

УДК 621.396.6+621.382.037

О.П. Кондратенко, І.Л. Страшний

Національна академія Національної гвардії України, Харків

## ПРО ОДИН З РЕЖИМІВ РОБОТИ ПАРАМЕТРИЧНОЇ СИСТЕМИ

У статті представлені результати аналізу характеристик і особливостей роботи параметричного діода в розширеному діапазоні зміни напруги накачування. Визначено коефіцієнт модуляції ємності для двох варіантів: у загальноприйнятому режимі, і з заходом у позитивну напругу, але не перевищуючу контактну різницю потенціалів, тобто без відкриття переходу.

**Ключові слова:** адаптивний компенсатор, варикап, коефіцієнт модуляції ємності, напруга накачування, параметричний діод.

### Вступ

**Постановка проблеми.** У практиці використання різних засобів радіозв'язку нерідко виникають проблеми приймання сигналів у присутності навмишних перешкод. Відомо, що одним з перспективних способів подолання виникаючих труднощів є використання адаптивних компенсаторів, побудованих по квадратурному або гетеродинному принципу [1]. Останній може бути реалізований різними способами, де в якості перемножника може використовуватися й нелінійна ємність параметричного діода [2]. Розглянемо можливі варіанти режимів роботи варикапа, характеристики якого визначаються досяжним значенням коефіцієнта модуляції ємності.

У статті використовується устояна термінологія, згідно з якою параметричні діоди умовно ділять на варикапи й варактори, розмежовуючи тим самим області застосування [3].

Так, в обох типах використовується властивість залежності ємності р-п переходу від напруги, що подається на діод. Але: "Варикап – напівпровідниковий діод, робота якого заснована на залежності бар'єрної ємності р-п переходу від зворотної напруги. Варикапи застосовуються як елементи з електрично-керованою ємністю в схемах перестроювання частоти коливального контуру, ділення й множення частоти, частотної модуляції, керованих фазообертачів і ін."

"Варактор – напівпровідниковий діод, за принципом дії аналогічний варикапу. Використовується переважно як нелінійний елемент в множниках частоти, а також для посилення колювання в параметричних підсилювачах. При зміні напруги на діоді ємність міняється в одиниці-десятки раз, він може бути використаний як змінний конденсатор".

**Мета статті.** Доказ можливості збільшення основної характеристики параметричного діода (коефіцієнта модуляції ємності) шляхом вибору розширеного діапазону зміни напруги накачування, але без заходу в область відмикання переходу.

### Основна частина

Вид і характер залежності бар'єрної ємності від прикладеної запираючої напруги залежить від матеріалу виготовлення й ступені концентрації носіїв. У цьому плані розрізняють діоди із плавним, різким і надрізким переходом, що виражається формулою:

$$C_d(u) = \frac{C_d(0)}{\left(1 + \frac{u}{\phi_0}\right)^n}, \quad (1)$$

де  $C_d(0)$  – ємність діода при нульовому зсуві;  $\phi_0$  – контактна різниця потенціалів,  $n=1/2$  для зварених діодів (зі східчастим різким переходом);  $n=1/3$  для дифузійних діодів (із плавним переходом);  $n \approx 1$  для арсенід-галієвих діодів (з надрізким переходом). Для германія  $\phi_0 \approx 0,3 \dots 0,4$  В, для кремнію  $\phi_0 \approx 0,6 \dots 0,8$  В, для арсеніду галію  $\phi_0 \approx 1 \dots 1,2$  В [4].

Використовуючи ці дані, зрівняємо хід вольт-фарадної характеристики (ВФХ) для вибору режиму накачування. У різкому несиметричному р-п переході:

$$C_6 = C_0 \cdot (\phi_0 - u)^{-\frac{1}{2}}. \quad (2)$$

Для плавного р-п переходу з лінійним розподілом концентрації домішок:

$$C_6 = C_0 \cdot (\phi_0 - u)^{-\frac{1}{3}}. \quad (3)$$

Максимальна величина зворотної напруги для значної частини варикапів становить 25...30 вольт [5], цією величиною й обмежимо подальші розрахунки, використовуючи офісний пакет Excel. У підсумку одержимо графіки, показані на рис. 1 і – у дрібному масштабі початкова частина – на рис. 2, горизонтальна вісь – зворотна напруга, вертикальна – ємність у пікофарадах при початковій ємності 25 пФ.

Використовуючи ці графіки, визначимо коефіцієнт модуляції ємності для двох варіантів – 1) у загальноприйнятому режимі, обмежуючи верхню границю нулем вольт і нижню – максимальним (по модулю) значенням напруги на варикапі (25 вольт), і 2) із заходом у позитивну напругу, але не переви-

щуючу контактну різницю потенціалів, тобто без відкриття переходу. Дані зведемо в табл. 1.

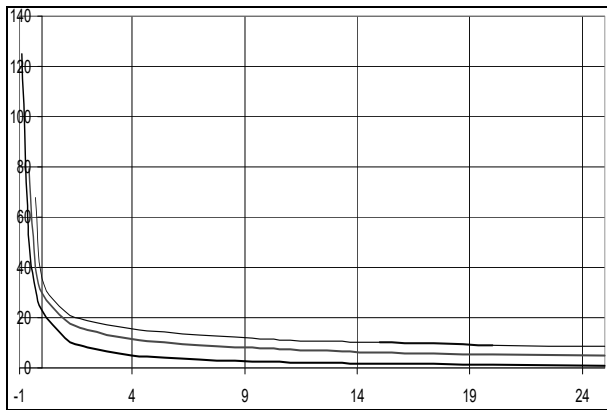


Рис. 1. ВФХ бар'єрної ємності варикапа

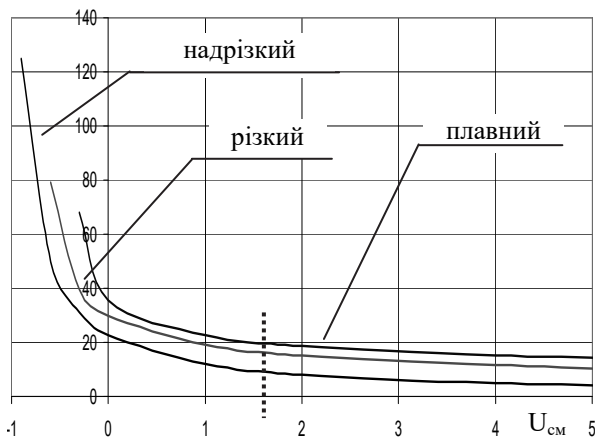


Рис. 2. Початкова ділянка ВФХ

Таблиця 1

Коефіцієнт модуляції ємності

перехід	коефіцієнт модуляції ємності в режимі			
	стандар-тний	с заходом у позитивну область		
		макси-мальний	з обме-женням 7 вольт	з обме-женням 4 вольти
плавний	4,17	7,97	5,28	4,43
різкий	6,06	16,03	8,77	6,85
надрізкий	23,67	130,21	40,45	25,51

Значення першого стовпця («стандартний») не розходяться з відомими, що свідчить про вірність і інших результатів.

Дані таблиці свідчать, що навіть із розмахом накачування в 2,5 вольт (замість 12 вольтів) при початковому зсуві приблизно мінус 1,5 вольта коефіцієнт перекриття перевищує загальноприйнятую величину. Звідси впливає важливий вивід – суттєво знижуються вимоги до лінійності як вихідного каскаду, так і всього тракту накачування, що позитивно позначається на кореляції вхідних і вихідних коливань.

Разом з тим можуть виникнути проблеми, пов'язані з перевищенням зсуви амплітудою коливан-

ня, що приведе до появи прямих струмів через перехід. З'явиться значна дифузійна ємність, але добротність падає практично до нуля. Для когерентної обробки такий режим навряд чи прийнятний, і розв'язок питання вимагає подальшого розгляду, але виходить за рамки цієї статті.

При розрахунках резонансних систем радіотехнічних пристроїв необхідно знати середнє значення змінної ємності параметричного діода. У нашому випадку охоче прийняте середнє арифметичне використовувати недоцільно, тому що воно справедливо тільки для лінійних характеристик або зі слабкою нелінійністю.

Для визначення середнього значення слід користуватися поняттям «середнє гармонійне» [6]:

$$h = \frac{n}{\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_2} + \dots + \frac{1}{x_n}} \quad (4)$$

Для нашого випадку, діапазону напруг плюс 0,9...мінус 4 вольтів і надрізкого переходу одержимо:  $C_{\text{макс}} = 4,9$  пФ,  $C_{\text{мін}} = 0,9$  пФ. Арифметичнє середнє дає 2,9 пФ, середнє гармонійнє з формули (4) 1,66 пФ. Як бачимо, різниця (майже в 2 рази) істотна, що приведе до помилки визначення резонансної частоти на 41%. Але ще більша відмінність проявляється на всьому протязі ВФХ: 63 пФ і 2 пФ – майже в 30 разів.

З технічної літератури відомо, що при прямому включенні діода опір переходу різко зменшується, і вже при напрузі десятих часток вольт замикаючий шар практично зникає. У германієвих діодів ріст струму починається вже при напрузі близько 0,15 В, а в кремнієвих – близько 0,5 В (рис. 3).

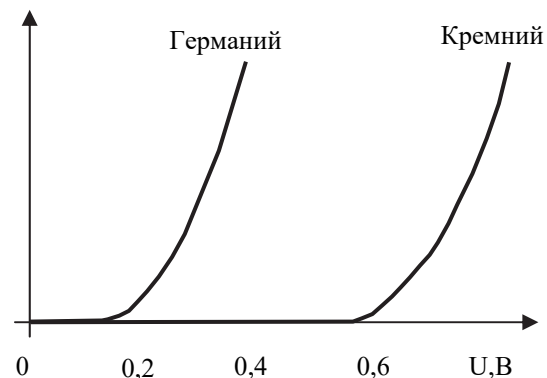


Рис. 3. Вольт-амперна характеристика діодів у прямому включенні

Враховуючи, що напруга запирання подається через великий опір (порядку мегаом), навіть малі – порядку мікроамперів – струми викличуть позитивні вольтові добавки до негативної напруги зсуву, а це, в остаточному підсумку, приведе до частотного розстроювання резонансних контурів, не говорячи вже про зникнення бар'єрної ємності варикапа.

Для кількісної оцінки напруги відмикання конкретних діодів були проведені віртуальні дослідження за допомогою пакета моделюючих програм Electronics Workbench Multisim.

Невимогливість цього пакета програм до апаратних ресурсів комп'ютера дозволила провести віртуальний експеримент за наступною схемою (рис. 4). Конкретизація полягає в аналізі початкової ділянки вольт-амперної характеристики (ВАХ) високочастотних кремнієвих епітаксiallyно-планарних діодів, до яких ставляться варикапи.

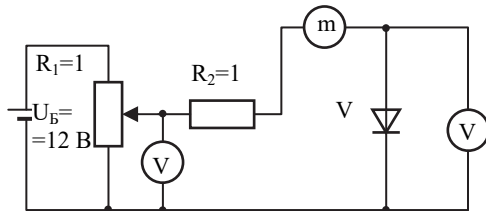


Рис. 4. Схема вимірів

Результати вимірів для трьох типів діодів – 2Д503А, 2Д522А і КД512А – представлені на рис. 5. Експеримент підтвердив, що для варикапів справедливо встановлювати границю відкривання на рівні 0,35...0,45 В.

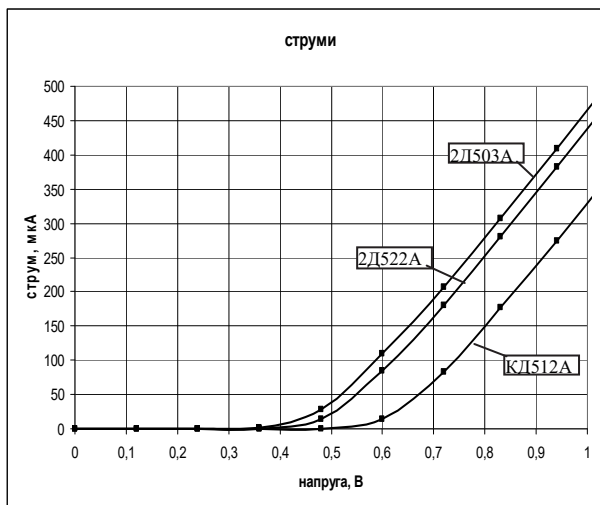


Рис. 5. Початкові ділянки ВАХ кремнієвих високочастотних діодів

## Висновки

1. Запропоновано і обґрунтовано варіант збільшення коефіцієнта модуляції ємності варикапа шляхом вибору режиму його роботи із заходом у позитивну область, але без відкриття р-п переходу.

2. Збільшення, що досягається, становить величину в 1,9; 2,6 і 5,5 раз більше для плавного, різкого й надрізкого переходів відповідно.

3. Запропонований режим дозволяє суттєво знизити вимоги до лінійності підсилювальних трактів і споживаної потужності вихідного каскаду каналу накачування, який для збереження кореляції повинен працювати в лінійному режимі.

4. Для виключення помилок у проектуванні коливальних систем необхідно при розрахунках користуватися гармонійним, а не арифметичним середнім значенням ємності варикапа.

## Список літератури

1. Лосев Адаптивная компенсация помех в каналах связи / Ю.И. Лосев. – М.: Радио и связь, 1988. – 111 с.
2. Радитехнические цепи и сигналы: [Текст] / С.И. Баскаков. – М.: Высшая школа, 2000. – 463 с.
3. Справочник по учебному проектированию приемно-усилительных устройств / М.К. Белкин, В.Т. Белинский, Ю.Л. Мазор, Р.М. Терещук. 2-е изд.: [Текст]. – К.: Выща школа, 1988. – 472 с.
4. Лекция 3. Барьерная емкость р-п – перехода: [электрон. ресурс]. – Режим доступа: <http://pandia.ru/text/78/393/1096.php>.
5. Аксенов А.И. Элементы схем бытовой радиоаппаратуры. Диоды. Транзисторы: [Текст] / А.И. Аксенов, А.В. Нефедов, А.М. Юшин. – Радио и связь, 1992. – 224 с.
6. Худорожков Р. Правильное среднее: [электрон. ресурс]. – Режим доступа: <http://www.banki.ru/blog/hudorojkov/903.php/>.

Надійшла до редколегії 9.11.2016

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Л.Ф. Купченко, Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

## ОБ ОДНОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

А.П. Кондратенко, И.Л. Страшный

В статье представлены результаты анализа характеристик и особенностей работы параметрического диода в расширенном диапазоне изменения напряжения накачки. Определен коэффициент модуляции емкости для двух вариантов – в общепринятом режиме, и с заходом в положительное напряжение, но не превышающее контактную разность потенциалов, то есть без открытия перехода.

**Ключевые слова:** адаптивный компенсатор, варикап, коэффициент модуляции емкости, напряжение накачки, параметрический диод.

## ABOUT ONE OPERATION MODE OF PARAMETRIC SYSTEM

O.P. Kondratenko, I.L. Strashny

In article analysis results of characteristics and features of operation of the parametrical diode in the expanded range of voltage variation of pump are provided. The capacity percentage modulation for two options – in the standard mode, and with stopping in the positive voltage but which isn't exceeding contact potential difference that is without transition opening is defined.

**Keywords:** the adaptive compensator, varicap, capacity percentage modulation, pump tension, parametrical diode.