

Ліщинська Д. Дослідження узагальненого перетворювача іммітансу на польовому транзисторі при зміні полярності напруги на затворі / Ліщинська Д., Барабан М., Філінюк М. // Вісник ТНТУ. — 2012. — Том 66. — № 2. — С.174-180. — (приладобудування та інформаційно-вимірвальні технології).

УДК 621.372

Л. Ліщинська, канд. техн. наук; М. Барабан; М. Філінюк, докт. техн. наук

Вінницький національний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ УЗАГАЛЬНЕНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ІММІТАНСУ НА ПОЛЬОВОМУ ТРАНЗИСТОРІ ПРИ ЗМІНІ ПОЛЯРНOSTІ НАПРУГИ НА ЗАТВОРІ

Резюме. Досліджено узагальнений перетворювач іммітансу на польовому транзисторі при позитивній та негативній полярності напруги на затворі від індуктивного іммітансу навантаження.

Ключові слова: узагальнений перетворювач іммітансу, польовий транзистор, конвертор іммітансу, інвертор іммітансу.

L. Lischynska, M. Baraban, N. Filinyuk.

RESEARCH OF GENERALIZED IMMITTANCE CONVERTER ON THE FIELD-EFFECT TRANSISTOR WITH POLARITY REVERSAL OF VOLTAGE ON THE GATE

The summary. Generalized immittance converter (GIC) on field-effect transistor with a p-n-junction (JFET) and with positive and negative polarity voltage on the gate of inductive immittance load was studied. JFET is included in the scheme with common source. Physical equivalent circuit JFET at different voltage polarity on the gate was interpreted. Dependences of the input resistance of the load resistance at various gate voltage polarity was investigated. The diagrams of Volpert-Smit were built. The conditions under which JFET can be used as a converter and inverter of immittance without changing the connection circuit were specified. With the negative polarity of voltage on the gate JFET possesses properties of immittance inverter, with a positive polarity of voltage on the gate JFET possesses properties of immittance converter. In general, the structures of JFET with p-n junction is similar to the structures of UJT and IST, which allows in certain modes to describe it by the similar physical small-signal equivalent circuits. The main difference is in the length and resistance of the channel (base), which significantly affects the nature of the physical processes in it. Using the JFET in direct displacement of p-n junction it is necessary to describe the T-shaped equivalent circuit which is used for the bipolar transistor, the realized GIC possessing properties of immittance converter. Application of JFET as a converter or inverter of immittance without changing of the connection circuit is limited by the quantity of the immittance transformation and relative frequency Ω .

Key words: generalized immittance converter, field-effect transistor, transformer of immittance, immittance inverter.

Вступ. Польові транзистори (ПТ) знаходять застосування в якості узагальнених перетворювачів іммітансу (УПІ) в режимі запираючої напруги на затворі [1], реалізуючи, залежно від схеми ввімкнення, функції конвертора або інвертора іммітансу. Структура ПТ з р-п переходом подібна до структури одноперехідного транзистора (ОТ), який працює в режимі відкритого р-п переходу, а також залежно від схеми ввімкнення володіє властивостями інвертора або конвертора іммітансу [2].

Виходячи з цього, з практичної точки зору є цікавим об'єднати в одному транзисторі властивості конвертора та інвертора іммітансу без зміни схеми його ввімкнення.

Ціль та завдання дослідження. Ціллю роботи є дослідження ПТ з р-п переходом у режимі УПІ при різній полярності потенціалу затвора. Для досягнення цієї цілі поставлені такі завдання:

- обґрунтування фізичних еквівалентних схем ПТ при різній полярності напруги на затворі;
- дослідження залежності перетвореного опору від перетворюваного при різноманітній полярності напруги на затворі ПТ;
- визначення умов, за яких ПТ може бути використаний в якості конвертора та інвертора іммітансу без зміни схеми ввімкнення.

Обґрунтування фізичної еквівалентної схеми ПТ при різній полярності напруги на затворі. При запираючій полярності напруги на затворі ПТ у широкому діапазоні частот застосовується його Т-подібна фізична еквівалентна схема [3] (рис. 1а). На схемі $C_{зс}$, $C_{зв}$ – ємність затвор-стік та затвор-витік відповідно; R_i – диференційний опір між затвором та витіком; G – провідність каналу. Вона використовується для ПТ з р-п переходом і переходом Шоттки. Зі зростанням частоти збільшується вплив паразитних елементів корпусу та виводів ПТ, які з метою спрощення розрахунків на відносно низьких частотах на фізичній еквівалентній схемі не враховуються.

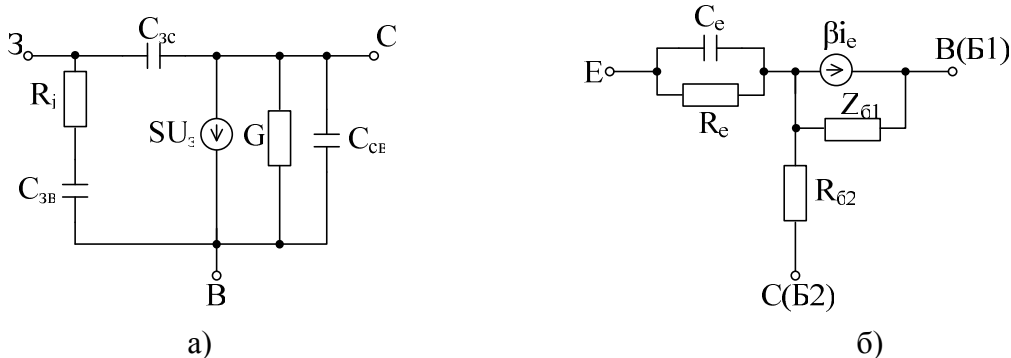


Рисунок 1. Фізичні еквівалентні схеми ПТ з р-п переходом при запираючій напрузі на затворі (а) і ПТ при прямому зміщенні на емітері (б)

Figure 1. Physical equivalent circuits of JFET at locking voltage on the gate (a) and JFET in direct bias on emitter (b)

Але ця схема описує ПТ тільки при запираючій напрузі на затворі. Враховуючи, що структура ОТ подібна до структури ПТ з р-п переходом, у певному режимі можливий опис ПТ при позитивній напрузі на затворі фізичною еквівалентною схемою ОТ [4]. Але ці схеми, як правило, призначені для дослідження ключового режиму ОТ, враховують високий опір каналу і використовуються на низьких частотах (менше 100 кГц для ОТ типу КТ117). Вказівки зроблено в [5], що ОТ у схемі ввімкнення з загальною першою базою володіє властивостями, аналогічними до властивостей біполярного транзистора, ввімкненого за схемою з загальним колектором. Вони лягли в основу розглядання одноперехідної транзисторної структури, подібної до структур ПТ і ОТ як структури інжекційно-пролітного транзистора (ІПТ) [6], що працює при прямому зміщенні на затворі, який має низькоомний опір каналу (не більше десятків/сотень Ом) як у ПТ, який описується фізичною еквівалентною схемою біполярного транзистора (рис. 1б). На схемі C_e , R_e – ємність та опір емітера; $Z_{б1}$ – ємнісний опір першої бази; $R_{б2}$ – опір другої бази.

З проведеного аналізу випливає, що ПТ залежн від полярності напруги на затворі повинен бути описаний різними фізичними еквівалентними схемами: при запираючому зміщенні – схемою на рис. 1а; при відпираючому зміщенні – схемою рис. 1б.

Відомо, що чотириполіусник, увімкнений за схемою з загальним витокком і запираючою напругою на затворі, володіє при виконанні певних умов властивостями інвертора іммітансу [1]. Чотириполіусник створений ОТ, увімкнений за схемою з загальною першою базою, що еквівалентно ввімкненню ПТ та ППТ за схемою з загальним витокком, при відпираючій напрузі на емітері володіє властивостями конвертора іммітансу [2]. Це дозволяє зробити висновок, що для досягнення поставленої цілі дослідження необхідно використовувати ввімкнення ПТ із загальним витокком (рис. 2а).

Дослідження УПІ на основі ПТ, увімкненого за схемою з загальним витокком. На основі фізичних еквівалентних схем ПТ (рис. 1) представимо фізичні еквівалентні схеми УПІ на основі ПТ із загальним витокком у вигляді рис. 2.

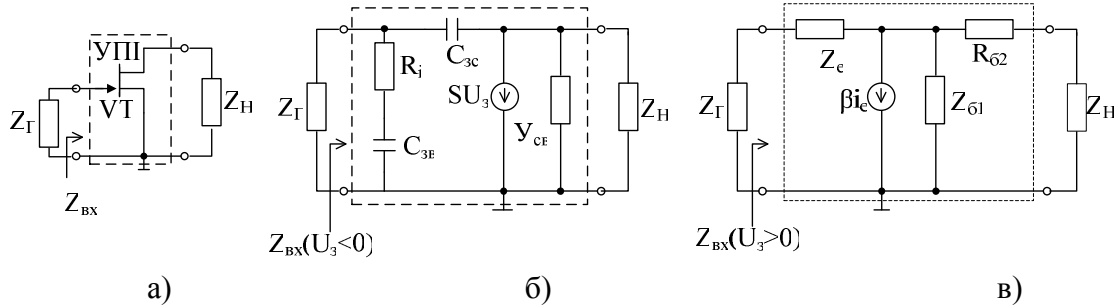


Рисунок 2. Високочастотна (а) та малосигнальні фізичні еквівалентні схеми УПІ на основі ПТ увімкненого за схемою з загальним витокком при запираючій (б) та відпираючій (в) напрузі на затворі
 Figure 2. High frequency (a) and small-signal physical equivalent circuits of GIC based on JFET turned on the circuit with common source with locking (b) and opening (b) voltage at the gate

Матриці провідностей цих схем мають вигляд [2]

$$[Y^{(-)}] = \begin{bmatrix} Y_{11}^{(-)} & Y_{12}^{(-)} \\ Y_{21}^{(-)} & Y_{22}^{(-)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\Omega^2}{R_i} + j \frac{\Omega}{R_i} & -j \frac{\Omega \xi}{R_i} \\ s_0 - j \Omega s_0 & G + j \frac{\Omega \xi}{R_i} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де $\Omega = \frac{\omega}{\omega_s}$, $\omega_s = \frac{1}{R_i C_{3б}}$; R_i – диференційний опір між затвором та витокком; $\xi = \frac{C_{3б}}{C_{3с}}$, $C_{3б}$, $C_{3с}$ – ємність затвор-витік та затвор-стік відповідно; s_0 – низькочастотне значення крутизни;

$$[Y^{(+)}] = \begin{bmatrix} Y_{11}^{(+)} & Y_{12}^{(+)} \\ Y_{21}^{(+)} & Y_{22}^{(+)} \end{bmatrix} = \Delta Z^{-1} \begin{bmatrix} R_{б2} + Z_{б1} & -Z_{б1} \\ -Z_{б1}(1 - \beta) & Z_e + Z_{б1}(1 - \beta) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

де $\Delta Z = Z_e R_{б2} + Z_{б1} [Z_e + R_{б2} (1 - \beta)]$, β – комплексний коефіцієнт передавання по струму ППТ.

Перетворення опору УПІ для прямого перетворення визначаємо виразом [7]

$$Z_{ex} = 1 / Y_{ex} = 1 / ((Y_{11} - Y_{12} Y_{21}) / (Y_{22} + 1 / Z_H)), \quad (3)$$

де $Z_H = j\omega L$ – індуктивний опір навантаження.

Підставивши (1) та (2) в (3), отримаємо аналітичні вирази для перетвореного опору УПІ при запираючій ($Z_{ex}^{(-)}$) та відпираючій ($Z_{ex}^{(+)}$) напрузі на затворі ПТ

$$Z_{ex}^{(-)} = \left[\frac{\Omega^2}{R} + j \frac{\Omega}{R} - \frac{\omega L \Omega \xi (s_0 - j \Omega s_0)}{(GR + j \Omega \xi) j \omega L + R} \right]^{-1}; \quad (4)$$

$$Z_{ex}^{(+)} = \left[\frac{Z_{\sigma 1} + R_{\sigma 2}}{\Delta} - \frac{Z_{\sigma 1} Z_H (1 - \dot{\beta})}{(Z_{\sigma 1} (1 - \dot{\beta}) + Z_e) Z_H \Delta + \Delta^2} \right]^{-1}, \quad (5)$$

де L – перетворювана індуктивність; $Z_H = j \omega L$.

На основі (4–5) отримано розрахункові залежності активної та реактивної складових перетвореного опору ПТ від наведених частот ($\Omega = f / f_s$, $\Omega = f / f_\beta$) та полярності напруги на затворі ПТ при індуктивному характері перетвореного іммітансу (рис. 3).

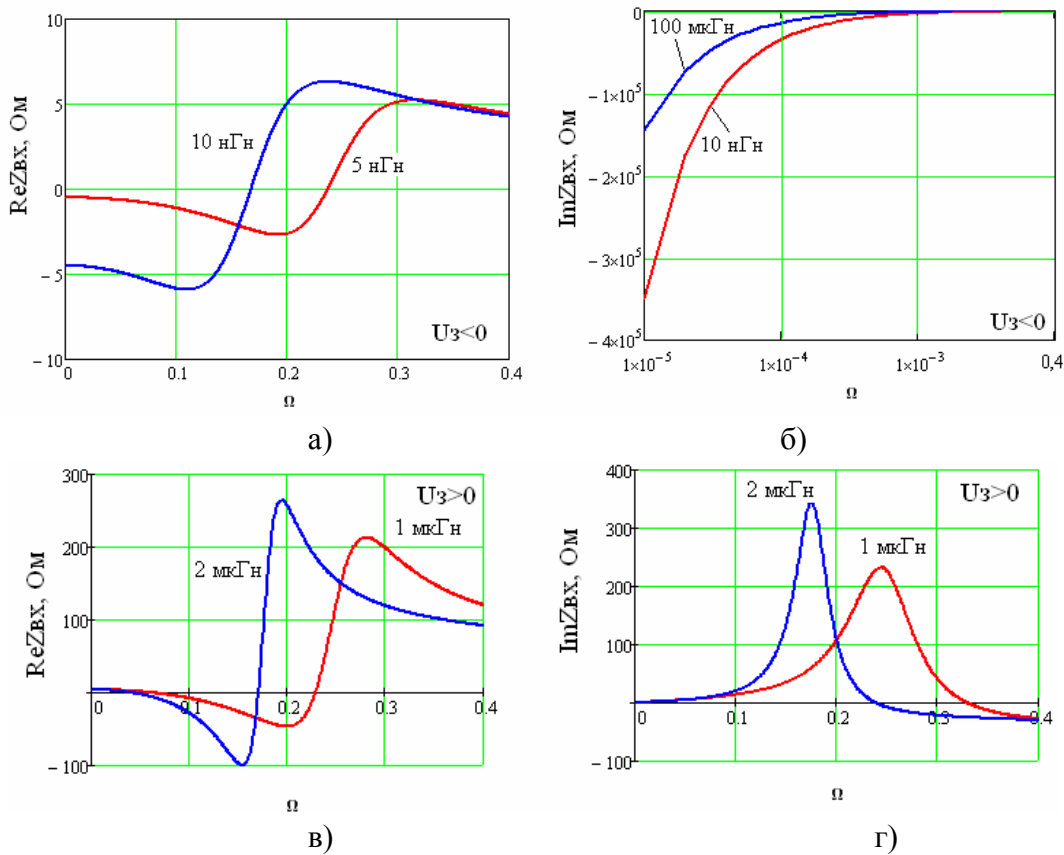


Рисунок 3. Розрахункові залежності перетвореного іммітансу УПІ на основі ПТ увімкненого за схемою зі спільним витоком при індуктивному характері перетворюваного іммітансу і різній полярності напруги на затворі

Figure 3. Calculated dependences of converted immittance GIC based on JFET turned on the scheme with a common source in the inductive nature of the converted immittance and different polarity of the voltage at the gate

З розрахункових графіків (рис. 3а, б) випливає, що при від’ємній напрузі на затворі ПТ у діапазоні частот володіє властивостями інвертора іммітансу, перетворюючи індуктивний опір в ємнісний ($\text{Im} Z_{ex}^{(-)} < 0$) з від’ємною дійсною складовою ($\text{Re} Z_{ex}^{(-)} < 0$). При відпираючій полярності напруги на затворі ($U_3 > 0$) у розглянутому УПІ в діапазоні частот $\Omega < 0.6$ відбувається перетворення індуктивного

опору $Z_r = j\omega L$ в індуктивний опір $\text{Im} Z_{ex}^{(+)} > 0$ з від'ємною активною складовою $\text{Re} Z_{ex}^{(+)} < 0$, що характерно для конвертора іммітансу.

Таким чином, теоретичний розрахунок показав, що шляхом зміни полярності напруги на затворі можна змінювати властивості УПІ на основі ПТ з режиму конверсії в режим інверсії іммітансу без зміни схеми ввімкнення ПТ.

Експериментальні дослідження. Отримані результати базуються на спрощених фізичних еквівалентних схемах ПТ, які враховують процеси тільки в активній області їх кристала. Тому наведені на рис. 3 результати потрібно розглядати як якісні, що показують можливість керування характером перетворюваного іммітансу УПІ шляхом зміни полярності напруги на затворі ПТ.

Для експериментального підтвердження отриманих результатів та їх кількісної оцінки проведені експериментальні дослідження УПІ режимі перетворення індуктивного опору на основі ПТ з р-п переходом типу 3П330 у діапазоні індуктивного опору $Z_H = j\omega L$. Вимірювання вихідного опору проводилося з використанням фазового вольтметра ФК2-12 при потужності сигналу, яка не перевищує 10^{-4} Вт.

Порівняльний аналіз розрахункових (рис. 3) та експериментальних (рис. 4) результатів показав їх якісне співпадання, що ще раз підтверджує можливість керування характером перетворення УПІ шляхом зміни полярності напруги на затворі ПТ.

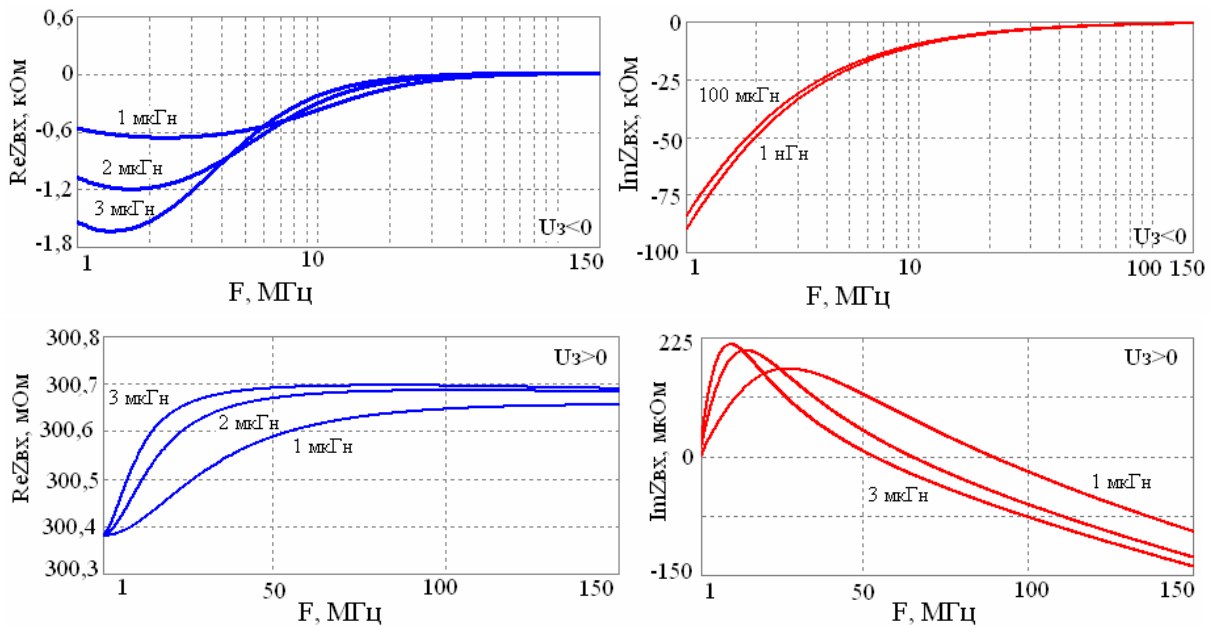


Рисунок 4. Експериментальна залежність перетвореного опору УПІ на основі ПТ при індуктивному характері перетворюваного іммітансу

Figure 4. Experimental dependence of converted resistance GIC based on JFET at inductive character of the converted immittance

Результати, наведені на рис. 4, отримано для випадку зворотного перетворення індуктивного іммітансу, який змінюється в обмеженому діапазоні. Це не дозволяє визначити граничні умови, за яких ПТ може бути використаний в якості конвертора або інвертора іммітансу без зміни схеми його ввімкнення. Для розв'язання цієї задачі проведено дослідження вхідного $Z_{вх}$ опору при будь-яких значеннях перетвореного опору Z_H й побудовано іммітансні окружності УПІ в режимах, коли $U_3 > 0$, $U_3 < 0$ у

випадку прямого перетворення імпедансу Z_H (рис. 5). В імпедансній окружності, за методикою, описаною в [8], вписані діаграми Вольперта-Смітта, які відображають весь діапазон нормованих значень перетворених імпедансів Z_H

$$\operatorname{Re} \bar{Z}_H = \operatorname{Re} Z_H / \operatorname{Re} Z_{22}; \quad \operatorname{Im} \bar{Z}_H = \operatorname{Im}(Z_H + Z_{22}) / \operatorname{Re} Z_{22}.$$

У будь-якій точці на краю діаграми Вольперта-Смітта $\operatorname{Re} \bar{Z}_H = 0$. Уся діаграма Вольперта-Смітта ділиться на дві частини медіаною – лінією, яка ділить область, де $\operatorname{Im} Z_H > 0$, що відповідає індуктивним значенням перетворених опорів та області, де $\operatorname{Im} Z_H < 0$, що відповідає ємнісним значенням перетворених опорів. На імпедансній окружності медіана з'єднує точки Z_{11} та $\operatorname{Im} Z_H = 0$, де $\operatorname{Im} \bar{Z}_H = \operatorname{Im} Z_{22} / \operatorname{Re} Z_{22}$.

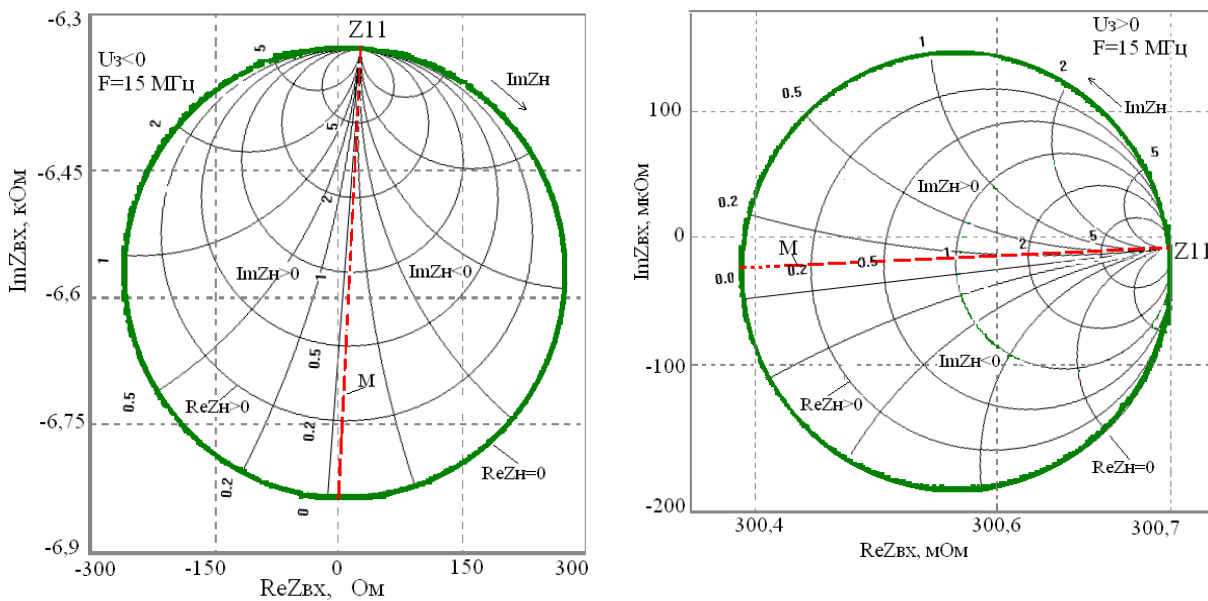


Рисунок 5. Імпедансні окружності УПІ в режимі інвертора та конвертора імпедансу у випадку зворотного перетворення опору Z_H (М – медіана)

Figure 5. Imittance circle GCI using the inverter and converter of immittance in the case of reverse transformation of resistance Z_N (M – median)

Аналіз отриманих імпедансних окружностей показав, що при $U_3 < 0$ УПІ на основі ПТ володіє властивостями інвертора імпедансу при $\operatorname{Re} Z_H = \operatorname{Re} Z_T = 0$, коли приведена реактивна складова приведенного імпедансу змінюється в діапазоні від $\operatorname{Im} W_{11}$ до $\operatorname{Im} \bar{W}_H = 0$. При $U_3 > 0$ УПІ на основі ПТ володіє властивостями конвертора та інвертора імпедансу при зміні $\operatorname{Im} Z_H$ у діапазоні $(0,15-10) \operatorname{Im} \bar{W}_H$.

Висновки. У загальному випадку структури ПТ з p-n переходом подібна до структур ОТ та ППТ, що дозволяє в певних режимах описувати їх подібними малосигнальними фізичними еквівалентними схемами. Основна різниця полягає в довжині та опорі каналу (бази), що значною мірою впливає на характер фізичних процесів у них. При використанні ПТ у режимах прямого зміщення p-n переходу його необхідно описувати Т-подібною еквівалентною схемою, яка використовується для біполярного транзистора, а реалізований при цьому УПІ володіє властивостями конвертора імпедансу. Використання ПТ в якості конвертора або інвертора імпедансу

без зміни схеми ввімкнення обмежене величиною перетворення іммітансу та відносною частотою Ω .

Conclusions. In general, the structures of JFET with p-n junction is similar to the structures of UJT and IST, which allows in certain modes to describe it by the similar physical small-signal equivalent circuits. The main difference is in the length and resistance of the channel (base), which significantly affects the nature of physical processes in it. Using the JFET in direct displacement of p-n junction it is necessary to describe the T-shaped equivalent circuit which is used for the bipolar transistor, and realized GIC possesses properties of immittance converter. Using the JFET as a converter or inverter of immittance without changing the connection circuit is limited by the quantity of the transformation of immittance and relative frequency Ω .

Список використаної літератури

1. Филинюк, Н.А. Анализ ОПИ на основе полевых транзисторов [Текст] / Н.А. Филинюк, М.М. Семеренко; под ред. И.Ф. Николаевского // Полупроводниковая электроника в технике электросвязи. – М.: Радио и связь, 1984. – Вып. 24. – С. 51–57.
2. Ліщинська, Л.Б. Інформаційні пристрої на основі однопереїдної транзисторної структури [Текст] / Л.Б. Ліщинська, М.В. Барабан // Наукові праці ВНТУ. – 2010. – №1. – С. 1–5.
3. Данилин, В.Н. Аналоговые полупроводниковые интегральные схемы СВЧ [Текст] / В.Н. Данилин, А.И. Кушниренко, Г.В. Петров. – М.: Радио и связь, 1985. – 192 с.
4. Дьяконов, В.П. Однопереходные транзисторы и их аналоги [Текст] / В.П. Дьяконов. – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2008. – 240 с.
5. Федотов, Я.А. Основы физики полупроводниковых приборов [Текст] / Я.А. Федотов. – М.: Сов. Радио. – 1969. – 592 с.
6. Филинюк, Н.А. Инжекционно-пролетный транзистор [Текст] / Н.А. Филинюк, И.В. Булыга // Труды шестой МТНТ “Микроэлектронные преобразователи и приборы на их основе”. – Баку – Сумгаит. – 2007. – С. 95–97.
7. Філінюк, М.А. Інформаційні пристрої на основі потенційно-нестійких багатоелектродних напівпровідникових структур Шоттки: монографія [Текст] / М.А. Філінюк, О.М. Куземко, Л.Б. Ліщинська. – Вінниця: ВНТУ, 2009. – 274 с.
8. Філінюк, М.А. Методи та засоби вимірювання параметрів потенційно-нестійких чотириполюсників: монографія [Текст] / М.А. Філінюк, К.В. Огородник, Л.Б. Ліщинська. – Вінниця: ВНТУ. – 2010. – 176 с.

Отримано 26.12.2011