

РЕАЛІЗАЦІЇ ІНДУКТИВНОСТЕЙ НВЧ ДІАПАЗОНУ НА ОСНОВІ РЕАКТИВНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТРАНЗИСТОРНИХ СТРУКТУР

Анотація

В роботі представлено дослідження реалізації індуктивностей НВЧ діапазону на основі реактивних властивостей транзисторних схем. Отримано аналітичний вираз для визначення вхідного опору транзисторного індуктивного елемента.

Ключові слова: еквівалентна індуктивність; реактивні властивості; від'ємний динамічний диференціальний опір.

Abstract

The paper presents a study of the realization of microwave inductances based on the reactive properties of transistor circuits. An analytical expression was obtained to determine the input impedance of a transistor inductor.

Keywords: equivalent inductance; reactive properties; negative dynamic differential resistance.

Вступ

В теперішній час досягнуті значні успіхи в створенні твердотільних пристроїв НВЧ, що робить можливим мікромініатюризацию радіоелектронних пристроїв та систем. Проте проблема мікромініатюризації селективних кіл особливо в низькочастотній області НВЧ діапазону та примикаючої до неї високочастотної області на даний час повністю не вирішена. Це пов'язано з тим, що розміри реактивних елементів, роль яких виконують розімкнені або з розподіленими параметрами відрізки лінії передачі, великі. Особливо гостро ця проблема стоїть при мініатюризації індуктивних елементів [1-5].

Теоретичні та експериментальні дослідження

В сучасних інтегральних НВЧ схемах індуктивна компонента виконується у вигляді смужки, індуктивність на одиницю довжини якої в випадку прямої смужки розраховується по формулі [2].

$$L = 2 \ln \frac{l}{W} + 1,93 + 0,224 \frac{W}{l}, \quad (1)$$

де l , W – довжина та ширина смужки в см.

Активний опір на одиницю довжини смужкової індуктивності в припущенні, що високочастотний струм протікає лише по скін-шару верхньої та нижньої поверхні смужки, можна визначити з виразу

$$R = \frac{\pi K}{W} \sqrt{f \rho}, \quad (2)$$

де f – частота в ГГц, ρ – питомий опір в Ом*см.

Коефіцієнт K змінюється від 1 до 2, з його допомогою враховується зміна щільності струму в вузлах смужки [2]. Максимальна добротність таких індуктивностей на частоті 1 ГГц складає порядку 60 та із зменшенням частоти – спадає. При зближенні такої котушки із заземленою смужкою індуктивність на одиницю довжини зменшується. Для виключення впливу екрану необхідно, щоб відстань до заземленої смужки під котушкою індуктивності на основі сапфірової підкладки (Al_2O_3) більше ніж в 20 разів перевищувало ширину провідника котушки. Заземленні провідники, що лежать в площині котушки, повинні бути розподілені на відстані в п'ять разів більше, ніж ширина провідника котушки [3]. Все це призводить до збільшення розмірів, а також добротність таких котушок, як показано вище, не завжди задовольняє вимогам сучасної радіоелектронної апаратури.

Для побудованих селективних кіл знаходять практичне застосування активні RC фільтри на основі операційних підсилювачів, керованих джерел, гіраторів. Проте вони використовуються в низько- та середньочастотній області. Використання розробниками НВЧ пристроїв останніх досягнень технології виготовлення інтегральних схем привело до різкого скорочення габаритів звичайних смужкових ліній. Подальший розвиток ідей створення пристроїв частотної селекції на мікросмужкових лініях призводить до розробки систем, пов'язаних багато провідних ліній (в загальному випадку неоднорідних), що представляють собою багато каскадні плівкові структури [3, 4].

Імітація індуктивності здійснюється вхідним опором транзистора, який працює в динамічному режимі при великому рівні інжекції на частоті, що близька до граничної частоти підсилення транзистора. Дослідження фазової затримки в транзисторі за рахунок прояви ефекту скінченності часу руху неосновних носіїв струму в його базі показали можливість створення напівпровідникових аналогів індуктивності, що володіють високою добротністю в діапазоні високих та надвисоких частот. Для побудови і аналізу пристрою на основі фазової затримки носія в базі транзистора доцільно провести теоретичні та експериментальні дослідження індуктивних властивостей транзисторів в дециметровому діапазоні.

Відомо з роботи [3], що вхідний опір транзистора, ввімкненого по схемі із спільним колектором, в діапазоні частот, що близький до граничної, є індуктивним. При чому добротність такої індуктивності може бути достатньо високою, якщо вхід транзистора навантажити позитивною реактивністю. Для оцінки величини індуктивності та добротності проведемо розрахунок повного опору транзисторного аналога індуктивності в режимі малого сигналу. З цією ціллю представимо еквівалентну схему транзистора в вигляді драбинчастого кола, першим елементом якого є послідовно ввімкнений комплексний опір емітерного переходу, а всі наступні члени драбинчастого кола являють собою зведення коефіцієнта трансформації опору або провідності на елементи перетвореної схеми транзистора, під'єднанні послідовно або паралельно.

Еквівалентна схема НВЧ транзистора, ввімкненого в схему з спільним колектором, з урахуванням того, що на вході ввімкнена позитивна реактивність, представлена на рис. 1.

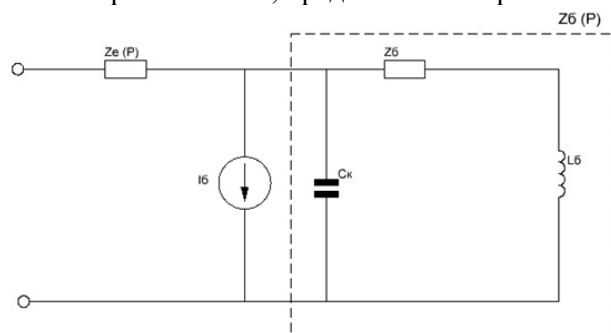


Рис.1. Еквівалентна схема НВЧ транзистора: $Z_e(P)$ – повний опір емітерного переходу; $\alpha(P)$ – комплексний коефіцієнт передачі по струму для схеми із спільною базою; C_k – ємність колекторного переходу; Z_6 – опір бази; L_6 – зовнішня індуктивність, ввімкнена в коло бази

В загальному випадку вхідний опір такої схеми можна представити у вигляді

$$Z_L(P) = Z_e(P) + [1 - \alpha(P)] \cdot Z_6(P), \quad (3)$$

Якщо припустити, що статичний коефіцієнт передачі по струму для схеми з спільною базою приблизно дорівнює одиниці, що справедливо для НВЧ транзисторів, то вираз (3) можливо представити наступним чином:

$$Z_L(P) = Z_e(P) + T(P) \cdot Z_6(P), \quad (4)$$

де $T(P) = \frac{p}{p + \omega_T}$ – коефіцієнт трансформації опору.

Опір бази $Z_6(P)$ може бути представлено у вигляді східчастого кола і застосовуючи метод прямолінійного багатоланкового синтезу виразу $T(P) \cdot Z_6(P)$ також можна розвернути в багатоланкове коло, в якому послідовно приєднаний елемент $Z_{6i}(P)$ в основі драбини трансформується на вхід послідовний елемент $T(P) \cdot Z_{6i}(P)$, а приєднаний паралельно елемент $Y_{6i}(P)$ в основі драбини трансформується на вхід в паралельний елемент $T^{-1}(P) \cdot Y_{6i}(P)$, де $T^{-1}(P) = \frac{p + \omega_T}{p}$ – коефіцієнт трансформації провідності. Тоді результуюче еквівалентне драбинчасте коло схеми заміщення транзистора може бути отримане шляхом додавання послідовного включення опору емітерного переходу до драбини, отриманої в результаті миттєвого синтезу.

З використанням даного представлення вхідний опір такого кола можливо описати наступним виразом:

$$Z_L(P) = \frac{(Z_1 - Y_H)}{(Y_2 - Y_H)}, \quad (5)$$

де $(Z_1 - Y_H)$, $(Y_2 - Y_H)$ - континуанти драбинчастого кола.

Підставляючи значення $(Z_1 - Y_H)$ та $(Y_2 - Y_H)$ отримаємо вираз для визначення вхідного опору:

$$Z_L(P) = \frac{Z_1 \cdot Y_2 \cdot Z_3 \cdot Y_H + Z_1 \cdot Y_2 + Z_1 \cdot Y_H + Z_3 \cdot Y_H + 1}{Y_2 \cdot Y_H \cdot Z_3 + Y_2 + Y_H}, \quad (6)$$

$$\text{де } Z_1 = Z_2 = \frac{Z_E}{1 + p C_E Z_E}, \quad Y_2 = T^{-1}(p) \cdot p C_K, \quad Z_3 = T(p) \cdot Z_6, \quad Y_2 = T^{-1}(p) \cdot \frac{1}{pL},$$

Для проведення розрахунків вхідного опору на персональному комп'ютері вираз (6) необхідно представити у вигляді дійсної і уявної частин. Після відповідних перетворень вираз (6) описується рівнянням

$$Z_L(P) = R + jX, \quad (7)$$

$$\text{де } R = \frac{AC+BD}{C^2+D^2}, \quad X = \frac{BC+AD}{C^2+D^2},$$

$$A = C_K Z_6 \omega^2 Z_E (1 - \omega_T Z_E C_E) + Z_E (\omega_T + Z_E C_E \omega^2) (C_K L_6 \omega^2 - 1) + \omega^2 L_6 (1 + \omega^2 C_E^2 Z_E^2),$$

$$B = (1 - Z_E C_E \omega_T) (C_K L_6 \omega^2 - 1) Z_E \omega - Z_E Z_6 \omega C_K (\omega_T + \omega^2 Z_E C_E) - Z_6 \omega (1 + \omega^2 C_E^2 Z_E^2),$$

$$C = (1 + \omega^2 C_E^2 Z_E^2) (\omega^2 C_K Z_6 + \omega_T \omega^2 L_6 C_K - \omega_T), \quad D = \omega (1 + \omega^2 C_E^2 Z_E^2) (\omega^2 L_6 C_K - \omega_T C_K Z_6 - 1).$$

На основі виразів (6), (7) був проведений розрахунок параметрів транзисторного аналога індуктивності. Аналіз залежності L та R від частоти показав, що для транзистора типу 2N5774 максимальне значення індуктивності спостерігається на частоті, що дорівнює граничній частоті (f_T) транзистора, при цьому активний опір в широкому діапазоні частот до f_T приймає від'ємне значення для певних значень навантаження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Saeid Taghizadeh, Maryam Taghizadeh, Parisa Taghizadeh, Abbas Kamaly, Seyed Ali Emamghorashi. Design of a New LC VCO using Active Inductor// International Journal of Computer Sciences and Engineering. 2016. Volume-4, Issue-12. –P.27-30.
2. Omar Faruqe, Md Tawfiq Amin. Active Inductor with Feedback Resistor Based Voltage Controlled Oscillator Design for Wireless Applications // INTL JOURNAL OF ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS, 2018, VOL. 65, NO. 1, PP. 57-64
3. Осадчук В.С. Индуктивный эффект в полупроводниковых приборах : монографія. – Киев : Вища школа, 1987. – 155 с.
4. Осадчук В. С., Осадчук А. В. Реактивные свойства транзисторов и транзисторных схем. – Винница: «Универсум-Винница», 1999. - 275 с.
5. Осадчук В. С., Осадчук А. В. Напівпровідникові прилади з від'ємним опором. –Вінниця: ВНТУ, 2006. – 162 с.

Осадчук Володимир Степанович — докт. техн. наук, проф., професор кафедри радіотехніки, Вінницький національний технічний університет

Осадчук Олександр Володимирович — докт. техн. наук, проф., зав. кафедри радіотехніки, Вінницький національний технічний університет, osadchuk.av69@gmail.com

Осадчук Ярослав Олександрович — канд. техн. наук, доцент кафедри радіотехніки, Вінницький національний технічний університет

Думенко Денис Олегович — аспірант кафедри радіотехніки, Вінницький національний технічний університет

Volodimir Osadchuk — Doc. Tech. Sc., prof., Department of Radio Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine

Alexander Osadchuk — Doc. Tech. Sc., prof. Head of Department of Radio Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine, osadchuk.av69@gmail.com

Iaroslav Osadchuk — Ph.D.Tech., Department of Radio Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine

Denis Dumenko — Postgraduate Student of the Department of Radio Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine