависимость коэффициента чувствительности при прямом преобразовании для реального ОПИ на базе БТ при разной приведённой частоте от сопротивления базы  $r_b$  (а); ёмкости коллектора  $C_k$  (б); сопротивления эмиттера  $r_e$  (в); коэффициента передачи транзистора по току  $a_0$  (г)



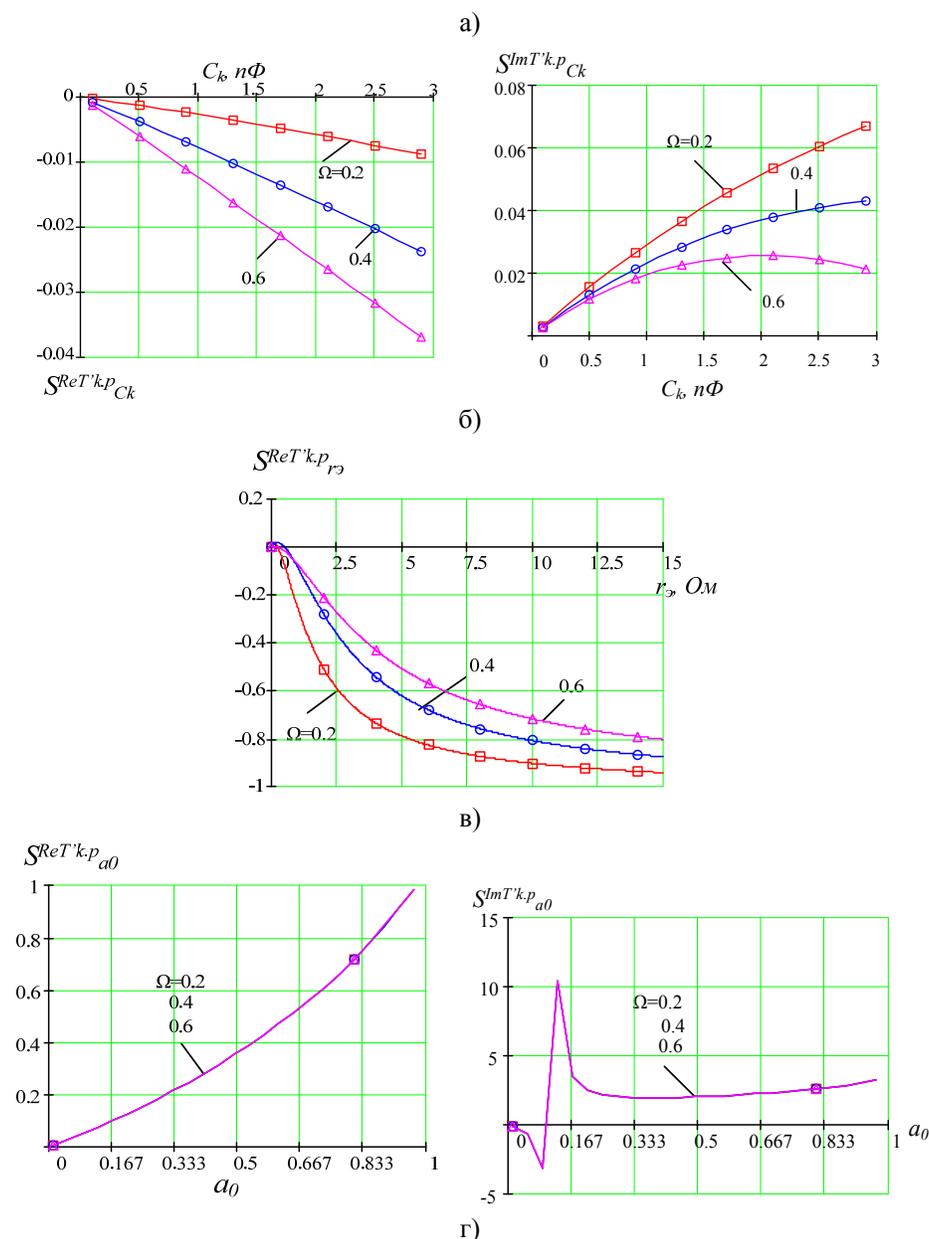


Рис. 9. Зависимость коэффициента чувствительности при обратном преобразовании для реального ОПИ на базе БТ при разной приведённой частоте от: сопротивления базы  $r_b$  (а); ёмкости коллектора  $C_k$  (б); сопротивления эмиттера  $r_э$  (в); коэффициента передачи транзистора по току  $a_0$  (г)

Анализ графиков зависимости качества от  $r_b$ ,  $C_k$  и  $r_э$  (рис. 9 а, б, в) показывает, что реальная часть  $S_{ai}^{Tk}$  уменьшается с увеличением этих параметров, его числовые значения являются отрицательными и спадают с увеличением приведенной частоты. Рост коэффициента передачи по току, как видно из графика реальной части (рис. 9 г), существенно увеличивает чувствительность конвертора, уменьшая его качество, что негативно влияет на его работу, причем она вообще не зависит от размера приведенной частоты. На графике мнимой части наблюдается 2 экстремума – минимум ( $S_{a0}^{Tk} = -3,19$ ) при значении  $a_0 = 0,09$  и максимум ( $S_{a0}^{Tk} = 10,4$ ) при  $a_0 = 0,13$ . Увеличение значения  $a_0 > 0,33$  не влияет на качество. Зависимости чувствительности  $S_{ai}^{Tk}$  при прямом и обратном преобразовании для реального конвертора от основных физических параметров схемы ПТ является близкими к нулю ( $10^{-15}$ ).

В таблице 1 приведены числовые значения коэффициента чувствительности для всех Наукові праці ВНТУ, 2010, № 3

вышерассмотренных случаев.

Таблица 1

**Значение качества от разных параметров физической структуры конверторов иммитанса на частоте  $\Omega=0,2$**

Режим прямой конверсии					
ОТ		БТ		ПТ	
Идеальный	Реальный	Идеальный	Реальный	Идеальный	Реальный
		$S^{Re Tk}_{Rb}=0.013$ $S^{Im Tk}_{Rb}=-0.0081$	$S^{Re Tk}_{Rb}=-0,019$ $S^{Im Tk}_{Rb}=-0,36$	$S^{Re Tk}_{Ri}=-2$ $S^{Im Tk}_{Ri}=-1$	$S^{Re Tk}_{Ri}=-2$ $S^{Im Tk}_{Ri}=-1$
$S^{Im Tk}_{Rb2}=1$	$S^{Re Tk}_{Rb2}=-0,0005$ $S^{Im Tk}_{Rb2}=-0,0005$	$S^{Re Tk}_{Ck}=0.016$ $S^{Im Tk}_{Ck}=0.038$	$S^{Re Tk}_{Ck}=0.024$ $S^{Im Tk}_{Ck}=0.032$	$S^{Re Tk}_{omegas}=-2$ $S^{Im Tk}_{omegas}=-1$	$S^{Re Tk}_{omegas}=-2$ $S^{Im Tk}_{Ci}=-1$
	$S^{Im Tk}_{Cb1}=-2,294$	$S^{Re Tk}_{Rem}=0.0044$ $S^{Im Tk}_{Rem}=0.046$	$S^{Re Tk}_{Rem}=-0.98$ $S^{Im Tk}_{Rem}=-0.57$	$S^{Re Tk}_{s0}=-2$ $S^{Im Tk}_{s0}=-1$	$S^{Re Tk}_{s0}=-2$ $S^{Im Tk}_{s0}=-1$
$S^{Re Tk}_{\beta0}=1.93$ $S^{Im Tk}_{\beta0}=-0.37$		$S^{Re Tk}_{a0}=-18.42$ $S^{Im Tk}_{a0}=1,013$	$S^{Re Tk}_{a0}=-7.514$ $S^{Im Tk}_{a0}=2.943$		
Режим обратной конверсии					
ОТ		БТ		ПТ	
Идеальный	Реальный	Идеальный	Реальный	Идеальный	Реальный
		$S^{Re Tk}_{Rb}=0.014$ $S^{Im Tk}_{Rb}=-0.008$	$S^{Re Tk}_{Rb}=-0.206$ $S^{Im Tk}_{Rb}=0.794$	$S^{Im Tk}_{Ri}=1$	$S^{Im Tk}_{Ri}=1$
$S^{Re Tk}_{Rb2}=-1$ $S^{Im Tk}_{Rb2}=-1$	$S^{Re Tk}_{Rb2}=-0,99$ $S^{Im Tk}_{Rb2}=-0,99$	$S^{Re Tk}_{Ck}=-0.043$ $S^{Im Tk}_{Ck}=-0.022$	$S^{Re Tk}_{Ck}=-0,003$ $S^{Im Tk}_{Ck}=0,034$	$S^{Im Tk}_{omegas}=1$	$S^{Im Tk}_{omegas}=1$
		$S^{Re Tk}_{Rem}=-0,057$ $S^{Im Tk}_{Rem}=-0.016$	$S^{Re Tk}_{Rem}=-0.79$ $S^{Im Tk}_{Rem}=-1.96$	$S^{Re Tk}_{s0}=0$ $S^{Im Tk}_{s0}=1$	$S^{Re Tk}_{s0}=0$ $S^{Im Tk}_{s0}=1$
		$S^{Re Tk}_{a0}=-17,732$ $S^{Im Tk}_{a0}=1,629$	$S^{Re Tk}_{a0}=0.983$ $S^{Im Tk}_{a0}=3.1$		

Наименьшая чувствительность, а следовательно и наибольшее качество, наблюдается для идеального конвертора на базе БТ, включенного по схеме с общим коллектором как при прямой ( $S_{a0}^{Tk} = -18,43$ ), так и при обратной ( $S_{a0}^{Tk} = -17,732$ ) конверсии. Наименьшее качество наблюдается для идеального конвертора на базе ВОТ, включенного по схеме с общей базой 1 для прямой конверсии  $T_k$  ( $S_{\beta0}^{Tk} = 1,93$ ) и для обоих видов конверторов на базе ПТ, включенного по схеме с общим стоком как для прямой так и обратной конверсии по всем параметрам  $S_{ai}^{Tk} = 1$ .

**Выводы**

Для идеального конвертора на базе ОТ наименьшее качество ( $S_{R\delta2}^{Tk} = -1$ ) наблюдается при обратной конверсии при включении по схеме с общей базой 1. Для реального конвертора на базе ОТ наименьшим является качество ( $S_{R\delta2}^{Tk} = -0,99$ ) при обратном коэффициенте конверсии. Следовательно, увеличивая значение параметра сопротивления базы 2 ( $R_{\delta2}$ ), можно увеличивать качество однокристального конвертора на базе ОТ.

Для идеального конвертора на базе БТ наименьшая чувствительность наблюдается как при прямой ( $S_{a0}^{Tk} = -18,43$ ), так и при обратной ( $S_{a0}^{Tk} = -17,732$ ) конверсии, при включении по схеме с общим коллектором. Для реального конвертора на базе БТ качество является наибольшим ( $S_{a0}^{Tk} = -0,98$ ) при прямой конверсии. Увеличивая значение коэффициента передачи транзистора по току  $\alpha_0$ , можно увеличивать качество однокристального конвертора на базе БТ.

Как для идеального, так и для реального конвертора на базе ПТ наименьшая чувствительность ( $S_{ai}^{Tk} = -2$ ) наблюдается при прямой конверсии по всем параметрам при включении по схеме

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Филановский Н. М. Схемы с преобразователями сопротивления / Н. М. Филановский, А. Ю. Персианов, В. К. Рыбин – Л.: Энергия, 1973, – 192 с.
2. Узагальнені перетворювачі іммітансу на основі інжекційно-пролітної транзисторної структури із загальним витоком [Електронний ресурс] / Ліщинська Л. Б., Булига Н. В., Шведюк А. Г., Філінюк М. А. // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – №2: 2008, Режим доступу до журн.: [http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2008-2/2008-2.files/uk/08lblsts\\_uk.pdf](http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2008-2/2008-2.files/uk/08lblsts_uk.pdf)
3. Радзевич В. Д. Проектирование СВЧ устройств с помощью Microwave office / В. Д. Радзевич, Ю. В. Потапов, А. А. Кукушин; под ред. В. Д. Радзевича. – М.: САЛОН- Пресс, 2003, – 496 с.
4. Філінюк М. А. Інформаційні пристрої на основі потенційно-нестійких структур Шотткі. / М. А. Філінюк, О. М. Куземко, Л. Б. Ліщинська – Вінниця, ВНТУ, 2009, – 274 с.
5. Філінюк М. А. Метрологічні основи негatronіки / М. А. Філінюк, Д. В. Гаврілов – Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2006, – 188 с.
6. Сигорский В. П. Алгоритмы анализа электронных схем / В. П. Сигорский, А. И. Петренко – М.: Советское радио, 1976, – 608 с.
7. Філінюк М. А. Основи негatronіки. Том I. Теоретичні і фізичні основи негatronіки / М. А. Філінюк – Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2009, – 274 с.

**Ліщинська Людмила Брониславовна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри фінансового контролю і аналізу e-mail: [L\\_Fil@mail.ru](mailto:L_Fil@mail.ru).

Вінницький торгово-економічний інститут.

**Рожкова Яна Сергеевна** – студентка кафедри проектування комп'ютерної і телекомунікаційної апаратури, [rozhkova.yana@gmail.com](mailto:rozhkova.yana@gmail.com).

**Філінюк Николай Антонович** – доктор технічних наук, професор, e-mail: [Filinyuk@vstu.vinnica.ua](mailto:Filinyuk@vstu.vinnica.ua).

Вінницький національний технічний університет.