

АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ТРАНЗИСТОРНИХ АНАЛОГІВ ІНДУКТИВНОСТІ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

В роботі представлено аналіз основних фізичних параметрів транзисторних аналогів індуктивностей НВЧ діапазону на основі реактивних властивостей транзисторних схем. Отримано аналітичний вираз для визначення вхідного опору транзисторного індуктивного елемента. Розраховано залежності вхідного опору, індуктивності та добротності для транзисторів типу 2N4390 та 2N5774 від струму емітера.

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

Abstract

The paper presents an analysis of the main physical parameters of transistor analogs of microwave inductors based on the reactive properties of transistor circuits. An analytical expression for determining the input resistance of a transistor inductive element is obtained. The dependences of the input resistance, inductance and quality factor for transistors of type 2N4390 and 2N5774 on the emitter current are calculated.

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

Вступ

На теперішній час досягнуті значні успіхи в створенні твердотільних пристроїв НВЧ, що робить можливим мікромініатюризацію радіотехнічних та телекомунікаційних 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 ліній передачі, великі. Особливо гостро ця проблема стоїть при мініатюризації індуктивних елементів [1-5].

Теоретичні та експериментальні дослідження

Стабільність параметрів транзисторних аналогів індуктивності в значній степені визначається нестабільністю джерел живлення по постійному струмі. Для оцінки впливу цієї нестабільності проведемо аналіз залежності основних параметрів еквівалентної схеми транзистора від струму емітера та напруги на колекторному переході.

Варто відмітити, що елементи малосигнальної еквівалентної схеми транзистора можна розділити на дві групи. До першої відносяться елементи власно транзисторної структури. До другої групи відносяться всі паразитні елементи корпусу, контактних площадок та сусідніх провідників (рис. 4). На другу групу елементів режим живлення по постійному струму не здійснює впливу і тому при розрахунку їх враховувати не будемо.

До елементів першої групи відносяться: опір бази, ємність колекторного переходу, дифузійна та бар'єрна ємність емітерного переходу, опір емітерного переходу, гранична частота транзистору, коефіцієнт передачі по струму α .

Залежність опору емітерного переходу від струму при нехтуванні реакції колекторної ланки можливо представити наступним виразом

$$Z_{E0} = KT(qI_E)^{-1}$$

де $KT = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{Bm \cdot сек}{град}$ – постійна Больцмана; q - заряд електрону; I_E – струм емітера; T – абсолютна температура; якщо $I_E = 0$, то $Z_E = \frac{\varphi_T}{I'_{E0}(1-\alpha N)}$; де I'_{E0} – тепловий струм емітерного переходу.

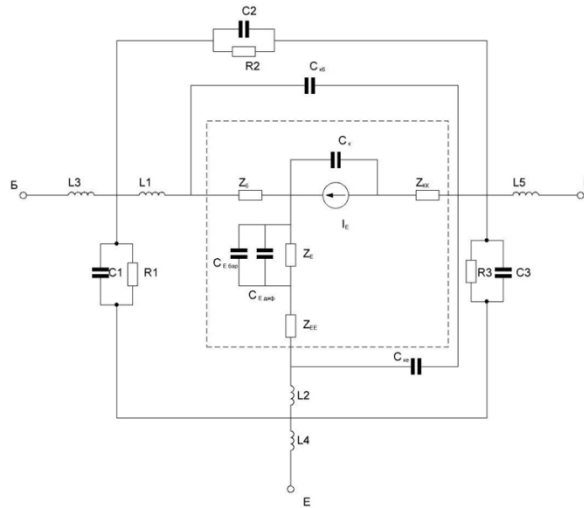


Рис. 1. НВЧ еквівалентна схема біполярного транзистора

Залежність опору емітера від струму колектора і напруги на колекторному переході можуть бути представлені наступними наближеними формулами

$$Z_{Ei} = Z_{EH} \frac{I_{KH}}{I_{Ki}},$$

$$Z_{Ein} = Z_{EH},$$

де, $Z_{EH} = \frac{\alpha \cdot 25 \cdot 10^{-3}}{I_{KH} - I'_{k0}}$ – номінальне значення опору емітера; α – коефіцієнт передачі струму емітера;

I'_{k0} – тепловий струм емітерного переходу; I_{KH} – номінальний струм емітера.

Залежність ємності колектора від напруги на колекторному переході можливо представити у вигляді

$$C_K = F_K \sqrt{\frac{\varepsilon \varepsilon_0 n q}{8 \pi U_K}},$$

де ε – відносна діелектрична проникність; ε_0 – діелектрична проникність вакууму; $n = C_{exp} \left(-\frac{\Delta E}{2KT} \right)$

– концентрація електронів; F_K – площа колекторного переходу, см².

Залежність ємності колекторного переходу від U_K може бути представлена:

Для транзистора із іонно-імплантованими переходами:

$$C_{KiHi} = C_{KH} \sqrt{\frac{U_{KH}}{U_{Ki}}},$$

Для транзистора з дифузійно-створеними областями переходів:

$$C_{KH} = C_{KH} \sqrt[3]{\frac{U_{KH}}{U_{Ki}}},$$

де $C_{KH} = \frac{42610F_K}{\sqrt{U_{HK}}}$, Пф – номінальна ємність колекторного переходу.

Від струму колектора ємність C_K залежить слабо.

Залежність дифузійної ємності емітерного переходу від струму емітера можна представити наступним виразом

$$C_{ED} = \frac{2}{3} \cdot \frac{t_D}{Z_t} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\tau_D}{KT} qI_E,$$

де t_D – час життя.

Номінальне значення дифузійної ємності можна визначити по виразу

$$C_{EDH} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\tau_p (I_{KH} - I_{K0})}{\alpha \cdot 2,5 \cdot 10^{-3}},$$

Напруга колекторного переходу на дифузійну ємність практично не здійснює впливу, так як час життя носіїв не залежить від U_K .

Бар'єрна ємність емітерного переходу визначається аналогічно ємності колекторного переходу. Проте враховуючи, що емітерний перехід відкритий, зворотна напруга відсутня, то її впливом в еквівалентній схемі нехтуємо.

Опір бази з ростом струму емітера зменшується і ця залежність може бути представлена наступним виразом

$$Z_B = \frac{\rho_B}{8\pi W} + \frac{\alpha \cdot K \cdot T}{1 - \alpha^2 qI_E},$$

де ρ_B – питомий опір бази, W – товщина активної області бази. Перший член даного виразу визначає об'ємний опір області бази. Другий член визначає дифузійний опір бази і є результатом виявлення ефекту розширення колекторного переходу.

Залежність опору бази від колекторного струму може бути представлена в вигляді

$$Z_{BiI} = Z_{BH} \frac{\beta_I I_{KH}}{\beta_H i_{Ki}},$$

$$Z_{BH} = Z_{BH} \left[1 + 0,05 \left(\frac{U_{Ki}}{i_{Ki}} - 1 \right) \right],$$

де $Z_{BH} = \frac{\alpha}{1 + \alpha^2} \cdot \frac{(12 \div 15) \cdot 10^{-3}}{I_{KH} - I_{K0}}$.

Вираз для знаходження залежності коефіцієнту передачі по струму від струму емітера можна представити виразом:

$$\alpha_0 = \frac{\tau \sqrt{I_E}}{\varphi_T \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0 WS}{\Delta\phi_0 D}}}. \quad (1)$$

Залежність коефіцієнта передачі від струму емітера обумовлена головним чином зміною коефіцієнта інжекції. Із збільшенням струму модулюється опір бази і зменшується коефіцієнт інжекції.

Зменшення коефіцієнту передачі в області малих струмів пояснюється тим, що зменшується коефіцієнт дифузії і зменшується коефіцієнт інжекції. Залежність коефіцієнту передачі від напруги на колекторі прихована в параметрі W – товщина бази.

Залежність коефіцієнта передачі струму бази від струму емітера та напруги на колекторі можуть бути представлені у вигляді

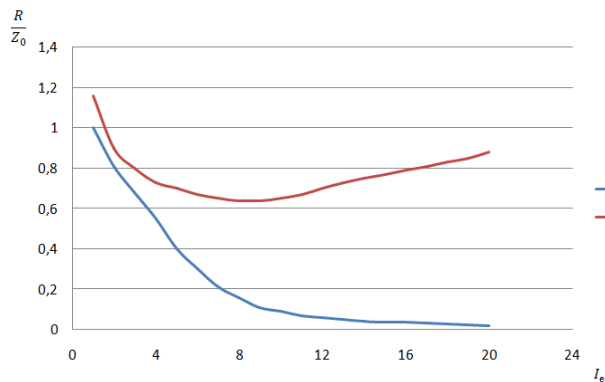
$$\beta_{it} = \beta_H,$$

$$\frac{\beta_{it}}{\beta_H} = 1,03 - 3,2 \cdot 10^{-2} \frac{U_{Ki}}{U_{KH}} + 1,3 \cdot 10^{-2} \left(\frac{U_{Ki}}{U_{KH}} \right)^2.$$

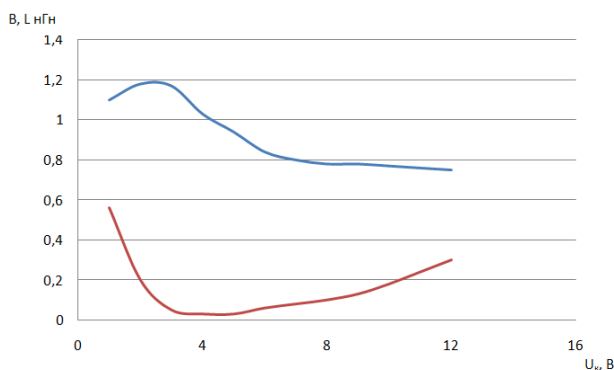
Залежність граничної частоти підсилення струму від струму емітера можна представити наступним виразом

$$\omega_T = \frac{\tau \sqrt{I_E}}{\left(\varphi_T \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0 WS}{\Delta\varphi_0 D}} + \sqrt{I_E} \right) \cdot t_D} . \quad (2)$$

Варто відмітити, що аналітичні залежності α_0 і ω_T від I_E і U_K описані виразами (1) та (2) досить складні, так як від параметрів залежить час дифузії, коефіцієнт дифузії, ширина бази та час життя носіїв τ , тому для розрахунків використано Matlab 9.3. Результати розрахунку залежностей вхідного опору, індуктивності та добротності для транзисторів типу 2N4390 та 2N5774 від струму емітера представлені на рис. 2.



2N4390	
U_K	6 В
L_0	5 нГн



2N4390	
I_e	10 мА
L_0	5 нГн

Рис.2. Залежності вхідного опору, індуктивності та добротності для транзисторів типу 2N4390 та 2N5774 від струму емітера

При малому струмі емітера реактивна складова вхідного опору має ємнісний характер. Із збільшенням струму відбувається її зменшення. Це обумовлено збільшенням індуктивного ефекту, що виникає в результаті затримки носіїв в області бази. Активна складова із збільшенням струму зменшується. Індуктивність та добротність збільшується.

Із збільшенням запираючої напруги на колекторі зменшується величина зарядної ємності колекторного переходу, що веде до росту індуктивної складової вхідного опору та до зменшення активної складової повного опору.

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