

4. Филинюк Н. А. Активные СВЧ фильтры на транзисторах. — М.: Радио и связь, 1987. — 112 с.  
 5. Бондаренко И. К., Дейнега Г. А., Маграчев З. В. Автоматизация измерений параметров СВЧ трактов. — М.: Сов.радио, 1969. — 304 с.

Рекомендована кафедрою проектування комп'ютерної та телекомунікаційної апаратури

Надійшла до редакції 22.01.02  
 Рекомендована до опублікування 18.04.02

**Філінюк Микола Антонович** — завідувач кафедри; **Гаврилов Дмитро Володимирович** — аспірант.

Кафедра проектування комп'ютерної та телекомунікаційної апаратури, Вінницький державний технічний університет

УДК 621.317.625

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

## ДО ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ВАРИКАПІВ

У коливальних контурах сучасних систем радіозв'язу 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 коливального контуру, в параметричних схемах підсилення, ділення та множення частоти, в схемах частотної модуляції, керованих фазообертачах тощо.

Параметрами варикапа є:

- номінальна ємність  $C_H$ , тобто ємність між виводами варикапа з номінальною напругою зміщення;
- максимальна ємність  $C_{max}$ , тобто ємність варикапа з заданою мінімальною напругою зміщення;
- мінімальна ємність  $C_{min}$ , тобто ємність варикапа з заданою максимальною напругою зміщення;
- коефіцієнт перекриття ємності  $K_C = C_{max}/C_{min}$ ;
- температурний коефіцієнт ємності  $TKC = \frac{dC}{C_H dT}$ , тобто відносна зміна ємності варикапа

зі зміною температури навколишнього середовища на 1 К в робочому діапазоні температур та заданій напрузі зміщення;

- номінальна добротність варикапа  $Q_B$ , тобто відношення реактивного опору варикапа до повного опору втрат з номінальною напругою зміщення на заданій частоті;

— температурний коефіцієнт добротності  $TKQ_B = \frac{dQ_B}{Q_B dT}$ , тобто відносна зміна добротності варикапа зі зміною температури навколишнього середовища на 1 К в заданому інтервалі температур;

— частотний діапазон роботи варикапа  $f_{min} \div f_{max}$ , що визначається граничними частотами, на яких добротність варикапа дорівнює одиниці; при цьому граничні частоти варикапа  $f_{min} = \frac{1}{2\pi C_{бар} R_{II}}$  та  $f_{max} = \frac{1}{2\pi C_{бар} r_S}$ , де  $r_S = r_E + r_B$  — опір втрат в емітерній та базовій областях варикапа;  $R_{II}$  — опір переходу з прикладанням до варикапа зворотної напруги.



Одним з основних параметрів варикапа є його добротність. 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 виміряна добротність контуру з варикапом, то можна обчислити і добротність самого варикапа. Тому в цьому випадку принципово важливим є точне визначення параметрів вимірювального резонансного контуру.

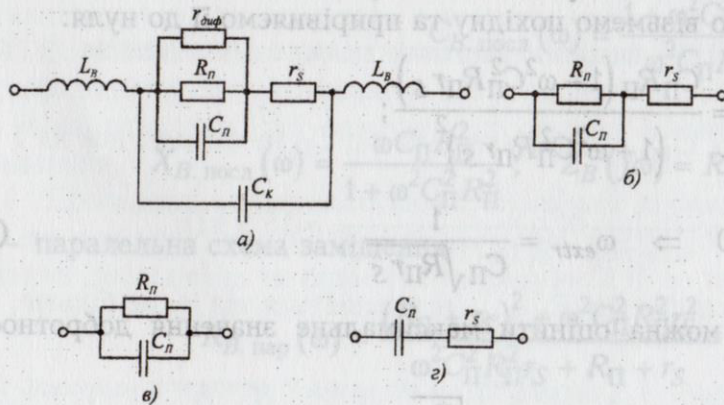


Рис. 1. Еквівалентні схеми варикапа: а – повна малосигнальна; б – спрощена; в – спрощена низькочастотна; г – спрощена високочастотна

даною до варикапа зворотною напругою; конденсатор  $C_{\Pi}$  ( $C_{бар}$ ) – еквівалент ємності переходу (бар'єрної ємності).

На частотах до декількох десятків мегагерц деякими параметрами еквівалентної малосигнальної схеми ( $L_B$ ,  $C_K$ ,  $r_{диф}$ ) можна знехтувати та обмежитись спрощеною еквівалентною схемою (рис. 1б). При цьому типові значення зворотного опору переходу  $R_{\Pi} > 1$  МОм.

За спрощеною еквівалентною схемою варикапа знайдемо його повний опір

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

$$= \frac{R_{\Pi} + r_S + \omega^2 C_{\Pi}^2 R_{\Pi}^2 r_S}{1 + \omega^2 C_{\Pi}^2 R_{\Pi}^2} - j \frac{\omega C_{\Pi} R_{\Pi}^2}{1 + \omega^2 C_{\Pi}^2 R_{\Pi}^2} = \text{Re}_B(\omega) - j \text{Im}_B(\omega) = R_B(\omega) - jX_B(\omega).$$

З останнього співвідношення знайдемо добротність варикапа:

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

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

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

З аналізу співвідношення (2) видно, що послідовний опір  $r_S$  визначає добротність варикапа на високих частотах. Для збільшення добротності необхідно зменшувати опір бази, що відбувається з введенням до структури варикапа  $n^+$ -області, а також зменшувати опір омичного контакту зі збільшенням концентрації домішків в  $n^+$ -області бази та підборі металу омичних контактів.

На низьких частотах, для яких  $\omega C_{\Pi} r_S \ll 1$ , еквівалентна схема варикапа є паралельним з'єднанням  $R_{\Pi}$  та  $C_{\Pi}$  (рис. 1в). 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  $Q_{B.VЧ}(\omega) \approx \frac{1}{\omega C_{\Pi} r_S}$ . В цьому випадку зі збільшенням частоти добротність зменшується, а еквівалентна схема варикапа є послідовним з'єднанням  $r_S$  та  $C_{\Pi}$  (рис. 1г). Таким чином, залежність добротності варикапа від частоти має максимум. Для збільшення добротності варикапа на високих частотах необхідно зменшувати опір  $r_S$ , тобто зменшувати товщину  $n$ -області бази. Визначимо координати цього максимуму, для чого візьмемо похідну та прирівняємо її до нуля:

$$\frac{dQ_B(\omega)}{d\omega} = \frac{C_{\Pi} R_{\Pi} (1 - \omega^2 C_{\Pi}^2 R_{\Pi} r_S)}{(1 + \omega^2 C_{\Pi}^2 R_{\Pi} r_S)^2};$$

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

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

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

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

На основі отриманих аналітичних співвідношень була побудована теоретична залежність добротності варикапа KB104A з параметрами  $r_S = 20$  Ом,  $R_{\Pi} = 1$  МОм та  $C_{\Pi} = 100$  пФ від частоти (суцільна лінія на рис. 2), а також обчислено такі значення:

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

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

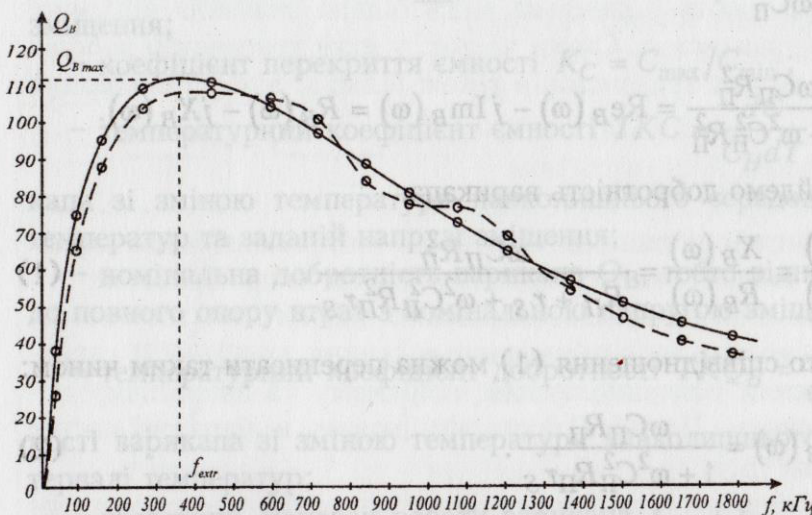


Рис. 2. Теоретична (суцільна лінія) та експериментальна (штрихова лінія) залежності  $Q_B = f(\omega)$  для варикапа KB104A

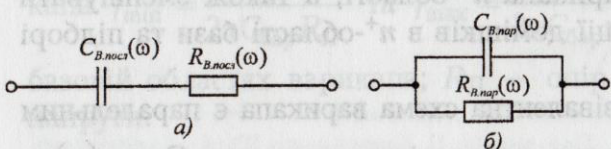


Рис. 3. Послідовна (а) та паралельна (б) схеми заміщення варикапа

Експериментально отримана залежність  $Q_B = f(\omega)$  для варикапа KB104A показана на рис. 2 штриховою лінією. При цьому  $f_{extr} = 376,2$  кГц,  $Q_{B.max} = 106,2$  а графіки теоретичних та експериментальних залежностей відрізняються не більше, ніж на 7,6 %.

Добротність варикапа зменшується зі збільшенням температури, тому що при цьому збільшується опір  $r_S$ . Зі збільшенням зворотного зміщення ємність  $C_{\Pi}$  та опір  $r_S$  зменшуються, а добротність відповідно збільшується. Зменшення  $r_S$  в останньому випадку пояснюється розширенням переходу та зменшенням товщини бази в  $n$ -області структури варикапа.

Варикап можна представити за допомогою послідовної (рис. 3а) та паралельної (рис. 3б) схем заміщення. При цьому параметри цих схем заміщення будуть визначатися такими



співвідношеннями:

— послідовна схема заміщення

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

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

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

— паралельна схема заміщення

$$R_{B. \text{ пар.}}(\omega) = \frac{(R_{\Pi} + r_S)^2 + \omega^2 C_{\Pi}^2 R_{\Pi}^2 r_S^2}{\omega^2 C_{\Pi}^2 R_{\Pi}^2 r_S + R_{\Pi} + r_S} \approx \frac{R_{\Pi} (1 + \omega^2 C_{\Pi}^2 r_S^2)}{1 + \omega^2 C_{\Pi}^2 R_{\Pi} r_S}; \quad (6)$$

$$C_{B. \text{ пар.}}(\omega) = \frac{C_{\Pi} R_{\Pi}^2}{\omega^2 C_{\Pi}^2 R_{\Pi}^2 r_S^2 + (R_{\Pi} + r_S)^2} \approx \frac{C_{\Pi}}{1 + \omega^2 C_{\Pi}^2 r_S^2}; \quad (7)$$

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

За отриманими співвідношеннями (4)–(7) на рис. 4 побудовано залежності параметрів схеми заміщення для варикапа KB104A від частоти.

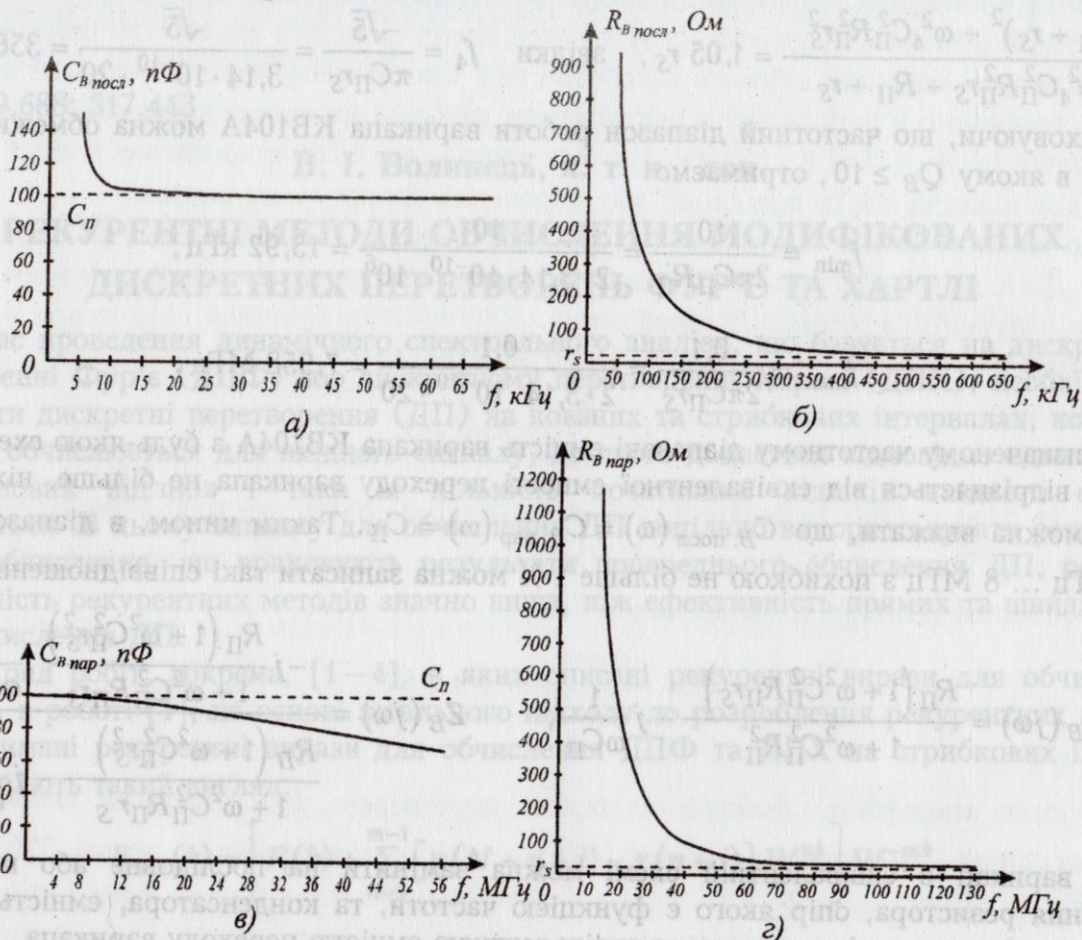


Рис. 4. Залежності параметрів схеми заміщення для варикапа KB104A від частоти

Аналіз наведених залежностей дозволяє зробити такі висновки:



- залежність  $C_{B. посл}(f)$  (рис. 4а) на високих частотах прямує до значення  $C_{\Pi}$ , а на низьких — до нескінченності;
- залежність  $R_{B. посл}(f)$  (рис. 4б) на високих частотах прямує до значення  $r_S$ , а на низьких — до нескінченності;
- залежність  $C_{B. пар}(f)$  (рис. 4в) на високих частотах прямує до нуля, а на низьких практично дорівнює значенню  $C_{\Pi}$ ;
- залежність  $R_{B. пар}(f)$  (рис. 4г) на високих частотах прямує до значення  $r_S$ , а на низьких — до нескінченності.

Знайдемо частоту  $f_1$ , на якій ємність  $C_{B. посл}$  відрізняється від  $C_{\Pi}$  не більше, ніж на 1 %:

$$\frac{1 + \omega_1^2 C_{\Pi}^2 R_{\Pi}^2}{\omega_1^2 C_{\Pi} R_{\Pi}^2} = 1,01 C_{\Pi}, \text{ звідки } f_1 = \frac{5}{\pi C_{\Pi} R_{\Pi}} = \frac{5}{3,14 \cdot 10^{-10} \cdot 10^6} = 15,9 \text{ кГц.}$$

Знайдемо частоту  $f_2$ , на якій активний опір  $R_{B. посл}$  відрізняється від  $r_S$  не більше, ніж на 5 %:

$$\frac{R_{\Pi} + r_S + \omega_2^2 C_{\Pi}^2 R_{\Pi}^2 r_S}{1 + \omega_2^2 C_{\Pi}^2 R_{\Pi}^2} = 1,05 r_S, \text{ звідки } f_2 = \frac{1}{\pi C_{\Pi}} \sqrt{\frac{5}{R_{\Pi} r_S}} = \frac{1}{3,14 \cdot 10^{-10}} \sqrt{\frac{5}{10^6 \cdot 20}} = 1,59 \text{ МГц.}$$

Знайдемо частоту  $f_3$ , на якій ємність  $C_{B. пар}$  відрізняється від  $C_{\Pi}$  не більше, ніж на 1 %:

$$\frac{C_{\Pi} R_{\Pi}^2}{\omega_3^2 C_{\Pi}^2 R_{\Pi}^2 r_S^2 + (R_{\Pi} + r_S)^2} = 0,99 C_{\Pi}, \text{ звідки } f_3 = \frac{1}{2\pi\sqrt{99} C_{\Pi} r_S} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot \sqrt{99} \cdot 10^{-10} \cdot 20} = 8 \text{ МГц.}$$

Знайдемо частоту  $f_4$ , на якій активний опір  $R_{B. пар}$  відрізняється від  $r_S$  не більше, ніж на 5 %:

$$\frac{(R_{\Pi} + r_S)^2 + \omega_4^2 C_{\Pi}^2 R_{\Pi}^2 r_S^2}{\omega_4^2 C_{\Pi}^2 R_{\Pi}^2 r_S + R_{\Pi} + r_S} = 1,05 r_S, \text{ звідки } f_4 = \frac{\sqrt{5}}{\pi C_{\Pi} r_S} = \frac{\sqrt{5}}{3,14 \cdot 10^{-10} \cdot 20} = 356 \text{ МГц.}$$

Враховуючи, що частотний діапазон роботи варикапа КВ104А можна обмежити діапазоном, в якому  $Q_B \geq 10$ , отримаємо

$$f_{\min} = \frac{10}{2\pi C_{\Pi} R_{\Pi}} = \frac{10}{2 \cdot 3,14 \cdot 10^{-10} \cdot 10^6} = 15,92 \text{ кГц;}$$

$$f_{\max} = \frac{0,1}{2\pi C_{\Pi} r_S} = \frac{0,1}{2 \cdot 3,14 \cdot 10^{-10} \cdot 20} = 7,958 \text{ МГц.}$$

У визначеному частотному діапазоні ємність варикапа КВ104А з будь-якою схемою заміщення відрізняється від еквівалентної ємності переходу варикапа не більше, ніж на 1 %, тобто можна вважати, що  $C_{B. посл}(\omega) = C_{B. пар}(\omega) = C_{\Pi}$ . Таким чином, в діапазоні частот 15,9 кГц ... 8 МГц з похибкою не більше 1 % можна записати такі співвідношення

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

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



## 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 послідовну та паралельну схеми заміщення варикапа та знайдено співвідношення, що описують параметри елементів такої еквівалентної схеми.

3. Проаналізовано частотні залежності добротності варикапа і параметрів послідовної та паралельної схем заміщення, що дозволило в робочому діапазоні частот дещо спростити співвідношення, які описують параметри елементів послідовної та паралельної схем заміщення.

4. 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.

Рекомендована кафедрою радіотехніки

Надійшла до редакції 30.04.02

Рекомендована до опублікування 03.09.02

**Рудик Андрій Вікторович** — доцент, **Павлов Сергій Миколайович** — доцент.

Кафедра радіотехніки, Вінницький державний технічний університет.

УДК 519.688: 517.443

**В. І. Волинець, к. т. н., доц.**

## РЕКУРЕНТНІ МЕТОДИ ОБЧИСЛЕННЯ МОДИФІКОВАНИХ ДИСКРЕТНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ ФУР'Є ТА ХАРТЛІ

Під час проведення динамічного спектрального аналізу, що базується на дискретному перетворенні Фур'є (ДПФ) або дискретному перетворенні Хартлі (ДПХ), необхідно обчислювати дискретні перетворення (ДП) на ковзних та стрибкових інтервалах, коли чергове ДП обчислюється для вхідного сигналу, до якого додається відповідно один або декілька нових відліків і така ж кількість початкових відліків вхідного сигналу відкидається. В цьому випадку для обчислення ДП доцільно використовувати рекурентні методи обчислення, що враховують результати попереднього обчислення ДП, оскільки ефективність рекурентних методів значно вища, ніж ефективність прямих та швидких методів обчислення ДП.

Існує ряд робіт, зокрема, [1–4], в яких описані рекурентні вирази для обчислення ДП. Так, в роботі [1], на основі загального підходу до розроблення рекурентних методів були отримані рекурентні вирази для обчислення ДПФ та ДПХ на стрибкових інтервалах, які мають такий вигляд:

$$F_{i+m}(k) = \left[ F_i(k) + \sum_{n=0}^{m-1} [x(N+n+i) - x(n+i)] W^{nk} \right] W^{-mk}, \quad (1)$$