

УДК 621.374

Л. Б. Ліщинська, к. т. н., доц.; Я. С. Рожкова; М. А. Філінюк, д. т. н., проф.

АНАЛІЗ «ЯКОСТІ» ОДНОКРИСТАЛЬНИХ КОНВЕРТОРІВ ІМІТАНСУ

У статті розроблено математичні моделі УПП, що враховують залежності їх перетворених імітансів від фізичних параметрів транзисторів, а також проведено дослідження залежностей якості S_{ai}^{Tk} від фізичних параметрів вищезначених транзисторів.

Ключові слова: узагальнений перетворювач імітансу, одноперехідний транзистор, біполярний транзистор, польовий транзистор, коефіцієнт чутливості, якість.

Вступ

Однією з вимог, що висуваються до узагальнених перетворювачів імітансу (УПП), є стабільність коефіцієнта перетворення. Нестабільність цього коефіцієнта прийнято характеризувати чутливістю до зміни параметрів УПП, що одержала назву «якість» УПП [1]. Чим менша чутливість УПП, тим вища його якість.

Постановка задач досліджень

З метою визначення залежності якості УПП від фізичних параметрів одноперехідного (ОТ), біполярного (БТ) та польового (ПТ) транзисторів, які забезпечують можливість керування якістю S_{ai}^{Tk} за допомогою зміни фізичних параметрів та схем включення. При цьому необхідно розв'язати такі задачі:

- розробити математичні моделі конверторів імітансу на базі ОТ, БТ та ПТ, які враховують залежність їх перетворених імітансів від фізичних параметрів транзисторів;
- провести дослідження залежностей якості S_{ai}^{Tk} від фізичних параметрів транзисторів для реального та ідеального конвертора імітансу.

Розробка математичних моделей

Розглянемо три види конверторів, заснованих на базі одноперехідного транзистора, ввімкненого за схемою зі спільною базою 1 (б1), біполярного транзистора, включеного за схемою зі спільним колектором (к) та на базі польового транзистора, ввімкненого за схемою зі спільним стоком (с).

Для побудови математичних моделей таких конверторів, які враховують фізичні параметри транзисторів, використаємо їх фізичні еквівалентні схеми [2 – 4].

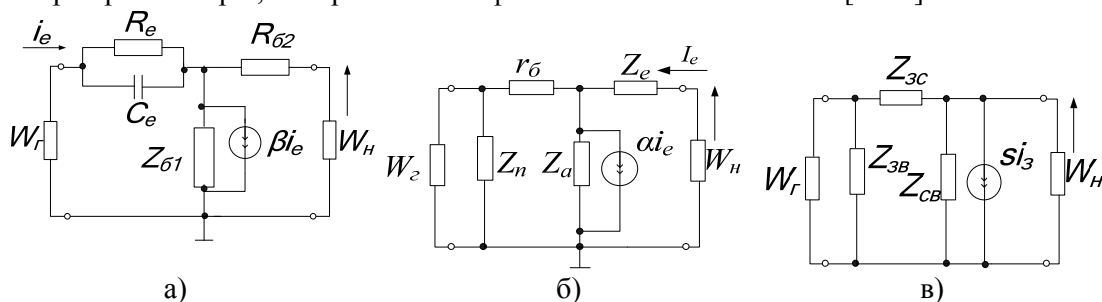


Рис. 1. Еквівалентні схеми однокристальних конверторів на базі: а) ОТ; б) БТ; в) ПТ

На схемі (рис. 1 а): β – коефіцієнт передачі ОТ за струмом; $Z_{б1}$, $R_{б2}$ – опір бази 1 і бази 2; C_e і R_e – бар'єрна ємність та диференціальний опір емітерного переходу. На схемі (рис. 1 б): α – коефіцієнт передачі БТ за струмом; r_b – омичний опір бази, Z_e – повний опір емітерного переходу, що визначається як $Z_e = r_e / (1 + j\omega r_e C_e)$; $Z_a = 1 / j\omega C_{k1}$, $Z_n = 1 / j\omega C_{k2}$, де C_{k1} та C_{k2} – активна та пасивна ємність колекторного переходу. На схемі (рис. 1 в): $Z_{зв}$, $Z_{зс}$ та $Z_{св}$ –

комплексні опори затвор-витік, затвор-стік та стік-витік ПТ відповідно; s – крутизна ПТ.

Фізичні еквівалентні схеми отримані без урахування паразитних елементів, корпуса та виводів, так як дослідження проводяться на відносно невисоких частотах. Параметри фізичних еквівалентних схем визначені за методикою, описаною в [5].

Для спрощення розрахунків зробимо певні припущення, а саме: в одноперехідному транзисторі при великих струмах опір емітера $R_e \rightarrow 0$, а $Z_{\delta 1} = 1/j\omega C_{\delta 1}$.

З урахуванням цих припущень, отримаємо математичні вирази для Y -параметрів трьох фізичних еквівалентних схем УПІ.

Матриця провідності схеми (рис. 1 а) матиме вигляд:

$$[Y_{\delta 1}] = \begin{bmatrix} \frac{R_{\delta 2} + Z_{\delta 1}}{R_{\delta 2} \cdot (1 - \beta) + Z_{\delta 1}} & \frac{-1}{R_{\delta 2} \cdot (1 - \beta)} \\ \frac{-1}{R_{\delta 2}} & \frac{1}{R_{\delta 2}} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Матриця провідності схеми (рис. 1 б) матиме вигляд:

$$[Y_{\kappa}] = \begin{bmatrix} \frac{Z_e + Z_a \cdot (1 - \alpha)}{Z_e \cdot r_{\delta} + Z_a \cdot [r_e + r_{\delta} \cdot (1 - \alpha)]} & -\frac{Z_e}{Z_e \cdot r_{\delta} + Z_a \cdot [r_e + r_{\delta} \cdot (1 - \alpha)]} \\ \frac{Z_a}{Z_e \cdot r_{\delta} + Z_a \cdot [r_e + r_{\delta} \cdot (1 - \alpha)]} & \frac{r_{\delta} + Z_a}{Z_e \cdot r_{\delta} + Z_a \cdot [r_e + r_{\delta} \cdot (1 - \alpha)]} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Матриця провідності схеми (рис. 1 в) матиме вигляд:

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

де $\Omega_s = \frac{\omega}{\omega_s}$, $\omega_s = \frac{1}{R_e C_{зб}}$; R_e – опір витоку, $C_{зб}$ – ємність затвор-витік; $\alpha = \frac{\alpha_0}{1 + j\Omega_T}$,

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

Вхідна та вихідна перетворені провідності схем, що розглядаються, дорівнюють [6]:

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

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

де Y_n та Y_c – провідності, що перетворюються.

Системи рівнянь утворюють математичні моделі однокристальних УПІ та дозволяють провести дослідження залежностей якості від основних параметрів фізичних еквівалентних схем ОТ, БТ та ПТ.

Для визначення якості однокристальних конверторів імітансу на основі (1) – (3) знаходимо коефіцієнт конверсії імітансу T_{κ} . Для всіх випадків при ідеальному УПІ прямий $T_{\kappa,i}$ та зворотний $T'_{\kappa,i}$ коефіцієнти конверсії будуть описуватися виразами [7]:

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

При реальному УПІ прямий $T_{\kappa,p}$ та зворотній $T'_{\kappa,p}$ коефіцієнти конверсії з урахуванням (4) та (5) будуть дорівнювати:

$$T_{к.р} = \frac{Y_{ex.}}{Y_n}, \quad T'_{к.р} = \frac{Y_{вix.}}{Y_2}. \quad (7)$$

Використовуючи (6) і (7), знаходимо аналітичні вирази для якості однокристальних перетворювачів імітансу при прямому та зворотному перетворенні:

$$S_{\alpha_i}^{T_k} = \frac{\partial T_{к.р}}{\partial \alpha_i} \cdot \frac{\alpha_i}{T_{к.р}}, \quad S_{\alpha_i}^{T'_k} = \frac{\partial T'_{к.р}}{\partial \alpha_i} \cdot \frac{\alpha_i}{T'_{к.р}}, \quad (8)$$

де α_i – обраний фізичний параметр транзистора.

Результати дослідження

Залежності коефіцієнтів якості від параметрів фізичних еквівалентних схем вищезначених УПІ розглядалися для двох випадків: ідеального та реального конверторів.

Для ідеального конвертора залежності чутливості прямого $T_{к.i}$ та зворотного $T'_{к.i}$ коефіцієнтів конверсії від основних фізичних параметрів еквівалентної схеми ОТ представлені на рис. 2 і 3.

Залежність реальної частини якості від опору бази 2 ($R_{б2}$) носить зростаючий характер, а уявної частини – спадний характер, але вплив зміни $R_{б2}$ є незначним. Збільшення коефіцієнта передачі транзистора за струмом β_0 призводить до зростання реальної частини чутливості, а отже падіння якості конвертора (рис. 2б), причому збільшення приведеної частоти Ω зменшує $S_{\beta_0}^{T_k}$. З графіку уявної частини залежності можна зробити висновок, що ні зміна коефіцієнта передачі транзистора за струмом β_0 , ні зміна приведеної частоти Ω не впливають на якість. Залежності чутливості від опору ($R_{б1}$) та ємності ($C_{б1}$) бази 1 є настільки незначними (порядку $10^{-14} - 10^{-15}$), що ними можна знехтувати.

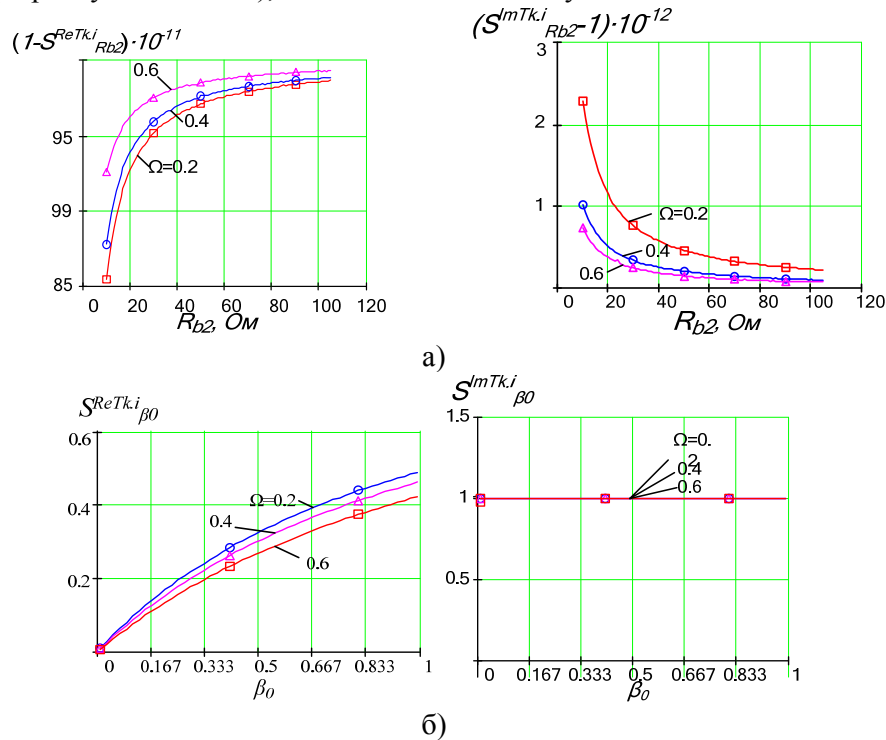


Рис. 2. Залежність чутливості для прямого коефіцієнту перетворення $T_{к.i}$ для ідеального УПІ на базі ОТ при різній наведеній частоті $\Omega = f/f_T$ від опору бази 2 $R_{б2}$ (а); коефіцієнта передачі транзистора за струмом β_0 (б)

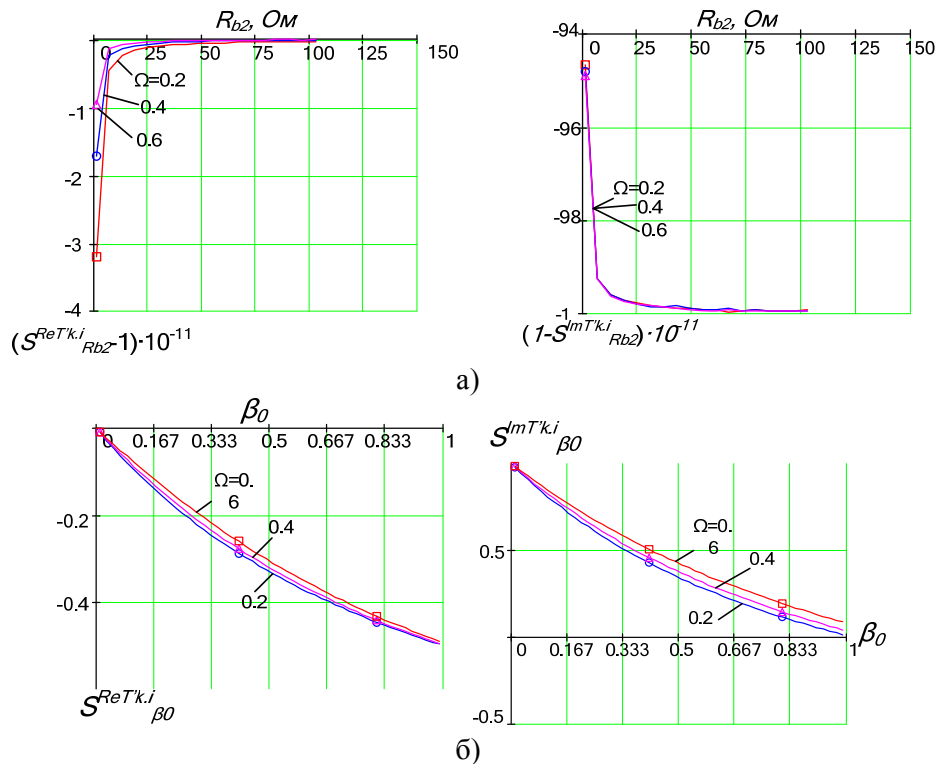


Рис. 3. Залежність чутливості зворотного коефіцієнта перетворення $T'_{к,i}$ для ідеального УПП на базі ОТ при різній наведеній частоті $\Omega=f/f_T$ від опору бази 2 $R_{б2}$ (а); коефіцієнта передачі транзистора за струмом β_0 (б)

Якість для зворотного коефіцієнта конверсії залежить від зміни опору $R_{б2}$ в незначній мірі (рис. 3а), причому зміна наведеної частоти практично не впливає на якість. Як реальна, так і уявна частина залежності якості від β_0 мають спадний характер, при цьому розташовуються в різних чвертях: реальна частина має від'ємні значення чутливості, а уявна – додатні.

Аналіз залежностей якості для прямої та зворотної конверсії для ідеального конвертора від основних фізичних параметрів схеми біполярного транзистора, представлений на рисунках. 4 та 5. Реальна частина чутливості суттєво зростає, зменшуючи якість конвертора, (рис. 4а) як із збільшенням опору бази r_b , так і зі збільшенням наведеної частоти Ω . Уявна ж частина носить протилежний характер і є від'ємною, зменшуючись із зростанням r_b та Ω . Збільшення ємності колектора збільшує чутливість (як для реальної, так і для уявної частини), але зростання наведеної частоти призводить до зменшення якості для реальної частини, та її збільшення для уявної (рис. 4б).

Збільшення опору емітера r_e та наведеної частоти позитивно впливає на зміну якості (рис. 4в). Залежності мають однакові числові межі, але характер графіків свідчить про різні знаки перших похідних. Зміна в сторону збільшення коефіцієнта передачі БТ за струмом зменшує значення чутливості, збільшуючи якість (рис. 4г); реальна частина графіка цих залежностей є суто від'ємною. Уявна частина носить змішаний характер: до $\alpha_0 = 0,038$ якість є від'ємною, а після цього значення – додатною. При значенні $\alpha_0 = 0,05$ спостерігається пік зростання $S_{\alpha_0}^{T_{к,i}}$, подальше збільшення коефіцієнта передачі, як і зміна наведеної частоти, не впливає на зміну якості.

При зворотному перетворенні чутливості коефіцієнта конверсії $T'_{к,i}$ реальна частина залежності якості від опору бази r_b (рис. 5а) є зростаючою і лежить в області додатних значень, а вплив наведеної частоти Ω є таким же, як і при прямому коефіцієнті конверсії. Залежність в уявній частині носить спадний характер, має від'ємні значення і зменшується зі

зростанням наведеної частоти. Збільшення C_k та r_e (рис. 5 б, в) призводить до зменшення чутливості та збільшення якості (як для реальної так і для уявної його частини), причому всі значення коефіцієнта є від'ємними. Зростання Ω збільшує числові значення коефіцієнта в реальній частині і зменшує в уявній.

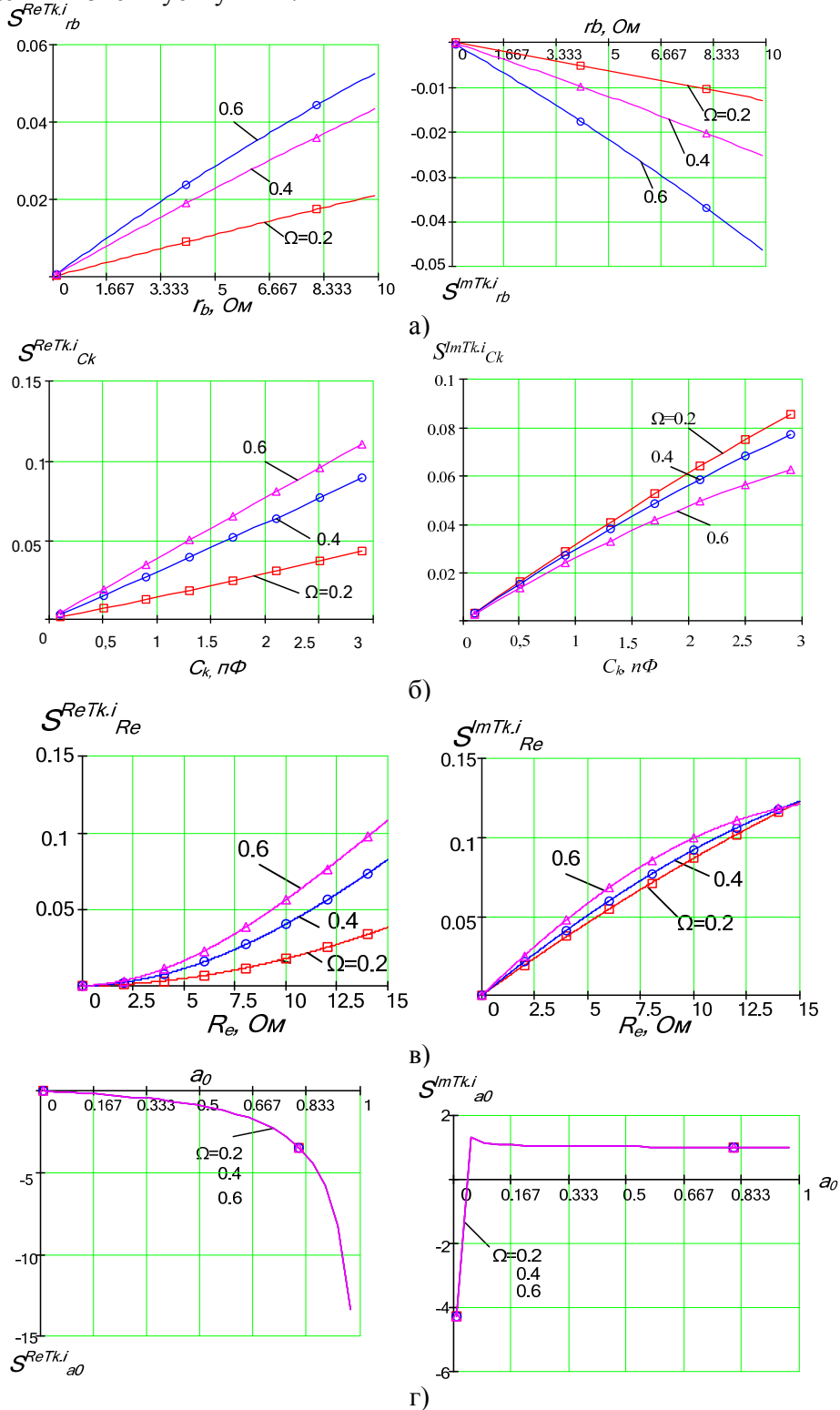


Рис. 4. Залежність якості прямого перетворення ідеального УПІ на базі БТ при різній наведеній частоті $\Omega=f/f_T$ від опору бази r_b (а); ємності колектора C_k (б); опору емітера r_e (в); коефіцієнта передачі транзистора за струмом a_0 (г)

Вплив коефіцієнта передачі транзистора за струмом (рис 5 г) носить змішаний характер як для реальної, так і для уявної частини. На реальній частині до значення $\alpha_0 = 0,7$ спостерігається незначне збільшення чутливості, і його різке падіння після $\alpha_0 = 0,833$. На уявній частині для зворотної конверсії спостерігається два піки зростання $S_{\alpha_0}^{T^k}$: при $\alpha_0 = 0,05$ та $\alpha_0 = 0,8$. Після другого піку відбувається різке падіння значень чутливості.

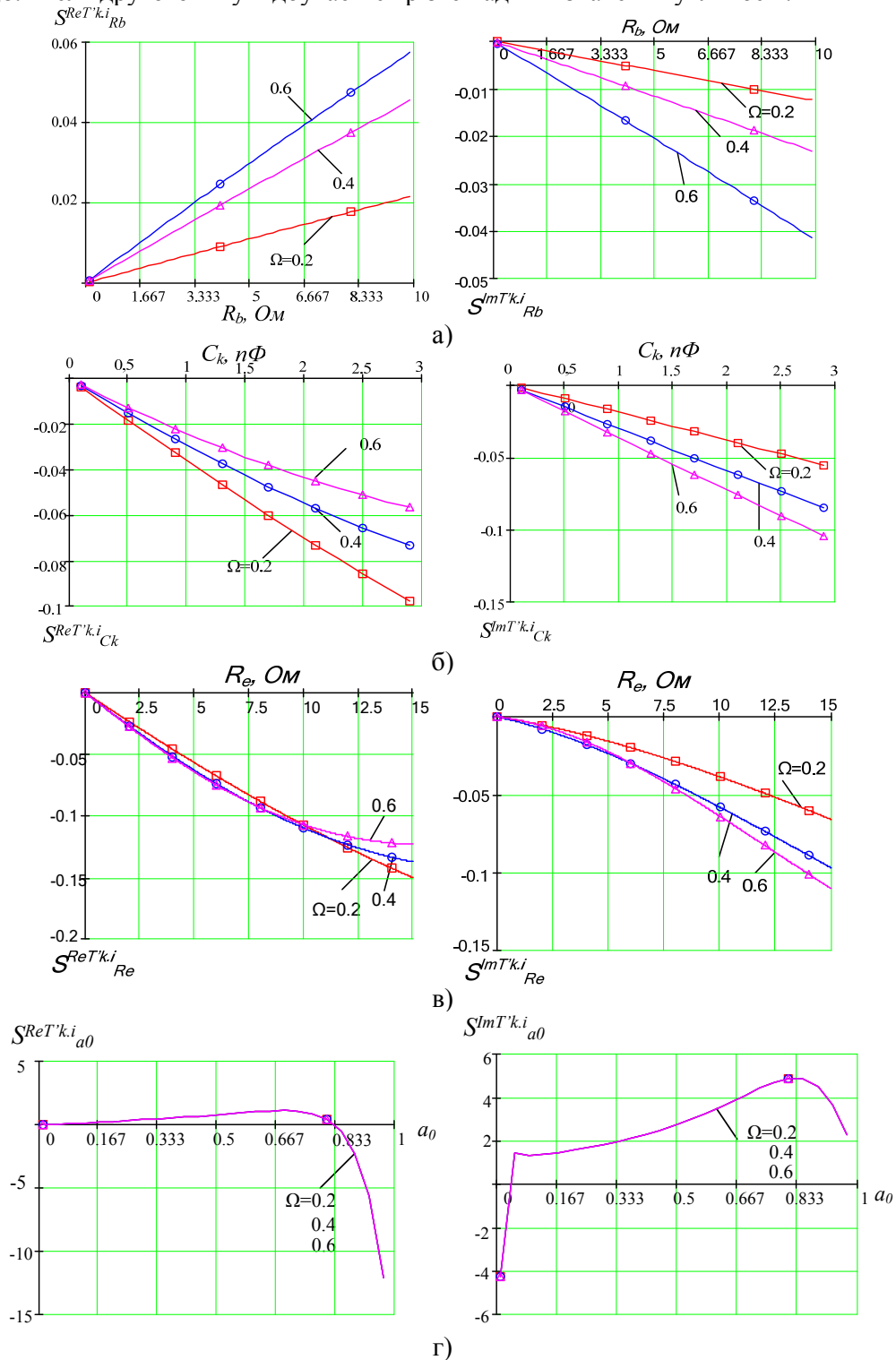


Рис. 5. Залежність якості при зворотному перетворенні для ідеального УПІ на базі БТ при різних наведених частот $\Omega = f/f_T$ від опору бази R_b (а); ємності колектора C_k (б); опору емітера R_{em} (в); коефіцієнта передачі транзистора за струмом α_0 (г)

Для польового транзистора при прямому та зворотному перетворенні, залежності чутливості від основних його фізичних параметрів є незначними ($10^{-14} - 10^{-15}$).

Наступним кроком дослідження було виявлення тих самих залежностей, але вже для реального конвертора. Розглянемо їх при прямому та зворотному перетворенні для ОТ. Результати чисельних розрахунків чутливості S_{ai}^{Tk} представлені на рисунках 6 та 7.

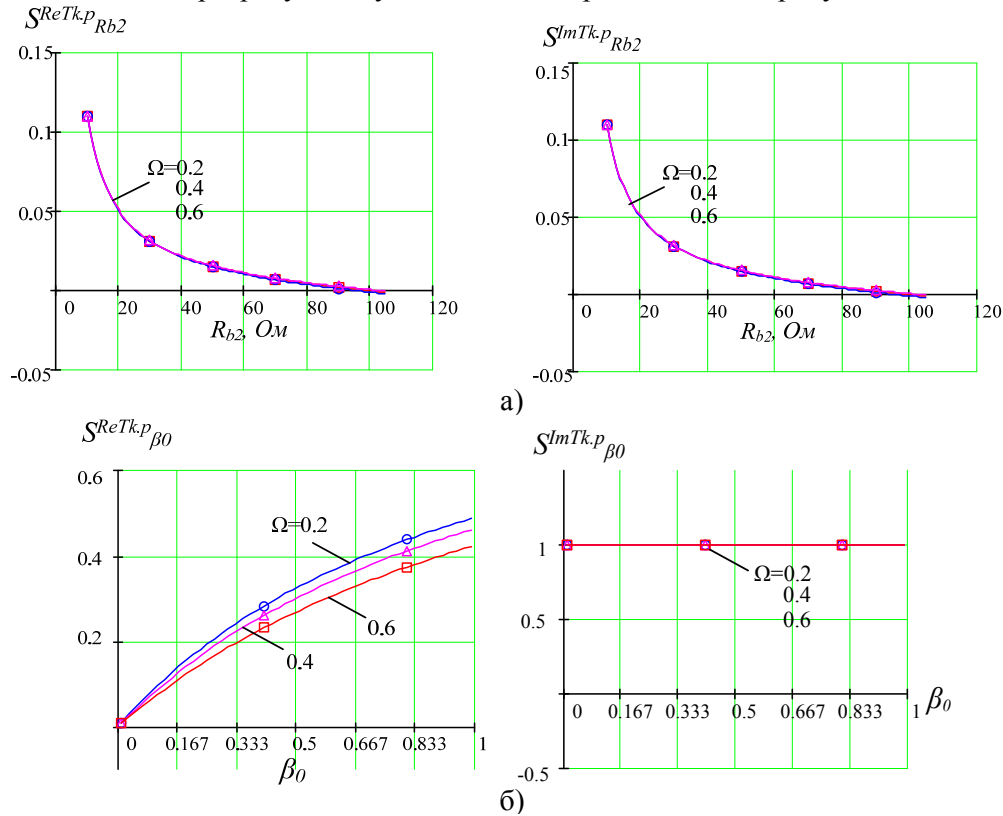


Рис. 6. Залежність чутливості при прямому перетворенні для реального УПІ на базі ОТ при різній наведеній частоті $\Omega=f/f_T$ від опору бази 2 $R_{\delta 2}$ (а); коефіцієнта передачі транзистора за струмом β_0 (б)

Опір бази 2 $R_{\delta 2}$ при зростанні зменшує значення якості конвертора (рис. 6а) для реальної і збільшує для уявної частини, має однакові числові межі і не піддається впливу зміни наведеної частоти. Коефіцієнт передачі транзистора за струмом (рис. 6 б) у випадку реального конвертора має такий самий вплив на якість, як і при ідеальному конверторі.

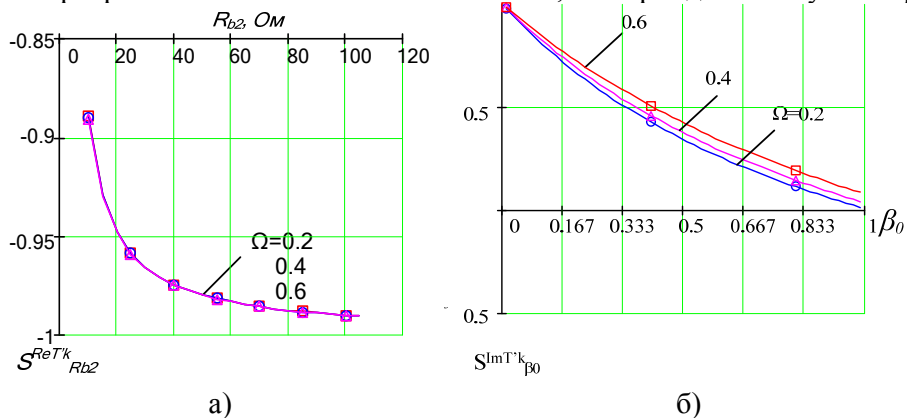
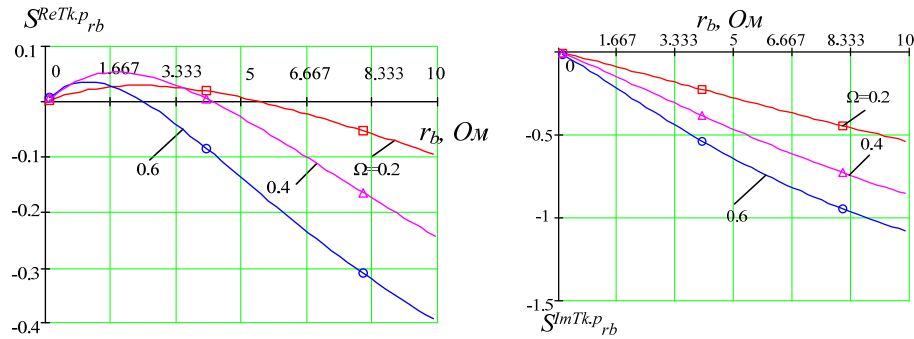


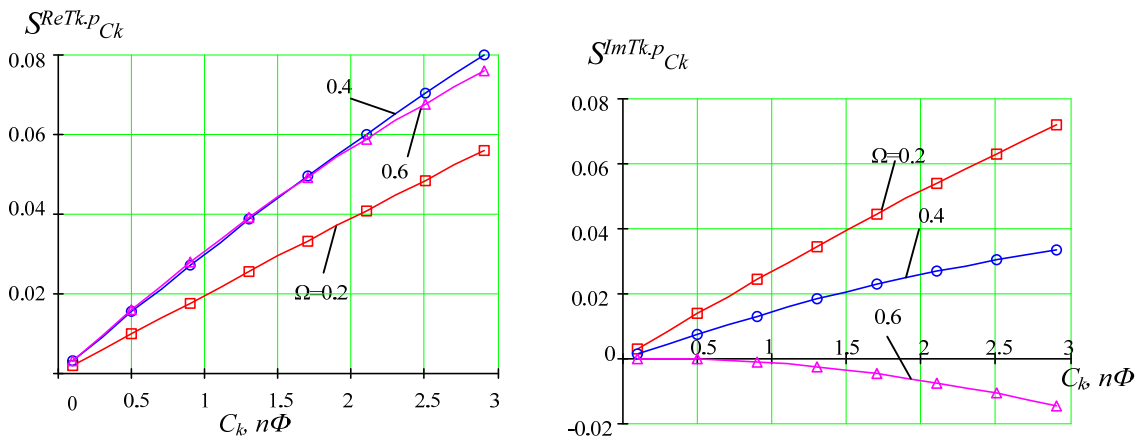
Рис. 7. Залежність коефіцієнта чутливості при зворотному перетворенні для реального УПІ на базі ОТ при різній наведеній частоті $\Omega=f/f_T$ від опору бази 2 $R_{\delta 2}$ (а); коефіцієнта передачі транзистора за струмом β_0 (б)

Неоднозначна картина спостерігається для зворотного коефіцієнта конверсії T'_{κ} : числові значення $S_{R_{\delta 2}}^{Tk,p}$ є від'ємними (рис. 7 а) і зменшуються зі зростанням опору бази 2 $R_{\delta 2}$. Коефіцієнт передачі транзистора за струмом β_0 (рис. 7 б) не впливає на розмір реальної частини якості конвертора і зменшує чутливість в його уявній частині.

Залежності якості при прямому та зворотному перетворенні для реального конвертора на базі БТ представлені на рисунках 8 та 9. Графіки дають підстави стверджувати, що вплив r_{δ} на якість БТ носить неоднозначний характер (рис. 8 а): на реальній частині спостерігається пік зростання при $r_{\delta} = 0,5 - 1,66 \text{ Ом}$, після чого збільшення r_{δ} зменшує чутливість, причому після значення $r_{\delta} = 3,33 - 4 \text{ Ом}$ коефіцієнт набуває від'ємних значень. Ємність колектора C_{κ} (рис. 9 б) при її зростанні негативно впливає на якість. Але на уявній частині при збільшенні наведеної частоти до $\Omega = 0,6$ спостерігається зменшення $S_{C_{\kappa}}^{Tk}$, і він стає від'ємним. При всіх значеннях опору емітера реальна частина якості має від'ємні числові значення (рис. 8 в) і носить спадний характер. Уявна частина також є спадною, але до значення $r_e = 2 - 4,5 \text{ Ом}$ (в залежності від розміру Ω) якість має позитивні значення, а в наступному – негативні. Чутливість при збільшенні α_0 на реальній частині графіка (рис. 8 г) має спадний характер, а на уявній – зростаючий. Збільшення наведеної частоти більше за значення $\Omega=0,4$ не впливає на якість.



а)



б)

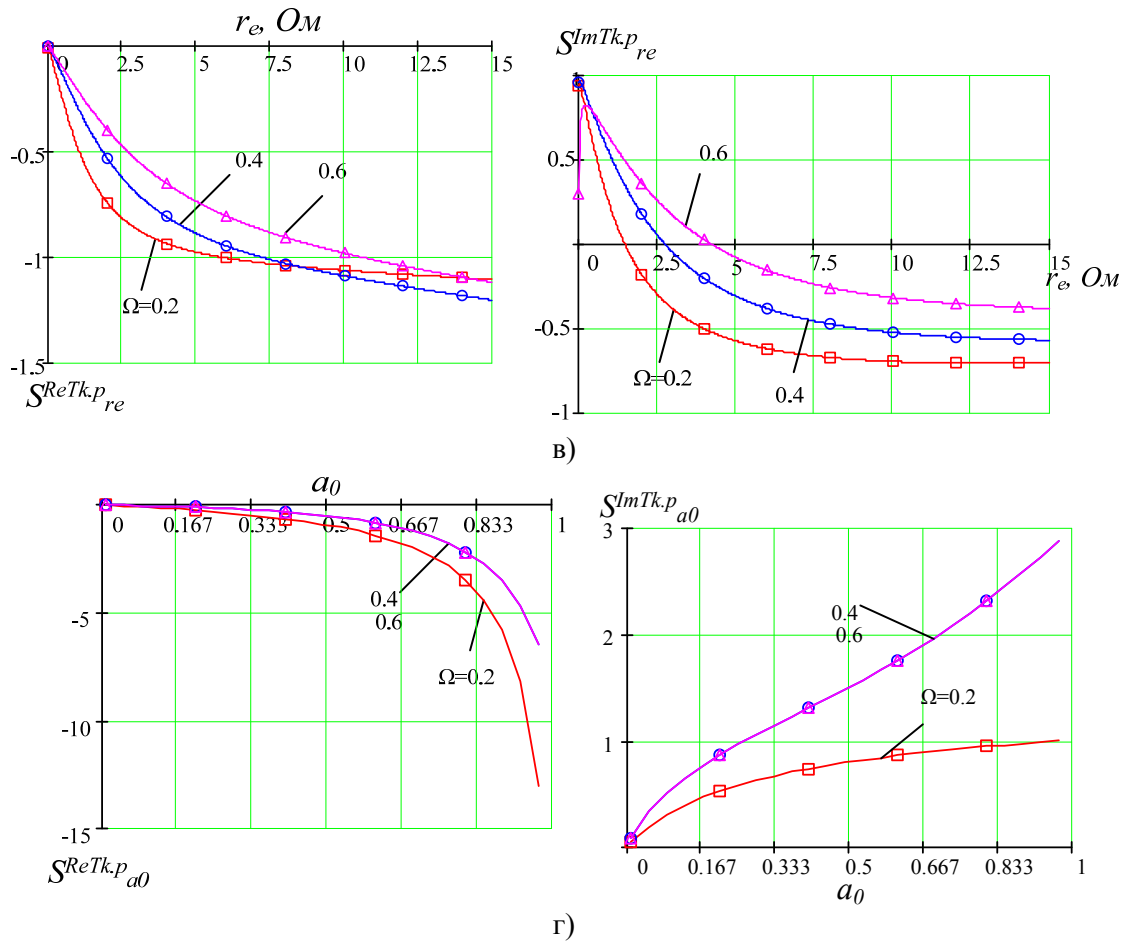
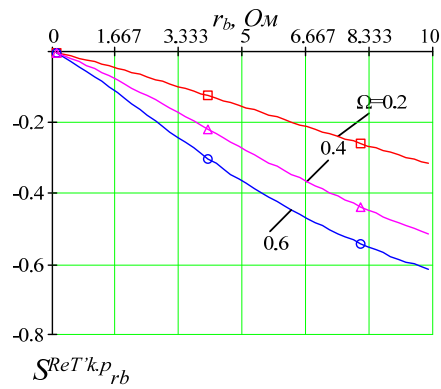


Рис. 8. Залежність коефіцієнта чутливості при прямому перетворенні для реального УПІ на базі БТ при різній наведеній частоті $\Omega=f/f_T$ від опору бази $2r_b$ (а); ємності колектора C_k (б); опору емітера r_e (в); коефіцієнта передачі транзистора за струмом a_0 (г)



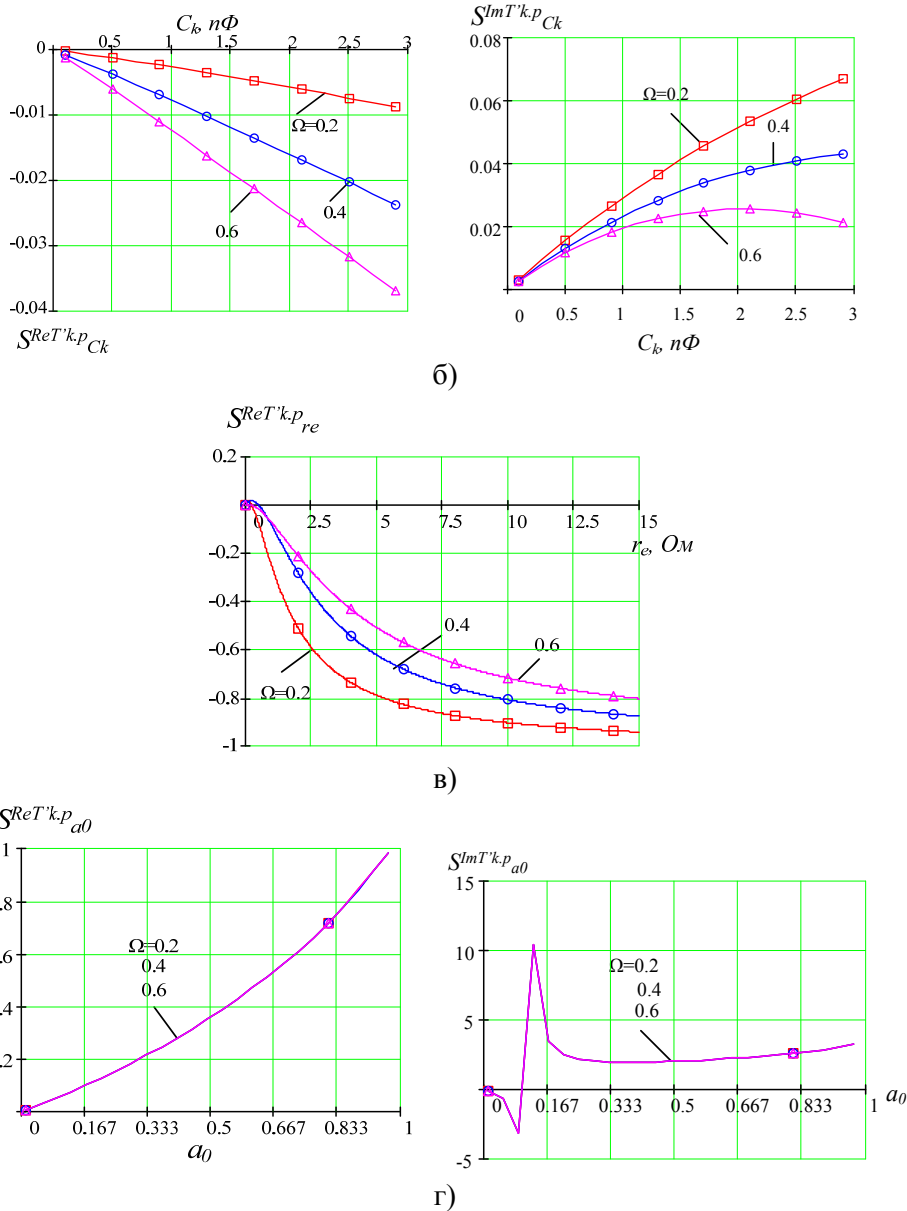


Рис. 9. Залежність чутливості при зворотному перетворенні для реального УПІ на базі БТ при різній наведеній частоті $\Omega=f/f_T$ від опору бази r_b (а); дифузійної ємності колектора C_k (б); опору емітера r_e (в); коефіцієнта передачі транзистора за струмом a_0 (г)

Аналіз графіків залежності якості від r_b , C_k та r_e (рис. 9 а, б, в) показує, що реальна частина S_{ai}^{Tk} зменшується зі збільшенням цих параметрів, його числові значення є від'ємними і спадають із збільшенням наведеної частоти. Зростання коефіцієнта передачі за струмом, як видно з графіка реальної частини (рис. 9 г), суттєво збільшує чутливість конвертора, зменшуючи його якість, що негативно впливає на його роботу, при чому вона взагалі не залежить від розміру наведеної частоти. На графіку уявної частини спостерігається 2 екстремуми – мінімум ($S_{a0}^{Tk} = -3,19$) при значенні $a_0 = 0,09$ і максимум ($S_{a0}^{Tk} = 10,4$) при $a_0 = 0,13$. Збільшення значення $a_0 > 0,33$ не впливає на якість. Залежності чутливості S_{ai}^{Tk} при прямому та зворотному перетворенні для реального конвертора від основних фізичних параметрів схеми ПТ, є близькими до нуля (10^{-15}).

У таблиці 1 наведено числові значення коефіцієнта чутливості для всіх вищерозглянутих випадків.

Таблиця 1

Значення якості від різних параметрів фізичної структури конверторів імітансу на частоті $\Omega=0,2$

| Режим прямої конверсії | | | | | |
|---|--|--|--|--|--|
| ОТ | | БТ | | ПТ | |
| Ідеальний | Реальний | Ідеальний | Реальний | Ідеальний | Реальний |
| | | $S_{Rb}^{Re Tk} = 0.013$ $S_{Rb}^{Im Tk} = -0.0081$ | $S_{Rb}^{Re Tk} = -0.019$ $S_{Rb}^{Im Tk} = -0.36$ | $S_{Ri}^{Re Tk} = -2$ $S_{Ri}^{Im Tk} = -1$ | $S_{Ri}^{Re Tk} = -2$ $S_{Ri}^{Im Tk} = -1$ |
| $S_{Rb2}^{Im Tk} = 1$ | $S_{Rb2}^{Re Tk} = -0.0005$ $S_{Rb2}^{Im Tk} = -0.0005$ | $S_{Ck}^{Re Tk} = 0.016$ $S_{Ck}^{Im Tk} = 0.038$ | $S_{Ck}^{Re Tk} = 0.024$ $S_{Ck}^{Im Tk} = 0.032$ | $S_{\omega}^{Re Tk} = -2$ $S_{\omega}^{Im Tk} = -1$ | $S_{\omega}^{Re Tk} = -2$ $S_{\omega}^{Im Tk} = -1$ |
| | $S_{Cb1}^{Im Tk} = -2,294$ | $S_{Rem}^{Re Tk} = 0.0044$ $S_{Rem}^{Im Tk} = 0.046$ | $S_{Rem}^{Re Tk} = -0.98$ $S_{Rem}^{Im Tk} = -0.57$ | $S_{s0}^{Re Tk} = -2$ $S_{s0}^{Im Tk} = -1$ | $S_{s0}^{Re Tk} = -2$ $S_{s0}^{Im Tk} = -1$ |
| $S_{\beta0}^{Re Tk} = 1.93$ $S_{\beta0}^{Im Tk} = -0.37$ | | $S_{a0}^{Re Tk} = -18.42$ $S_{a0}^{Im Tk} = 1.013$ | $S_{a0}^{Re Tk} = -7.514$ $S_{a0}^{Im Tk} = 2.943$ | | |
| Режим зворотної конверсії | | | | | |
| ОТ | | БТ | | ПТ | |
| Ідеальний | Реальний | Ідеальний | Реальний | Ідеальний | Реальний |
| | | $S_{Rb}^{Re Tk} = 0.014$ $S_{Rb}^{Im Tk} = -0.008$ | $S_{Rb}^{Re Tk} = -0.206$ $S_{Rb}^{Im Tk} = 0.794$ | $S_{Ri}^{Im Tk} = 1$ | $S_{Ri}^{Im Tk} = 1$ |
| $S_{Rb2}^{Re Tk} = -1$ $S_{Rb2}^{Im Tk} = -1$ | $S_{Rb2}^{Re Tk} = -0,99$ $S_{Rb2}^{Im Tk} = -0,99$ | $S_{Ck}^{Re Tk} = -0.043$ $S_{Ck}^{Im Tk} = -0.022$ | $S_{Ck}^{Re Tk} = -0,003$ $S_{Ck}^{Im Tk} = 0,034$ | $S_{\omega}^{Im Tk} = 1$ | $S_{\omega}^{Im Tk} = 1$ |
| | | $S_{Rem}^{Re Tk} = -0,057$ $S_{Rem}^{Im Tk} = -0.016$ | $S_{Rem}^{Re Tk} = -0.79$ $S_{Rem}^{Im Tk} = -1.96$ | $S_{s0}^{Re Tk} = 0$ $S_{s0}^{Im Tk} = 1$ | $S_{s0}^{Re Tk} = 0$ $S_{s0}^{Im Tk} = 1$ |
| | | $S_{a0}^{Re Tk} = -17,732$ $S_{a0}^{Im Tk} = 1,629$ | $S_{a0}^{Re Tk} = 0.983$ $S_{a0}^{Im Tk} = 3.1$ | | |

Найменша чутливість, а отже і найбільша якість, спостерігається для ідеального конвертора на базі БТ, ввімкненого за схемою зі спільним колектором як при прямій ($S_{a0}^{Tk} = -18,43$), так і при зворотній ($S_{a0}^{Tk} = -17,732$) конверсії. Найменша якість спостерігається для ідеального конвертора на базі ОТ, ввімкненого по схемі зі спільною базою 1 для прямої конверсії T_k ($S_{\beta0}^{Tk} = 1,93$) і для обох видів конверторів на базі ПТ, ввімкненого по схемі зі спільним стоком як для прямої, так і зворотної конверсії по всіх параметрах $S_{ai}^{Tk} = 1$.

Висновки

1. Для ідеального конвертора на базі ОТ найменша якість ($S_{R\delta2}^{Tk} = -1$) спостерігається при зворотній конверсії, при ввімкненні за схемою зі спільною базою 1. Для реального конвертора на базі ОТ найменшою є якість ($S_{R\delta2}^{Tk} = -0,99$) при зворотному коефіцієнті конверсії. Отже, збільшуючи значення параметра опору бази 2 ($R_{\delta2}$), можна збільшувати якість однокристалного конвертора на базі ОТ.

2. Для ідеального конвертора на базі БТ найменша чутливість спостерігається як при прямій ($S_{a0}^{Tk} = -18,43$), так і при зворотній ($S_{a0}^{Tk} = -17,732$) конверсії, при ввімкненні за схемою зі спільним колектором. Для реального конвертора на базі БТ якість є найбільшою ($S_{a0}^{Tk} = -0,98$) при прямій конверсії. Збільшуючи значення коефіцієнта передачі транзистора за струмом α_0 можна збільшувати якість однокристалного конвертора на базі БТ.

3. Як для ідеального, так і для реального конвертора на базі ПТ найменша чутливість ($S_{ai}^{Tk} = -2$) спостерігається при прямій конверсії по всіх параметрах, при ввімкненні за схемою зі спільним стоком. Отже, зменшуючи значення одних параметрів та збільшуючи інші, можна регулювати якість однокристалного конвертора на базі ПТ.

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.nbuu.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 Броніславівна – к. т. н., доцент кафедри фінансового контролю та аналізу, e-mail: L_Fil@mail.ru.

Вінницький торгово-економічний інституту

Рожкова Яна Сергіївна – студентка кафедри проектування комп'ютерної та телекомунікаційної апаратури, e-mail: rozhkova.yana@gmail.com.

Філінюк Микола Антонович – д. т. н., професор кафедри проектування комп'ютерної та телекомунікаційної апаратури, e-mail: Filinyuk@vstu.vinnica.ua.

Вінницький національний технічний університет.