

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ІМІТАНСНОГО КОЛА ДВОПАРАМЕТРИЧНОГО  
КОНВЕРТОРА ІМІТАНСУ НА ОСНОВІ ПОЛЬОВОГО ТРАНЗИСТОРА**

Метою дослідження є визначення основних параметрів імітансних кіл багатопараметричних узагальнених перетворювачів імітансу на основі польового транзистора.

Досліджено залежності критичних точок імітансного кола конвертора імітансу в діапазоні перетворених імітансів омичного, ємнісного та індуктивного характеру.

Показано, що багатопараметричні конвертори імітансу на основі польової транзисторної структури є перспективними елементами для реалізації на їх основі адаптивних генераторних давачів.

Ключові слова: узагальнений перетворювач імітансу, імітансне коло, польовий транзистор, імітанс.

L.B. LISHCHYNSKA, Y.S. TKACHUK, O.O. LAZAREV, M.A. FILINYUK  
Vinnytsya National Technical University

**THE RESEARCH OF THE IMMITANCE CIRCLE PARAMETERS FOR TWO-PARAMETER IMMITANCE  
CONVERTOR ON THE BASIS OF FIELD-EFFECT TRANSISTOR**

Abstract – The purpose of the study is to determine the basic parameters of multiparameter generalized immitance convertors immitance circles on the basis of FET.

The research of the main immitance circle parameters for the immitance convertor was conducted in the range of converted resistive, capacitive and inductive immitances.

The research results proved that multiparameter immitance convertors on the basis of FET are perspective elements for adaptive oscillator sensors implementation.

Keywords: generalized immitance convertor, immitance circle, field-effect transistor, immitance.

**Вступ**

Найбільш широкого застосування перетворювачі імітансу отримали при реалізації схемотехнічних аналогів індуктивності, активних фільтрів, різноманітних видів фазо- та амплітудних коректорів [1, 2]. На низьких та високих частотах для їх реалізації використовуються схемотехнічні рішення [3], а в діапазонах УВЧ та НВЧ – застосовують однокристалні узагальнені перетворювачі імітансу (УПІ) [4]. Окрім застосування їх при реалізації НВЧ фільтрів та різних видів пристроїв керування (комутаторів, фазообертальних пристроїв), вони добре зарекомендували себе при побудові генераторних давачів [5]. Подальшою їх перспективою є застосування багатопараметричних УПІ, які забезпечують розширення функціональних можливостей, наприклад, при побудові мультифункціональних давачів, та покращення технічних параметрів за рахунок реалізації адаптивної функції [6].

Однією із перспективних напівпровідникових структур (з точки зору технологічності, робочого діапазону частот, вартості) є польова транзисторна структура, яка може бути використана для реалізації двопараметричних УПІ.

**Мета роботи та формулювання задач дослідження**

Для ефективного використання польової транзисторної структури (ПТС) як багатопараметричного конвертора імітансу, необхідна інформація про поведінку її конверторних властивостей в діапазоні перетворених імітансів. Ці властивості описуються поведінкою її імітансного кола. Тому метою дослідження є визначення основних параметрів імітансних кіл багатопараметричних УПІ на основі ПТ.

При цьому поставлені та вирішені наступні задачі:

1. Обґрунтування та аналітичне визначення основних параметрів імітансного кола досліджуваного двопараметричного конвертора імітансу.
2. Дослідження залежності основних параметрів імітансного кола досліджуваного конвертора імітансу в діапазоні перетворених імітансів, що мають омичний, ємнісний та індуктивний характер.

**Аналітичне визначення параметрів імітансного кола двопараметричного УПІ**

В загальному випадку двопараметричний заземлений УПІ утворюється трьохполюсником, між двох полюсів якого та загальною шиною підключені перетворювані імітанси  $Z_1$  та  $Z_2$ , а перетворений імітанс  $W_{вих} = T_i(Z_1, Z_2)$  спостерігається між третім полюсом та загальною шиною (рис. 1 а) [4].

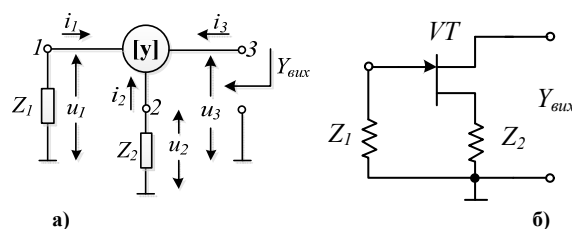


Рис. 1. Узагальнена схема двопараметричного УПІ на основі трьохполюсника (а) та його високочастотна схема при використанні польового транзистора (б)

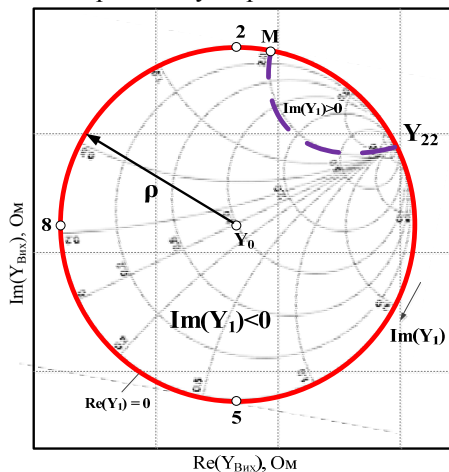
Вважається, що трьохполосник є квазілінійним, і його можна описати системою рівнянь:

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де  $Y_{11}, Y_{12}, Y_{13}, Y_{21}, Y_{22}, Y_{23}, Y_{31}, Y_{32}, Y_{33}$  – параметри невизначеної матриці провідності трьохполосника. При  $Z_2 = 0$  реалізується чотирьохполосник, для якого з (1) знаходимо:

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{13} \\ Y_{31} & Y_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

При  $Z_2 \neq 0$  утворюється новий чотирьохполосник, адмітансні параметри якого залежать від  $Z_2$  [4]:



$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{y_{11} + Z_2 \Delta y}{1 + Z_2 \sum y} & \frac{y_{13} - Z_2 \Delta y}{1 + Z_2 \sum y} \\ \frac{y_{31} - Z_2 \Delta y}{1 + Z_2 \sum y} & \frac{y_{33} + Z_2 \Delta y}{1 + Z_2 \sum y} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

де  $\sum y = y_{11} + y_{13} + y_{31} + y_{33}$ ;  $\Delta y = y_{11}y_{33} - y_{31}y_{13}$ .

З урахуванням підключеного до входу такого чотирьохполосника перетвореного імітансу  $Z_1$ , знаходимо аналітичний опис перетвореного імітансу  $Y_{вих} = T_i(Z_1, Z_2)$ , де  $T_i$  – частковий коефіцієнт перетворення:

$$Y_{вих} = Y_{22} - Y_{12} \cdot Y_{21} / Y_{11} + (1/Z_1). \quad (4)$$

У відповідності до теорії конформних відображень [7] на комплексній площині, дрібно-лінійна функція (4) може бути представлена у вигляді кола (рис. 2) з радіусом  $\rho$  та координатою центра  $Y_0$ :

$$\rho = |Y_{12} \cdot Y_{21}| / 2 \cdot \text{Re}(Y_{11} + 1/Z_1), \quad (5)$$

$$Y_0 = Y_{22} - Y_{12} \cdot Y_{21} / 2 \text{Re}(Y_{11} + 1/Z_1). \quad (6)$$

Координати кожної точки на цьому колі та всередині нього є функцією перетворених імітансів  $Z_1$  та  $Z_2$  та при введенні нормування виду  $\text{Re}(\bar{Y}_1) = \text{Re}(Y_1) / \text{Re}(Y_{11})$ ,  $\text{Im}(\bar{Y}_1) = \text{Im}(Y_1 + Y_{22}) / \text{Re}(Y_{22})$ , де  $Y_1 = 1/Z_1$ , дозволяють використовувати вписану в імітансне коло діаграму Вольперта-Сміта для визначення всіх можливих значень перетвореного адмітанса  $Y_{вих}$  в залежності від перетворених імпедансів  $Z_1$  та  $Z_2$  двопараметричного УПШ.

Аналіз цього кола, проведений в [8], показав, що крім його радіуса  $\rho$  та координати центра  $Y_0$ , для реалізації більшості інформаційних пристроїв практичний інтерес становлять ряд характерних точок на цьому колі, в тому числі: екстремальні точки 2 і 5, які характеризують максимально-досяжні значення уявної складової перетвореного адмітанса, і які мають координати:

$$y_{вих.2} = \text{Re}(Y_0) + j(\rho + \text{Im}(Y_0)); \quad (7)$$

$$y_{вих.5} = \text{Re}(Y_0) + j(\text{Im}(Y_0) - \rho); \quad (8)$$

- екстремальна точка 8, яка характеризує мінімально-досяжне значення дійсної складової перетвореного адмітанса з координатами

$$y_{вих.8} = \text{Re}(Y_0) - \rho + j \cdot \text{Im}(Y_0). \quad (9)$$

Крім того важливими параметрами двопараметричного УПШ слід вважати його інваріантний коефіцієнт стійкості, пов'язаний з параметрами імітансного кола співвідношенням [7]

$$K_{y.8} = \text{Re}(Y_0) / \rho, \quad (10)$$

а також імітансну координату медіани  $M$ , де  $Z_1 = 0$

$$M = Y_{22} - Y_{12}Y_{21}/Y_{11}. \quad (11)$$

Система рівнянь (4 – 11) характеризує основні параметри імітансного кола будь-якого двопараметричного УПШ та для їх застосування достатньо знати систему адмітансних  $y$ -параметрів матриці в рівнянні (2).

#### Дослідження залежності основних параметрів імітансного кола двопараметричного УПШ

Високочастотна схема двопараметричного конвертора імітансу на основі польового транзистора представлена на рис. 1 б. Для знаходження адмітансних параметрів  $y_{11}$ ,  $y_{13}$ ,  $y_{31}$  та  $y_{33}$  використано експериментальну схему (рис. 3 а) та методику вимірювання, описану в [9]. Результати частотної залежності шуканих  $y$ -параметрів представлені на рис. 3 б.

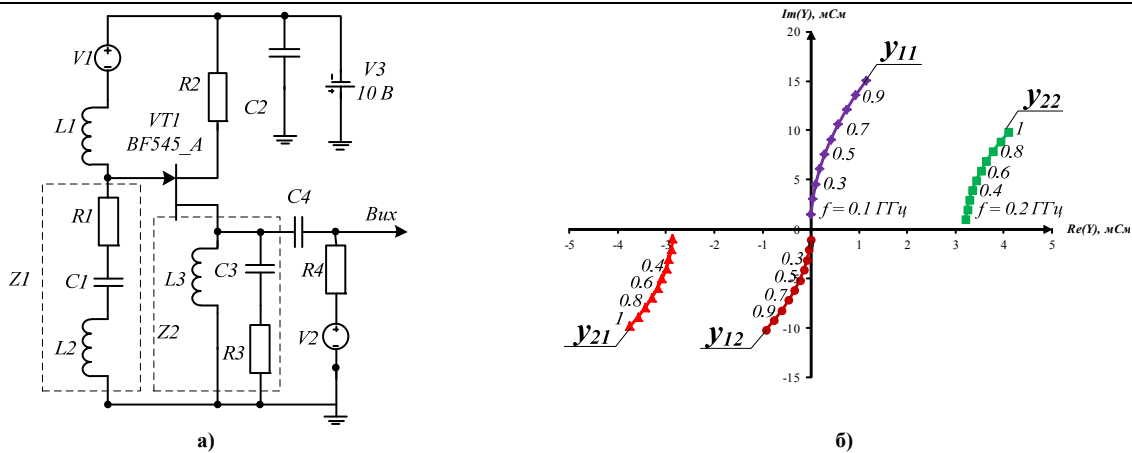


Рис. 3. Експериментальна схема двопараметричного конвертора імпедансу (а) та частотні залежності його адмітансних параметрів (б)

На основі експериментально отриманих значень у-параметрів (рис. 3 б) з використанням рівнянь (4 – 11), розраховано залежності координат характерних точок УПІ на його імпедансному колі (рис. 4 – 9).

Важливим параметром імпедансного кола є його радіус  $\rho$ . Чим він більший, тим ширшими є функціональні можливості УПІ при реалізації на його основі різних видів інформаційних пристроїв керування. Як видно з рис. 4, зменшення як активного, так і реактивного опору  $Z_2$ , призводить до зростання  $\rho$ .

Однак при індуктивному характері  $Z_2$  спостерігається екстремум при  $L_2 = 10$  нГн. Величина цієї індуктивності також нелінійно впливає на координати центру кола  $Y_0$ , на відміну від впливу ємнісного та омичного опору  $Z_2$  (рис. 5).

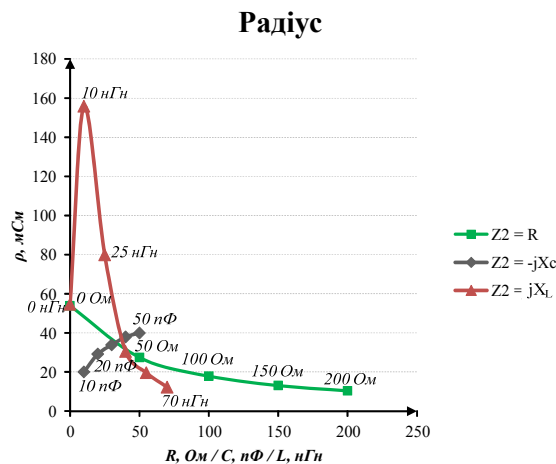


Рис. 4. Залежності радіуса імпедансних кіл при різних значеннях ввімкненого у загальний вивід імпедансу  $Z_2$

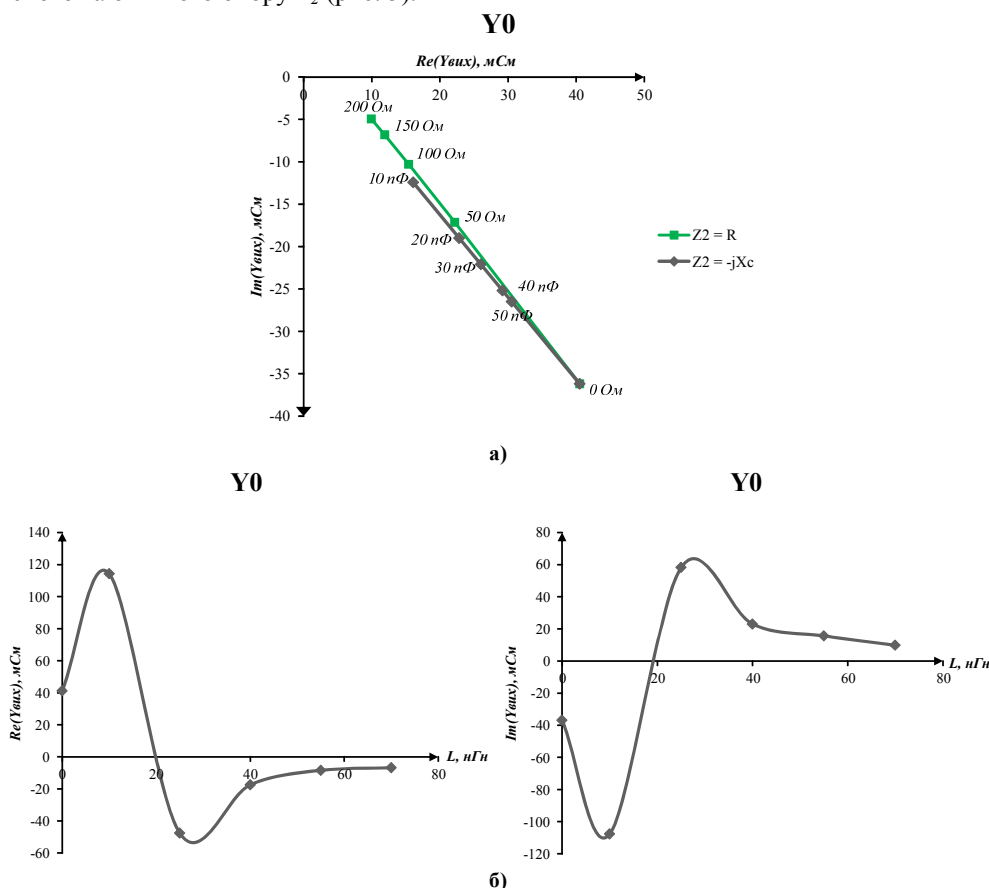


Рис. 5. Залежності координат точки центру  $Y_0$  імпедансних кіл при  $Z_2 = R$ ,  $Z_2 = 1/j\omega C$  (а) та  $Z_2 = j\omega L$  (б)

Ця нелінійна залежність при  $Im(Z_2) > 0$  дозволяє змінювати характер перетворювача імітанса в критичній точці 8 (рис. 6) з конвертора при  $L < 20$  нГн, на інвертор ( $L > 20$  нГн), що також істотно розширює функціональні властивості такого УПП, в тому числі при побудові імітансних логічних елементів.

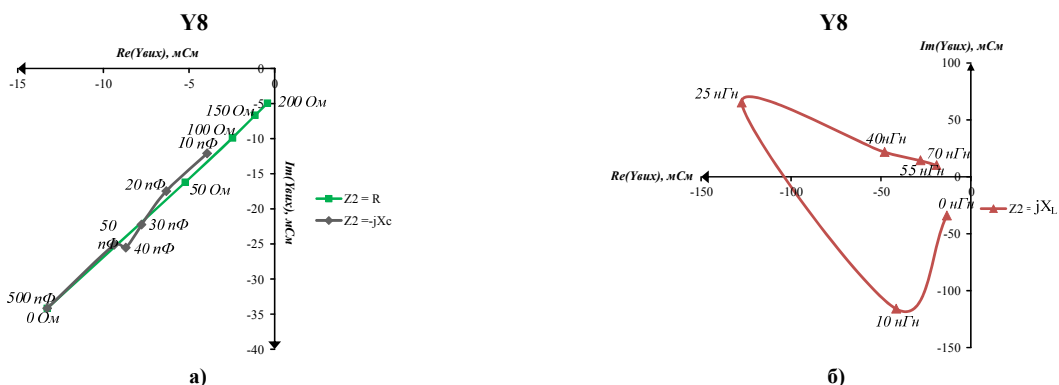


Рис. 6. Залежності координат точки  $Y_8$  імітансних кіл при  $Z_2 = R$ ,  $Z_2 = 1/j\omega C$  (а) та  $Z_2 = j\omega L$  (б)

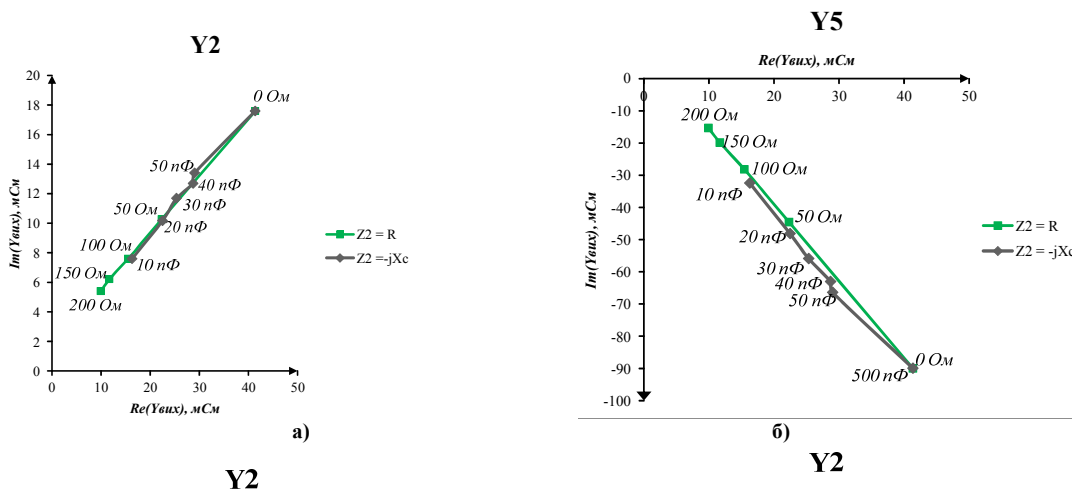


Рис. 7. Залежності координат точок  $Y_2$  та  $Y_5$  імітансних кіл при  $Z_2 = R$ ,  $Z_2 = 1/j\omega C$  (а, б) та  $Z_2 = j\omega L$  (в, г)

Аналіз координат точок  $Y_2$  та  $Y_5$  показує ідентичний характер їх залежності від  $Z_2$ . Враховуючи, що в цих точках УПП найчастіше використовується як керуючий реактивний елемент, перевагу слід надавати використанню в якості  $Z_2$  активного або ємнісного опорів, від зміни величин яких спостерігається майже лінійна залежність  $Im(Y_{вих})$  (рис. 7).

Особливий інтерес для практичного використання представляє залежність медіани  $M$  від величини перетвореного опору  $Z_2$  (рис. 8).

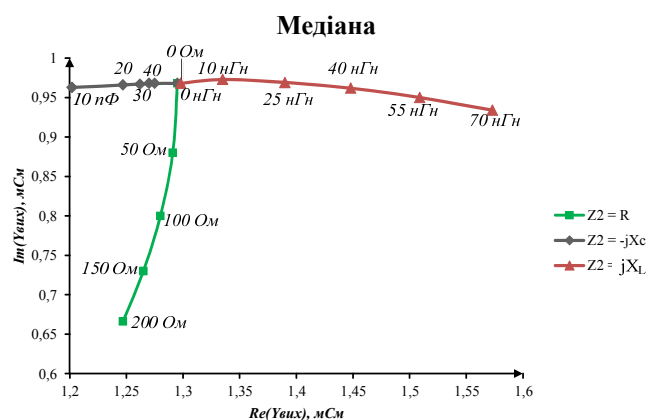


Рис. 8. Залежності координат точок медіани імітансних кіл при різних значеннях ввімкненого у загальний вивід імпедансу  $Z_2$

Зміною  $Z_2 = R$  можливо майже лінійне керування переважно лише уявною координатою, а зміною  $Z_2 = 1/j\omega C$  та  $Z_2 = j\omega L$  – дійсною координатою медіани, що дозволяє регулювати ширину конвертуючої та інвертуючої областей перетворення імітансу  $Z_1$ .

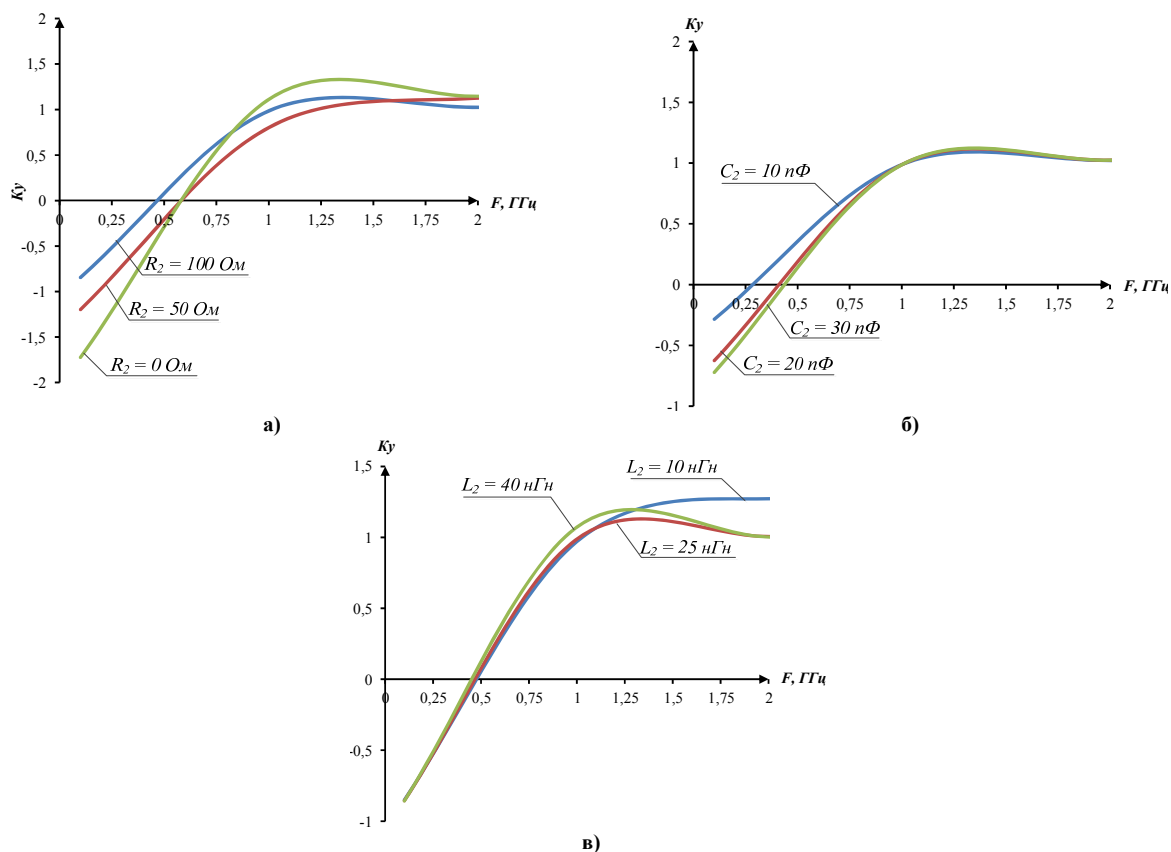


Рис. 9. Залежності інваріантного коефіцієнта стійкості від частоти при різних значеннях  $R_2$  (а),  $C_2$  (б) та  $L_2$  (в)

При цьому, як слідує із рис. 9, УПП в широкому діапазоні частот (до 1 ГГц) залишається потенційно нестійким, що забезпечує реалізацію на його основі адаптивних генераторних давачів.

### Висновки

1. Зі зменшенням як активного, так і реактивного опорів  $Z_2$ , радіус імітансного кола збільшується. Чим більшим є радіус імітансного кола багатопараметричного УПП, тим ширшими є його функціональні можливості при реалізації на його основі різноманітних інформаційних пристроїв.

2. Нелінійна залежність координат точки центру кола від  $Z_2 = j\omega L$  при  $Im(Z_2) > 0$  дозволяє

змінювати характер перетворювача імітанса в критичній точці 8 з конвертора на інвертор, що також істотно розширює функціональні властивості УПП.

3. Поведінка координат точок  $Y_2$  та  $Y_5$  показала ідентичний характер їх залежності від  $Z_2$ . При зміні величин  $Z_2 = 1/j\omega C$  та  $Z_2 = R$  залежність  $Im(Y_{вих})$  є практично лінійною, що необхідно при побудові пристроїв керування.

4. Змінюючи значення  $Z_2 = R$  можна керувати уявною координатою медіани, а зміною  $Z_2 = 1/j\omega C$  та  $Z_2 = j\omega L$  – її дійсною координатою. Це дозволяє регулювати ширину конвертуючої та інвертуючої областей перетворення імітансу  $Z_1$ .

### Література

1. Ионкин П. А. Синтез RC-схем с активными взаимными элементами / П. А. Ионкин, В. Г. Миронов. – М. : Энергия, 1976. – 240 с.
2. Філінюк М. А. Інформаційні пристрої на основі потенційно-нестійких багатоелектродних напівпровідникових структур Шоттки : монографія / М. А. Філінюк, О. М. Куземко, Л. Б. Ліщинська. – Вінниця : ВНТУ, 2009. – 274 с.
3. Бенинг Ф. Отрицательное сопротивление в электронных схемах / Бенинг Ф. – М. : Сов.радио, 1975. – 286с.
4. Ліщинська Л. Б. Багатопараметричні узагальнені перетворювачі імітансу на основі однокристальних напівпровідникових структур : [монографія] / Л. Б. Ліщинська. – Вінниця: ВНТУ, 2012. – 243 с.
5. Пашаев А. М. Физико-технологические и схемотехнические основы негatronики / А. М. Пашаев, Ф. Д. Касимов, Н. А. Филинук, О. Н. Негоденко. – Баку : Элм, 2008. – 433 с.
6. Ліщинська Л. Б. Інформаційні пристрої на основі багатопараметричних узагальнених перетворювачів імітансу : монографія / Л. Б. Ліщинська. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 219 с.
7. Богачев В. М. Транзисторные усилители мощности / В. М. Богачев, В. В. Никифоров. – М. : Энергия, 1978. – 344 с.
8. Філінюк М. А. Методи та засоби вимірювання параметрів потенційно-нестійких чотириполосників : [монографія] / М. А. Філінюк, К. В. Огородник, Л. Б. Ліщинська. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 176 с.
9. Філінюк М. А. Метрологічні основи негatronіки : [монографія] / М. А. Філінюк, Д. В. Гаврілов. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006 – 188 с.

### References

1. Ionkin P. A., Mironov V. G. Sintez RC-skhem s aktivnymi nevzaimnymi elementami. Moscow. Energiya. 1976. 240 p. [In Russian]
2. Filinyuk M. A., Kuzemko O. M., Lischinska L. B. Informatsijni prystroi na osnovi potentsijno-nestijkih bagatoelectroodnyh napivprovodnikovoyh struktur Shottki: monograph. Vinnitsa. VNTU, 2009. 274 p. [In Ukrainian]
3. Benning F. Otritsatelnoe soprotivlenie v elektronnyh skhemah. Moscow. Sov. Radio. 1975. 286 p. [In Russian]
4. Lischinska L. B. Bagatoparametrychni uzagalneni peretvoryuvachi imitansu na osnovi odnokristalnih napivprovodnikovoyh struktur: monograph. Vinnitsa. VNTU. 2012. 243 p. [In Ukrainian]
5. Pashaev A. M., Kasimov F. D., Filinyuk N. A., Negodenko O. N. Fiziko-tehnologicheskie i skhemotekhnicheskie osnovy negatroniki. Baku. Elm. 2008. 433 p. [In Russian]
6. Lischinska L. B. Informatsijni prystroi na osnovi bagatoparametrychnykh uzagalnenykh peretvoryuvachiv imitansu: monograph. Vinnitsa. VNTU. 2013. 219 p. [In Ukrainian]
7. Bogachev V. M., Nikiforov V. V. Tranzistornye usiliteli moschnosti. Moscow. Energiya. 1978. 344 p. [In Russian]
8. Filinyuk M. A., Ogorodnyk K. V., Lischinska L. B. Metody ta zasoby vymiryuvannya parametriv potentsijno-nestijkih chotyrypolusnykiv: monograph. Vinnitsa. VNTU, 2010. 176 p [In Ukrainian]
9. Filinyuk M. A., Gavrilov D. V. Metrologychni osnovy negatroniky: monograph. Vinnitsa. Universum. 2006. 188 p. [In Ukrainian]

Рецензія/Peer review : 20.5.2013 р.

Надрукована/Printed :18.6.2013 р.

Рецензент: д.т.н., проф., завідувач кафедрою Електроніки Вінницького національного технічного університету Білинський Й. Й.