

ВІСНИК

ВІННИЦЬКОГО
ПОЛІТЕХНІЧНОГО
ІНСТИТУТУ

3

2003

Журнал «Вісник ВПІ» є науковим виданням, публікації в якому визнаються при захисті дисертаційних робіт з технічних, економічних та педагогічних наук (постанови президії ВАК України від 9. 06. 1999 р. № 1-05/7, від 8. 09. 1999 р. № 01-05/9 та від 10. 07. 1999 р. № 3-05/11).

Журнал публікує статті, які містять нові теоретичні та практичні результати в галузях технічних, природничих та гуманітарних наук. Публікуються також огляди сучасного стану розробки важливих наукових проблем, огляди наукових та методичних конференцій, які відбулися у ВДТУ, статті з педагогіки вищої освіти.

Розділи журналу:

- ☒ автоматика та інформаційно-вимірвальна техніка;
- ☒ будівництво;
- ☒ гуманізація і гуманітаризація технічної освіти;
- ☒ застосування результатів досліджень;
- ☒ економіка, менеджмент та екологія;
- ☒ енергетика та електротехніка;
- ☒ інформаційні технології та комп'ютерна техніка;
- ☒ машинобудування;
- ☒ радіоелектроніка та радіоелектронне апаратобудування;
- ☒ стратегія, зміст та нові технології підготовки спеціалістів з вищою технічною освітою;
- ☒ філософія науки і техніки;
- ☒ фундаментальні науки;
- ☒ рецензії;
- ☒ ювілеї і ювіляри.

Головний редактор Б. І. Мокін

Відповідальний секретар редколегії О. В. Дерібо

Редакційна колегія

О. Д. Азаров, Ю. А. Буренніков, Т. Б. Буяльська, Ю. І. Волков, В. В. Грабко (заст. головного редактора), В. Я. Данилов, О. В. Дерібо, М. Ф. Друкований, В. М. Дубовий, П. М. Зузяк, І. А. Зязюн, Р. Д. Іскович-Лотоцький, В. О. Капустян, Ю. О. Карпов, Р. Н. Кветний, В. І. Ключко, М. Д. Коваль (заст. відповідального секретаря), П. І. Когут, В. П. Кожем'яко, В. В. Кухарчук, Г. А. Корчинський, І. В. Кузьмін (заст. головного редактора), О. В. Кухленко, П. Д. Лежнюк, В. О. Леонтьєв, В. М. Локазюк, О. С. Макаренко, В. С. Мельник, В. М. Михалевич, П. А. Молчанов, О. В. Мороз, Н. Г. Ничкало, П. К. Ніколюк, В. А. Огородніков, В. С. Осадчук, М. І. Петренко, В. Г. Петрук, А. М. Пстух, В. І. Піла, В. О. Поджаренко, М. Д. Раранський, В. С. Ратніков, Б. С. Рогальський, О. М. Романкевич, О. П. Ротштейн, О. Я. Савченко, В. Д. Свердлов, В. Р. Сердюк, І. О. Сивак, М. І. Сметанський, В. П. Тарасенко, С. Й. Ткаченко, М. А. Філінюк, О. І. Хома, С. В. Юхимчук

Адреса редакції: 21021, Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95. Вінницький державний технічний університет, к. 104 ГНК.

Телефон: (0432) 44-03-83, 44-05-32. E-mail: visvpi@vstu.vinnica.ua. <http://www.vstu.vinnica.ua/~vlanyk/>

РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА РАДІОЕЛЕКТРОННЕ АПАРАТОБУДУВАННЯ

УДК 621.317.625

А. В. Рудик, к. т. н., доц.; С. М. Павлов, к. т. н., доц.

РЕЗОНАНСНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ДОБРОТНОСТІ ВАРИКАПІВ

В резонансних контурах сучасних радіотехнічних систем та систем радіозв'язку як електрично керовані ємності використовуються варикапи. Принцип роботи варикапа оснований на використанні залежності ємності електричного переходу від напруги [1]. Варикапи також використовуються в пристроях керування частотою резонансного контуру, в параметричних схемах підсилення, ділення та множення частоти, в схемах частотної та фазової модуляції, керованих фазообертачах і т. ін.

Одним з основних параметрів варикапа є його добротність. Номінальна добротність варикапа Q_B є відношенням реактивного опору варикапа $\text{Im}_B = X_B$ до повного опору втрат $\text{Re}_B = R_B$ при номінальній напрузі зміщення на заданій частоті. Варикап є високодобротним елементом, тому його добротність на практиці визначають резонансними методами, включивши його у вимірювальний резонансний контур. Якщо відомі постійні параметри резонансного контуру та виміряні резонансна частота і добротність контуру з варикапом, то можна обчислити і добротність самого варикапа. Тому в цьому випадку принципово важливим є точне визначення параметрів вимірювального резонансного контуру.

Важливим також є частотний діапазон роботи варикапа $f_{\min} \div f_{\max}$, що визначається граничними частотами, на яких добротність варикапа дорівнює одиниці. При цьому граничні частоти варикапа $f_{\min} = \frac{1}{2\pi C_{\text{бар}} R_{\Pi}}$ та $f_{\max} = \frac{1}{2\pi C_{\text{бар}} r_S}$, де $r_S = r_E + r_B$ — опір втрат в емітерній та базовій областях варикапа; R_{Π} — опір переходу у разі прикладання до варикапа зворотної напруги; C_{Π} ($C_{\text{бар}}$) — еквівалентна ємність переходу (бар'ерна ємність).

Варикап можна замінити еквівалентною малосигнальною схемою [2], на якій враховано індуктивності виводів варикапа L_B (мають величину порядку декількох мікрогенрі), ємність корпусу $C_K \leq 1,5$ пФ, опір $r_S = r_E + r_B$, який моделює омичний опір бази з опором омичного контакту та опір емітерної області з аналогічним контактом, опори $r_{\text{диф}}$ та R_{Π} , які враховують диференційний опір переходу та опір переходу, якщо до варикапа прикладена зворотна напруга, а також ємність C_{Π} ($C_{\text{бар}}$), яка є еквівалентом ємності переходу (бар'ерної ємності).

На частотах до декількох десятків мегагерц деякими параметрами еквівалентної малосигнальної схеми (L_B , C_K , $r_{\text{диф}}$) можна знехтувати та обмежитись спрощеною еквівалентною схемою, яка складається з елементів R_{Π} , C_{Π} і r_S [2]. При цьому типові значення зворотного опору переходу $R_{\Pi} > 1$ МОм.

За спрощеною еквівалентною схемою варикапа його добротність визначається таким співвідношенням

$$Q_B(\omega) = \frac{\text{Im}_B(\omega)}{\text{Re}_B(\omega)} = \frac{X_B(\omega)}{R_B(\omega)} = \frac{\omega C_{\Pi} R_{\Pi}^2}{R_{\Pi} + r_S + \omega^2 C_{\Pi}^2 R_{\Pi}^2 r_S} \quad (1)$$

Якщо врахувати, що $R_{\Pi} \gg r_S$, то співвідношення (1) можна переписати таким чином

$$Q_B(\omega) = \frac{\omega C_{\Pi} R_{\Pi}}{1 + \omega^2 C_{\Pi}^2 R_{\Pi} r_S} \quad (2)$$

На низьких частотах, для яких $\omega C_{\Pi} r_S \ll 1$, еквівалентна схема варикапа є паралельним з'єднанням R_{Π} та C_{Π} . В цьому випадку добротність варикапа $Q_{B.НЧ}(\omega) \approx \omega C_{\Pi} R_{\Pi}$. Зі збільшенням частоти добротність лінійно збільшується пропорційно частоті. На високих частотах $\omega C_{\Pi} R_{\Pi} \gg 1$ та добротність варикапа $Q_{B.ВЧ}(\omega) \approx \frac{1}{\omega C_{\Pi} r_S}$. В цьому випадку зі збільшенням частоти добротність зменшується, а еквівалентна схема варикапа є послідовним з'єднанням r_S та C_{Π} . Таким чином, залежність добротності варикапа від частоти має екстремум (максимум).

Координати цього екстремуму можна знайти, взявши похідну від співвідношення (2) за частотою і прирівнявши її до нуля

$$\frac{dQ_B(\omega)}{d\omega} = 0 \Rightarrow \omega_{\text{extr}} = \frac{1}{C_{\Pi} \sqrt{R_{\Pi} r_S}} \quad (3)$$

Враховуючи співвідношення (3), можна оцінити максимальне значення добротності варикапа за співвідношенням

$$Q_{B. \text{max}} = Q_B(\omega_{\text{extr}}) = 0,5 \sqrt{\frac{R_{\Pi}}{r_S}},$$

тобто можна зробити висновок, що воно визначається параметрами малосигнальної еквівалентної схеми.

Варикап можна представити за допомогою послідовної схеми заміщення, яка складається з послідовно включених активного опору варикапа та його ємності. При цьому параметри схеми заміщення будуть визначатися такими співвідношеннями:

$$R_{B. \text{ посл}}(\omega) = \frac{R_{\Pi} + r_S + \omega^2 C_{\Pi}^2 R_{\Pi}^2 r_S}{1 + \omega^2 C_{\Pi}^2 R_{\Pi}^2} \approx \frac{R_{\Pi} (1 + \omega^2 C_{\Pi}^2 R_{\Pi} r_S)}{1 + \omega^2 C_{\Pi}^2 R_{\Pi}^2}; \quad (4)$$

$$C_{B. \text{ посл}}(\omega) = \frac{1 + \omega^2 C_{\Pi}^2 R_{\Pi}^2}{\omega^2 C_{\Pi} R_{\Pi}^2}; \quad (5)$$

$$X_{B. \text{ посл}}(\omega) = \frac{\omega C_{\Pi} R_{\Pi}^2}{1 + \omega^2 C_{\Pi}^2 R_{\Pi}^2}; \quad Z_B(j\omega) = R_{B. \text{ посл}}(\omega) - jX_{B. \text{ посл}}(\omega).$$

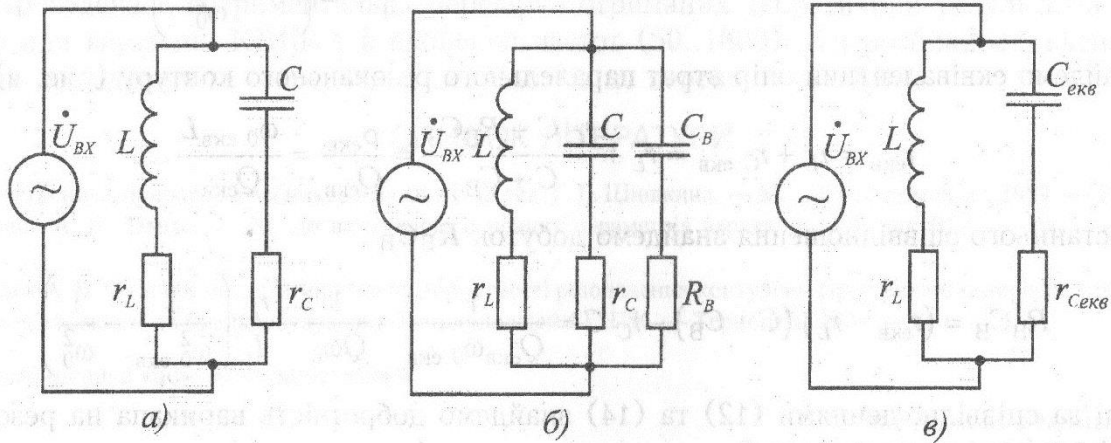
Як показано в роботі [2], в робочому частотному діапазоні ємність варикапа з послідовною схемою заміщення відрізняється від еквівалентної ємності переходу варикапа не більше, ніж на 1 %, тобто можна вважати, що $C_{B. \text{ посл}}(\omega) = C_{\Pi}$. Таким чином, з похибкою не більше 1 % можна записати, що

$$Z_B(j\omega) = \frac{R_{\Pi} (1 + \omega^2 C_{\Pi}^2 R_{\Pi} r_S)}{1 + \omega^2 C_{\Pi}^2 R_{\Pi}^2} - j \frac{1}{\omega C_{\Pi}},$$

тобто варикап в еквівалентній схемі можна замінити на послідовне з'єднання резистора, опір якого є функцією частоти, та конденсатора, ємність якого не залежить від частоти і визначається еквівалентною ємністю переходу варикапа.

Розглянемо методику вимірювання добротності варикапа резонансним методом. Для цього використовується вимірювальний паралельний резонансний контур (рис. а) з такими відомими параметрами: резонансною частотою $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, добротністю $Q = \frac{\rho}{r_L + r_C} =$

$= \frac{\omega_0 L}{r_L + r_C}$, індуктивністю L та активним опором котушки індуктивності r_L .



Еквівалентні схеми вимірювального паралельного резонансного контуру без варикапа (а) та з підключеним варикапом (б, в)

При підключенні варикапа паралельно до вимірювального резонансного контуру (рис. б) змінюються резонансна частота і добротність еквівалентного паралельного резонансного контуру. Такий контур (рис. б) можна за допомогою еквівалентних перетворень звести до простішого паралельного резонансного контуру (рис. в):

$$C_{\text{екв}} = C + C_B; \quad (6)$$

$$r_{C. \text{екв}} = \frac{r_C C + R_B C_B}{C + C_B}. \quad (7)$$

Для еквівалентного резонансного контуру (рис. в) знайдемо його основні параметри

$$\omega_{0 \text{ екв}} = \frac{1}{\sqrt{LC_{\text{екв}}}} = \frac{1}{\sqrt{L(C + C_B)}} = \frac{\omega_0}{\sqrt{1 + \frac{C_B}{C}}} = \omega_0 \sqrt{\frac{C}{C + C_B}} < \omega_0; \quad (8)$$

$$Q_{\text{екв}} = \frac{\rho_{\text{екв}}}{r_L + r_{C. \text{екв}}} = \frac{\omega_{0 \text{ екв}} L}{r_L + r_{C. \text{екв}}} = \frac{\rho}{(r_L + r_{C. \text{екв}}) \sqrt{\frac{C + C_B}{C}}} < Q. \quad (9)$$

Розв'язавши рівняння (8) стосовно ємності варикапа C_B , отримаємо

$$\frac{\omega_{0 \text{ екв}}}{\omega_0} = \sqrt{\frac{C}{C + C_B}}, \text{ тобто}$$

$$C_B = \frac{C(\omega_0^2 - \omega_{0 \text{ екв}}^2)}{\omega_{0 \text{ екв}}^2} = \frac{\omega_0^2 - \omega_{0 \text{ екв}}^2}{\omega_0^2 \omega_{0 \text{ екв}}^2 L} = \frac{1}{L} \left(\frac{1}{\omega_{0 \text{ екв}}^2} - \frac{1}{\omega_0^2} \right). \quad (10)$$

З співвідношення (10) реактивний опір варикапа на резонансній частоті визначається:

$$X_B(\omega_{0 \text{ екв}}) = \frac{1}{\omega_{0 \text{ екв}} C_B} = \frac{\omega_0^2 \omega_{0 \text{ екв}} L}{\omega_0^2 - \omega_{0 \text{ екв}}^2} = \frac{\rho_{\text{екв}}}{1 - \frac{\omega_{0 \text{ екв}}^2}{\omega_0^2}} > \rho_{\text{екв}}. \quad (11)$$

а добротність варикапа визначається співвідношенням

$$Q_B(\omega_{0 \text{ екв}}) = \frac{X_B(\omega_{0 \text{ екв}})}{R_B} = \frac{1}{\omega_{0 \text{ екв}} C_B R_B} = \frac{\rho_{\text{екв}}}{R_B \left(1 - \frac{\omega_{0 \text{ екв}}^2}{\omega_0^2}\right)}. \quad (12)$$

Знайдемо еквівалентний опір втрат паралельного резонансного контуру (рис. в)

$$r_{\text{екв}} = r_L + r_{C \text{ екв}} = r_L + \frac{r_C C + R_B C_B}{C + C_B} = \frac{\rho_{\text{екв}}}{Q_{\text{екв}}} = \frac{\omega_{0 \text{ екв}} L}{Q_{\text{екв}}}. \quad (13)$$

З останнього співвідношення знайдемо добуток $R_B C_B$

$$R_B C_B = (r_{\text{екв}} - r_L)(C + C_B) - r_C C = \frac{1}{Q_{\text{екв}} \omega_{0 \text{ екв}}} - \frac{1}{Q \omega_0} - \frac{r_L}{L} \left(\frac{1}{\omega_{0 \text{ екв}}^2} - \frac{1}{\omega_0^2} \right). \quad (14)$$

Тоді за співвідношеннями (12) та (14) знайдемо добротність варикапа на резонансній частоті контуру

$$\begin{aligned} Q_B(\omega_{0 \text{ екв}}) &= \frac{1}{\omega_{0 \text{ екв}} R_B C_B} = \frac{1}{\frac{1}{Q_{\text{екв}}} - \frac{\omega_{0 \text{ екв}}}{Q \omega_0} - \frac{r_L (\omega_0^2 - \omega_{0 \text{ екв}}^2)}{\omega_0^2 \omega_{0 \text{ екв}} L}} = \\ &= \frac{Q_{\text{екв}} Q \omega_{0 \text{ екв}} \omega_0^2 L}{\omega_0 \omega_{0 \text{ екв}} L (Q \omega_0 - Q_{\text{екв}} \omega_{0 \text{ екв}}) - Q_{\text{екв}} Q r_L (\omega_0^2 - \omega_{0 \text{ екв}}^2)}. \end{aligned} \quad (15)$$

Таким чином, вимірявши добротність та резонансну частоту вимірювального паралельного резонансного контуру з відключеним та підключеним варикапом, а також знаючи параметри котушки індуктивності вимірювального резонансного контуру (індуктивність та активний опір), можна розрахувати добротність варикапа на резонансній частоті контуру $\omega_{0 \text{ екв}}$.

Провести вимірювання резонансної частоти та добротності паралельного резонансного контуру можна фазовим методом за методикою, викладеною в роботі [3].

На основі отриманих аналітичних співвідношень в роботі [2] була побудована теоретична залежність добротності варикапа KB104A з параметрами $r_S = 20 \text{ Ом}$, $R_{\Pi} = 1 \text{ МОм}$ та $C_{\Pi} = 100 \text{ пФ}$ від частоти, а також обчислено такі значення

$$f_{\text{extr}} = \frac{1}{2\pi C_{\Pi} \sqrt{R_{\Pi} r_S}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 10^{-10} \sqrt{10^6 \cdot 20}} = 355,881 \text{ кГц};$$

$$Q_{B \text{ max}} = Q_B(\omega_{\text{extr}}) = 0,5 \sqrt{\frac{10^6}{20}} = 111,8.$$

Експериментально отримана за допомогою запропонованого резонансного методу залежність $Q_B = f(\omega)$ для варикапа KB104A показана в роботі [2, рис. 2] штрихованою лінією. При цьому експериментальні значення дорівнюють $f_{\text{extr}} = 376,2 \text{ кГц}$ та $Q_{B \text{ max}} = 106,2$, а графіки теоретичних і експериментальних залежностей відрізняються не більше, ніж на 7,6 %.

Висновки

1. Показано, що добротність варикапа визначається параметрами еквівалентної мало-сигнальної схеми заміщення і є функцією частоти. Отримано співвідношення, за якими можна визначити максимальне значення добротності варикапа та частоту, яка відповідає максимальній добротності варикапа.

2. Запропоновано резонансний метод вимірювання добротності варикапів, який дозволяє знайти добротність варикапа на резонансній частоті паралельного контуру, виміряв-

ши добротність та резонансну частоту вимірювального контуру з відключеним та підключеним варикапом, а також знаючи параметри котушки індуктивності вимірювального резонансного контуру.

3. Проведена експериментальна перевірка отриманих теоретичних результатів показала, що для варикапа КВ104А в діапазоні частот (50..1800) кГц розбіжності експериментальних досліджень та теоретичних результатів не перевищують 7,6 %.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Электронные приборы: Учебник для вузов / Под ред. Г. Г. Шишкина. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 496 с.
2. Рудик А. В., Павлов С. М. До визначення основних параметрів варикапів // Вісник ВПІ. — 2003. — № 1. — С. 72—77.
3. Рудик А. В. Фазовий метод вимірювання добротності резонансних контурів // Прогресивні матеріали, технології та обладнання в машино- та приладобудуванні: Тези доповідей 4-ї НТК. — Тернопіль, 2000. — 81 с.

Рекомендована кафедрою радіотехніки

Надійшла до редакції 30.04.02
Рекомендована до опублікування 3.09.02

Рудик Андрій Вікторович — доцент кафедри радіотехніки, **Павлов Сергій Миколайович** — доцент кафедри проектування комп'ютерної та телекомунікаційної апаратури
Вінницький державний технічний університет

УДК 621.372.061

В. А. Гикавий, к. т. н., доц.

ВІДНОВЛЕННЯ СИГНАЛУ В ПРИСУТНОСТІ ШУМУ

Результати спектральних оцінок сигналу за спотвореними часовими послідовностями можуть значно відрізнятись від їх дійсних значень. Дані спотворюються внаслідок втрати деяких відліків сигналу в каналі передачі або внаслідок низького співвідношення сигнал – шум.

Тому досить актуальним є питання адекватного відновлення сигналів, що спотворені через втрату відліків [1–3].

Припустимо, що існує обмежений по частотній смузі дискретизований сигнал X з N відліками $X(n)$, $0 \leq n \leq N - 1$, тобто спектральні складові сигналу відсутні на частотах, більших за деяку частоту ω_0 . З можливістю втрати деяких відліків замість відліку сигналу $X(n)$ утворюється відлік $X_1(n) = X(n)D(n)$; $D(n) = 1$, коли відлік результатного сигналу відповідає дійсному значенню сигналу $X(n)$, $D(n) = 0$, коли відлік втрачено. Спотворений сигнал X_1 має спектр $Y_1 = F^+\{X_1\}$, з якого можна отримати спектр Z_1 шляхом обмеження його в смузі $\omega < \omega_0$, тобто $Z_1 = H\{Y_1\}$, де $F^+\{..\}$, $H\{..\}$ — оператори прямого перетворення Фур'є і частотного обмеження.

Зворотне перетворення Фур'є дає можливість по спектру Z_1 отримати сигнал $S_1 = F^-\{Z_1\}$. Нові значення вхідної послідовності $X_2(n)$ отримуємо згідно зі співвідношенням

$$X_2(n) = [1 - D(n)]F^-\{H\{F^+\{X_1\}\}\}(n) + X_1(n).$$

Після цього повторюється новий аналогічний цикл перетворень. Таким чином має місце ітераційна процедура