
ОПТИЧНА І КВАНТОВА ЕЛЕКТРОНІКА В КОМП'ЮТЕРНИХ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

УДК 521.501.7

Л.Б. ЛІЩИНСЬКА, М.В. БАРАБАН, М.А. ФІЛІНЮК

ЕФЕКТИВНІСТЬ КОМБІНОВАНИХ КЕРОВАНИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА ОСНОВІ ОДНОКРИСТАЛЬНОГО УЗАГАЛЬНЕНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ІММІТАНСУ

*Вінницький національний технічний університет
Хмельницьке шосе 95, 21021, м. Вінниця, Україна,
тел. 0432-598075, e-mail: L_Fill@mail.ru*

Анотація. Розроблено теорію оцінки ефективності комбінації двохелектродних керованих елементів з узагальненими перетворювачами іммітансу та досліджено ефективність таких елементів на основі однопереїдної транзисторної структури.

Аннотация. Разработана теория оценки эффективности комбинированных двухэлектродных управляемых элементов с обобщенными преобразователями иммитанса и исследована эффективность таких элементов на основе однопереїдной транзисторной структуры.

Abstract. The theory of assessment of the effectiveness of combination two-electrodes managed elements with generalized transformers of the immitance is developed and the efficiency of such elements based on the unijunction transistor structure is investigated.

Ключові слова: керований елемент, узагальнений перетворювач іммітансу, однопереїдна транзисторна структура.

ВСТУП

В системах автоматики знаходять застосування двохелектродні керовані елементи (КЕ) значення іммітансу яких залежить від керованого чинника F_y . Характерним прикладом таких КЕ є варикапи, ємність C_B яких залежить від керованої напруги U_K , та р-і-п діоди, активний опір яких r_i залежить від керованого струму I_K [1]. Ефективність варикапів характеризується коефіцієнтом перекриття по ємності $K_C = C_{B\max} / C_{B\min}$, а р-і-п діода – “якістю” $K_r = r_{i\max} / r_{i\min}$. Чим більші ці параметри, тим ширше діапазон керування.

Підвищити ефективність таких КЕ, а також розширити їх якісні характеристики можна шляхом комбінації двохелектродних КЕ з узагальненими перетворювачами іммітансу (УПІ) [2]. Проте оцінити ефективність таких комбінованих КЕ з допомогою вище перелічених критеріїв неможливо, так як, вони не дозволяють враховувати зміну знаку реактивної і активної складової перетворюючого іммітансу, та не враховують вплив параметрів УПІ на ефективність КЕ.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Виходячи з вище проведеного аналізу ціллю роботи є дослідження ефективності комбінованих КЕ на основі двохелектродних КЕ і однокристальних УПІ.

Для досягнення поставленої цілі рішаються наступні задачі:

1. Формулюються вимоги до критеріїв оцінки ефективності комбінованих КЕ на основі УПІ.
2. Здійснюється аналітичне визначення критеріїв враховуючих параметри УПІ та варикапа.
3. Досліджується ефективність КЕ на основі комбінації варикапа і однокристального УПІ, який використовує однопереїдну транзисторну структуру.

ФОРМУВАННЯ ВИМОГ ДО КРИТЕРІЇВ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ КОМБІНОВАНИХ КЕ НА ОСНОВІ УПІ

Будь-який критерій ефективності повинен відображати основну цільову функцію пристрою. Для досліджених КЕ, це можливий діапазон зміни перетвореного іммітансу УПІ. Чим ширше цей діапазон і менше величина керованого чинника тим вище ефективність КЕ. Крім того критерій ефективності повинен відповідати цілому ряду вимог, основні з яких сформовані в [3]. А саме:

- повинні мати явний фізичний зміст;
- бути нормованими;
- повинні мати потенційну межу.

Крім того, враховуючи специфіку об'єкту дослідження, ці критерії ефективності повинні враховувати вплив на величину ефективності як параметрів двохелектродного КЕ, так і УПІ.

АНАЛІТИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ КРИТЕРІЇВ

В загальному випадку комбінований КЕ представляє чотирьохполюсник, який володіє властивостями УПІ, по входу або по виходу якого підключається двохелектродний КЕ перетворюючий іммітанс якого (W_{Γ} або W_H) перетворюється в перетворений іммітанс $W_{вих}(W_{вх})$ (рис. 1).

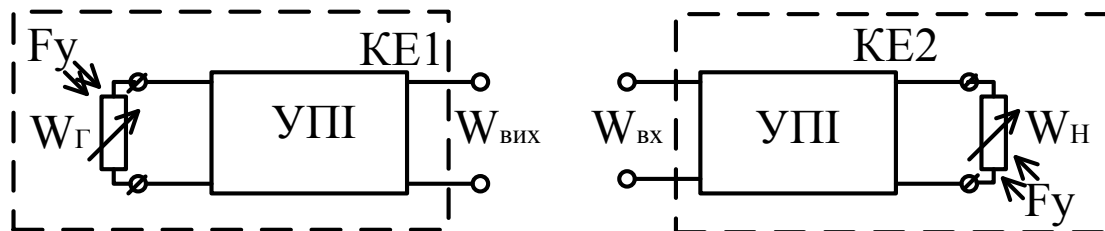


Рис. 1. Узагальнені схеми комбінованих КЕ на основі УПІ

В малосигнальному режимі УПІ володіє лінійними властивостями і його перетворений іммітанс рівний [2]:

$$W_{вих} = \text{Re} W_{вих} + j \text{Im} W_{вих} = W_{22} - W_{12}W_{21} / (W_{11} + W_{\Gamma}), \quad (1)$$

$$W_{вх} = \text{Re} W_{вх} + j \text{Im} W_{вх} = W_{11} - W_{12}W_{21} / (W_{22} + W_H); \quad (2)$$

де: W_{11} , W_{22} , W_{12} , W_{21} – параметри іммітансної матриці УПІ.

Як слідує з (1), в відповідності з конформним відображенням, на комплексній площині залежність $W_{вих} = f(W_{\Gamma})$ представляє окружність з максимальним радіусом [2]:

$$p_{вих} = |W_{12}W_{21}| / \text{Re}(W_{22} + W_{\Gamma}) \quad (3)$$

і координатами центра:

$$\text{Re} W_o = \text{Re} W_{22} - \text{Re}(W_{12}W_{21}) / 2 \text{Re} W_{11}; \quad (4)$$

$$\text{Im} W_o = \text{Im} W_{22} - \text{Im}(W_{12}W_{21}) / 2 \text{Im} W_{11}. \quad (5)$$

Аналогічно описується залежність $W_{вх} = f(W_H)$.

В [2] для оцінки ефективності УПІ при реалізації розглянутого комбінованого КЕ сформовані вимоги до УПІ:

1. Ідеальний УПІ використаний при реалізації КЕ має іммітансну окружність з центром в початку координат. Відхилення центру іммітансної окружності від початку координат веде до погіршення ефективності КЕ.

2. Ефективність КЕ вища, чим більше радіус іммітансної окружності p .

Виходячи з цих вимог ефективності УПІ, використаного в комбінованих КЕ, запропоновано оцінювати коефіцієнтом:

$$K1 = p_{вих} / p_{\max} [(1 + |\beta_R|)(1 + |\beta_X|)], \quad (6)$$

де:

$$\beta_x = \text{Im} W_o / p_{вих}; \quad \beta_R = \text{Re} W_o / p_{вих}, \quad (7)$$

P_{\max} – максимальний радіус вхідної або вихідної іммітансної окружності, при цьому $0 \leq K1 \leq 1$.

З (3) слідує, що максимальне значення $P_{вих}$, а відповідно і $K1$, досягається при чисто реактивному перетворюючому іммітансу, коли $\text{Re}W_{\Gamma}=0$. При цьому більшою ефективністю буде володіти такий КЕ на основі УПІ, у якого більшому діапазону зміни дійсної $R_{\max} = \text{Re}(W_{вих\max} - W_{вих\min})$ або уявної $X_{\max} = \text{Im}(W_{вих\max} - W_{вих\min})$ складових перетвореного іммітансу буде відповідати менше значення зміни уявної $X_{opt} = \text{Im}(W_{\Gamma\max} - W_{\Gamma\min})$ складової перетворюючого іммітансу, що в значній мірі залежить від положення діаметра іммітансної окружності (рис. 2) і кількісно можна характеризувати коефіцієнтами оптимальної крутизни перетворення [2]:

$$S_{X_{opt}}^{R_{\max}} = \text{Im}(W12W21) / 2 \text{Re}W11\text{Re}W22 ; \quad (8)$$

$$S_{X_{opt}}^{X_{\max}} = \text{Re}(W12W21) / 2 \text{Re}W11\text{Re}W22 . \quad (9)$$

Враховуючи, що діапазон зміни цих коефіцієнтів лежить в межах $(0-\infty)$, для приведення його до діапазону $(0-1)$, представимо коефіцієнти оптимальної ефективності положення осі іммітансної окружності в вигляді:

для КЕ з керованою дійсною складовою перетвореного іммітансу

$$K2 = 2 \arctg S_{X_{opt}}^{R_{\max}} / \pi ; \quad (10)$$

для КЕ з керованою уявною складовою перетвореного іммітансу

$$K3 = 2 \arctg S_{X_{opt}}^{X_{\max}} / \pi ; \quad (11)$$

Коефіцієнти $K1-K3$ змінюється в діапазоні $(0-1)$ і характеризують ефективність УПІ який входить в склад комбінованого КЕ.

Будь-який двохелектродний КЕ володіє як дійсною $\text{Re}W_{\Gamma}$ так і уявною $\text{Im}W_{\Gamma}$ складовими іммітансу, який перетворюється в іммітанс $W_{вих}$ який також має як дійсну так і уявну складові. Тому діапазон зміни перетвореного іммітансу, будемо характеризувати нормованими коефіцієнтами перекриття КЕ виду:

– по дійсній складовій:

$$K4 = K_R = |\text{Re}(W_{вих1} - W_{вих2})| / 2P_{вих} ; \quad (12)$$

– по уявній складовій:

$$K5 = K_X = |\text{Im}(W_{вих1} - W_{вих2})| / 2P_{вих} , \quad (13)$$

де $W_{вих1}$ і $W_{вих2}$ – значення перетвореного іммітансу, який відповідає крайнім приведеним значенням $\overline{W}_{\Gamma1}$ і $\overline{W}_{\Gamma2}$ перетворюючого іммітансу (рис. 2) двохелектродного КЕ.
Діапазон зміни $K4$ і $K5$ аналогічний діапазону зміни $K1-K3$.

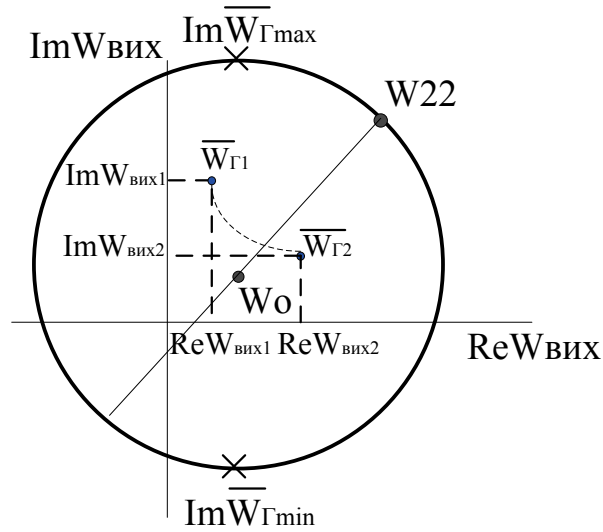


Рис. 2. Імпідансна окружність залежності перетвореного імпідансу $W_{вих}$ УПІ від перетворюючого імпідансу $W_{Г}$

Важливим параметром, який характеризує ефективність системи, утвореної УПІ і двохелектродним КЕ також є величина крутизни зміни стану перетвореного імпідансу $W_{вих}$ від величини складових перетворюючого імпідансу $W_{Г}$ двохелектродного КЕ:

$$\left. \begin{aligned} S_X^X &= \frac{\text{Im}(W_{вих1} - W_{вих2})}{\text{Im}(W_{Г1} - W_{Г2})}; S_R^X = \frac{\text{Im}(W_{вих1} - W_{вих2})}{\text{Re}(W_{Г1} - W_{Г2})} \\ S_X^R &= \frac{\text{Re}(W_{вих1} - W_{вих2})}{\text{Im}(W_{Г1} - W_{Г2})}; S_R^R = \frac{\text{Re}(W_{вих1} - W_{вих2})}{\text{Re}(W_{Г1} - W_{Г2})} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Для оцінки ефективності КЕ по крутизни в діапазоні (0–1), на основі (14) отримаємо коефіцієнти ефективності виду:

$$\left. \begin{aligned} K6 &= 2\arctg S_R^R / \pi; K7 = 2\arctg S_R^X / \pi \\ K8 &= 2\arctg S_X^R / \pi; K9 = 2\arctg S_X^X / \pi \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Отримані коефіцієнти ефективності K1-K9 дозволяють шляхом їх комбінації отримати аналітичні вирази критеріїв ефективності розглянутих КЕ на основі УПІ в залежності від пред'явлених до них вимог. Найбільш характерними вимогами є:

отримання найбільш ефективного керування дійсною складовою перетвореного імпідансу, що описується критерієм

$$E_R = (K1 \times K2 \times K4 \times K8 \times K6)^{1/5}; \quad (16)$$

отримання найбільш ефективного керування уявною складовою перетвореного імпідансу, що описується критерієм

$$E_X = (K1 \times K3 \times K5 \times K9 \times K7)^{1/5}. \quad (17)$$

З врахування діапазону зміни нормованих значень коефіцієнта ефективності K_i , діапазон зміни значень критеріїв (16) і (17) лежить в межах (0–1), що відповідає сформованим вимогам і забезпечує можливість проведення порівняльної оцінки КЕ на основі різних видів УПІ.

Приведені аналітичні вирази отримані для випадку підключення двохелектродного КЕ на вхід УПІ. З врахуванням схожості виразів (1) і (2) вони справедливі і для випадку підключення двохелектродного КЕ на вихід УПІ при умові виконання заміни $W_{11} \rightarrow W_{22}$, $W_{22} \rightarrow W_{11}$, $W_{Г} \rightarrow W_{H}$.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КЕ НА ОСНОВІ ОДНОПЕРЕХІДНОЇ ТРАНЗИСТОРНОЇ СТРУКТУРИ

Одноперехідною транзисторною структурою володіють одноперехідні транзистори (ОТ) і польові транзистори (ПТ) з р-п переходом при прямому зміщенні затвора. На основі ОТ можна реалізувати три види УПІ з загальною: першою базою (Б1) та з другою базою (Б2), з загальним емітером (ЗЕ). При підключенні до таких УПІ наприклад, варикапа, можлива реалізація 6-ти видів комбінованих КЕ (рис. 3)

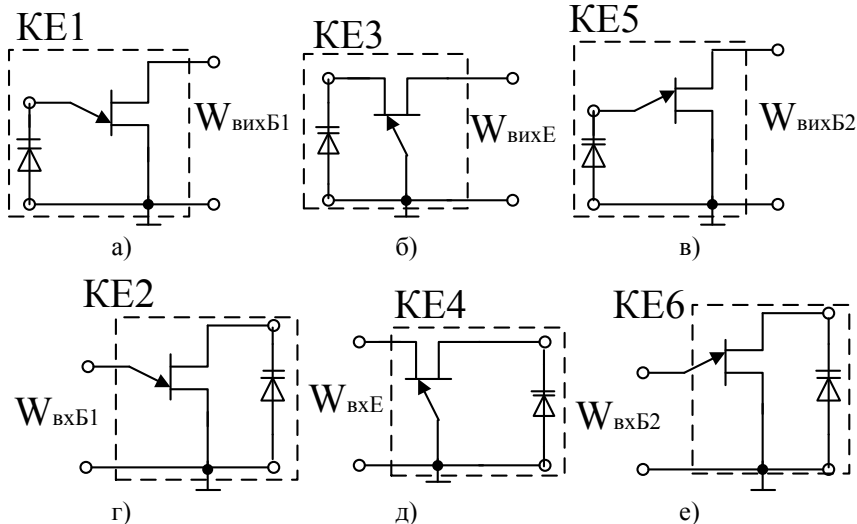


Рис. 3. Високочастотні схеми комбінованих КЕ на основі ОТ і варикапа

Дослідження ефективності таких КЕ проводилося за 20 параметрами, описаними виразами (3-17) при коефіцієнті підсилення по струму $\beta=0,9$ (табл. 1) та $\beta=4$ (табл. 2) числові значення яких занесенні до таблиць.

Таблиця 1.

Значення коефіцієнтів ефективності комбінованого КЕ на основі ОТ і варикапа при $\beta=0,9$

Параметри	ОЕвих	ОЕвх	ОБ2вих	ОБ2вх	ОБ1вих	ОБ1вх
P	$4.495 \cdot 10^{-4}$	$8.905 \cdot 10^{-3}$	$9.337 \cdot 10^{-4}$	0.178	$3.405 \cdot 10^{-3}$	0.033
β_x	5.694	1	1.335	1	0.249	0.157
β_R	1.096	1.096	0.063	0.063	0.991	0.991
K1	0.071	0.239	0.403	0.47	0.402	0.434
$S_{X,opt}^R$	1.24	1.24	2.608	2.608	0.049	0.049
$S_{X,opt}^X$	0.444	0.444	0.827	0.827	0.501	0.501
K2	0.568	0.568	0,767	0,767	0.031	0.031
K3	0,266	0.266	0.44	0.44	0.296	0.296
K4	$2.89 \cdot 10^{-3}$	$6.513 \cdot 10^{-3}$	$1.316 \cdot 10^{-3}$	$8.425 \cdot 10^{-3}$	$1.653 \cdot 10^{-3}$	0.021
K5	0.022	$8.35 \cdot 10^{-3}$	$1.981 \cdot 10^{-3}$	$8.108 \cdot 10^{-3}$	$1.703 \cdot 10^{-3}$	$8.2 \cdot 10^{-3}$
S_X^X	0.212	1.578	0.039	30.624	0.123	5.728
S_R^X	0.159	1.185	0.029	22.998	0.092	4.301
S_R^R	0.021	0.924	0.02	23.896	0.09	10.996
S_X^R	0.028	1.23	0.026	31.82	0.119	14.643
K6	0,133	0,64	0,025	0,979	0,078	0,89
K7	0,1	0,554	0,018	0,972	0,058	0,855
K8	0,013	0,475	0,013	0,973	0,057	0,942
K9	0,018	0,565	0,017	0,98	0,075	0,957
E_R	0.046	0.193	0.042	0.311	0.039	0.188
E_X	0.06	0.175	0.04	0.276	0.062	0.244

Таблиця 2.

Значення коефіцієнтів ефективності комбінованого КЕ на основі ОТ і варикапа при $\beta=4$

Параметри	ОЕвих	ОЕвх	ОБ2вих	ОБ2вх	ОБ1вих	ОБ1вх
P	$3,5 \cdot 10^{-6}$	$9,3 \cdot 10^{-3}$	$2,13 \cdot 10^{-4}$	0,188	$5,09 \cdot 10^{-3}$	$1,69 \cdot 10^{-3}$
β_x	30,5	1	0,475	1	0,034	0,096
β_R	1,041	1,041	0,034	0,034	0,997	0,997
K1	0,029	0,245	0,656	0,484	0,484	0,457
$S_{X,opt}^{Rmax}$	0,921	0,921	55,334	55,334	0,018	0,018
$S_{X,opt}^{Xmax}$	0,04	0,04	2,864	2,864	0,501	0,501
K2	0,474	0,474	0,988	0,988	0,011	0,011
K3	0,025	0,025	0,786	0,786	0,295	0,295
K4	$9,48 \cdot 10^{-3}$	0,05	0,028	0,049	0,04	0,012
K5	0,012	0,029	0,039	0,03	0,027	$9,38 \cdot 10^{-3}$
S_X^X	$9,266 \cdot 10^{-5}$	5,81	0,178	117,811	2,903	0,338
S_R^X	$6,998 \cdot 10^{-5}$	9,894	0,124	196,884	4,307	0,432
S_R^R	$5,255 \cdot 10^{-5}$	7,43	0,093	148,849	3,234	0,325
S_X^R	$6,959 \cdot 10^{-5}$	4,363	0,134	88,469	2,18	0,254
K6	$3,345 \cdot 10^{-5}$	0,915	0,059	0,996	0,809	0,2
K7	$4,455 \cdot 10^{-5}$	0,936	0,079	0,997	0,855	0,26
K8	$4,43 \cdot 10^{-5}$	0,857	0,085	0,993	0,726	0,158
K9	$5,899 \cdot 10^{-5}$	0,891	0,112	0,995	0,789	0,207
E_R	$6,343 \cdot 10^{-3}$	0,34	0,155	0,472	0,167	0,072
E_X	$4,152 \cdot 10^{-3}$	0,172	0,178	0,407	0,304	0,147

Як було зазначено вище, кращу ефективність буде мати та комбінована схема, у якій ці параметри є найвищими. При коефіцієнті підсилення по струму $\beta=0,9$ найбільшим радіусом володітиме схема включення ОТ з спільною другою базою по входу ($0,178 \text{ Ом}^{-1}$ для частоти 5 МГц). Коефіцієнт відхилення центру іммітансної окружності від центру координат K1 найвищий для схема включення ОТ з спільною другою базою по входу. Оптимальна крутизна перетворення складає 2,608 для схеми включення ОТ з спільною другою базою, яка перевищує оптимальну крутизну для схеми з спільною першою базою в 53 рази. Відповідно коефіцієнт оптимальної ефективності K2 для схеми включення ОТ з спільною другою базою становить 0,767. Нормований коефіцієнт перекриття КЕ по уявній складовій K5 для схеми включення ОТ з спільним емітером по виходу рівний 0,022, а по дійсній складовій для схеми з спільною по входу першою базою – 0,021. Найкращими значеннями крутизни зміни складових перетвореного іммітансу до перетворюючого володіє схема включення ОТ з спільною другою базою по входу, а найгіршими – ця сама схема тільки по виході, що й відповідає коефіцієнтам ефективності K6-K9. Найбільше значення ефективності керування дійсною та уявною складовими перетвореного іммітансу складає 0,311 та 0,276 для схеми включення по входу з спільною другою базою, що перевищує мінімальні значення в 7 разів. Як результат найкращою ефективністю володіє схема включення ОТ з спільною другою базою по входу, яка має 20 найвищих значень з 20 параметрів. Схема включення ОТ з спільною першою базою по входу також є конкурентно спроможною. Найменша ефективність схеми включення ОТ з спільною другою базою по виходу.

При значенні коефіцієнта підсилення по струму $\beta=4$, найвищою ефективністю володітиме схема включення по входу з спільною другою базою ($E_R=0,472$), а найменшою ефективністю володітиме схема включення з спільним емітером.

ВИСНОВКИ

Виходячи з властивостей комбінованих КЕ на основі двохелектродних КЕ і УПІ сформовані вимоги до критеріїв оцінки їх ефективності, які відображають можливість зміни діапазону перетвореного іммітансу УПІ при заданому діапазоні зміни іммітансу двохелектродного КЕ та є нормованими, що забезпечує можливість порівняльної оцінки ефективності КЕ.

На відміну від відомих критеріїв, розроблені аналітичні критерії оцінки ефективності забезпечують можливість аналізу і оптимізації комбінованих КЕ з врахуванням параметрів УПІ та двохелектродного КЕ, реалізованих на будь-яких напівпровідникових структурах.

На основі комбінації варикапа і УПІ, який використовує одноперехідну транзисторну структуру, можлива реалізація шести видів комбінованих КЕ. Оцінка їх ефективності показала, що найбільшою ефективністю керування дійсною (при $\beta=0,9 - E_R=0.311$, при $\beta=4 - E_R=0.472$) та уявною (при $\beta=0,9 - E_X=0,276$, при $\beta=0,9 - E_X=0,407$) складовими перетвореного іммітансу володіє КЕ високочастотна схема якого представлена на рис. 3 е.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гусятинер М.С. Полупроводниковые сверхвысокочастотные диоды / М.С. Гусятинер, А.И. Горбачев – М. : Радио и связь. – 1983. – 224 с.
2. Філінюк М.А. Інформаційні пристрої на основі потенційно-нестійких багато електродних напівпровідникових структур Шоттки: монографія. / М.А. Філінюк, О.М. Куземко, Л.Б. Ліщинська. – Вінниця: ВНТУ, 2009. – 274 с.
3. Филинюк Н.А. Аналитические требования к критериям эффективности информационных устройств / Н.А. Филинюк, Ле Туан Ту, Р.А. Анфилов // Контроль і управління в технічних системах. – 1997. – Т. 2. – С. 56-62.

Надійшла до редакції 14.04.2011р.

ЛІЩИНСЬКА ЛЮДМИЛА БРОНІСЛАВІВНА – к.т.н., доцент, пошукач, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.

БАРАБАН МАРІЯ ВОЛОДИМИРІВНА – аспірант кафедри проектування комп'ютерної та телекомунікаційної апаратури, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.

ФІЛІНЮК МИКОЛА АНТОНОВИЧ – д.т.н., професор, завідувач кафедри проектування комп'ютерної та телекомунікаційної апаратури, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.