

РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА РАДІОЕЛЕКТРОННЕ АПАРАТОБУДУВАННЯ

УДК 621.325

Л. Б. Ліщинська, к. т. н., доц.;

М. В. Барабан, асп.;

М. А. Філінюк, д. т. н., проф.

ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА ПОХИБОК ПЕРЕТВОРЕННЯ ОДНОКРИСТАЛЬНИХ КОНВЕРТОРІВ ІММІТАНСУ

Розроблено теорію оцінки похибок перетворення однокристальних конверторів іммітансу, проведено порівняльне оцінювання похибок перетворення однокристальних конверторів іммітансу на основі одноперехідного, біполярного та польового транзисторів й розроблено рекомендації з їх зменшення.

Вступ

Конвертори іммітансу застосовуються для реалізації різних видів інформаційних пристроїв широкого діапазону частот. Ефективність інформаційних пристроїв на їх основі значною мірою визначається величиною похибки перетворення іммітансу γ , яка залежить від коефіцієнта конверсії ідеального T_{K0} і реального T_{KP} конвертора іммітансу [1]:

$$\gamma = (T_{KP} - T_{K0})/T_{K0}. \quad (1)$$

Чим менший γ , тим ефективнішим буде інформаційний пристрій, реалізований на основі реального конвертора іммітансу.

Задачі дослідження

В діапазоні високих і, особливо, надвисоких частот використовуються однокристальні конвертори іммітансу на основі різних видів багатоелектродних напівпровідникових структур, зокрема на основі одноперехідних, біполярних і польових транзисторних структур [2—4].

Враховуючи, що оцінка похибок перетворення таких конверторів іммітансу раніше не проводилася, актуальною є задача розробки теорії оцінки таких похибок, проведення порівняльного оцінювання і розробка рекомендацій щодо їх зменшення.

Теоретичне обґрунтування

Конвертором іммітансу називають чотириполюсник, вхідний $W_{вх}$ (вихідний $W_{вих}$) іммітанс якого прямопропорційно залежить від іммітансу навантаження W_H (генератора W_Γ).

Для лінійного (або квазілінійного) чотириполюсника маємо [4]:

$$W_{вх} = W_{11} - \frac{W_{12}W_{21}}{W_{22} + W_H} = \frac{\Delta + W_{11}W_H}{W_{22} + W_H}, \quad (2)$$

$$W_{вих} = W_{22} - \frac{W_{12}W_{21}}{W_{11} + W_\Gamma} = \frac{\Delta + W_{22}W_\Gamma}{W_{11} + W_\Gamma}, \quad (3)$$

де W_{11} , W_{22} , W_{12} , W_{21} — параметри іммітансної W -матриці чотириполюсника; $\Delta = W_{11}W_{22} - W_{12}W_{21}$ — визначник іммітансної матриці.

Основним параметром конвертора іммітансу є коефіцієнт прямої T_K і зворотної T'_K конверсії іммітансу:

$$T_K = W_{\text{вх}}/W_H; \quad T'_K = W_{\text{вих}}/W_\Gamma. \quad (4)$$

Звідки

$$W_{\text{вх}} = T_K W_H; \quad W_{\text{вих}} = T'_K W_\Gamma. \quad (5)$$

Для ідеального конвертора іммітансу повинна виконуватись умова незалежності коефіцієнта конверсії від величини перетворюючого іммітансу. Порівнюючи (5) і (2), (3) знаходимо умову, яка забезпечує цю вимогу:

$$\Delta = 0; \quad W_H \ll W_{22}; \quad W_\Gamma \ll W_{11}. \quad (6)$$

Підставивши (6) в (2), (3) і (4), (5), знаходимо:

$$W_{\text{вх}} = \frac{W_{11}}{W_{22}} W_H; \quad W_{\text{вих}} = \frac{W_{22}}{W_{11}} W_\Gamma; \quad (7)$$

$$T_{K0} = W_{11}/W_{22}; \quad T'_{K0} = W_{22}/W_{11} = 1/T_{K0}. \quad (8)$$

Враховуючи, що в загальному випадку W_{11} і W_{22} комплексні величини, коефіцієнти конверсії (8), також є комплексним:

$$T_{K0} = \text{Re } T_{K0} + j \text{Im } T_{K0} = |T_{K0}| e^{j\phi_{T_{K0}}}; \quad (9)$$

$$T'_{K0} = \text{Re } T'_{K0} + j \text{Im } T'_{K0} = |T'_{K0}| e^{j\phi_{T'_{K0}}}. \quad (10)$$

Для реального конвертора іммітансу умова $\Delta = 0$, зазвичай, не виконується. Але шляхом введення додаткових компонентів може бути реалізована в обмеженому діапазоні частот. Умови $W_H \ll W_{22}$ і $W_\Gamma \ll W_{11}$ практично завжди можуть бути реалізовані шляхом вибору відповідних перетворених іммітансів, і тому їх недоцільно враховувати під час оцінювання похибки перетворення іммітансу.

З урахуванням виконання цих умов для реального конвертора іммітансу вирази (2) і (3) запишемо як:

$$W_{\text{вх}} \approx (\Delta + W_{11}W_H)/W_{22}; \quad W_{\text{вих}} \approx (\Delta + W_{22}W_\Gamma)/W_{11}. \quad (11)$$

В цьому випадку, з урахуванням (4), коефіцієнт конверсії реального конвертора іммітансу буде складати:

$$T_{\text{КР}} = \frac{\Delta + W_{11}W_H}{W_H W_{22}} = |T_{\text{КР}}| e^{j\phi_{T_{\text{КР}}}}; \quad T'_{\text{КР}} = \frac{\Delta + W_{22}W_\Gamma}{W_\Gamma W_{11}} = |T'_{\text{КР}}| e^{j\phi_{T'_{\text{КР}}}}. \quad (12)$$

Підставивши (8), (12) в (1), знаходимо вирази для величини похибки перетворення іммітансу реального конвертора іммітансу для режиму прямого γ і зворотного γ' перетворення:

$$\gamma = \frac{\Delta}{W_{11}W_H} = |\gamma| e^{j\phi_\gamma}; \quad \gamma' = \frac{\Delta}{W_{22}W_\Gamma} = |\gamma'| e^{j\phi_{\gamma'}}. \quad (13)$$

Як випливає з (13), похибки перетворення іммітансу в загальному випадку є комплексними величинами, і тому потрібно розглядати два види похибок:

— амплітудні: $|\gamma| = \sqrt{\text{Re}^2 \gamma + \text{Im}^2 \gamma}; \quad |\gamma'| = \sqrt{\text{Re}^2 \gamma' + \text{Im}^2 \gamma'};$

— фазові: $\phi_\gamma = \arctg\left(\frac{\text{Im } \gamma}{\text{Re } \gamma}\right); \quad \phi_{\gamma'} = \arctg\left(\frac{\text{Im } \gamma'}{\text{Re } \gamma'}\right).$

Крім величини модуля $|\gamma|$ і фази ϕ_γ , для оцінки похибки перетворення іммітансу однокристальних конверторів іммітансу також можна використовувати її дійсне і уявне значення:

$$\text{Re } \gamma = |\gamma| \cos \phi_\gamma, \quad \text{Im } \gamma = |\gamma| \sin \phi_\gamma; \quad (14)$$

$$\operatorname{Re} \gamma' = |\gamma'| \cos \varphi_{\gamma'}, \quad \operatorname{Im} \gamma' = |\gamma'| \sin \varphi_{\gamma'}. \quad (15)$$

Практичні дослідження похибок перетворення реальних однокристальних перетворювачів іммітансу показали, що друга форма зображення похибок є наочнішим.

Аналіз (13) показує, що величини похибки як прямого, так і зворотного перетворення іммітансу прямопропорційно залежать від величини Δ . Знизити ці похибки можна збільшенням перетвореного іммітансу $W_H(W_T)$. Але їх величини обмежені умовами (6). Значення похибок прямого γ і зворотного γ' перетворення для одного й того ж конвертора за $W_{11} \neq W_{22}$ різні. Ця відмінність визначається співвідношенням $\gamma'/\gamma = T_K W_H/W_T$. Під час вибору $W_H = W_T$ знаходимо $\gamma'/\gamma = T_K$, тобто у цьому випадку відмінність між похибками перетворення визначається величиною прямої конверсії іммітансу і за $T_K = 1$ вона зникає.

Дослідження похибок перетворення реальних однокристальних конверторів іммітансу

Як реальні однокристальні конвертори іммітансу отримали застосування чотирьохполюсники на основі одноперехідного транзистора (ОТ), під'єданого за схемою із загальною першою базою, біполярного транзистора (БТ) під'єданого за схемою із загальним колектором, і польового транзистора (ПТ) під'єданого за схемою із загальним стоком. Для їх опису використовуються малосигнальні фізичні еквівалентні схеми (рис. 1).

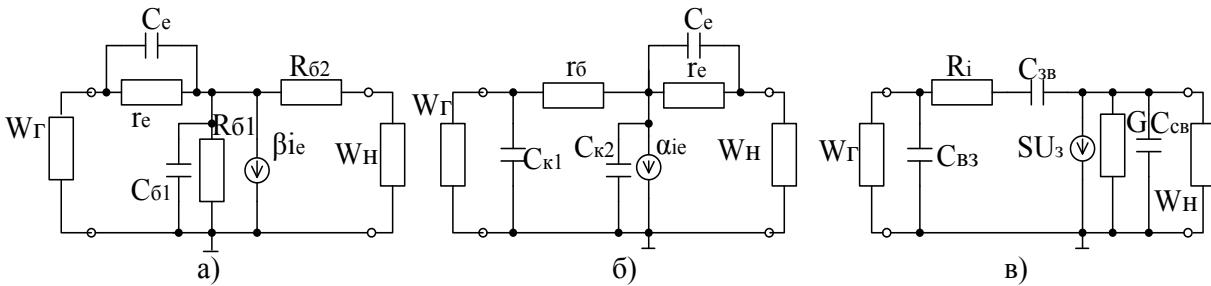


Рис. 1. Малосигнальні фізичні еквівалентні схеми однокристальних конверторів іммітансу на основі одноперехідного (а), біполярного (б) і польового (в) транзисторів

На схемах (див. рис. 1) R_{B1} і R_{B2} — опір першої та другої бази; C_{B1} — дифузійна ємність першої бази; C_e і r_e — ємність і диференціальний опір емітерного переходу; r_B — омичний опір бази біполярного транзистора; C_{K1} і C_{K2} — зарядні ємності активної і пасивної області колекторного переходу; R_i — дифузійний опір між затвором і витоком; G — провідність каналу; C_{CB} , C_{3B} і C_{3c} — ємність між стоком и витоком, затвором і витоком, затвором і стоком; $\beta = i_{B1}/i_e$ — коефіцієнт передачі одноперехідного транзистора за струмом; $\alpha = i_k/i_e$ — коефіцієнт передачі біполярного транзистора за струмом; $\dot{S} = i_c/i_3$ — крутизна польового транзистора.

З метою спрощення подальшого аналізу на еквівалентних схемах не враховуються паразитні елементи корпусу і виводів транзистора, які частково можуть бути враховані в перетворюючому і перетвореному іммітансах, а також вибором відносно невеликих частот досліджень.

Для аналізу похибок перетворення реальних однострижорних перетворювачів іммітансу, використовуючи малосигнальні фізичні еквівалентні схеми (див. рис. 1), знаходимо їх матриці провідності:

$$[Y_{B1}] = \begin{bmatrix} Y_{B11} & Y_{B12} \\ Y_{B21} & Y_{B22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Z_{B1} + R_{B2}}{Z_{B1} R_{B2} (1 - \beta)} & -\frac{1}{R_{B2} (1 - \beta)} \\ -\frac{1}{R_{B2}} & \frac{1}{R_{B2}} \end{bmatrix}; \quad (16)$$

$$[Y_K] = \begin{bmatrix} Y_{K11} & Y_{K12} \\ Y_{K21} & Y_{K22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1 + r_B \omega C_{K1}}{r_B} & \frac{-1}{r_B} \\ \frac{-1}{r_B (1 - \dot{\alpha})} & \frac{1 + r_B \omega C_{K1}}{r_B (1 - \dot{\alpha})} \end{bmatrix}; \quad (17)$$

$$[Y_C] = \begin{bmatrix} \frac{\Omega_s^2 + \Omega_s + j\Omega_s \xi (1 + \Omega_s^2)}{R_i (1 + \Omega_s^2)} & \frac{-\Omega_s^2 - j\Omega_s}{R_i (1 + \Omega_s^2)} \\ \frac{-\Omega_s^2 + RiS_0 - j\Omega_s (1 - RiS_0)}{R_i (1 + \Omega_s^2)} & G + \frac{\Omega_s^2 + RiS_0 + j\Omega_s (1 - RiS_0)}{R_i (1 + \Omega_s^2)} \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Використовуючи однополюсну апроксимацію для коефіцієнтів $\dot{\beta}$, $\dot{\alpha}$, \dot{S} [2, 3], отримаємо:

$$\dot{\beta} = \frac{\beta_0}{1 + j\Omega_{\beta}}; \quad \dot{\alpha} = \frac{\alpha_0}{1 + j\Omega_{\alpha}}; \quad \dot{S} = \frac{S_0}{1 + j\Omega_S},$$

де $\Omega_{\beta} = f/f_{\beta}$; $\Omega_{\alpha} = f/f_{\alpha}$; $\Omega_S = f/f_S$ — приведені граничні частоти транзисторів; f_{β} і f_{α} — граничні частоти коефіцієнта передачі за струмом ОТ і БТ; f_S — гранична частота за крутизною ПТ; β_0 і α_0 — низькочастотні коефіцієнти передачі за струмом ОТ и БТ; S_0 — низькочастотне значення крутизни ПТ.

Елементи матриць (16)—(18), після підстановки в (12), (14)—(15) отримані аналітичні вирази для амплітудних і фазових значень коефіцієнтів конверсії і похибок перетворення ідеальних і реальних однокристальних конверторів іммітансу. Враховуючи їх громіздкість, у роботі вони не наводяться, а використовуються лише для проведення числових експериментів, результати яких наведено на рис. 2 і в табл.

Привертає увагу, що коефіцієнт конверсії реальних конверторів іммітансу залежить від величини і характеру перетвореного іммітансу (W_G , W_H). Це приводить до необхідності рішення багатопараметричного завдання і, зрештою, не забезпечує проведення потенційної порівняльної оцінки. Щоб виключити цю неоднозначність, пропонується ввести оцінку параметрів за оптимальних значень перетвореного іммітансу $W_{\text{нopt}}$ і $W_{\text{гopt}}$. Під оптимальним значенням перетвореного іммітансу розуміють таку величину, за якої забезпечується мінімально досягне значення дійсної складової перетвореного іммітансу.

Привертає увагу, що зі зростанням частоти Ω , як активна, так і реактивна складові похибки перетворення зростають і за $\Omega = 0,5$ можуть досягати 0,6 % для ОТ.

Як видно з рис. 2в, г, для всіх досліджуваних конверторів як в режимі прямого, так і зворотного перетворення відбувається зменшення похибки перетворення зі зменшенням величини перетворених іммітансів, що цілком узгоджується з (6).

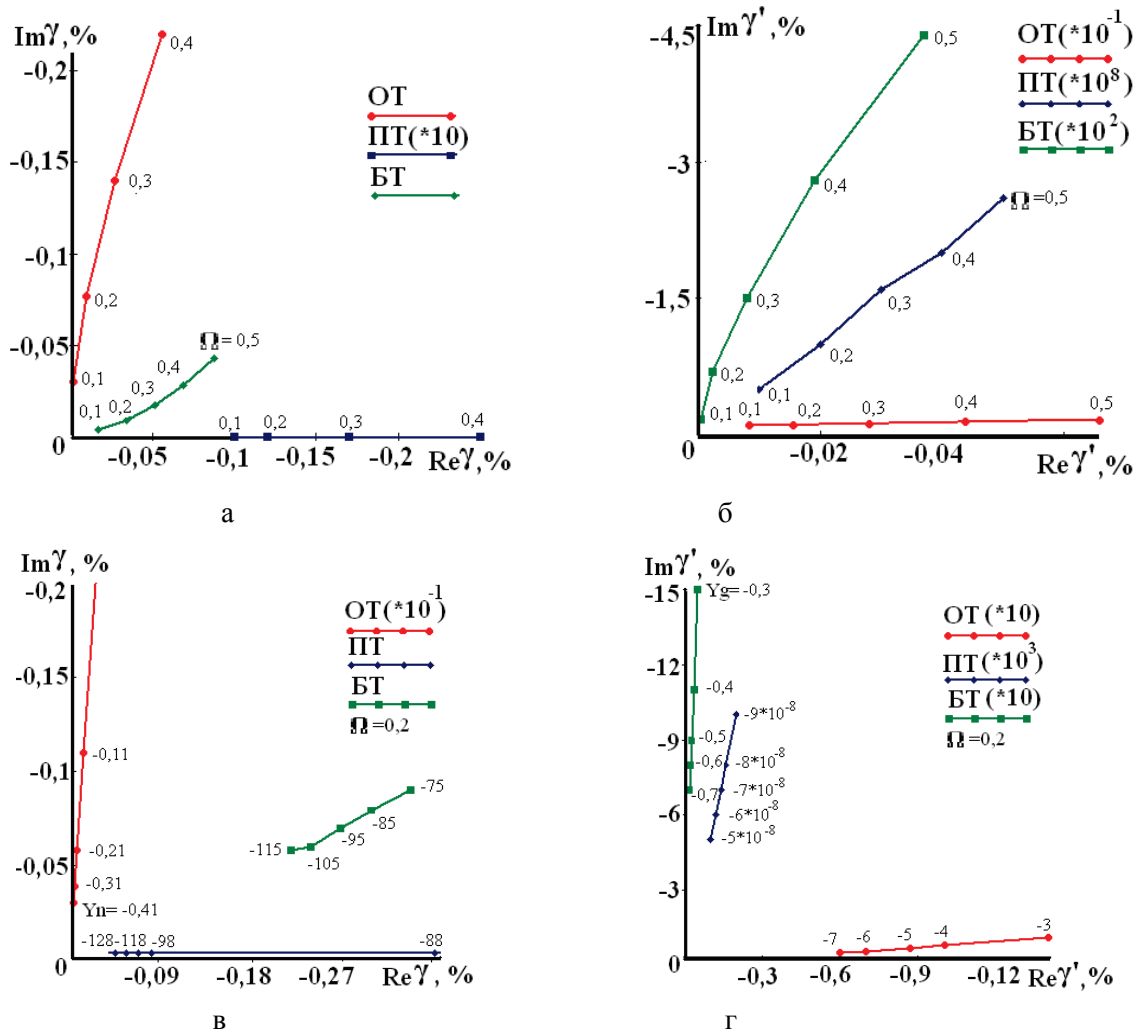


Рис. 2. Траєкторії годографів похибок прямого γ (а) і зворотного γ' (б) перетворення однокристальних конверторів іммітансу на основі ОТ, БТ, ПТ, а також залежності цих похибок від величини перетвореного іммітансу Y_n (в), Y_g (г)

Похибки перетворення однокристальних конверторів іммітансу на різних частотах

Тип	Похибки перетворення $Re\gamma/Im\gamma$ [%]								
	$\Omega = 0,01$			$\Omega = 0,2$			$\Omega = 0,5$		
	ОТ	БТ	ПТ	ОТ	БТ	ПТ	ОТ	БТ	ПТ
γ	$-9 \cdot 10^{-5}$	-0,002	-0,51	-0,003	-0,03	-0,03	-0,09	-0,09	-0,01
	-0,01	-0,003	$-1 \cdot 10^{-4}$	-0,08	-0,01	$-7 \cdot 10^{-6}$	-0,3	-0,04	$-3 \cdot 10^{-6}$
γ'	-0,07	$-9 \cdot 10^{-9}$	$-1 \cdot 10^{-11}$	-0,16	$-2 \cdot 10^{-5}$	$-2 \cdot 10^{-10}$	-0,7	$-4 \cdot 10^{-4}$	$-5 \cdot 10^{-10}$
	-0,08	$-6 \cdot 10^{-5}$	$-5 \cdot 10^{-10}$	-0,12	$-7 \cdot 10^{-3}$	$-1 \cdot 10^{-8}$	-0,5	$-4 \cdot 10^{-2}$	$-2 \cdot 10^{-8}$

Аналізуючи результати, показані у табл., бачимо, що найменшою похибку перетворення іммітансу мають конвертори іммітансу на основі ПТ. У режимі зворотного перетворення ця похибка не перевищує 10^{-8} %. Найбільшу похибку мають конвертори іммітансу на основі ОТ.

Висновки

1. Розроблено математичну модель оцінки похибок перетворення іммітансу однокристальних перетворювачів іммітансу на основі одноперехідного транзистора, біполярного транзистора, польового транзистора, що дозволяє здійснити їхню порівняльну оцінку в діапазоні частот і перетворених іммітансів, також в подальшому провести дослідження від параметрів структури УПП, впливу темпера-

тури і режиму живлення.

2. Найменшу похибку перетворення мають конвертори іммітансу на основі ПТ, а найбільшу — конвертори іммітансу на основі одноперехідного транзистора.

3. Для всіх видів розглянутих конверторів іммітансу суттєве зниження похибок перетворення досягається шляхом використання менших значень перетвореного іммітансу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Філінюк М. А. Аналіз і синтез інформаційних пристроїв на базі потенційно-нестійких узагальнених перетворювачів іммітансу / М. А. Філінюк. — Вінниця : ВДТУ, 1998. — 85 с.
2. Філінюк М. А. Інформаційні пристрої на основі потенційно-нестійких багато електродних напівпровідникових структур Шоткі : моног. / М. А. Філінюк, О. М. Куземко, Л. Б. Ліщинська. — Вінниця : ВНТУ, 2009. — 274 с.
3. Узагальнені перетворювачі іммітансу на основі інжекційно-пролітної транзисторної структури з спільним витоком [Електронний ресурс] / [Л. Б. Ліщинська, І. В. Булига, А. Г. Шведюк, М. А. Філінюк] // Наукові праці ВНТУ. — 2008. — № 2. — 18 с.— Режим доступу до журналу : [http\ www.nbu.gov.ua/e-journals/vntu/2008](http://www.nbu.gov.ua/e-journals/vntu/2008).
4. Філінюк М. А. Основи негatronіки. Т. 1. Теоретичні і фізичні основи негatronіки / М. А. Філінюк. — Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. — 456 с.

Рекомендована кафедрою проектування комп'ютерної та телекомунікаційної апаратури

Надійшла до редакції 31.03.10
Рекомендована до друку 27.04.10

Ліщинська Людмила Броніславівна — доцент.

Кафедра інформаційних систем Вінницького торговельно-економічного інституту Київського національного торговельно-економічного університету;

Барабан Марія Володимирівна — аспірантка; **Філінюк Микола Антонович** — завідувач кафедри.

Кафедра проектування комп'ютерної та телекомунікаційної апаратури Вінницького національного технічного університету