

УДК 621.396.96



О. П. Кондратенко



С. М. Мельников

### АДАПТИВНА ПРОСТОРОВА ФІЛЬТРАЦІЯ ЗАВАДИ В КАНАЛІ ЗВ'ЯЗКУ

Обговорюються варіанти побудови сумісного оброблення корисних сигналів і завад із застосуванням кореляційних автокомпенсаторів. 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 заходженням у позитивну напругу, не перевищуючу контактну різницю потенціалів, тобто без відкриття переходу.

*К л ю ч о в і с л о в а:* адаптивний компенсатор, варикап, коефіцієнт модуляції ємності, напруга накачування, параметричний діод.

**Постановка задачі.** Радіозв'язок є найважливішим, а в багатьох випадках і єдиним видом зв'язку, здатним забезпечити управління військами в найскладнішій обстановці, а також під час знаходження командирів і штабів у русі [1]. Це зумовило підвищені вимоги до військового зв'язку, створення більш досконалих електричних засобів. Серед багатьох завдань управління військами виділимо радіоелектронний захист радіоканалів зв'язку [2].

Захист ліній зв'язку від радіопридушення противником є одним з основних елементів забезпечення стійкості системи зв'язку, він досягається виконанням комплексу заходів, серед яких ті, на реалізацію яких спрямовані пропозиції цієї статті:

- проведення організаційних і технічних заходів щодо захисту від навмисних завад;
- застосування адаптивних радіоліній (просторово й частотно рознесені приймання і передавання, швидкодія й ін.);
- ефективна робота в умовах функціонування передавачів завад разової дії (ППРД), що закидає противник;
- застосування антен напрямленої дії;
- орієнтування антен, за якого напрям мінімального приймання діаграми направленості збігається з напрямом сигналу завади, у тому числі адаптивне.

За рубежем (у Росії) розроблена багатофункціональна система моніторингу й впливу на радіоелектронні засоби на основі безпілотних літальних апаратів (БПЛА) (рис. 1). Є відомості [3] про розроблення подібної апаратури (рис. 2) в інших країнах.



Рис. 1. БПЛА “Леер-3” у польоті



Рис. 2. БПЛА “Predator B” у польоті

Подібні системи вже проходять випробування в регіонах перманентних конфліктів: на сході України, у Сирії, Молдові [4]. Ще в жовтні 2014 р. перші системи цього типу (“Леер-3”) надійшли у війська Південного військового округу Росії – у Ростовську область, що межує з окупованими територіями Донецької й Луганської областей України. “Леер-3” – аеродинамічний передавач завад абонентським терміналам мобільного зв'язку, змонтований на легкому безпілотному об'єкті типу “Орлан-10”. Його призначення – придушення GSM зв'язку. Так само можуть бути подавлені й інші канали, виявлення яких не є складним. Комплекс “Леер-3” здатний виконувати завдання в заданому районі протягом 10 год при роботі з одним БПЛА. Система підтримує керування не більше ніж трьома БПЛА на відстані 50 ... 120 км.

Взаємодія між командуванням і підрозділами НГУ (командирами й підлеглими) здійснюється за допомогою радіозв'язку, який в ході спецоперації противник намагається заглушити, використовуючи сучасні прилади радіопротидії. Тому в липні 2015 у навчальному центрі НГУ в Нових Петрівцях керівництву були представлені сучасні засоби зв'язку, які допомагають забезпечити успішне ведення бойових дій [5]. Основна їх перевага – наявність захисту від придушення зв'язку, що робить його більш ефективним.

**Мета статті** – запропонувати один з можливих шляхів реалізації сумісного адаптивного просторового оброблення сигналів і завад на основі використання автокомпенсаційної техніки з поліпшеними характеристиками.

**Виклад основного матеріалу.** Сутність пропонованого раніше шляху полягає у формуванні провалів (в ідеалі – нулів приймання) у діаграмі направленості антенних систем засобів радіозв'язку в напрямках на джерела сигналів, що створюють завади [6, 7]. Варіант спрощеної структурної схеми адаптивного пристрою заглушення завади наведений на рис. 3.

У пристрої є два (як мінімум) канали – основний і додатковий, у якому необхідно для виключення втрат забезпечити нульовий рівень приймання корисного сигналу [8]. Як приклад показане використання антени з кардіоїдною діаграмою направленості. Детальний розгляд питань адаптивної компенсації завад виходить за рамки цієї статті й до того ж добре вивчений [9, 10]. У підсумку на виході в напрямку на джерело завади утворюється “нуль” приймання, як показано на рис. 4. На верхньому рисунку (а) показана вихідна діаграма направленості основної антени (її половина), на нижньому (б) – результат адаптації за двома джерелами завад [11].

Блок сумісної адаптивної обробки, показаний на рис. 3, може бути реалізований різними способами (їх достатньо). Ми розглянемо варіант гетеродинного автокомпенсатора [9], у якому вузол перемножування виконаний на параметричному діоді. У цьому випадку характеристики адаптації прямо залежать від коефіцієнта модуляції (або перекриття – в інших джерелах) ємності варикапа. Відповідно до мети статті ставиться завдання збільшення цього показника.

Розглянемо можливі варіанти режимів роботи варикапа, характеристики якого визначаються досяжним значенням коефіцієнта модуляції ємності.

У статті використовується загальноживана термінологія, згідно з якою параметричні діоди умовно поділяють на варикапи й варактори, розмежовуючи тим самим області їх застосування [12]. Так, в обох типах використовується властивість залежності ємності  $p$ - $n$  переходу від напруги, що подається на діод.

Докажемо можливість збільшити основну характеристику параметричного діода (коефіцієнта модуляції ємності) шляхом вибору розширеного діапазону зміни напруги накачування, але без заходження в область відмикання переходу.

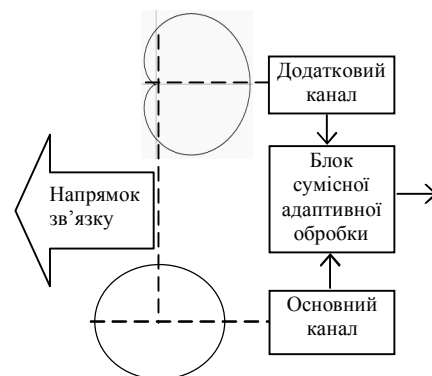


Рис. 3. Спрощена структурна схема адаптивного оброблення

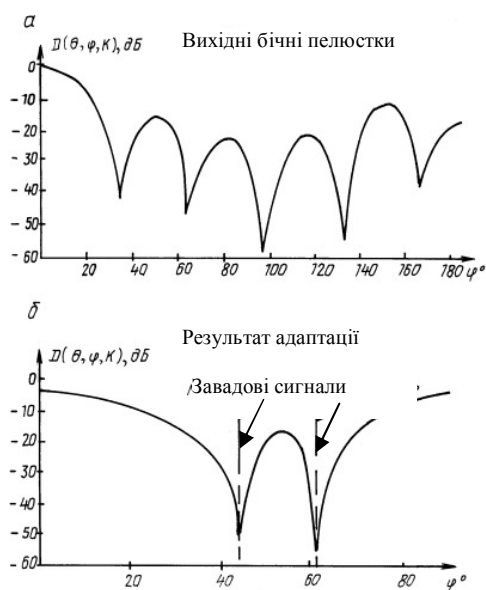


Рис. 4. Компенсація завадових сигналів із двох напрямів

Вид і характер залежності бар'єрної ємності від прикладеної запираючої напруги залежить від матеріалу виготовлення й ступеня концентрації носіїв. З урахуванням цього розрізняють діоди із плавним, різким і надрізким переходом, що виражається формулою:

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

де  $C_o(0)$  – 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 германію  $\phi_0 \approx 0,3 \dots 0,4$  В, для кремнію  $\phi_0 \approx 0,6 \dots 0,8$  В, для арсеніду галію  $\phi_0 \approx 1 \dots 1,2$  В [13].

Використовуючи ці дані, порівнюємо вольт-фарадні характеристики (ВФХ) для вибору режиму накачування. У різкому несиметричному  $p-n$  переході

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

Для плавного  $p-n$  переходу з лінійним розподілом концентрації домішок

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

Максимальна величина зворотної напруги для значної частини варикапів становить 25 ... 30 В [14], цією величиною й обмежимо подальші розрахунки, використовуючи офісний пакет ЕКСЕЛ. У підсумку одержимо графіки, показані на рис. 5. Початкова ділянка графіків у дрібному масштабі зображена на рис. 6, горизонтальна вісь – зворотна напруга, вертикальна – ємність у пікофарадах для початкової ємності 25 пФ.

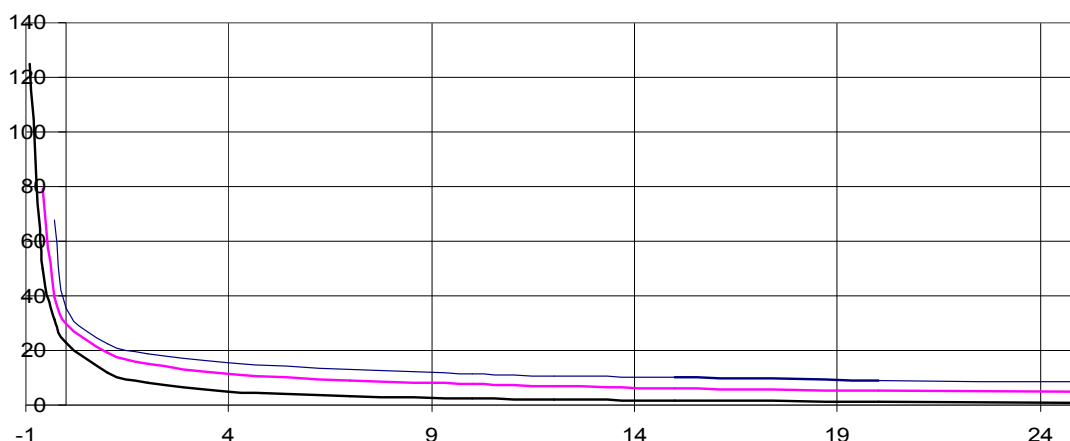


Рис. 5. ВФХ бар'єрної ємності варикапа

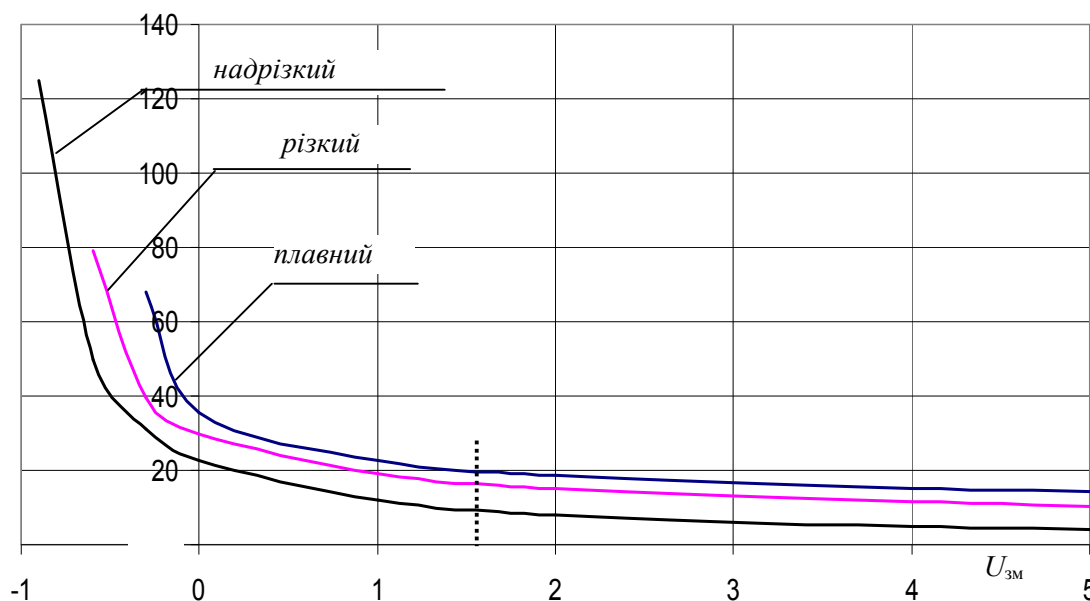


Рис. 6. Початкова ділянка ВФХ

Використовуючи ці графіки, визначимо коефіцієнт модуляції ємності для двох варіантів: 1) у загальноприйнятому режимі, обмежуючи верхню границю нулем вольт, а нижню – максимальним (за модулем) значенням напруги на варикапі (25 В); 2) із заходженням в область позитивної напруги, але не перевищуючу контактну різницю потенціалів, тобто без відкриття переходу. Дані зведені в таблиці.

*Коефіцієнт модуляції ємності*

Перехід	Стандартний	Із заходженням у позитивну область		
		максимальний	з обмеженням 7 В	з обмеженням 4 В
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 інших результатів.

Дані таблиці показують, що навіть із розмахом накачування 2,5 В (замість 12 В) при початковому зсуві приблизно мінус 1,5 В коефіцієнт перекриття перевищує загальноприйнятну величину.

Звідси випливає важливий висновок – 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 зсуву амплітудою коливання, що призведе до появи прямих струмів через перехід. З'явиться значна дифузійна ємність, і добротність зменшиться практично до нуля. Для когерентного оброблення такий режим навряд чи прийнятний, і результат рішення питання вимагає подальшого розгляду, що виходить за рамки цієї статті.

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

Для визначення середнього значення необхідно користуватися поняттям “середнє гармонійне” [15]

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

Для нашого діапазону напруг +0,9 ... –4 В і надрізкого переходу одержимо:  $C_{\max} = 4,9$  пФ,  $C_{\min} = 0,9$  пФ. Арифметичнє середнє дорівнює 2,9 пФ, середнє гармонійне за формулою (4) 1,66 пФ. Як бачимо, різниця (майже в 2 рази) істотна, що призведе до помилки визначення резонансної частоти на 41 %. Але ще більша відмінність проявляється на всій довжині ВФХ: 63 пФ і 2 пФ – майже у 30 разів.

З технічної літератури відомо, що при прямому включенні діода опір переходу різко зменшується, і вже при напрузі десятих вольт замикаючий шар практично зникає [16]. У германієвих діодів збільшення струму починається вже при напрузі близько 0,15 В, а в кремнієвих – близько 0,5 В (рис. 7).

Враховуючи, що напруга запирання подається через великий опір (порядку МОм), навіть малі (мкА) струми спричинять позитивні вольтові добавки до негативної напруги зсуву, а це в остаточному підсумку призведе до частотного розбалансу резонансних контурів, не кажучи вже про зникнення бар'єрної ємності варикапа.

Для кількісного оцінювання 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

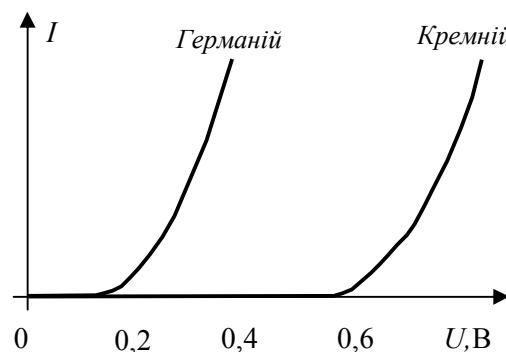


Рис. 7. Вольт-амперна характеристика діодів при прямому включенні

експеримент за схемою, наведеною на рис. 8. Конкретизація полягає в аналізі початкової ділянки вольт-амперної характеристики (ВАХ) високочастотних кремнієвих епітаксально-планарних діодів, до яких віднесено варикапи.

Результати вимірів для трьох типів діодів (2Д503А, 2Д522А та КД512А) представлені на рис. 9. Експеримент підтвердив, що для варикапів правильним є встановлювати границю відкриття на рівні 0,35 ... 0,45 В.

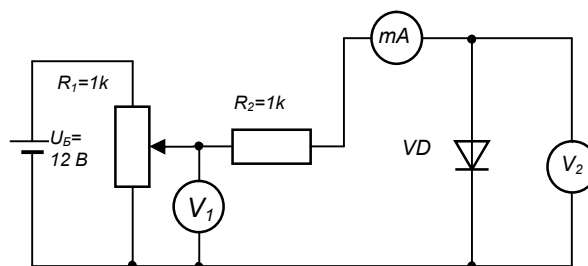


Рис. 8. Схема вимірів

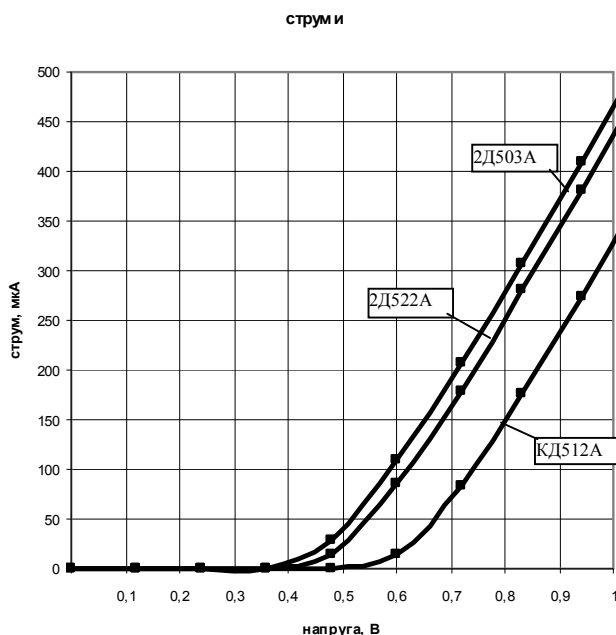


Рис. 9. Початкові ділянки ВАХ кремнієвих високочастотних діодів

### Висновки

1. Запропоновано і обґрунтовано варіант збільшення коефіцієнта модуляції ємності варикапа шляхом вибору режиму його роботи із заходженням у позитивну область, але без відкриття  $p-n$  переходу.
2. Збільшення, що досягається, становить величину в 1,9; 2,6 і 5,5 рази 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 використаних джерел

1. Радзиевский, А. И. Тактика в боевых примерах. Полк [Текст] / А. И. Радзиевский. – М. : Воениздат, 1974. – 286 с.
2. Организация военной связи [Електрон. ресурс]. – Режим доступу : <http://xreferat.com/17/422-3-organizaciya-voennoiy-svyazi.html> (дата звернення : 22.01.17). – Назва з екрана.
3. Жеребин А., Попов В., Демидов С. Беспилотные летательные аппараты. ФГУП ГосНИИАС [Електрон. ресурс]. – Режим доступу : <http://bp-la.ru/bak-voennogo-naznacheniya/> (дата звернення : 22.01.17). – Назва з екрана.
4. Карпенко А. В. Комплекс “Леер” с беспилотным летательным аппаратом “Орлан-10” // Оружие и военная техника. “Оружие Отечества” [Електрон. ресурс]. – Режим доступу : <http://bastion-ork.ru/orlan-10/> (дата звернення : 25.01.17). – Назва з екрана.
5. Нацгвардия представила новую концепцию организации радиосвязи [Електрон. ресурс]. – Режим доступу : <http://ngu.gov.ua/ru/news/nacgvarduuya-predstavyla-novuyu-konceptsuuyu-organyzacyu-radyosvyazy> (дата звернення : 25.01.17). – Назва з екрана.

6. Потапов Р. А., Сучилин В. И. Антенная решетка средств радиосвязи с управляемой диаграммой направленности. Патент Российской Федерации № 2007794 [Электрон. ресурс]. – Режим доступа : [http://www.ntpo.com/patents\\_electronics/electronics\\_4/electronics\\_6.shtml](http://www.ntpo.com/patents_electronics/electronics_4/electronics_6.shtml) (дата звернення : 25.01.17). – Назва з екрана.
7. Адаптивные антенные системы [Текст] / Уидроу (В. Widrow), Мантей (Р. Е. Mantey), Гриффите (L. J. Griffiths) и др. // Труды Института инженеров по электронике и радиотехнике. М. : ИИЭР, 1967. – № 12.
8. Лосев, Ю. И. Адаптивная компенсация помех в каналах связи [Текст] / Ю. И. Лосев. – М. : Радио и связь, 1988. – 111 с.
9. Ширман, Я. Д. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех [Текст] / Я. Д. Ширман, В. Н. Манжос. – М. : Радио и связь, 1981. – 416 с.
10. Радиозлектронные системы [Текст] : справочник / Я. Д. Ширман, Ю. И. Лосев, Н. Н. Минервин и др. ; под ред. Я. Д. Ширмана. : – М. : МАКВИС, 1998. – 828 с: ил.
11. Марчук Л. А., Гиниятуллин Н. Ф., Кабаев Л. В. Адаптивная антенная решетка. Патент Российской Федерации № 2090960 [Электрон. ресурс]. – Режим доступа : <http://www.freepatent.ru/patents/2090960> (дата звернення : 25.01.17). – Назва з екрана.
12. Справочник по учебному проектированию приемно-усилительных устройств [Текст] / М. К. Белкин, В. Т. Белинский, Ю. Л. Мазор, Р. М. Терещук; – 2-е изд. – К. : Вища шк., 1988. – 472 с.
13. Лекция 3. Барьерная емкость р-п перехода [Электрон. ресурс]. – Режим доступа : <http://pandia.ru/text/78/393/1096.php> (дата звернення : 27.01.17). – Назва з екрана.
14. Аксенов, А. И. Элементы схем бытовой радиоаппаратуры. Диоды. Транзисторы [Текст] / А. И. Аксенов, А. В. Нефедов, А. М. Юшин. – М. : Радио и связь, 1992. – 224 с.
15. Худорожков Р. Правильное среднее [Электрон. ресурс]. – Режим доступа : <http://www.banki.ru/blog/hudorojkov/903.php/> (дата звернення : 27.01.17). – Назва з екрана.
16. Баскаков, С. И. Радиотехнические цепи и сигналы [Текст] / С. И. Баскаков. – М. : Высш. шк., 2000. – 463 с.

*Стаття надійшла до редакції 14.03.2017 р.*

**УДК 621.396.96**

**А. П. Кондратенко, С. М. Мельников**

#### **АДАПТИВНАЯ ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ ПОМЕХИ В КАНАЛЕ СВЯЗИ**

*Обсуждаются варианты построения совместной обработки полезных сигналов и помех с применением корреляционных автокомпенсаторов. 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, не превышающее контактную разность потенциалов, то есть без открытия перехода.*

*К л ю ч е в ы е с л о в а: адаптивный компенсатор, варикап, коэффициент модуляции емкости, напряжение накачки, параметрический диод.*

**UDC 621.396.96**

**O. P. Kondratenko, S. M. Melnikov**

#### **ADAPTIVE SPACE FILTRATION OF THE HINDRANCE IN THE COMMUNICATION CHANNEL**

*Options of creation of collateral processing of the useful signals and hindrances are discussed with use of correlative self-balancing potentiometers. Results of the analysis of characteristics and features of operation of the parametrical diode in the expanded range of change of tension of a rating are presented. The capacity modulation index for two options – in the standard mode, and with calling the positive tension but which is not exceeding a contact potential difference that is without transition opening is defined.*

*K e y w o r d s: adaptive compensator, varicap, capacity modulation index, rating tension, parametrical diode.*

**Кондратенко Александр Павлович** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри автомобільної техніки Національної академії Національної гвардії України.

**Мельников Сергій Михайлович** – викладач кафедри експлуатації та ремонту автомобілів та бойових машин Національної академії Національної гвардії України.