

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

М. А. Філінюк, М. В. Богомолова

**ОДНОПЕРЕХІДНІ УЗАГАЛЬНЕНІ
ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ІМІТАНСУ
ДЛЯ ЕЛЕМЕНТІВ І ПРИСТРОЇВ
ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2014

УДК 621.314
ББК 31.264.5
Ф53

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 11 від 26.06.2013 р.)

Рецензенти:

Багацький В. О., доктор технічних наук, старший науковий співробітник

Азаров О. Д., доктор технічних наук, професор

Філінюк, М. А.

Ф53 Одноперехідні узагальнені перетворювачі імітансу для елементів і пристроїв інформаційних-вимірювальних систем / М. А. Філінюк, М. В. Богомолова. — Вінниця : ВНТУ, 2014. — 148 с.

ISBN 978-966-641-557-1

У монографії наведено результати розробки та дослідження елементів і пристроїв інформаційно-вимірювальних систем на основі одноперехідних узагальнених перетворювачів імітансу, зокрема, давачів, реактивних елементів, коливальних контурів, керованих елементів тощо. Розглянуто математичні моделі та параметри узагальнених перетворювачів імітансу на одноперехідних транзисторних структурах. Книга розрахована на науковців, аспірантів та інженерів, які займаються розробкою елементів і пристроїв інформаційно-вимірювальних систем.

УДК 621.314
ББК 31.264.5

ISBN 978-966-641-557-1

© М. Філінюк, М. Богомолова, 2014

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	5
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 УЗАГАЛЬНЕНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ІМІТАНСУ ТА ЇХ РЕАЛІЗАЦІЯ.....	7
1.1 Визначення, класифікація і основні параметри узагальнених перетворювачів імітансу	7
1.2 Схемотехнічні узагальнені перетворювачі імітансу	17
1.3 Однокристальні узагальнені перетворювачі імітансу	22
РОЗДІЛ 2 ЕЛЕМЕНТИ ТА ПРИСТРОЇ ІНФОРМАЦІЙНО- ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ З ВИКОРИСТАННЯМ ОДНОПЕРЕХІДНИХ ТРАНЗИСТОРНИХ СТРУКТУР	28
2.1 Ключові схеми на одноперехідних транзисторах	28
2.2 Елементи пам'яті на одноперехідних транзисторних структурах.....	29
2.3 Детектори та зчитувачі на польових транзисторах.....	31
2.4 Підсилювачі та модулі, як базові елементи детекторів з використанням польових транзисторів.....	34
2.5 Сенсори на одноперехідних та польових транзисторах	38
2.6 Генератори на одноперехідних транзисторах.....	44
РОЗДІЛ 3 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТА ПАРАМЕТРИ УЗАГАЛЬНЕНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ІМІТАНСУ НА ОДНОПЕРЕХІДНИХ ТРАНЗИСТОРНИХ СТРУКТУРАХ	49
3.1 Фізична еквівалентна схема та фізичні процеси одноперехідної транзисторної структури.....	49
3.2 Математичні моделі узагальнених перетворювачів імітансу на основі одноперехідної транзисторної структури.....	53
3.3 Параметри узагальнених перетворювачів імітансу на основі одноперехідної транзисторної структури	57
3.4 Параметри узагальненого перетворювача імітансу на польовому транзисторі з керованим р-n-переходом при зміні полярності напруги на затворі.....	62
3.5 Двопараметричні узагальнені перетворювачі імітансу на основі одноперехідної транзисторної структури.....	68

3.6 Похибки перетворення імітансу однокристальних узагальнених перетворювачів імітансу	74
3.7 Таблиці перетворення імітансу узагальнених перетворювачів імітансу із застосуванням одноперехідної транзисторної структури	82
РОЗДІЛ 4 ЕЛЕМЕНТИ ТА ПРИСТРОЇ ІНФОРМАЦІЙНО- ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ ОДНОПЕРЕХІДНИХ УЗАГАЛЬНЕНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ІМІТАНСУ	85
4.1 Дистанційні давачі на базі одноперехідної транзисторної структури	85
4.2 Індуктивні генераторні давачі	98
4.3 Реактивні елементи та активні коливальні контури як елементи інформаційно-вимірювальних пристроїв	103
4.4 Ефективність комбінованих керованих елементів з використанням одноперехідного узагальненого перетворювача імітансу	118
ЛІТЕРАТУРА	128
Додаток А.....	144

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АМ	амплітудна модуляція
БТ	біполярний транзистор
ВАХ	вольт-амперна характеристика
Г	генератор
ДЖ	джерело живлення
ДФВ	давачі фізичних величин
ЕРС	електрорушійна сила
ЕП	елемент пам'яті
ІП	інформаційний пристрій
ОП	операційний підсилювач
ОТ	одноперехідний транзистор
ОТС	одноперехідна транзисторна структура
ПІ	перетворювач імітансу
ПВП	первинний вимірювальний перетворювач
ПТ	польовий транзистор
УПІ	узагальнений перетворювач імітансу

+

ВСТУП

Стрімкий розвиток сучасних технологій та елементної бази привів до широкого різноманіття пристроїв обчислювальної та інформаційно-вимірювальної техніки. Проте часто отримання високих технічних характеристик досягається за рахунок збільшення їх складності, габаритів, маси та вартості. Необхідність вдосконалення пристроїв обчислювальної та інформаційно-вимірювальної техніки обумовлює подальшу розробку теорії побудови та пошук нових принципів їх фізичної реалізації. На сучасному етапі розвитку елементної бази до перспективних слід віднести пристрої з від'ємним диференціальним опором, що пояснюється низкою їх переваг.

Елементи та пристрої, розроблені на основі пристроїв з від'ємним диференціальним опором, дозволяють реалізувати технічні параметри, які не завжди досягаються на класичній елементній базі. Пристрої з від'ємним диференціальним опором також привертають увагу виробників своєю багатofункціональністю. Напрямок електроніки, пов'язаний з теорією та практикою створення і використання пристроїв з від'ємним опором, отримав назву «Негатроніка» [1]. Використання досягнень негатроніки вже в наш час дало результати, які визначають розвиток ряду електронних систем. Тільки напівпровідникових негатронів створено більше двох десятків різновидів.

Значний вклад у розвиток цього напрямку внесли І. Д. Абезгауз, Ф. Бенінг, Д. Ганн, С. А. Гаряїнов, В. П. Дьяконов, Л. Есакі, Ф. Д. Касімов, У. Шоклі та інші. В публікаціях цих вчених узагальнено результати, як теоретичних, так і практичних досліджень різноманітних видів пристроїв з від'ємним опором і їх застосування. Поява нових напівпровідникових структур відкриває нові можливості створення пристроїв з покращеними параметрами. Однією із таких структур є одноперехідний транзистор. Однак аналіз публікацій з його застосуванням показав, що він в основному використовується в «класичному» режимі аналогового ключа, а дослідження потенційної нестійкості в різних схемах включення відсутні, як показано в [2]. Дослідження одноперехідного транзистора як узагальненого перетворювача імітансу відкриває нові можливості для реалізації пристроїв інформаційно-вимірювальної та обчислювальної техніки з покращеними параметрами.

РОЗДІЛ 1

УЗАГАЛЬНЕНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ІМІТАНСУ ТА ЇХ РЕАЛІЗАЦІЯ

1.1 Визначення, класифікація і основні параметри узагальнених перетворювачів імпедансу

Узагальненим перетворювачем імпедансу називається чотириполюсник у якого імпеданс між однією парою виводів є функцією імпедансу підключеного до іншої пари виводів $W_H(W_\Gamma)$. При цьому імпеданс $W_{ex}(W_{vux})$ отримав назву перетворювального імпедансу, а $W_H(W_\Gamma)$ – перетвореного імпедансу (рис. 1.1) [3]. Залежність $W_{ex} = f(W_H)$ – називається прямим перетворенням імпедансу, а $W_{vux} = f(W_\Gamma)$ – зворотним перетворенням імпедансу [138].

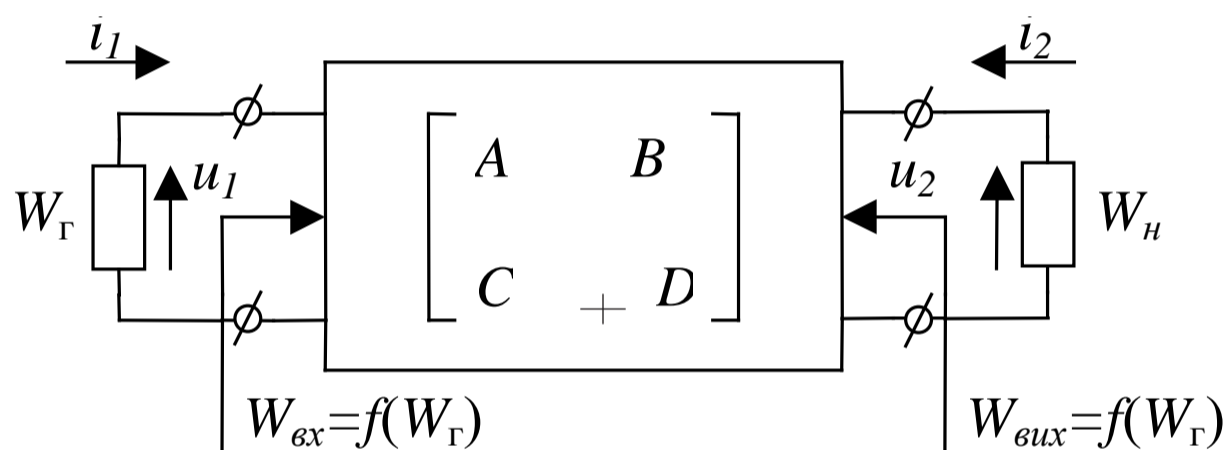


Рисунок 1.1 – Структурна схема узагальненого перетворювача імпедансу

При представленні ОТС у вигляді чотириполюсника вибирають параметри, які характеризують його поведінку. Відомо шість систем рівнянь чотириполюсника: система повних опорів, система повної провідності, система h-параметрів, система g-параметрів, система a-параметрів та система b-параметрів [4]. Останні дві системи використовуються для розподілених структур $W_{ex}(W_{vux})$ та аналізу передачі електричних сигналів по їх ланцюгах, тому вони мають обмежене застосування. Найчастіше використовують три перші системи параметрів, але вони є не рівнозначними. Тому для побудови узагальненої математичної моделі УПІ використано систему імпедансних W-параметрів, де під імпедансом розуміють повний опір (імпеданс), або повну провідність (адмітанс).

Всі види УПІ діляться на два типи: ті, які використовують схемотехнічні рішення для отримання необхідного коефіцієнта перетворення імітансу та ті, які використовують фізичні ефекти твердого тіла.

Розрізняють конвертори та інвертори імітансу. Конвертором імітансу називається чотириполюсник у якого імітанс між однією парою виводів прямо пропорційно залежить від імітансу між іншою парою виводів (рис. 1.2).

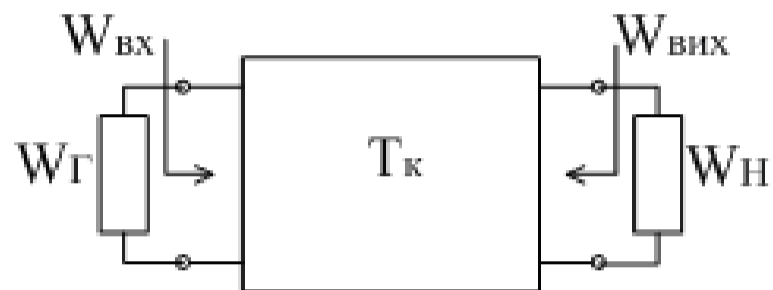


Рисунок 1.2 – Узагальнена схема конвертора імітансу: T_k – коефіцієнт конверсії

Інвертором імітансу називається чотириполюсник у якого імітанс між однією парою виводів обернено пропорційно залежить від імітансу між іншою парою виводів. Для конвертора імітансу, у випадку перетворення повного опору Z_H (пряме перетворення), маємо

$$Z_{Bx} = (A/D)Z_H,$$

де A і D – елементи $ABCD$ ланцюгової матриці перетворювача (в загальному випадку комплексні), які зв'язують струми та напруги на клеммах УПІ (див. рис. 1.1)

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ i_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_2 \\ -i_2 \end{pmatrix}. \quad (1.1)$$

У випадку ідеального конвертора імітансу, матриця (1.1) має вигляд

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ i_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & 0 \\ 0 & D \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_2 \\ -i_2 \end{pmatrix}, \quad (1.2)$$

з якої випливає, що він невзаємний і активний, якщо $AD \neq 1$ [8].

Відношення

$$A/D = T_K \quad (1.3)$$

є коефіцієнтом конверсії прямого перетворення, а величина

$$T_K' = 1/T_K \quad (1.4)$$

є коефіцієнтом конверсії зворотного перетворення імітансу.

В загальному випадку коефіцієнт конверсії – це комплексна величина. В окремому випадку, коли параметри ланцюгової матриці (1.2) є дійсні числа, коефіцієнт конверсії також дійсна величина. Конвертори імітансу, що характеризуються таким коефіцієнтом конверсії, називаються дійсними конверторами імітансу [5].

Якщо параметри ланцюгової матриці (1.2) характеризуються уявними числами, коефіцієнт конверсії також є уявною величиною, а відповідні КІ називаються уявними конверторами імітансу. Ідеальним конвертором імітансу називається чотиріполюсник, коефіцієнт конверсії якого не залежить від імітансу, що перетворюється.

Значення коефіцієнта конверсії T_K не служить повним описом конвертора імітансу, матриця якого має два параметра A і D . В залежності від співвідношення між параметрами A і D , дійсні конвертори імітансу поділяються на п'ять видів.

Інвертором імітансу називається чотиріполюсник, імітанс між однією парою клем якого зворотно-пропорційно залежить від імітансу, що підключається до іншої пари його клем. Наприклад, у випадку перетворення повного опору навантаження Z_H (пряме перетворення) маємо

$$Z_{Bx} = B/CZ_H.$$

Ланцюгова матриця ідеального інвертора імітансу має вигляд

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ i_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & B \\ C & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_2 \\ -i_2 \end{pmatrix}, \quad (1.5)$$

з якої випливає, що інвертор імітансу є невзаємним і активним чотиріполюсником [5].

Відношення

$$B/C = T_I \quad (1.6)$$

є коефіцієнтом інверсії прямого перетворення, а величина $W_I = \sqrt{T_I}$ – імітансом гірації прямого перетворення. В загальному випадку це комплексна величина. В окремому випадку, коли параметри ланцюгової матриці (1.5) є дійсні числа, імітанс гірації – також дійсна величина: опір гірації R_I , при перетворенні повного опору Z_H або провідність гірації G_I , при перетворенні повної провідності Y_H . Інвертори імітансу, які характеризуються дійсним імітансом гірації (R_I або G_I), називаються дійсними інверторами імітансу [5].

Якщо параметри матриці (1.5) характеризуються уявними числами, відповідні інвертори імітансу називаються уявними. Значення коефіцієнта інверсії T_I не слугує повним описом інвертора імітансу, матриця якого (1.5) має два параметри B і C . В залежності від співвідношення між параметрами B і C , дійсні інвертори імітансу поділяються на п'ять видів (рис. 1.3) [6].

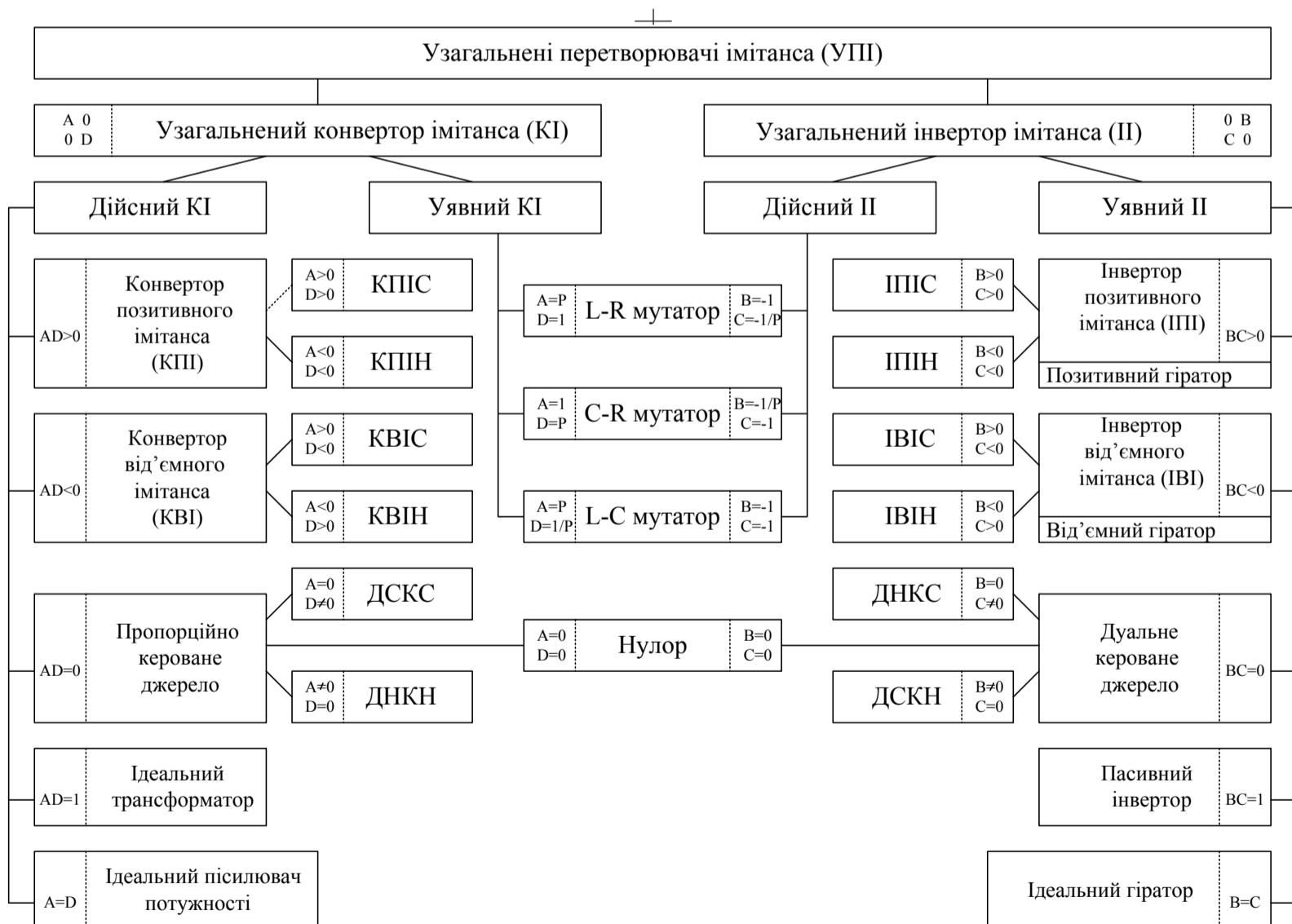


Рисунок 1.3 – Основні види узагальнених перетворювачів імітансу

За допомогою дійсних і уявних перетворювачів імітансу можна реалізувати, в якості вхідних функцій або функцій передачі, будь-який раціональний дріб з дійсними коефіцієнтами і довільним співвідношенням величин чисельника та знаменника [5]. В діапазоні низьких частот при розв'язанні цих задач використовується математична модель УПІ, що складається з коефіцієнта перетворення імітансу T і чутливості якості цього коефіцієнта до зміни параметрів α_I УПІ – $S_{\alpha_I}^T$. При цьому, як правило, передбачається, що коефіцієнт перетворення імітансу є дійсною (як правило рівною 1 або -1), або уявною величиною. Але при практичному використанні УПІ в ІП необхідна не тільки реалізація заданої функції, але й забезпечення визначених експлуатаційних вимог щодо стійкості, рівня шуму, коефіцієнта передачі й т. п. Вибір виду та типу УПІ в даному випадку не може бути виконаний тільки за коефіцієнтом перетворення та «якістю», а необхідно використовувати математичну модель, яка враховує систему робочих параметрів. Основні вимоги до такої моделі містяться в її повноті та точності, тобто вона повинна бути достатньою для визначення основних експлуатаційних параметрів УПІ, з достатньою для проектування ІП точністю, а також в її об'єктивності, тобто кожний параметр цієї моделі повинен бути вимірним або розрахунковим, виходячи з реальних початкових умов. Крім цього, з інженерної точки зору параметри цієї моделі повинні узгоджуватися (або визначатися за допомогою них) з класичними системами параметрів (наприклад Y, Z, S і т. п.), які використовуються при розрахунку інших видів електронних пристроїв.

Виходячи з перелічених вимог, пропонується така система робочих параметрів УПІ [3]:

прямий коефіцієнт перетворення – T ;

зворотний коефіцієнт перетворення – T' ;

похибка перетворення – γ_T ;

інваріантний коефіцієнт стійкості – $K_{свн}$;

гранична частота – f_T ;

чутливість коефіцієнта перетворення – $S_{\alpha_I}^T$;

максимально досяжний коефіцієнт стійкої передачі по

потужності – K_{ms} ;

коефіцієнт невзаємності – K_H ;

максимально досяжне значення від'ємної дійсної

складової перетвореного імітансу – $\text{Re}W_{\max}^{(-)}$;

оптимальна частота перетворення – f_{opt} ;

мінімально досяжне значення коефіцієнта шуму – $F_{u \min}$;

ефективність – E .

Кожен з вище перелічених параметрів може бути виражений через параметри узагальненої W -матриці чотириполюсника.

В зв'язку з тим, що всі види УПІ підрозділяються на конвертори і інвертори імітансу, їх коефіцієнти перетворення мають різний вигляд. Для конвертора імітансу, виходячи з визначення, при перетворенні імітансу навантаження W_H в вхідний імітанс, коефіцієнт прямого перетворення $T_K = W_{Bx}/W_H$ і називається коефіцієнтом прямої конверсії імітансу. При перетворенні імітансу генератора W_Γ у вихідний імітанс W_{Bux} , маємо коефіцієнт зворотного перетворення $T_K' = W_{Bux}/W_\Gamma$. Якщо коефіцієнт перетворення імітансу не залежить від імітансу, що перетворюється, то такий УПІ називається ідеальним [5]. Враховуючи, що вхідний і вихідний імітанси лінійного чотириполюсника зв'язані з параметрами його W -матриці співвідношеннями [5]:

$$W_{Bx} = W_{11} - W_{12}W_{21}/(W_{22} - W_H); \quad (1.7)$$

$$W_{Bux} = W_{22} - W_{12}W_{21}/(W_{11} - W_\Gamma). \quad (1.8)$$

Виходячи з (1.7) і (1.8), необхідні вимоги для реалізації ідеального узагальненого конвертора імітансу мають вигляд

$$\Delta W = 0; \quad (1.9)$$

$$W_{22} \gg W_H; \quad (1.10)$$

$$W_{11} \gg W_\Gamma. \quad (1.11)$$

В даному випадку прямий і зворотний коефіцієнти конверсії УПІ визначаються виразом (1.12) і (1.14) в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Параметри узагальненого перетворювача імітансу

Найменування параметра	Розрахункова формула	Номер формули
Прямий коефіцієнт перетворення імітансу W_H : для конвертора – для інвертора –	$T_K = W_{Bx}/W_H = W_{11}/W_{22}$, при $\Delta = 0$, $W_{22} \gg W_{11}$	(1.12)
	$T_I = W_{Bx}/W_H = -W_{12}/W_{21}$, при $W_{11} = W_{22} = 0$	(1.13)
Зворотний коефіцієнт перетворення імітансу: для конвертора – для інвертора –	$T'_K = W_{Bux}/W_\Gamma = W_{22}/W_{11}$, при $\Delta = 0, W_{11} \gg W_{22}$	(1.14)
	$T'_I = W_{Bux}/W_\Gamma = -W_{12}/W_{22}$, при $W_{11} = W_{22} = 0$	(1.15)
Похибка перетворення	$\gamma_T = (T - T_P)/T_P$, при $W_H = \text{Im}W_{H \text{ opt}}$, $W_\Gamma = \text{Im}W_{\Gamma \text{ opt}}$	(1.16)
Інваріантний коефіцієнт стійкості	$K_{CBH} = \frac{2 \text{Re}W_{11} \text{Re}W_{22} - \text{Re}(W_{12}W_{21})}{ W_{12}W_{21} }$	(1.17)
Гранична частота	$f_T (K_{CBH} = 1)$	(1.18)
Чутливість коефіцієнта перетворення імітансу	$S_{\alpha_I}^T = \frac{\partial T}{\partial \alpha_I} \frac{\alpha_I}{T}$	(1.19)
Максимально досяжний коефіцієнт стійкості за потужністю	$K_{MS} (K_{CBH} = 1) = W_{21}/W_{12} $	(1.20)
Коефіцієнт невзаємності: -потенційно-стійкого УПІ – -потенційно-нестійкого УПІ –	$K_H (K_{CBH} > 1) = W_{21}/W_{12} ^2 = K_{MS}^2$,	(1.21)
	$K_H (K_{CBH} < 1) = \text{Re}W_{22}/\text{Re}W_{11}$	(1.22)

Максимально досяжне значення від'ємної дійсної складової перетвореного імпедансу: при прямому перетворенні – при зворотному перетворенні –	$\operatorname{Re}W_{MAX}^{(-)} Bx = W_{12}/W_{21} (1 - K_{CBH})/2 \operatorname{Re}W_{22} \quad (1.23)$ $\operatorname{Re}W_{MAX}^{(-)} Bx = W_{12}/W_{21} (1 - K_{CBH})/2 \operatorname{Re}W_{11} \quad (1.24)$	
Оптимальна частота перетворення імпедансу	$f_{opt} (\partial \operatorname{Re}W_{MAX}^{(-)} / \partial f = 0)$	(1.25)
Мінімально досяжне значення коефіцієнта шуму	$F_{Ш MIN} = F_{Ш} (W_{\Gamma} = W_{opt})$	(1.26)
Ефективність	$E = \left(\prod_{i=1}^n \eta_i^{\alpha_i} \right)^{1/n}$	(1.27)

За визначенням перетворюваний імпеданс W_H узагальненого інвертора імпедансу, пов'язаний з перетвореним імпедансом W_{Bx} співвідношенням $W_{Bx} = T_I / W_H$, де T_I – коефіцієнт прямої інверсії імпедансу. З (1.7) і (1.8) випливає, що для реалізації ідеального узагальненого інвертора імпедансу необхідно забезпечити виконання умов: $W_{11} = 0$, $W_{22} = 0$.

В цьому випадку прямий T_I і зворотний T_I' коефіцієнти інверсії УПІ визначаються виразами (1.13) і (1.15). В випадку невиконання знайдених умов, коефіцієнт перетворення залежить від перетворюваного імпедансу, що вносить в процес перетворення похибку. Для оцінки величини цієї похибки використовується коефіцієнт (1.16), який визначається при значенні перетворюваного імпедансу, яке забезпечує мінімальнодосяжне значення дійсної складової перетвореного імпедансу ($W_H = \operatorname{Im}W_{Hopt}$ – для прямого перетворення імпедансу, $W_{\Gamma} = \operatorname{Im}W_{\Gamma opt}$ – для зворотного перетворення імпедансу).

Властивість УПІ синтезувати від'ємний дійсний імітанс $\text{Re}W^{(-)}$ може привести до його нестійкості. Кількісно оцінити потенційну нестійкість УПІ можна за допомогою інваріантного коефіцієнта стійкості [5], який визначається виразом (1.17), справедливим при умовах, одержаних А. А. Куліковським при виведенні імітансного критерію стійкості [5]:

$$1) \text{Re}W_{11} > 0, \text{Re}W_{22} > 0;$$

2) УПІ стійкий при підключенні до його клем нескінчених імітансів ($W_G = \infty, W_H = \infty$) при цьому характеризується такою W -матрицею, що розмірності імітансів W_{11} і W_{22} збігаються відповідно з розмірностями вказаних нескінчених імітансів.

Коли $K_{CBH} > 1$, УПІ абсолютно стійкий при будь-яких значеннях імітансів W_G і W_H . В цьому випадку УПІ не може забезпечити компенсацію дисипативних втрат в схемі, що обмежує його функціональні можливості.

Однією з вимог, які висуваються до УПІ, є постійність коефіцієнта перетворення. Тому найважливішим критерієм для порівняння різних видів УПІ є чутливість його коефіцієнта перетворення T до зміни α_I параметрів УПІ, що одержала назву «якість перетворювача». Чим менша чутливість УПІ, тим вища його якість. Найбільше практичне значення одержала логарифмічна чутливість коефіцієнта перетворення T до зміни параметра α_I УПІ. Вона розраховується за допомогою виразу (1.19) [5].

В залежності від співвідношення параметрів УПІ, він може як підсилювати сигнал, так і вносити затухання. Кількісно цю властивість УПІ характеризує його максимальнодосяжний коефіцієнт передачі за потужністю на межі стійкості K_{MS} , який визначається виразом (1.20) [5]. Також як і інваріантний коефіцієнт стійкості K_{CBH} , коефіцієнт K_{MS} залежить тільки від параметрів узагальненої W -матриці УПІ і визначається номінальним коефіцієнтом прямої передачі УПІ за потужністю $K_{ном21}$ [5].

$$K_{ном21} = K_{MS} \left(K_{CBH} - \sqrt{K_{CBH}^2 - 1} \right). \quad (1.28)$$

Аналогічно визначається номінальний коефіцієнт $K_{ном12}$ зворотної передачі УПІ за потужністю

$$K_{ном12} = K_{MS}^{-1} \left(K_{CBH} - \sqrt{K_{CBH}^2 - 1} \right). \quad (1.29)$$

Відношення (1.28) до (1.29) характеризує невзаємні властивості УПІ в області їх потенційної стійкості, що оцінюються коефіцієнтом невзаємності $K_H (K_{CBH} > 1)$ (1.21). З виразу (1.21) випливає, що у випадку потенційно стійкого УПІ, його коефіцієнт невзаємності дорівнює квадрату від максимально досяжного коефіцієнта стійкості підсилення.

Для потенційно нестійких УПІ ($K_{CBH} < 1$), їх двостороннє узгодження неможливе [31] і поняття $K_{ном}$ не має змісту. В цьому випадку УПІ характеризується максимально досяжним значенням від'ємного дійсного імітансу $\text{Re}W_{MAX}^{(-)}$, який показує яку максимальну величину дисипативних втрат (виражених в одиницях імітансу) може компенсувати цей УПІ.

Чутливість і динамічний діапазон ІІ значною мірою визначаються його шумовими властивостями, які залежать від шумових властивостей УПІ. При включенні його в схему як чотиріполюсника шумові властивості УПІ оцінюються значенням мінімально досяжного коефіцієнта шуму $F_{Ш MIN}$ (1.26), який залежить тільки від параметрів УПІ і відповідає коефіцієнту шуму УПІ при оптимальній провідності генератора $Y_{GF} = \text{Re}Y_{GF} + j \text{Im}Y_{GF}$.

Розглянуті параметри описують УПІ як елемент ІІ. Але і самостійно, без додаткових елементів, УПІ потрібно розглядати як ІІ (наприклад, використання його в якості вимірювального перетворювача, елемента керування й т. п.). В цьому випадку його ефективність необхідно оцінювати за допомогою узагальненого критерію ефективності E (1.27). Найбільшу ефективність будуть мати УПІ з великими значеннями граничної частоти f_T , максимально досяжного коефіцієнта стійкої передачі за потужністю K_{MS} , максимально досяжного від'ємного дійсного перетвореного імітансу $\text{Re}W_{MAX}^{(-)}$ оптимальної частоти перетворення f_{opt} і меншим значенням мінімально досяжного коефіцієнта шуму $F_{Ш MIN}$. Вплив інших параметрів УПІ на його ефективність залежать від призначення ІІ.

Таким чином, як випливає з табл. 1.1 [3], параметри УПІ виражаються через параметри його узагальненої W -матриці, яка інваріантна до будь-якої Y -, Z -, h - або g -системи параметрів чотирьохполюсника, що дозволяє розглядати таку систему робочих параметрів УПІ як його узагальнену математичну модель, оскільки вона підходить для аналізу будь-яких видів і типів УПІ незалежно від використаних в них фізичних ефектів, в тому числі для дослідження реальних багатоелектродних напівпровідникових структур.

1.2 Схемотехнічні узагальнені перетворювачі імітансу

В основі схемотехнічних перетворювачів імітансу (ПІ) використовуються схеми, які забезпечують необхідний фазовий зсув між напругою та струмом на вході (виході) схеми. Одержати необхідний фазовий зсув можна або шляхом зміни напрямку струму, або знака напруги, тому ПІ поділяються на перетворювачі імпедансу зі зміною напрямку струму (I-ПІ), та перетворювачі імпедансу зі зміною знака напруги (U-ПІ) [6]. Перетворювачі від'ємного імпедансу будують на активному приладі – підсилювачі, охопленому позитивним зворотним зв'язком. При цьому, як показали Альберт і Гензель, при використанні позитивного послідовного зворотного зв'язку за напругою або позитивного паралельного зворотного зв'язку за струмом реалізуються конвертори від'ємного опору, для яких від'ємний вхідний імпеданс Z_{ex} пропорційний імпедансу навантаження Z_H . При використанні позитивного паралельного зворотного зв'язку за напругою або позитивного послідовного зворотного зв'язку за струмом реалізуються інвертори (гіратори) від'ємного опору, для яких від'ємний вхідний імпеданс Z_{ex} обернено пропорційний імпедансу навантаження Z_H .

За видом зворотного зв'язку ПІ поділяються на ПІ з пасивним зворотним зв'язком та на ПІ з активним зворотним зв'язком. За видом підсилювача ПІ поділяються на ПІ на асиметричному відносно землі підсилювачі, та на ПІ на симетричному відносно землі підсилювачі (мостові схеми ПІ) [6]. В залежності від схеми ПІ можуть мати спадну ділянку на основній характеристиці – статичні ПІ, або працювати лише на змінному струмі в певному діапазоні частот – динамічні ПІ.

Структурну схему ПІ зі зміною напрямку струму і з загальним заземленням [6] зображено на рис. 1.4.

На схемі показано, що вхідний струм I_1 безпосередньо протікає по опору навантаження Z_H і одночасно створює струмопроходження у допоміжному генераторі струму величиною $2I_1$ у вказаному на схемі напрямі. Тоді

$$I_1 = -I_H + 2I_1 \rightarrow I_1 = I_H.$$

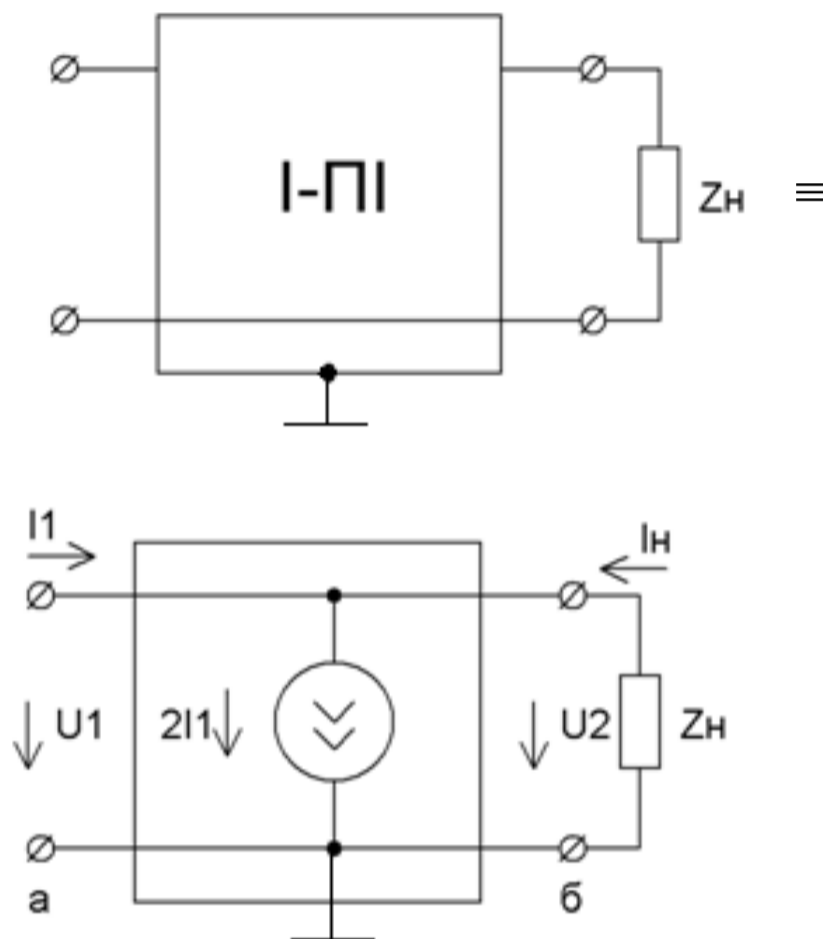


Рисунок 1.4 – Структурна схема асиметричного відносно землі I-III з загальним заземленням затискачів a, b

Таким чином, в схемі вхідний і вихідний струми направлені протилежно, що характерно для III зі зміною напрямку струму. Крім того, якщо вхідна і вихідна напруги однакові ($U_1 = U_2$), то вхідний імпеданс Z_{BX} дорівнює від'ємному імпедансу навантаження Z_H [10]:

$$Z_{BX} = U_1/I_1 = U_2/(-I_H) = -Z_H.$$

Якщо навантаженням є додатний активний опір R_H , то на вході одержуємо від'ємний активний опір $R_{BX}^{(-)} = -R_H$. Якщо навантаженням є додатна ємність C_H , то на вході одержуємо від'ємну ємність $C_{BX}^{(-)} = -C_H$. Якщо навантаженням є додатна індуктивність L_H , то на вході одержуємо від'ємну індуктивність $L_{BX}^{(-)} = -L_H$.

На рис. 1.5 наведена принципова схема ПІ зі зміною полярності напруги та з спільною шиною між входом і виходом. Вхідна напруга U_1 створює на опорі навантаження Z_H вихідну напругу U_2 такої ж величини.

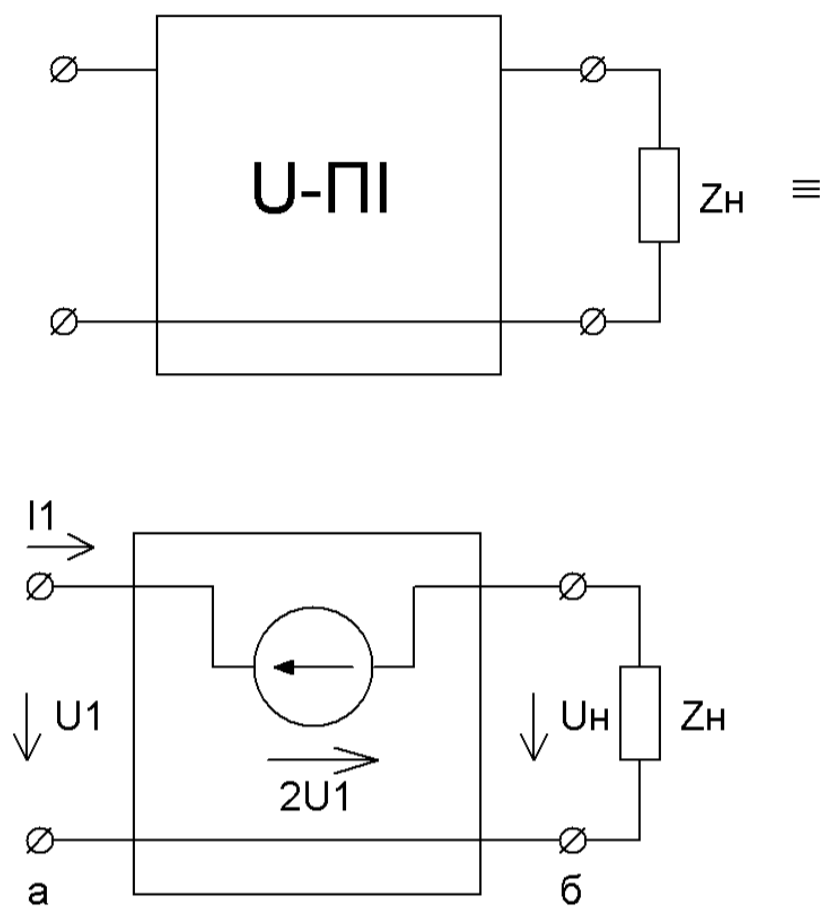


Рисунок 1.5 – Несиметричний відносно землі U-ПІ з спільним заземленням затискачів a і b та його еквівалентна схема

Додатково в регульованому джерелі напруги виникає допоміжна напруга $2U_1$. Вона вдвічі більша за вхідну напругу і має протилежну полярність. В підсумку результуюча вхідна напруга змінює полярність:

$$U_1 = U_H + 2U_1 \rightarrow U_1 = -U_H.$$

Оскільки струми на вході та виході однакові, то вхідний імпеданс $Z_{вх}$ дорівнює від'ємному імпедансу навантаження:

$$Z_{вх} = U_1 / I_1 = -U_H / I_H = -Z_H.$$

Використовуючи ці властивості в схемотехнічних аналогах негatronів вдалося зменшити, а в низці випадків позбутися недоліків, які властиві фізичним негatronам, і синтезувати пристрої з необхідними параметрами. Але схемотехнічні аналози негatronів є більш громіздкими в порівнянні з фізичними негatronами, так як в них використову-

ється більша кількість елементів. Низка технічних параметрів синтезованих негатронів (наприклад, таких як верхня робоча частота, динамічний діапазон та інші) обмежується параметрами використовуваних транзисторів та паразитними зв'язками [6].

В якості підсилювача в ПІ можуть використовуватися різні активні прилади: електровакуумні лампи, напівпровідникові біполярні та польові транзистори, операційні підсилювачі (ОП).

Історично першими на напівпровідникових приладах були запропоновані схеми ПІ на біполярних транзисторах (50 – 60 рр. ХХ ст.) [6]. Раніше були відомі реалізації ПІ на базі електронно-вакуумних ламп [6]. В кінці 60-х років на початку 70-х років ХХ ст. з'явилися схеми ПІ на (ОП) [6]. В цей же час з'являється новий елемент – конвеєр струму, та схеми ПІ на його основі [6]. Однак на той час цей напрямок не набув широкого розвитку, бо основна увага дослідників та виробників вже була зосереджена на ОП. В 70-і роки ХХ ст. відбувається стрімкий розвиток польових транзисторів, що виявляють ряд відомих переваг, з'являються схеми ПІ на польових транзисторах [6]. В 90-і роки ХХ ст. переважною технологією виготовлення цифрових мікросхем стає КМОН (CMOS) технологія і починається її бурхливий розвиток. Відроджується струмовий підхід до побудови схем і знову увагу до себе привертають струмові конвеєри.

Конвеєр струму є базовим блоком, аналогічним до операційного підсилювача, але працює зі струмами. На базі конвеєрів струму можна реалізувати всі схеми, що реалізується на ОП (масштабні перетворювачі, інтегратори, диференціатори, суматори, конвертори та інвертори опорів тощо) [6].

Струмовий підхід забезпечує певні переваги порівняно з роботою з напругами: більшу швидкодію та частотний діапазон, бо схеми можуть працювати на частотах до f_T транзисторів; непотрібно забезпечувати великі значення коефіцієнтів підсилення, тому що для струмових конвеєрів коефіцієнт передачі струму дорівнює одиниці; більшу точність, бо не потребують використання прецизійних резисторів для перетворення струмів у напруги і схеми можуть бути побудовані лише на транзисторах; меншу споживану потужність оскільки в цьому випадку схеми менш чутливі до нелінійних спотворень, що виникають при роботі з малими напругами.

ЛІТЕРАТУРА

1. Филинюк Н. Краткий исторический обзор развития научного направления «Негатроника» / Николай Филинюк. – Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 1999. – № 3. – С. 38–43.
2. Ліщинська Л. Б. Багатопараметричні узагальнені перетворювачі імпедансу на основі одно кристальних напівпровідникових структур / Л. Б. Ліщинська. – Вінниця : ВНТУ, 2012. – 244 с.
3. Філінюк М. А. Активні УВЧ та НВЧ фільтри : монографія / М. А. Філінюк, Л. Б. Ліщинська. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 396 с.
4. Спиридонов Н. С. Основы теории транзисторов / Н. С. Спиридонов – Техніка. – 1975. – 360 с.
5. Філінюк М. А. Основи негатроніки. Теоретичні аспекти / М. А. Філінюк. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – 306 с.
6. Лазарев О. О. Аналіз схемотехнічних реалізацій негатронів на перетворювачах імпедансу / О. О. Лазарев, Л. Б. Ліщинська, О. В. Войцеховська. – Вісник ХНУ, – 2011. – № 6. – С. 49–55.
7. Кобболд Р. Теория и применение полевых транзисторов / Р. Кобболд. – Ленинград : Энергия, 1975. – 304 с.
8. Изьюрова Г. И. Приборы и устройства промышленной электроники / Г. И. Изьюрова, М. С. Кауфман – М. : Высшая школа, 1975.
9. Філінюк М. А. Аналіз і синтез інформаційних пристроїв на базі потенційно-нестійких узагальнених перетворювачів імпедансу / М. А. Філінюк. – Вінниця : ВДТУ, 1998. – 85с.
10. Дьяконов В. П. Энциклопедия устройств на полевых транзисторах / В. П. Дьяконов – М. : СОЛОН-ПРЕСС, 2002. – 512 с.
11. Осадчук В. С. Напівпровідникові прилади з від'ємним опором / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук. – Вінниця : ВНТУ, 2006. – 162 с.
12. Патент Российской Федерации 2031554, МПК6 Н 05 В 39/02. Осветительное устройство / А. Н. Филиппов, А. С. Машков, Н. М. Пушкин ; заявитель и патентообладатель НИИ измерительной техники. – № 5054391/07 ; заявл. 14.07.92 ; опубл. 20.03.95.

13. Патент Российской Федерации 15432, МПК7 Н 02 J 7/10. Устройство для заряда аккумуляторной батареи / Г. Д. Лившин, Д. М. Ременик, В. П. Дмитриев, А. С. Меркулов ; заявитель и патенто-обладатель ООО «КОСМОС-ЭНВО». – № 2000109049/20 ; заявл. 12.04.2000 ; опубл. 10.10.2000.

14. Патент Российской Федерации 1306435, МПК⁶ Н 02 Р 9/30. Тиристорный регулятор напряжения генератора переменного тока / А. В. Нечаев, А. Д. Рябов – № 3828578/07 ; заявл. 20.12.84 ; опубл. 10.09.99.

15. Патент 51719 України, МПК⁶ G 05 F 1/44. Пристрій для регулювання світлового режиму в пташниках / О. М. Берека, Е. Л. Жулай ; заявник та патентовласник Національний аграрний університет. – № 99021126 ; заявл. 26.02.1999 ; опубл. 16.12.2002, Бюл. № 12.

16. Патент 60442 А України, МПК6 Е 21 В 43/25, Е 21 В 47/12. Заглибний свердловинний пристрій / Ю. І. Курашко, М. М. Кліманський, А. Ф. Лазун ; заявник та патентовласник Інститут імпульсних процесів і технологій Національної академії наук України. – № 2002075822 ; Заявл. 15.07.02 ; опубл. 15.10.03, Бюл. №10.

17. Ramkumar K. New static RAM cell based on the unijunction transistor // K. Ramkumar, M. Satyam // International Journal of Electronics. – 1990. – № 68 (2). – P. 195–199.

18. United States Patent, International Classes G11C 17/06. Non-linear conductor memory / Daniel R. Shepard, Nort Hampton – № 11/926,778 ; Filed. 29.10.2007 ; Publ. 30.04.2009.

19. United States Patent, International Classes G11C 11/56. Stacked organic memory devices and methods of operating and fabricating / Nicholas H. Tripsas, Uzodinma Okoroanyanwu, Suzette K. Pangrle, Michael A. VanBuskirk – № 8,003,436 ; Filed. 23.04.2011 ; Publ. 03.12.2008.

20. United States Patent, International Classes G11C 11/56. Planar polymer memory device / Nicholas H. Tripsas, Matthew S. Buynoski,

Okoroanyanwu Uzodinma, Pangrle Suzette K. – № 6,977,389 ; Filed. 02.06.2003 ; Publ. 20.12.2005.

21. Electrical characteristics of neuron oscillation circuits composed of MOSFETs and complementary unijunction transistors / S. M. Yoon, Y. Kurita, E. Tokumitsu, H. Ishiwara // Japanese Journal of Applied Physics, Part 1: Regular Papers and Short Notes and Review Papers. – 1998. – № 37 (3 SUPPL. B). – P. 1110–1115.

22. Ferroelectric neuron circuits with adaptive-learning function / H. Ishiwara, Y. Aoyama, S. Okada, [and other] // Computers and Electrical Engineering. – 1997. – № 23 (6). – P. 431–438.

23. United States Patent, International Classes G11C 11/56. Programmable resistance memory elements / Klersy; Pat – № 8,089,059 ; Filed. 11.11.2010 ; Publ. 03.01.2012.

24. United States Patent. Self-aligned memory cells and method for forming / Dennison; Charles H. – № 8,067,761 ; Filed. 20.10.2010; Publ. 28.11.2011.

25. United States Patent IPC8+Class A H01 L 218242FI. Dynamic random access memory having junction field effect transistor cell access device / Douglas B. Boyle – № 20120009743 ; Filed. 20.08.2008 ; Publ. 11.10.2011.

26. United States Patent. Spin transistor and magnetic memory / Inokuchi Tomoaki, Ishikawa Mizue, Sugiyama – № 7,956,395 ; Filed. 28.08.2008 ; Publ. 07.06.2011.

27. United States Patent. Memory device and method of making same / Wolodymyr Czubytyj, Tyler Lowrey, Sergey Kostylev – № 7,902,536; Filed. 28.07.2006 ; Publ. 08.03.2011.

28. United States Patent. Multi-chip module / Ralf Otremba, Josef Hoeglauer, Stefan Landau, Erwin Huber – № 7,872,350 ; Filed. 10.04.2007 ; Publ. 18.01.2011.

29. United States Patent. Memory cell including an emitter follower and emitter follower sensing scheme and method of reading data therefrom

/ Richard K. Chou, Damodar R. Thummalapally – № 7,843,721; Filed. 18.09.2008; Publ. 30.11.2010.

30. Detection of soft X-rays using semi-insulating GaAs detector / B. Zat'ko, F. Dubecký, P. Bohacek [and other] // Conference Proceedings - The 18th International Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems, ASDAM, 2010. – Art. No. 5667023. – P. 219–222.

31. Electrical and spectroscopic characterization of 7-cell Si-drift detectors / K. Hansen, C. Reckleben, I. Diehl, E. Welter // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2008. – № 585 (1–2). – P. 76–82.

32. A monolithic array of 77 silicon drift detectors for X-ray spectroscopy and gamma-ray imaging applications / C. Fiorini, M. Bellini, A. Gola [and other] // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2005. – № 52 (4). – P. 1165–1170.

33. A monolithic array of silicon drift detectors coupled to a single scintillator for γ -ray imaging with sub-millimeter position resolution / C. Fiorini, A. Longoni, F. Perotti [and other] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2003. – № 512 (1–2). – P. 265–271.

34. Hard X-ray and Gamma-ray Imaging and Spectroscopy using Scintillators coupled to Silicon Drift Detectors / P. Lechner, R. Eckhard, C. Fiorini, A. Gola [and other] // High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy III. – Marseille, France, 2008. – 10 p.

35. Silicon waveguide integrated germanium JFET photodetector with improved speed performance / J. Wang, M. Yu, G. Lo [and other] // IEEE Photonics Technology Letters 23 (12). – 2011. – Art. No. 5739506. – P. 765–767.

36. Development and evaluation of semi-insulating GaAs detectors in hot plasmas diagnostic / B. Zat'ko, F. Dubecky, P. Bohacek [and other] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A:

Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 633 (SUPPL. 1). – 2011. – P. S131–S133.

37. A new approach to the readout of cryogenic ionization detectors: GeFRO / C. Cattadori, B. Gallese, A. Giachero [and other] // Journal of Instrumentation. – 2011. – № 6 (5). – Art. No. P05006.

38. The cryogenic readout system with GaAs JFETs for multi-pixel cameras / Y. Hibi, H. Matsuo, H. Nagata [and other] // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering 7854. – 2010. – Art. No. 78541Z.

39. Superconducting THz camera with GaAs-JFET cryogenic readout electronics / H. Matsuo, Y. Hibi, T. Suzuki [and other] // AIP Conference Proceedings. – 2009. – № 1185. – P. 393–396.

40. Progress on GaAs cryogenic readout circuits for SISCAM / [H. Nagata, J. Kobayashi, H. Matsuo, M. Fujiwara] Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. – 2006. – № 6275. – Art. No. 627527.

41. SISCAM 32-ch cryogenic⁺ readout module with GaAs-JFET ASICs / H. Matsuo, Y. Hibi, H. Nagata [and other] // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 7741. – 2010. – art. no. 77412V.

42. Evaluation of cryogenic readout circuits with GaAs JFETs for far-infrared detectors / Okumura, Kenichi, Hosako [and other] // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 4008. – 2000. – P. 1.

43. Cryogenic performance of a low-noise JFET-CMOS preamplifier for HPGe detectors / A. Pullia, F. Zocca, S. Riboldi [and other] // IEEE Transactions on Nuclear Science 57 (2 PART 2). – 2010. – Art. No. 5446495. – P. 737–742.

44. Allen Oh. L. Fabrication of a thermally isolated and pre-amplified transistor module with polyimide micro-wires for cryogenic detectors / Oh. L. Allen, C. Kelley R. // Journal of Low Temperature Physics (3–4 PART 2). – 2008. – № 151. – P. 1003–1008.

45. Development of cryogenic GaAs AC-coupled CTIA readout for farinfrared and submillimeter detectors / Hirohisa Nagata, Jun Kobayashi, Hiroshi Matsuo [and other] // SPIE Digital Library. – 2008. – vol. 7020. – P. 1–10.

46. Cryogenic Digital Readout system with GaAsJFETs / Yasunori Hibi, Hiroshi Matsuo, Hirohisa Nagata [and other] // The 10th Workshop on SubmmWave Receiver Technologies in Eastern Asia. –Wuxi, China, 2009. – P. 1–13.

47. «32-channel Multi-Chip-Module» The Cryogenic Readout System for Submillimeter/Terahertz Cameras / Yasunori Hibi, Hiroshi Matsuo, Taishi Ookawa [and other] // ISSTT. – 2011. – P. 95–99.

48. Fujiwara M. Performance of GaAs JFET at a cryogenic temperature for application to readout circuit of high-impedance detectors / M. Fujiwara, M. Sasaki // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2004. – № 51 (12). – P. 2042–2047.

49. Fabrication of cryogenic readout circuits with n-type GaAs-JFETs for low temperature detectors / H. Nagata, J. Kobayashi, H. Matsuo [and other] // Thirteenth International Workshop on Low Temperature Detectors. – Stanford, 2009. – 7 p.

50. Осадчук В. С. Сенсори тиску і магнітного поля : монографія / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 207 с.

51. Викулина Л. Ф. Физика сенсоров температуры и магнитного поля / Л. Ф. Викулина, М. А. Глауберман. – Одесса : Маяк, 2000. – 156 с.

52. Гуменюк С. В. Интегральные полупроводниковые магнито-чувствительные датчики / С. В. Гуменюк, Б. И. Подлепецкий // Зарубежная электронная техника. – 1989. – № 12(343). – С. 3–47.

53. Готра З. Ю. Мікроелектронні сенсорні пристрої магнітного поля / З. Ю. Готра. – Львів : Видавництво НУ «Львівська політехніка», 2001. – 412 с.

54. Преобразователи давления с частотным выходом на основе однопереходных транзисторов / Г. Г. Бабичев, Г. И. Гаврилюк, Э. А. Зинченко [и др.] // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. – 2004. – № 3. – С. 48–51.

55. Кремниевый однопереходный тензотранзистор / Г. Г. Бабичев, С. И. Козловский, В. А. Романов [и др.] // *Журнал технической физики*. – 2002. – № 4. – С. 66–71.

56. Converter of pressure with frequency output on the base of unijunction tenso-transistors / G. G. Babichev, G. P. Gavrylyuk [etc.] // *Technology and design in electronic devices*. – 2004. – № 3. – P. 48–51.

57. Викулин И. М. Фотоприемник на основе однопереходного и полевого транзисторов / И. М. Викулин, Ш. Д. Курмашев, В. А. Мингалев // *Sensors Electronics and Microsystems Technologies*. – 2006. – № 4. – P. 28–30.

58. Фотоприемник на основе однопереходного транзистора и фотодиода / И. М. Викулин, Ш. Д. Курмашев, С. Н. Никифоров [и др.] // *Фотоэлектроника*. О.: Астропринт, 2008. – № 17. – С. 88–90.

59. Патент 20016 України, МПК⁶ Н 01 L 31/10. Одноперехідний фототранзистор / І. М. Вікулін, Ш. Д. Курмашев, С. М. Никифоров, М. І. Панфілов ; заявник та патентовласник Одеська національна академія зв'язку ім. О. С. Попова. – № u200606237 ; заявл. 05.06.06 ; опубл. 15.01.07, Бюл. № 1.

60. Датчики температуры на основе однопереходного и полевого транзисторов при радиационном воздействии / И. М. Викулин, Ш. Д. Курмашев, П. Ю. Марколенко [и др.] // *Sensors Electronics and Microsystems Technologies*. – 2009. – № 2. – P. 18–21.

61. Патент 49256 України, МПК⁶ Н 01 L 29/82. Магніточутливий сенсор / І. М. Вікулін, Л. Ф. Вікуліна, Ш. Д. Курмашев ; заявник та патентовласник Одеська національна академія зв'язку ім. О. С. Попова. – № u200910777 ; заявл. 26.10.09 ; опубл. 26.04.10, Бюл. № 8.

62. Патент 30179 А України, МПК⁶ G 01 K 13/00, A61B 5/02. Пристрій для реєстрації теплових властивостей шкіри / В. В. Логінов, В. Ф. Русяєв ; заявник та патентовласник Кримський медичний університет ім. С. І. Георгієвського. – № 98010211 ; заявл. 15.01.1998 ; опубл. 15.11.2000, Бюл. № 6.

63. Патент 19977 України, МПК Н 01 L 29/00. Одноперехідний тензотранзистор / І. М. Вікулін, Ш. Д. Курмашев, В. О. Мінгальов, С. М. Никифоров ; заявник та патентовласник Одеська національна академія зв'язку ім. О. С. Попова. – № u200605556 ; заявл. 22.05.06 ; опубл. 15.01.07, Бюл. № 1.

64. Патент 53618 України, МПК⁶ Н 01 L 9/04. Одноперехідний тензотранзистор / Ш. Д. Курмашев, І. М. Вікулін, Р. Г. Сидорець ; заявник та патентовласник Одеський національний університет ім. І. І. Мечникова. – № u201004826 ; заявл. 22.04.10 ; опубл. 11.10.10, Бюл. № 19.

65. Викулин И. М. Частотные микроэлектронные сенсоры на основе однопереходных транзисторов / И. М. Викулин, Л. Ф. Викулина, Ш. Д. Курмашев // 4-та Міжнародна науково-технічна конференція Сенсорна електроніка та мікросистемні технології, 28 червня–2 липня 2010 р. : тези доповідей. – О. : Астропринт, 2010. – С. 199.

66. Викулин И. М. Физика полупроводниковых приборов / И. М. Викулин, В. И. Стафеев – М. : Радио и связь, 1990. – 290 с.

67. Патент Российской Федерации, МПК G05D23/24. Датчик-реле температуры / О. В. Новиков, А. О. Новиков – № 18000 ; Заявл. 13.04.2000 ; опубл. 10.05.2001.

68. Патент Российской Федерации, МПК G01K7/14. Электронный датчик температуры / И. М. Викулин, В. И. Гречан, И. Р. Халимов – № 2058019 ; Заявл. 04.09.1991 ; опубл. 10.04.1996.

69. Патент Российской Федерации, МПК G01P15/08. Устройство для измерения ускорений / В. М. Крылов, В. Л. Кузьмин, П. С. Гусев и др. – № 1840409; Заявл. 28.01.1988; Опубл. 20.11.2006.

70. Ch. S. Carrier domain magnetometer with frequency output / S. Ch., D. Nikolov / *Sensor Letters*. – № 2 (1). – P. 82–84.

71. A retrofit 60 Hz current sensor for non-intrusive power monitoring at the circuit breaker / Z. Clifford, J. Cooley, A.-T. Avestruz [and other] // *Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition – APEC, 2010*. – art. no. 5433631. – P. 444–451.

72. Design, fabrication and characterization of pyroelectric thin film and its application for infrared gas sensors / TanQiu-lin, ZhangWen-dong, XueChen-yang, XiongJi-jun [and other] // *Microelectronics Journal*. – 2009. – № 40. – P. 58–62.

73. Tests of small X-ray active matrix pixel sensor prototypes at the national synchrotron light source / G. Carini, W. Chen, A. Dragone [and other] // *Journal of Instrumentation*. – 2009. – № 4 (3). – art. no. P03014.

74. Barillaro G. Modeling of porous silicon junction field effect transistor gas sensors: Insight into NO₂ interaction / G. Barillaro, G. Lazzerini, L. Strambini // *Applied Physics Letters* 96 (16). – 2010. – art. no. 162105.

75. Barillaro G. Tuning of the sensitivity of porous silicon JFET gas sensors / G. Barillaro, L. Strambini, G. Lazzerini // *AIP Conference Proceedings* 1137. – 2009. – P. 394–397.

76. Spectroscopic and imaging performance of DEPFET pixel sensors / J. Ulrici, S. Adler, P. Buchholz [and other] // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. – 2001. – № 465 (1). – P. 247–252.

77. Chang C. C. An integrated pyroelectric infrared sensor with a PZT thin film / C. C. Chang, C. S. Tang // *Sensors and Actuators, A: Physical*. – 1998. – № 65 (2-3). – P. 171–174.

78. Strambini L. A power-saving approach for driving integrated FET gas sensors / L. Strambini, G. Lazzerini, G. Barillaro // *Proceedings of IEEE Sensors*. – 2011. – art. no. 6127119. – P. 1040–1043.

79. Taranovich S. Piezoelectric sensors and signal-Conditioning front-End solutions: Part 1 of a multi-Part series of sensor articles / S. Taranovich. – Electronic Products (Garden City, New York). – 2011. – № 53 (8).

80. United States Patent. Nanosensors / Lieber, Charles M. Park, Hongkun Wei, Qingqiao Cui, Yi Liang – № 7,956,427 ; Filed. 02.06.2010 ; Publ. 07.06.2011.

81. Дьяконов В. П. Однопереходные транзисторы и их аналоги / В. П. Дьяконов. – М. : СОЛОН-ПРЕСС, 2008. – 240 с.

82. Бутов А. Л. Генераторы звуковых эффектов на однопереходных транзисторах / А. Л. Бутов. – Радиоаматор. – 2005. – № 06. – 4 с.

83. Патент Российской Федерации 2087069, МПК6 Н 03 К 3/351. Генератор импульсов / Иванов С. М., Сонин А. Ф., Тимофеев В. М. ; заявитель и патентообладатель Московский институт теплотехники.– № 3828578/07 ; заявл. 12.04.94 ; опубл. 10.08.97.

84. Salivahanan S. Electronic Devices and Circuits / S. Salivahanan, N. Suresh Kumar, A. Vallavaraj. – Tata McGraw-Hill, 2008. – 951 p.

85. Hasegawa Y. On rational phase-locking oscillations of a simple sawtooth oscillator with UJT / Y. Hasegawa, R. Tanaka, Y. Ueda. International Journal of Bifurcation and Chaos in Applied Sciences and Engineering. – 2001. – № 11 (12). – P. 3003–3032.

86. Nurujjaman M. Coherence resonance in a unijunction transistor relaxation oscillator / M. Nurujjaman, P. Bhattacharya, A. Iyengar, S. Sarkar // Physical Review E – Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics. – 2009. – № 80 (1). – art. no. 015201.

87. Федотов Я. А. Основы физики полупроводниковых приборов / Я. А. Федотов. – М. : Сов. Радио, 1980. – 296 с.

88. Ліщинська Л. Б. Дослідження узагальненого перетворювача іммітансу на базі одноперехідного транзистора від параметрів його фізичної еквівалентної схеми / Л. Б. Ліщинська, М. В. Барабан, Я. С. Рожкова // Наукові праці ВНТУ. – 2010. – № 2. – С. 1– 6. – Режим доступу до журналу: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/1257/603>.

89. Ліщинська Л. Б. Експериментальний метод визначення параметрів одноперехідного транзистора / Л. Б. Ліщинська, А. Г. Шведюк, М. А. Філінюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – № 6. – С. 137–140.

90. Данилин В. Н. Аналоговые полупроводниковые интегральные схемы СВЧ / В. Н. Данилин, А. И. Кушниренко, Г. В. Петров. – М. : Радио и связь, 1985. – 192 с.

91. Філінюк Н. А. Анализ ОПИ на основе полевых транзисторов / Н. А. Філінюк, М. М. Семеренко // Полупроводниковая электроника в техники электросвязи. – М. : Радио и связь, 1984. – Вып. 24. – С. 51–57.

92. Філінюк М. А. Інформаційні пристрої на основі потенційно-нестійких багатоелектродних напівпровідникових структур Шотткі : монографія / М. А. Філінюк, О. М. Куземко, Л. Б. Ліщинська. – Вінниця : ВНТУ, 2009. – 274 с.

93. Ліщинська Л. Дослідження узагальненого перетворювача імпідансу на польовому транзисторі при зміні полярності напруги на затворі / Л. Ліщинська, М. Барабан, М. Філінюк // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – 2012. – № 2 (66). – С. 174–180.

94. Філінюк М. А. Метрологічні основи негатроніки : монографія / М. А. Філінюк, Д. В. Гаврилов – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – 188 с.

95. Ліщинська Л. Б. Синтез таблиць перетворення імпідансу дво-параметричних УПІ на основі одноперехідної транзисторної структури / Л. Б. Ліщинська, М. В. Барабан // Вісник Сумського державного університету. Технічні науки. – 2011. – № 2. – С. 94–100.

96. Ліщинська Л. Б. Порівняльна оцінка похибок перетворення однокристальних конверторів імпідансу / Л. Б. Ліщинська, М. В. Барабан, М. А. Філінюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – № 6. – С. 87–92.

97. Узагальнені перетворювачі імітансу на основі інжекційно-пролітної транзисторної структури із загальним витоком [Електронний ресурс] / Л. Б. Ліщинська, І. В. Булига, А. Г. Шведюк, Н. А. Філінюк // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – 2008. – № 2. Режим доступу до журн.: http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2008-2/2008-2.files/uk/08lblsts_uk.pdf.

98. Застосування концепції «нечіткого імітансу» на етапі функціонального синтезу інформаційних пристроїв / Л. Б. Ліщинська, М. В. Барабан, Я. С. Рожкова, М. А. Філінюк // VII Міжнародна науково-практична конференція Інтернет, освіта, наука, 28 вересня–3 жовтня 2010 р. : тези доповідей. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – С. 368–371.

99. Осадчук О. В. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором / О. В. Осадчук. – Вінниця : УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2000. – 303 с.

100. Ліщинська Л. Б. Генераторні сенсори на базі негатронів / Л. Б. Ліщинська, С. В. Мірошникова, М. А. Філінюк // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2009. – № 2(18). – С. 42–46.

101. Ліщинська Л. Б. Радіочастотні датчики дистанційного контролю стану об'єкта / Л. Б. Ліщинська // Сенсорна електроніка та мікросистемні технології. – 2010. – № 4. – С. 27–37.

102. Патент України на корисну модель № 54733, (51) МПК G01R 11/02 (2006.01). Дистанційний лічильник витрат електричної енергії / Л. Б. Ліщинська, М. В. Барабан, О. О. Лазарєв, М. А. Філінюк ; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № 201004696 ; заявл. 20.04.2010 ; опубл. 25.11.2010, Бюл. № 22.

103. Радиочастотные датчики на базе обобщенных преобразователей иммитанса / Л. Б. Лищинская, М. В. Барабан, Я. С. Рожкова, Н. А. Филинчук // 20-я Международная конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», 13–17 сентября 2010 г. : тезисы докладов. – Севастополь, 2010. – С. 971–972.

104. Філінюк М. А. Елементи та пристрої автоматики на основі нелінійних властивостях динамічних негатронів / М. А. Філінюк, О. В. Войцеховська. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця. – 2008. – 174 с.

105. Полуактивный радиочастотный датчик контроля расхода электроэнергии / Л. Б. Лищинская, А. А. Лазарев, М. В. Барабан, Н. А. Филинчук // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2012. – № 2. – С. 3–7.

106. Барабан М. Автономный радиочастотный датчик температуры / Мария Барабан // 16-й Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке». 17–19 апреля 2012 г. : тезисы докладов. – Харьков, 2012. – Том 1. – С. 51–52.

107. Патент України на корисну модель № 68886, (51) МПК (2012.01) G01R 27/00. Радіочастотний сенсор температури / Л. Б. Ліщинська, М. В. Барабан, О. О. Лазарев, М. А. Філінчук ; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № 201112879 ; заявл. 02.11.2011 ; опубл. 10.04.2012, Бюл. № 7.

108. Газовые анализаторы с частотным выходом / Ф. Д. Касимов, Н. А. Бабаев, О. Н. Негоденко, С. Н. Рагимов // Всесоюзная научно-техническая конференция «Приборы с отрицательным сопротивлением и интегральные преобразователи на их основе», тезисы докладов. – Баку, 1991. – С. 52.

109. Осадчук В. С. Датчики освещенности на основе полупроводниковых структур с отрицательным сопротивлением / В. С. Осадчук, А. В. Осадчук // Всесоюзная научно-техническая конференция «Приборы с отрицательным сопротивлением и интегральные преобразователи на их основе», тезисы докладов. – Баку, 1991. – С. 90.

110. Филинчук Н. А. Разработка измерителя внутричерепного давления на основе транзисторного преобразователя импеданса / Н. А. Филинчук, С. Г. Лютворт, Н. И. Шанчук // Всесоюзная научно-техническая конференция «Вопросы улучшения технических параме-

тров универсальных электроизмерительных приборов», тезисы докладов. – Житомир, 1979. – С. 304–306.

111. Vendelin G. D. Microwave circuit design using linear and nonlinear techniques / G. D. Vendelin, A. M. Pavio, U. L. Rohde // Wiley Interscience. – 2005. – P. 1057.

112. Індуктивний генераторний датчик на основі комбінованого динамічного негatrona / Л. Б. Ліщинська, М. В. Барабан, О. О. Лазарєв, М. А. Філінюк // Вісник Хмельницького національного університету. – 2012. – № 1. – С. 116–120.

113. Патент України на корисну модель № 50131, (51) МПК (2009) G01R 27/00. Генераторний сенсор / Л. Б. Ліщинська, М. В. Барабан, М. А. Філінюк ; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № 200912677 ; заявл. 07.12.2009 ; опубл. 25.05.2009, Бюл. № 10.

114. Ионкин П. А. Синтез RC-схем с активными невзаимными элементами / П. А. Ионкин, В. Г. Миронов. – М. : Энергия, 1971. – 184 с. +

115. Осадчук В. С. Индуктивный эффект в полупроводниковых приборах / В. С. Осадчук. – К. : Вища шк. Головное издательство, 1987. – 155 с.

116. Dill H.G. Inductive semiconductor element and their application in handpass amplifiers / H. G. Dill // IRE Transactions on military electronics. – 1961. – V. MIL 5. – P. 239–250.

117. Негоденко О. Н. Анализ входного импеданса однопереходного транзистора / О. Н. Негоденко, М. Ф. Пономарев // Изв. вузов СССР. Радиоэлектроника. – 1971. – № 12. – С. 1433–1437.

118. Филинюк Н. А. Полупроводниковые индуктивности для СВЧ диапазона / Н. А. Филинюк, А. М. Куземко, Салех М. М. Журбан. – Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2006. – № 5. – С. 9–13.

119. Дослідження температурної стабільності еквівалента індуктивності на основі одноперехідної транзисторної структури / Л. Б. Лі-

щинська, М. В. Барабан, Р. Ю. Чехместрук, М. А. Філінюк // Вісник національного технічного університету «ХПІ». – 2011. – № 11. – С. 94–99.

120. Патент України на корисну модель № 23904, (51) МПК (2006) G01R 27/28. Транзисторний еквівалент котушки індуктивності / М. А. Філінюк, І. В. Булига, С. В. Мірошникова, М. В. Барабан ; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № 200701171 ; заявл. 05.02.2007 ; опубл. 11.06.2007, Бюл. № 8.

121. Патент України на корисну модель № 49747, (51) МПК G01R 27/28 (2006.01). Напівпровідникова індуктивність / Л. Б. Ліщинська, М. В. Барабан, М. А. Філінюк ; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № 200911676 ; заявл. 16.11.2009 ; опубл. 11.05.2010, Бюл. № 9.

122. Патент України на корисну модель № 38679, (51) МПК (2006) H03H 11/00. Активний коливальний контур / М. А. Філінюк, М. В. Барабан, Л. Б. Ліщинська ; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № 200808335 ; заявл. 20.06.2008 ; опубл. 12.01.2009, Бюл. № 1.

123. Патент України на корисну модель № 42867, (51) МПК (2009) H03H 3/00. Реактивний елемент / Л. Б. Ліщинська, М. В. Барабан, М. А. Філінюк ; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № 200901538 ; заявл. 23.02.2009 ; опубл. 27.07.2009, Бюл. № 14.

124. Патент України на корисну модель № 64354, (51) МПК (2011.01) H03K 11/00. Керований імпедансний елемент / Л. Б. Ліщинська, М. В. Барабан, М. А. Філінюк ; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № 201102999 ; заявл. 14.03.2011 ; опубл. 10.11.2011, Бюл. № 21.

125. Гусятинер М. С. Полупроводниковые сверхвысокочастотные диоды / М. С. Гусятинер, А. И. Горбачев – М. : Радио и связь. – 1983. – 224 с.

126. Филинчук Н. А. Аналитические требования к критериям эффективности информационных устройств / Н. А. Филинчук, Ле Туан Ту, Р. А. Анфилов // Контроль і управління в технічних системах. – 1997. – Т. 2. – С. 56–62.

127. Ліщинська Л. Б. Ефективність комбінованих керуваних елементів на основі однокристалного узагальненого перетворювача іммітансу / Л. Б. Ліщинська, М. В. Барабан, М. А. Філінчук // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2011. – № 1. – С. 69–75.

128. Комп'ютерна програма «Ефективність керуваних комбінованих елементів на основі однокристалного узагальненого перетворювача іммітансу» / М. В. Барабан, О. В. Войцеховська, Л. Б. Ліщинська [та ін.] // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 42792. – К. : Державна служба інтелектуальної власності України. – Дата реєстрації: 19.03.2012 р.

129. Філінчук М. А. Аналіз і синтез інформаційних пристроїв на базі потенційно-нестійких узагальнених перетворювачів іммітанса / М. А. Філінчук – Вінниця : ВДТУ, 1998. – 85 с.

130. Ліщинська Л. Б. Інформаційні пристрої на основі багатопараметричних узагальнених перетворювачів іммітансу / Л. Б. Ліщинська. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 219 с.

131. Лищинская Л. Б. Функциональный синтез информационных устройств на базе однокристалльных ОПИ / Л. Б. Лищинская, М. В. Барабан, Я. С. Рожкова // VI Международная научно-практическая конференция «Новости научной мысли», 27 октября – 5 ноября 2010 г. : тезисы докладов. – Прага : Наука и образование, 2010. – С. 10–14.

Наукове видання

**Філінюк Микола Антонович
Богомолова Марія Володимирівна**

**ОДНОПЕРЕХІДНІ УЗАГАЛЬНЕНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ
ІМІТАНСУ ДЛЯ ЕЛЕМЕНТІВ І ПРИСТРОЇВ
ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ**

Монографія

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено М. Богомоловою

+

Підписано до друку 12.02.2014 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. др. арк. 8,55
Наклад 300 (1-й запуск 1–75) прим. Зам № В2014-04

Вінницький національний технічний університет,
КІВЦ ВНТУ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-85-32.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано ФОП Барановська Т. П.
21021, м. Вінниця, вул. Порика, 7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 4377 від 31.07.2012 р.