

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Вінницький національний технічний університет

Л. Б. Ліщинська

**БАГАТОПАРАМЕТРИЧНІ УЗАГАЛЬНЕНІ
ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ІМІТАНСУ
НА ОСНОВІ ОДНОКРИСТАЛЬНИХ
НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СТРУКТУР**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2012

УДК 621.38
ББК 32.85
Л67

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України (протокол № 5 від 22.12.2011р.)

Рецензенти:

Ю. С. Яковлєв, доктор технічних наук, професор

О. Д. Азаров, доктор технічних наук, професор

Ліщинська, Л. Б.

Л67 Багатопараметричні узагальнені перетворювачі імітансу на основі однокристальних напівпровідникових структур : монографія / Л. Б. Ліщинська. – Вінниця : ВНТУ, 2012. – 244 с.

ISBN 978-966-641-464-2

В монографії наведені результати розробки і досліджень математичних моделей багатопараметричних узагальнених перетворювачів імітансу, а також однокристальних багатоелектродних напівпровідникових структур, які використовуються для їх реалізації. Розглянуто метрологічне забезпечення проектування та шляхи оптимізації напівпровідникових структур, на основі яких будуються однокристальні УППН.

Книга розрахована на наукових співробітників та спеціалістів, аспірантів і студентів, які займаються дослідженням, проектуванням і розробкою інформаційних пристроїв і систем.

УДК 621.38
ББК 32.85

ISBN 978-966-641-464-2

© Л. Ліщинська, 2012

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	7
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ БАГАТОПАРАМЕТРИЧНИХ УЗАГАЛЬНЕНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ІМІТАНСУ	11
1.1 Визначення, класифікація та основні параметри багатопараметричних УПШ _N	11
1.1.1 Визначення багатопараметричних УПШ _N	12
1.1.2 Класифікація багатопараметричних УПШ _N	12
1.1.3 Основні параметри багатопараметричних УПШ _N	15
1.2 Математична модель УПШ _N на базі триполюсника.....	17
1.2.1 Постановка задачі.....	17
1.2.2 Граничні умови.....	18
1.2.3 Обґрунтування математичної моделі і перевірка її коректності	18
1.3 Методика знаходження параметрів невизначеної матриці провідності N-полюсника з послідовними опорами у ланцюзі кожного полюса	25
1.3.1 Постановка задачі.....	25
1.3.2 Аналітичне обґрунтування.....	26
1.3.3 Приклад практичної реалізації	32
1.4 Узагальнена математична модель багатопараметричного УПШ _N	35
1.5 Критеріальна оцінка ефективності багатопараметричних УПШ _N на базі N-полюсника	38
1.5.1 Постановка задачі.....	38
1.5.2 Загальна концепція побудови критерію ефективності багатопараметричних УПШ _N	39
1.5.3 Часткові ККД перетворення імітансу багатопараметричних УПШ _N	41
1.5.4 Практичне використання	43

РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ОДНОКРИСТАЛЬНИХ БАГАТОЕЛЕКТРОДНИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СТРУКТУР	47
2.1 Визначення і класифікація однокристальних багатоелектродних напівпровідникових структур.....	47
2.2 Математична модель біполярної багатоелектродної напівпровідникової структури	49
2.3 Математична модель уніполярної багатоелектродної напівпровідникової структури	54
2.4 Математична модель одноперехідної транзисторної структури.....	58
2.5 Математична модель інжекційно-пролітної транзисторної структури	62
2.6 Математичні моделі двозатворної польової транзисторної структури	73
2.6.1 Узагальнена невизначена матриця незалежного чотиріполюсника і знаходження її параметрів	73
2.6.2 Математична модель ПТ2 для випадку закритих переходів.....	75
2.6.3 Математична модель ПТ2 для режиму відкритих переходів.....	79
2.6.4 Математичні моделі чотиріполюсників на основі ПТ2 для режиму відкритого першого і закритого другого переходів.....	83
2.6.5 Математичні моделі чотиріполюсників на основі ПТ2 для режиму закритого першого і відкритого другого переходів.....	86
2.7 Експериментальне дослідження багатоелектродних напівпровідникових структур	90
2.7.1 Обґрунтування методики та оцінка похибки вимірювань	91
2.7.2 Вимірювання параметрів багатоелектродних напівпровідникових структур.....	93

РОЗДІЛ 3 МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ БАГАТОПАРАМЕТРИЧНИХ ОДНОКРИСТАЛЬНИХ УПШ _N	100
3.1 Вимірювання параметрів імітансних матриць УПШ _N	100
3.2 Вимірювання внутрішнього інваріантного коефіцієнта стійкості УПШ _N	108
3.2.1 Вимірювання $K_{c.вн.i}$ при відомих імітансних навантаженнях.....	109
3.2.2 Вимірювання $K_{c.вн.i}$ при плаваючому імітансі активного навантаження	112
3.3 Підвищення точності вимірювання імітансних параметрів УПШ _N та його внутрішнього інваріантного коефіцієнта стійкості	113
3.4 Вимірювання параметрів імітансних навантажень.....	116
3.5 Вимірювання параметрів фізичних моделей багатоелектродних напівпровідникових структур.....	121
3.5.1 Обґрунтування методики вимірювання	121
3.5.2 Вимірювання параметрів фізичних моделей трьохелектродних напівпровідникових структур	123
3.5.3 Вимірювання параметрів фізичних моделей чотирьохелектродних напівпровідникових структур	126
РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ОДНОКРИСТАЛЬНИХ БАГАТОПАРАМЕТРИЧНИХ УПШ _N	135
4.1 Різновиди однокристальних багатопараметричних заземлених УПШ _N	135
4.2 Однопараметричні УПШ _N на основі ППТ-структури.....	143
4.2.1 Таблиці перетворення імітансів $УПШ_B^{(+)}$	144
4.2.2 Таблиці перетворення імітансу $УПШ_C^{(+)}$	156
4.2.3 Дослідження УПШ _N на основі ППТ-структури.....	163
4.3 Дослідження перетворення імітансу двопараметричними УПШ _N на основі трьохелектродних напівпровідникових структур.....	176
4.3.1 Двопараметричні УПШ _N на основі ППТ-структури	177
4.3.2 Двопараметричні УПШ _N на основі ППТ-структури.....	186

4.3.3 Двопараметричні УПН на основі БТ-структури.....	194
4.4 Дослідження перетворення імітансу двопараметричними УПН на основі чотирьохелектродної напівпровідникової структури.....	196
4.5 Дослідження перетворення імітансу трипараметричними УПН на основі чотирьохелектродної напівпровідникової структури.....	200
РОЗДІЛ 5 ОПТИМІЗАЦІЯ НАПІВПРОВІДНИКОВОЇ СТРУКТУРИ, ЩО ВИКОРИСТОВУЄТЬСЯ В ОДНОКРИСТАЛЬНИХ УПН.....	206
5.1 Формулювання критеріїв оптимізації.....	206
5.2 Оцінка оптимальності УПН на рівні еквівалентної схемотехніки	208
5.3 Оцінка оптимальності УПН на фізичному рівні.....	209
5.4 Похибки перетворення	211
5.4.1 Теоретичне обґрунтування та аналіз	212
5.4.2 Похибки перетворення однокристальних конверторів імітансу	215
5.5 Аналіз «якості» однокристальних конверторів імітансу.....	219
ЛІТЕРАТУРА	233

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- АЧ – активний чотириполюсник
- Б – база
- БТ – біполярний транзистор
- В – виток
- З – затвор
- ІІ – інвертор імітансу
- ІІІ – інформаційний пристрій
- ІІТ – інжекційно-пролітний транзистор
- ІС – інтегральна схема
- Е – емітер
- К – колектор
- КІ – конвертор імітансу
- КЕ – керуючий елемент
- ККД – коефіцієнт корисної дії
- НВЧ – надвисокі частоти
- ОТ – одноперехідний транзистор
- ПІ – перетворювач імітансу
- ПТ – польовий транзистор
- ПТ2 – двозатворний польовий транзистор
- ПТУП – польовий транзистор з управляючим р-n переходом
- ПТШ – польовий транзистор Шотткі
- ПТШ1 – однозатворний ПТШ
- С – стік
- СВ – спільний витік
- СІТ – прилад зі статичною індукцією
- СЕ – спільний емітер
- СЗ – спільний затвор
- СС – спільний стік
- Т – тиристор
- УВЧ – ультрависокі частоти
- УПІ – узагальнений перетворювач імітансу
- УПІ_N – багатопараметричний узагальнений перетворювач імітансу

ВСТУП

Винахід біполярного транзистора став потужним інструментом розвитку інформаційної техніки. При чому, в основному отримали використання дві властивості транзистора – підсилення сигналу і комунікація електричного ланцюга. Хоча з самої назви «transistor» випливає, що основна його сутність полягає у передачі («transfer») опору («resist») [1].

У загальному випадку теорія перетворювачів опору ґрунтується на властивостях чотиріполюсників, охоплених зворотним зв'язком [2], а перша їх реалізація базувалася на використанні електронних ламп [3]. Такі схемотехнічні перетворювачі опору не отримали широкого застосування через низку відомих недоліків лампових схем. Поява у 50–60 роках минулого століття проблеми реалізації інтегральних індуктивностей і частотновибіркового пристроїв, пов'язаної з погіршенням параметрів таких компонентів зі зменшенням їх геометричних розмірів, призвела до широких теоретичних досліджень і практичного застосування схемотехнічних перетворювачів опору на основі транзисторів (гіраторів, від'ємних перетворювачів імпедансу тощо) [4, 5]. Найширше застосування такі перетворювачі опору отримали при створенні активних RC-фільтрів [6], компенсаторів і коректорів [3]. Як правило, до складу таких перетворювачів входить декілька транзисторів, схеми мають перехресні зв'язки, робиться допущення, що коефіцієнти перетворення є чисто дійсними чи уявними.

Подальшим розвитком таких перетворювачів стало використання в них операційних підсилювачів [2] і конвеєрів струму [7]. Але частотний діапазон їх застосування, внаслідок впливу перерахованих недоліків, залишався невисоким (менше 1–3 ГГц).

Розвиток мікроелектроніки надвисоких частот ще більше загострив проблему реалізації високодобротної індуктивності контурів і високовибіркових фільтрів, пов'язану не тільки зі зменшенням їх добротності і вибіркової при мініатюризації, але й з погіршенням цих параметрів з ростом частоти. Вирішення цих проблем було знайдено шляхом, по-перше, використання поняття узагальненого перетворювача імітансу (УІІ) – перетворювача опору, який має комплексний

коефіцієнт перетворення імітансу [8], по-друге, застосування однокристальних перетворювачів імітансу на основі біполярних і польових транзисторів [9] за рахунок використання їх внутрішнього зворотного зв'язку, який для більшості застосувань транзисторів є «паразитним». Це дозволило розширити діапазон використання перетворювачів імітансу до діапазону частот роботи сучасних транзисторів, який у теперішній час складає 100–200 ГГц [10]. Застосування у таких УПП польових транзисторів Шотткі (ПТШ) забезпечило реалізацію інформаційних пристроїв на базі однокристальних УПП не тільки у вигляді гібридних, але й твердотільних (напівпровідникових) мікросхем широкого діапазону частот, включаючи УВЧ і НВЧ діапазони [11], в яких використовують відомі переваги однокристальних інформаційних пристроїв, що набули широкого розвитку у цифровій техніці [12].

Такі однокристальні УПП є однопараметричними, оскільки перетворений імітанс залежить тільки від одного перетворюваного імітансу, що обмежує їх функціональні можливості. Одним з шляхів підвищення ефективності різноманітних інформаційних пристроїв та пристроїв автоматики є використання багатопараметричних систем [13]. Виходячи з цього, запропоновано подальший розвиток цього напрямку шляхом дослідження і використання багатопараметричних УПП_N, у яких перетворений імітанс (імітанси) залежать від декількох перетворюваних імітансів [14]. Результати цих досліджень узагальнені у запропонованій монографії.

В першому розділі монографії розглянуто загальну теорію багатопараметричних УПП без залежності від способів їх реалізації. Надано визначення, класифікація та обґрунтування основних параметрів багатопараметричних УПП_N. Розроблені математичні моделі УПП_N на триполюсниках як первинної комірки УПП_N, так і на N-полюсниках, які надають можливість реалізації різновидів УПП_N. Обґрунтовані критерії оцінки ефективності багатопараметричних УПП_N на базі N-полюсників.

В другому розділі розглянуто розроблені математичні моделі однокристальних багатоелектродних напівпровідникових структур, включаючи біполярні, польові, одноперехідні та інжекційно-пролітні транзисторні структури, а також двозатворні польові структури.

У третьому розділі наведені результати аналізу і розробки метрологічного забезпечення досліджень багатопараметричних однокристальних УПН.

У четвертому розділі наведені результати чисельних і натурних досліджень однокристальних багатопараметричних УПН на базі різноманітних напівпровідникових структур у діапазоні частот і перетворюваних імітансів.

В п'ятому розділі розглянуті питання оптимізації напівпровідникових структур, які використовуються у багатопараметричних однокристальних УПН з точки зору підвищення ефективності УПН і реалізованих на їх основі інформаційних пристроїв.

Питання практичного використання досліджуваних УПН будуть розглянуті у монографії «Інформаційні пристрої на основі багатопараметричних узагальнених перетворювачів імітансу», що готується до друку.

Автор висловлює подяку за корисні поради науковому консультанту д. т. н., проф. Філінюку М. А., а також своїм колегам по кафедрі проектування комп'ютерної і телекомунікаційної апаратури Вінницького національного технічного університету, зокрема к. т. н., доц. Лазареву О. О., к. т. н., доц. Фурсі С. Є., к. т. н., доц. Войцеховській О. В., аспіранту Барабан М. В. і магістру Рожковій Я. С. за допомогу у проведенні досліджень.

Крім того, автор висловлює щирі подяки редактору С. А. Малішевській за доброзичливість та професіоналізм при підготовці цієї книги до видання.

РОЗДІЛ 1

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ БАГАТОПАРАМЕТРИЧНИХ УЗАГАЛЬНЕНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ІМІТАНСУ

1.1 Визначення, класифікація та основні параметри багатопараметричних УПН

За визначенням [3], узагальненим перетворювачем імпедансу (УП) називають чотириполісник, вхідний W_{ex} (вихідний W_{vix}) імпеданс якого залежить, відповідно від імпедансу навантаження W_H (генератора W_G) (рис. 1.1а).

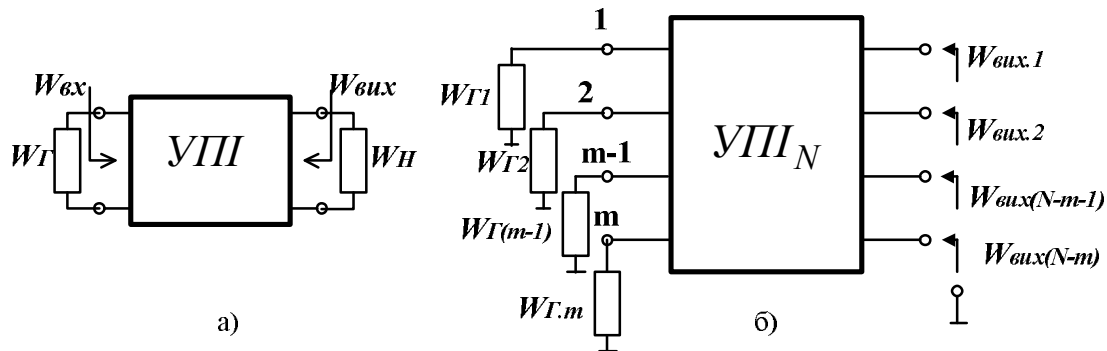


Рисунок 1.1 – Однопараметричний (а) і багатопараметричний (б) УПН

Перетворений імпеданс W_{ex} (W_{vix}) є функцією одного перетворюваного імпедансу W_H (W_G). Тому такі УП розглядаються як однопараметричні. На низьких частотах вони реалізуються схемотехнічними методами [15, 16], а на більш високих частотах у вигляді однокристальних УП на основі біполярних і польових транзисторів [8, 17]. Наявність напівпровідникових структур, які мають три і більше електроди, наприклад багатозатворні польові транзистори, одноперехідні запрограмовані транзистори та ін., дозволяють реалізувати на таких N-полісниках багатопараметричні УП_N. У розділі наведено визначення і класифікація багатопараметричних УП_N, обґрунтовано їх параметри і розроблено математичні моделі, що забезпечує проектувальникам інформаційних пристроїв більш ефективно застосування таких УП_N.

1.1.1 Визначення багатопараметричних УПН_N

Багатопараметричним УПН_N назовемо електричний N-полюсник, до частини полюсів якого підключаються перетворювані імітанси $W_{\Gamma i}$, а перетворені імітанси $W_{вих.j}$ реалізуються між залишеними незадіяними полюсами (див. рис. 1.1б) [14]. При цьому перетворені імітанси $W_{вих.j} = T_{ij}(W_{\Gamma i})$, які залежать від низки значень перетворюваних імітансів $W_{\Gamma i}$, є функцією декількох параметрів. Це дозволяє розглядати їх як багатопараметричні УПН_N з частковим коефіцієнтом перетворення імітансу T_{ij} .

1.1.2 Класифікація багатопараметричних УПН_N

У наведеному на рис. 1.1б багатопараметричному УПН_N перетворювані імітанси $W_{\Gamma i}$ підключаються між m -полюсами і загальною шиною, а перетворені імітанси $W_{вих.j}$ реалізуються між $(N-m)$ полюсами і загальною шиною. Такий вид УПН_N є «заземленим УПН_N» [18].

Можливий варіант реалізації УПН_N, коли перетворювані імітанси $W_{\Gamma i}$ підключаються тільки між m -полюсами, а перетворені імітанси також реалізуються тільки між $(N-m)$ полюсами (рис. 1.2а). Такі УПН_N є «незаземленими УПН_N».

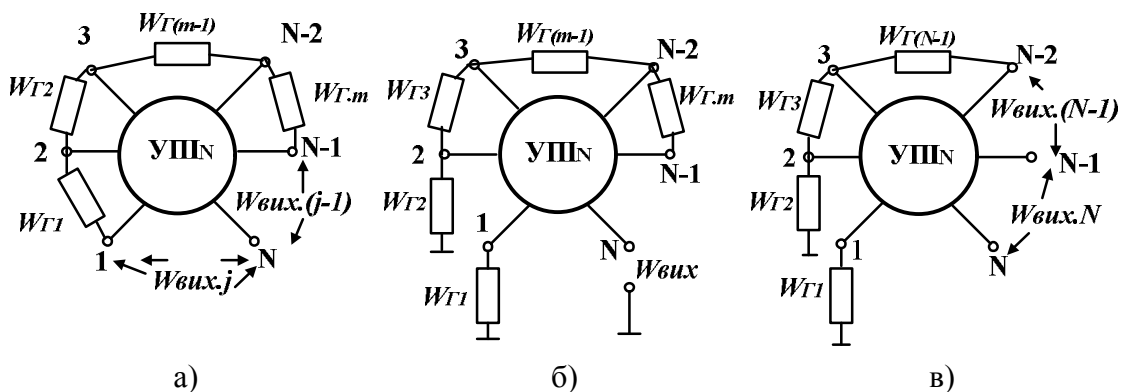


Рисунок 1.2 – Варіанти структурної реалізації багатопараметричних УПН_N на базі N-полюсника: незаземлений УПН_N (а); УПН_N змішаного 1-го типу (б); УПН_N змішаного 3-го типу (в)

Третій варіант реалізації багатопараметричного УПН_N полягає у змішаному використанні полюсів багатополіусника (див. рис. 1.2б, в). Такі УПН_N назовемо «змішаними УПН_N». Їх можна розділити на три типи (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Класифікація УПН_N в залежності від схеми використання полюсів багатополіусника

Перетворюваний імітанс W_{Γ_i}	Перетворений імітанс $W_{вих.j}$	Вид УПН _N
Заземлений	Заземлений	Заземлений
Незаземлений	Незаземлений	Незаземлений
Змішане включення	Заземлений	Змішаний 1-го типу
Заземлений	Змішане включення	Змішаний 2-го типу
Змішане включення	Змішане включення	Змішаний 3-го типу

В змішаних УПН_N 1-го типу перетворювані імітанси мають змішане підключення до полюсів – частина з них заземлена, а інша частина – не заземлена. При цьому перетворені імітанси $W_{вих.j}$ реалізуються між (N-m)-полюсами і загальною шиною.

У змішаних УПН_N 2-го типу всі перетворювані імітанси W_{Γ_i} заземлені, а перетворені імітанси $W_{вих.j}$ мають змішану реалізацію, частково реалізуються між полюсами і загальною шиною та частково – тільки між полюсами.

У змішаних УПН_N 3-го типу, як перетворені $W_{вих.j}$ так і перетворювані W_{Γ_i} імітанси, відповідно підключаються, або реалізуються, тільки частково заземленими.

У розглянутих видах УПН_N також можна виділити два варіанти побудови. В першому варіанті реалізуються тільки один перетворений імітанс $W_{вих.j}$, який залежить від перетворюваних імітансів W_{Γ_i} . Такі багатопараметричні УПН_N назовемо «одновихідні УПН_N». У другому варіанті реалізуються декілька перетворених імітансів $W_{вих.j}$, кожний з яких залежить від перетворюваних імітансів W_{Γ_i} : $W_{вих.j} = T_{ij}(W_{\Gamma_i})$. Такі багатопараметричні УПН_N назовемо «багатовихідними УПН_N».

Можливі варіанти, коли всі перетворені імітанси $W_{вих.j}$ залежать від всіх перетворюваних імітансів $W_{Гі}$. Такі багатопараметричні УПН_N назвемо «функціонально повними УПН_N». Якщо між одним або декількома перетвореними імітансами $W_{вих.j}$ відсутня залежність від одного або декількох перетворюваних імітансів $W_{Гі}$, тоді такі багатопараметричні УПН_N назвемо «функціонально неповними УПН_N».

Розглянута класифікація багатопараметричних УПН_N узагальнена на рис. 1.3. шляхом доповнення вже відомих варіантів реалізації і класифікації УПН [9], які можна поширити і на багатопараметричні УПН_N.

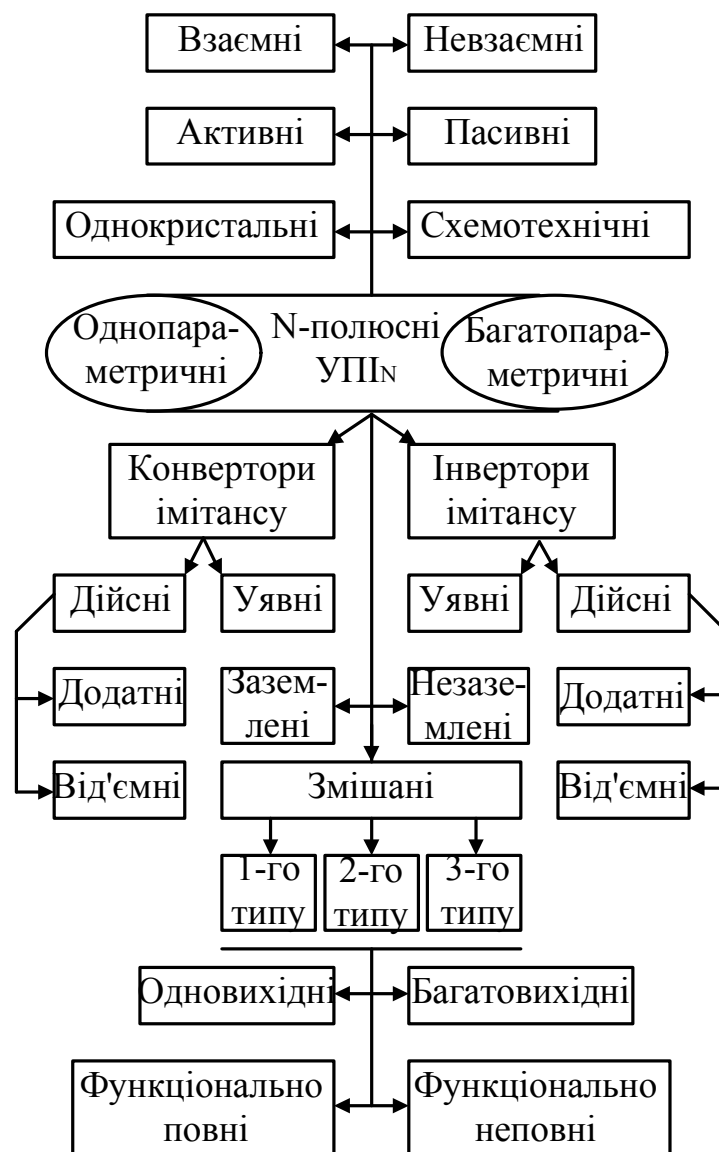


Рисунок 1.3 – Класифікація УПН_N на основі N-полюсників

Під однокристальним УПН будемо розглядати такі, у яких перетворення імітансу пов'язано з фізичними процесами, які відбуваються всередині напівпровідникового кристалу, зовнішні кола тільки задають його робочу точку за постійним струмом.

У схемотехнічних УПН перетворення імітансу забезпечується, як за рахунок процесів в активних пристроях (транзисторах, операційних підсилювачах, які забезпечують реалізацію функцій підсилення, інвертування тощо), так і за рахунок сигнальних процесів у зовнішніх RLC-колах. Такі УПН у своєму складі, як правило, містять декілька транзисторів і комбінованих кіл зовнішніх зворотних зв'язків. Найпростішим прикладом схемотехнічних багатопараметричних УПН є вимірювальні мостові схеми, а також балансні підсилювальні схеми.

Наведена класифікація не є остаточною і буде доповнюватись у процесі дослідження багатопараметричних УПН. Частково, у низці випадків неможливо розглядати багатопараметричні УПН як конвертор або як інвертор імітансу, оскільки один (або декілька) перетворених імітансів у розглянутому УПН будуть конвертуватися, а інші інвертуватися. Такі види УПН потребують додаткової класифікації.

1.1.3 Основні параметри багатопараметричних УПН

Дослідження і застосування однопараметричних УПН показали, що для їх опису є ефективним застосування такої системи параметрів [8]:

1) перетворений імітанс – W_{ex}, W_{vix} :

$$- \text{при прямому перетворенні } W_{ex} = W_{11} - \frac{W_{12}W_{21}}{W_{22} + W_H}; \quad (1.1)$$

$$- \text{при зворотному перетворенні } W_{vix} = W_{22} - \frac{W_{12}W_{21}}{W_{11} + W_\Gamma}; \quad (1.2)$$

2) коефіцієнт перетворення імітансу – T :

$$T = F(W_H, W_\Gamma, [W]); \quad (1.3)$$

3) інваріантний коефіцієнт стійкості – K_c :

$$K_c = (2\operatorname{Re}W_{11} \operatorname{Re}W_{22} - \operatorname{Re}(W_{12}W_{21})) / |W_{12}W_{21}|; \quad (1.4)$$

4) чутливість коефіцієнта перетворення імітансу (якість УПН) – $S_{\alpha_i}^T$:

$$S_{\alpha_i}^T = \partial T / \partial \alpha_i : \partial \alpha_i / T ; \quad (1.5)$$

де α_i – фізичний параметр УПШ;

5) максимально-досяжний коефіцієнт передачі по потужності на межі стійкості – K_{ms} :

$$K_{ms} (K_c = 1) = |W_{21} / W_{12}| ; \quad (1.6)$$

6) коефіцієнт невзаємності – K_H :

$$- \text{стійкого УПШ } K_H (K_c > 1) = |W_{21} / W_{12}|^2 = K_{ms}^2 ; \quad (1.7)$$

$$- \text{потенційно-нестійкого УПШ } K_H (K_c < 1) = \text{Re}W_{22} / \text{Re}W_{11} ; \quad (1.8)$$

7) максимально-досяжне значення від'ємної дійсної складової перетвореного імітансу – $\text{Re}W_{\text{ex.max}}^{(-)}$:

– при прямому перетворенні

$$\text{Re}W_{\text{ex.max}}^{(-)} = |W_{12}W_{21}|(1 - K_c) / 2\text{Re}W_{22} ; \quad (1.9)$$

– при зворотному перетворенні

$$\text{Re}W_{\text{ex.max}}^{(-)} = |W_{12}W_{21}|(1 - K_c) / 2\text{Re}W_{11} ; \quad (1.10)$$

$$8) \text{ гранична частота: } f_G (K_c = 1) ; \quad (1.11)$$

9) оптимальна частота перетворення імітансу:

$$f_{opt} (\partial \text{Re}W_{\text{max}}^{(-)} / \partial f \neq 0) ; \quad (1.12)$$

10) максимальний радіус імітансних кіл – ρ_{max} :

$$\rho_{\text{ex.max}} = |W_{12}W_{21}| / 2\text{Re}W_{22} ; \rho_{\text{вх.max}} = |W_{12}W_{21}| / 2\text{Re}W_{11} ; \quad (1.13)$$

11) активна складова координати центра максимального імітансного кола – $\text{Re}W_0$:

– при прямому перетворенні

$$\text{Re}W_{\text{ex.0}} = \text{Re}W_{11} - \text{Re}(W_{12}W_{21}) / 2\text{Re}W_{22} ; \quad (1.14)$$

– при зворотному перетворенні

$$\text{Re}W_{\text{вх.0}} = \text{Re}W_{22} - \text{Re}(W_{12}W_{21}) / 2\text{Re}W_{11} ; \quad (1.15)$$

12) мінімально-досяжне значення коефіцієнта шуму – $F_{u,\text{min}}$.(1.16)

Важливою перевагою цієї системи параметрів є їх однозначний зв'язок, за винятком $F_{u,\text{min}}$, з параметрами імітансної W -матриці залежного чотиріполюсника, використаного в якості УПШ:

$$[W] = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} \\ W_{21} & W_{22} \end{bmatrix}, \quad (1.17)$$

де $W_{11}, W_{12}, W_{21}, W_{22}$ – параметри імітансної матриці [19].

Будь-який лінійний (квазілінійний) N -поліусник також однозначно описується невизначеною імітансною матрицею [20]:

$$[W_N] = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} & \dots & W_{1N} \\ W_{21} & W_{22} & \dots & W_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ W_{N1} & W_{N2} & \dots & W_{NN} \end{bmatrix}. \quad (1.18)$$

Це дозволяє використовувати параметри (1.1)–(1.18) для опису УПН.

Але безпосереднє використання елементів матриці (1.18) для оцінки цих параметрів, у зв'язку з великим розмаїттям видів УПН та відсутністю у них однозначної залежності між перетворюваними $W_{\Gamma i}$ і перетвореними імітансами $W_{вих.j}$, вимагає встановлення аналітичних залежностей параметрів (1.1)–(1.15) від параметрів невизначеної імітансної матриці (1.18), які утворюють узагальнену математичну модель УПН.

1.2 Математична модель УПН на базі триполіусника

1.2.1 Постановка задачі

Найпростішим багатопараметричним УПН, який може бути базовою ланкою більш складних УПН, є УПН на базі триполіусника. Для ефективного використання УПН на базі триполіусників різної фізичної природи виникає завдання розробки їх математичної моделі, що забезпечує [18]:

- визначення необхідних і достатніх умов, при яких цей триполіусник може бути використаний для реалізації УПН;
- встановлення однозначної аналітичної залежності перетвореного імітансу $W_{вих}$ від перетворюваних $W_{\Gamma 1,2}$ імітансів;
- визначення запасу стійкості;

– встановлення граничних значень перетвореного імітансу, які досягаються з використанням цього триполюсника, в залежності від перетворюваних імітансів.

1.2.2 Граничні умови

Вважаємо, що для реалізації УПІ_N використовується триполюсник, в якому відсутні задавальні джерела і нульові початкові умови.

Триполюсник є квазілінійним, що забезпечується вибором настільки малої потужності сигналу, при якій параметри триполюсника не залежать від його величини [21, 22].

Двополюсники, що реалізують перетворені імітанси W_{Gi} , є пасивними. При цьому, відсутні обмеження по частоті і внутрішній фізичній структурі триполюсника.

1.2.3 Обґрунтування математичної моделі і перевірка її коректності

При розробці математичної моделі виходимо з положення досягнення найкращого компромісу між двома суперечливими вимогами: достатньо високого ступеня точності відображення реальних процесів і максимальної простоти та точності як самої моделі, так і способів визначення її початкових параметрів [23].

Виходячи з цього, вибираємо у якості задавальних параметрів струми I_i гілок триполюсника, а вузлові напруги U_i відлічуються від деякого базисного вузла (спільної шини), вибраного поза схемою (рис. 1.4а).

Такий вибір базисного вузла ставить всі полюси в рівноцінне положення і триполюсник описується системою рівнянь, симетричною відносно всіх полюсів цього триполюсника

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix}, \quad (1.19)$$

де Y_{ij} – елементи особливої (невизначеної) матриці провідності триполюсника.

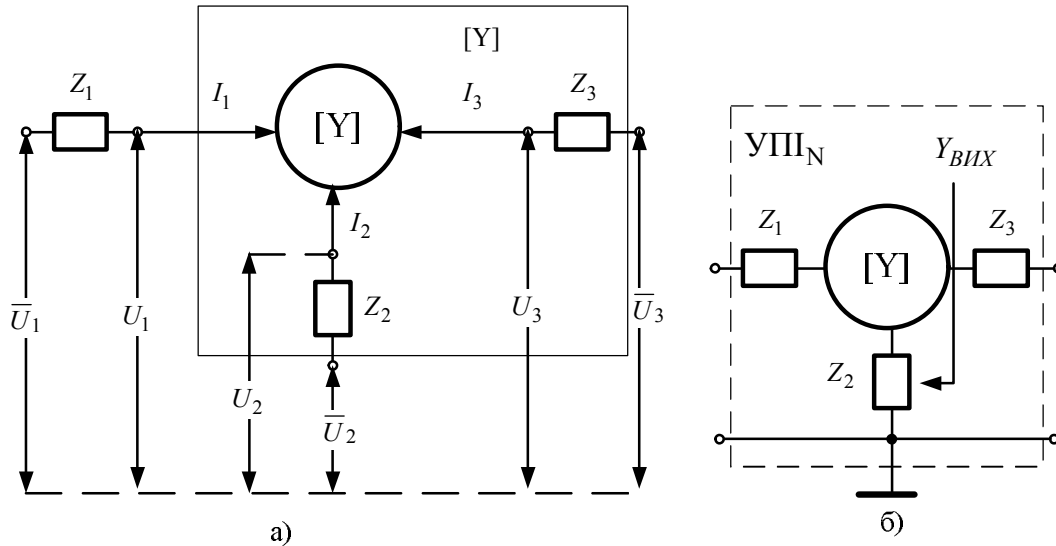


Рисунок 1.4 – Узагальнений триполюсник з опорами Z_i у ланцюгу кожного полюса (а) і двопараметричний УПІІ_N на базі триполюсника (б)

Визначимо необхідні умови, при яких цей триполюсник може бути використаний для реалізації УПІІ_N.

При включенні послідовно з кожним полюсом триполюсника опору Z_i система рівнянь (1.19) перетвориться до вигляду [18]

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{11} & \bar{Y}_{12} & \bar{Y}_{13} \\ \bar{Y}_{21} & \bar{Y}_{22} & \bar{Y}_{23} \\ \bar{Y}_{31} & \bar{Y}_{32} & \bar{Y}_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_1 \\ \bar{U}_2 \\ \bar{U}_3 \end{bmatrix}, \quad (1.20)$$

$$\text{де } \bar{U}_1 = U_1 - Z_1 I_1; \quad \bar{U}_2 = U_2 - Z_2 I_2; \quad \bar{U}_3 = U_3 - Z_3 I_3; \quad (1.21)$$

\bar{Y}_{ij} – параметри невизначеної матриці триполюсника з урахуванням включення опорів Z_i у ланцюг кожного полюса.

У випадку, коли $\bar{U}_2 = 0$ утворюється двопараметричний УПІІ_N вигляду, наведеного на рис. 1.4б, що описується рівнянням

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{11} & \bar{Y}_{13} \\ \bar{Y}_{31} & \bar{Y}_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_1 \\ \bar{U}_3 \end{bmatrix}. \quad (1.22)$$

Вважаючи $Z_1 = 1/Y_1$ в якості першого перетворюваного імітансу, при $Z_3 = 0$, перетворений імітанс буде дорівнювати

$$\bar{Y}_{вих31} = \bar{Y}_{33} - \frac{\bar{Y}_{13}\bar{Y}_{31}}{\bar{Y}_{11} + Y_1} = \frac{\Delta + \bar{Y}_{33}Y_1}{\bar{Y}_{11} + Y_1}, \quad (1.23)$$

де $\Delta = \bar{Y}_{33}\bar{Y}_{11} - \bar{Y}_{31}\bar{Y}_{13}$.

З (1.23) випливає, що для того, щоб чотириполіусник на рис. 1.4б мав властивості УПН, необхідно виконання умов:

$$\bar{Y}_{13} \neq 0; \bar{Y}_{31} \neq 0. \quad (1.24)$$

З урахуванням співвідношень:

$$\begin{aligned} \bar{Y}_{13} &= Y_{13} - Y_{12}Y_{23}Z_2 / (1 + Y_{22}Z_2); \\ \bar{Y}_{31} &= Y_{31} - Y_{32}Y_{21}Z_2 / (1 + Y_{22}Z_2), \end{aligned}$$

ці умови справедливі при виборі другого перетворюваного імітансу Z_2 з урахуванням нерівностей:

$$Z_2 \neq Y_{13}/\Delta_1; Z_2 \neq Y_{31}/\Delta_3; \quad (1.25)$$

де

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= Y_{13}Y_{22} - Y_{12}Y_{23}; \\ \Delta_3 &= Y_{31}Y_{22} - Y_{32}Y_{21}. \end{aligned}$$

Визначимо умови, за яких УПН, що розглядається, має властивості конвертора імітансу.

За визначенням, ця умова буде виконуватись, коли перетворений імітанс $Y_{вих}$ буде залежити прямопропорційно від перетворюваного імітансу. З урахуванням цього, з аналізу (1.23) знаходимо умову $Y_1 \ll \bar{Y}_{11}$, яка забезпечує реалізацію властивості конвертора по першому каналу.

Якщо $Z_1 \ll Y_{33}/\Delta$, чотириполіусник, що розглядається, буде мати властивості ідеального конвертора імітансу, тобто коефіцієнт перетворення імітансу $T_{K0} = Y_{вих13}/Y_1 = \bar{Y}_{33}/\bar{Y}_{11}$ не буде залежити від перетворюваної провідності Y_1 .

Визначимо умови, за яких УПН, що розглядається, має властивості інвертора імітансу.

За визначенням ця умова виконується, коли перетворений імітанс $Y_{вих}$ буде залежити зворотнопропорційно від перетворюваного імітансу. З урахуванням цього з аналізу (1.23) знаходимо умову $Z_1 \gg \bar{Y}_{33}/\Delta$, яка забезпечує реалізацію властивості інвертора по першому каналу.

ЛІТЕРАТУРА

1. American Heritage Dictionary. – Boston : Houghton Mifflin, 1992. – 345 p.
2. Бессонов Л. А. Линейные электрические цепи / Л. А. Бессонов. – М. : Высш. шк., 1983. – 336 с.
3. Бенинг Ф. Отрицательное сопротивление в электронных схемах / Ф. Бенинг – М. : Сов. радио, 1975. – 288 с.
4. Ионкин П. А. Синтез RC-схем с активными невзаимными элементами / П. А. Ионкин, В. Г. Миронов. – М. : Энергия, 1976. – 240 с.
5. Филановский Н. М. Схемы с преобразователями сопротивления / Н. М. Филановский, А. Ю. Персианов, В. К. Рыбин. – Л. : Энергия, 1973. – 192 с.
6. Хейнлейн В. Е. Активные фильтры для интегральных схем. / Хейнлейн В. Е., Холмс В. Х. – М. : Сов. радио, 1975. – 288 с.
7. Sedra A. S. The current conveyor: history, progress and new results / A. S. Sedra, G. W. Roberts, F. Gohh // IEEE Proc. of ISCAS. – 1990. – Vol. 137. – P. 78–87.
8. Филинюк Н. А. Активные СВЧ фильтры на транзисторах / Н. А. Филинюк. – М. : Радио и связь, 1987. – 112 с.
9. Філінюк М. А. Основи негatronіки. Т. I. Теоретичні і фізичні основи негatronіки / М. А. Філінюк – Вінниця : УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2006. – 456 с.
10. Ion-Implanted GaAs MESFETs with Low Cost Production Process / Masataka W., Daiji F., Hiroshi Y., Shigeru N. // IEEE Tech. Rep. – 2007. – Vol. 107, № 95. – P. 1–5.
11. Leifso C. Monolithic tunable active inductor with independent Q control / C. Leifso, J. Haslett, J. McRory // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 2000. – Vol. 48, № 6. – P. 1024–1029.
12. Однокристалльные компьютерные системы высокой производительности. Особенности архитектурно–структурной организации и внутренних процессов : монография. / Ю.С. Яковлев. – Винница : ВНТУ, 2009. – 294 с.
13. Шишмарев В. Ю. Основы автоматического управления : учеб. пособ. / В. Ю. Шишмарев. – М. : Академия, 2008. – 352 с.
14. Ліщинська Л. Б. Визначення, класифікація і параметри багатопараметричних узагальнених перетворювачів імітансу / Л. Б. Ліщинська // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – № 5. – С. 105–108.

15. Leisfso C. A fully integrated active inductor with independent voltage tunable inductance and series-loss resistance / C. Leisfso, M. Haslett // IEE Transactions on Microwave, Theory and Techniques. – 2001. – Vol. 49, №4. – P. 671–676.

16. Redoute J.M. Active inductor / J.M. Redoute, J. Sevenhans, J. Nathilda // United State Patent Application. – 2004. – № 20040212462.

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

18. Ліщинська Л. Б. Математична модель узагальненого перетворювача імітансу на базі трьохполюсника / Л. Б. Ліщинська // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – 2010. – Т.15, №3. – С. 165–171.

19. Філінюк М. А. Методи та засоби вимірювання параметрів потенційно–нестійких чотириполюсників : монографія. / М. А. Філінюк, К. В. Огородник, Л. Б. Ліщинська. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 176с.

20. Сигорский В. П. Алгоритмы анализа электронных схем / В. П. Сигорский, А. И. Петренко. – М. : Советское радио, 1976. – 608 с.

21. Мокін Б. І. Математичні моделі ідентифікації динамічних систем : навч. посіб. / Б. І. Мокін, В. Б. Мокін, О. Б. Мокін. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 260 с.

22. Сигорский В. П. Основы теории электронных схем / В. П. Сигорский, А. И. Петренко. – К. : Техника, 1967. – 609 с.

23. Кветный Р. Н. Математическое моделирование в задачах проектирования средств автоматики и информационно-измерительной техники : учеб. пособие / Р. Н. Кветный. – К. : УМК ВО, 1989. – 112 с.

24. Бергельсон И. Г. Транзисторы. Параметры, методы измерений и испытаний / И. Г. Бергельсон, Ю. А. Каменецкий, И. Ф. Николаевский. – М. : Советское радио, 1968. – 504 с.

25. Філінюк М. А. Метрологічні основи негatronіки : монографія. / М. А. Філінюк, Д. В. Гаврілов. – Вінниця : УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2006. – 188 с.

26. Фельдштейн А. Л. Синтез четырехполюсников и восьмиполюсников на СВЧ / А. Л. Фельдштейн, Л. Р. Явич. – М. : Связь, 1971. – 388 с.

27. Буков В. Н. Вложение систем. Аналитический подход к анализу и синтезу матричных систем / В. Н. Буков. – Калуга : Издательство научной литературы Н. Ф. Бочкарёвой, 2006. – 720 с.

28. Babak L. I. Decomposition synthesis approach to design of RF and microwave active circuits. / L. I. Babak // IEEE MTT-S Int. Microwave Sym. Dig. – 2001. – Vol. 2. – P. 1167–1170.

29. Sussman-Fort S.E. MMIC-Simulated inductors using compensated gyrators. / S. E. Sussman-Fort, L. Billonet. // Int. Microwave and Microwave Wave CAE. – 1997. – Vol. 7, №3. – P. 241–249.

30. Ліщинська Л. Б. Невизначена матриця провідності N-полюсника з послідовними опорами у ланцюзі кожного полюса / Л. Б. Ліщинська // Вісник Хмельницького національного університету. – 2010. – № 4. – С. 83–88.

31. Узагальнені перетворювачі іммітансу на основі інжекційно-пролітної транзисторної структури із загальним витокком / Л. Б. Ліщинська, І. В. Булига, О. Г. Шведюк, М. А. Філинюк // Наукові праці ВНТУ. – 2008. – № 2. – С. 1–18. – Режим доступу до ресурсу : http://www.nbuu.gov.ua/e-journals/vntu/2008-2/2008-2.files/uk/08lblsts_uk.pdf.

32. Маркушевич А. И. Комплексные числа и конформные отображения. / А. И. Маркушевич. – М. : Наука, 1980. – 56 с.

33. Філинюк М. А. Основи негatronіки. Т. II. Прикладні аспекти негatronіки / М. А. Філинюк – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – 306 с.

34. Філинюк Н. А. Метод определения инвариантного коэффициента устойчивости СВЧ четырёхполюсников / Н. А. Філинюк // Микроэлектроника и полупроводниковые приборы. – 1982. – Вып.7. – С. 245–250.

35. Філинюк М. А. Критеріальна оцінка ефективності узагальнених перетворювачів іммітансу / М. А. Філинюк, Ле Туан Ту, О. П. Піддубний // Вісник ВПІ. – 1999. – №1. – С. 85–90.

36. Кузьмин И. В. Оценка эффективности и оптимизации АСКУ / И. В. Кузьмин. – М. : Советское радио, 1971. – 296 с.

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

38. Філинюк Н. А. Критерий эффективности информационных устройств преобразования и управления / Н. А. Філинюк // Изв. вузов СССР. Сер. Приборостроение. – 1984. – Т. 27, № 4. – С. 253.

39. Лищинская Л. Б. Критеріальна оцінка ефективності многопараметрических ОПИ_N / Л. Б. Лищинская // Прикладная радиоэлектроника. – 2010. – Т. 9, № 4. – С. 542–546.

40. Степаненко И. П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем / И. П. Степаненко. – М. : Энергия, 1977.
41. Трутко А. Ф. Методы расчёта транзисторов / А. Ф. Трутко. – М. : Энергия, 1971. – 272 с.
42. Спиридонов Н. С. Основы теории транзисторов / Н. С. Спиридонов. – К. : Техника, 1975. – 360 с.
43. Валиев К. А. Применение контакта металл–полупроводник в электронике / К. А. Валиев, Ю. И. Пашинцев, Г. В. Петров. – М. : Сов. радио, 1981. – 304 с.
44. Викулин И. М. Физика полупроводниковых приборов / И. М. Викулин, В. И. Стафеев. – М. : Сов. Радио, 1980. – 296 с.
45. Хауэс М. Полупроводниковые приборы в схемах СВЧ / М. Хауэс, Д. Морган. – М. : Мир, 1979. – 444 с.
46. Федотов Я. А. Основы физики полупроводниковых приборов / Я. А. Федотов. – М. : Сов. Радио, 1969. – 592 с.
47. Vendelin G. D. Microwave circuit design using linear and nonlinear techniques / G. D. Vendelin, A. M. Pavio, U. L. Ronde. – New Jersey : J. Wiley&Sons, 2005. – 1058 p.
48. Тугов Н. М. Полупроводниковые приборы / Н. М. Тугов, Б. А. Глебов, Н. А. Чарыков. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.
49. Raghavan A. Modeling and design techniques for RF power amplifiers / A. Raghavan, N. Srirattana, J. Laskar. – New Jersey : J. Wiley&Sons, 2008. – 206 p.
50. Лавриненко В. Ю. Справочник по полупроводниковым приборам / В. Ю. Лавриненко. – К. : Техника, 1984. – 424 с.
51. Филинюк Н. А. Инжекционно-пролётный транзистор / Н. А. Филинюк, И. В. Булыга. // Микроэлектронные преобразователи и приборы на их основе. – Баку–Сумгаит, 2007. – С. 95–97.
52. Gupta R. K. Schottky barrier field-effect transistor with static-induction principle (MESSIT) / R. K. Gupta, V.A. Alatief // Phys. Stat. Solid. – 1981. – №63. – P. 313–319.
53. Chamberlain S. G. Some new-properties of forward biased emitter-base connection of gigahertz silicon transistor / S. G. Chamberlain // Electronics letters. – 1970. – Vol. 6., № 26. – P. 843–845.
54. Ebers I. I. Large-signal behavior of junction transistor / I. I. Ebers, J. L. Moll // Proc. IRE. – 1954. – № 42. – P. 1761–1772.
55. Gummel H. K. An integral charge control model of bipolar transistors / H. K. Gummel, H. C. Poon // Bell Syst. Tech. – 1970. – № 49. – P. 827–852.

56. McAndrew C. C. VBIC95, the vertical bipolar inter-company model / C. C. McAndrew, J. A. Seitchik, D. F. Bowers // IEEE S. Solid-State circuit. – 1996. – № 31(10). – P. 1476–1483.

57. Graff H. C. New formulation of the current and charge relations in bipolar transistor modeling for CACD purposes / H. C. Graff, W. J. Kloosterman // IEEE Trans. Electron. Devices. – 1985. – № 32(11). – P. 2415–2419.

58. A semi-physical bipolar transistor model for the design of very high-frequency analog ICs / H. M. Rein, M. Sehroter, A. Koldehoff, K. Womer // Proc. IEEE Bipolar circuits and technology meeting. – 1992. – P. 217–220.

59. Уваров А. С. Программа P-CAD. Электронное моделирование / А. С. Уваров. – М. : Диалог-МИФИ, 2008. – 192 с.

60. Разевиг В. Д. Применение программ P-CAD и PSpice для схемотехнического моделирования на ПЭВМ. – Вып. 2 : Модели компонентов аналоговых устройств / В. Д. Разевиг. – М. : Радио и связь, 1992. – 64 с.

61. Разевиг В. Д. Проектирование СВЧ устройств с помощью MICROWAVE OFFICE. / В. Д. Разевиг, Ю. В. Потапов, А. А. Курушин. – М. : СОЛОН-ПРЕСС, 2003. – 496 с.

62. Хернитер М. Е. Multisim 7: Современная система компьютерного моделирования и анализа схем электронных устройств. / М. Е. Хернитер ; пер. с англ. А. И. Осипов. – М. : Издательский дом ДМК-пресс, 2006. – 488 с.

63. Шварц Н. З. Линейные транзисторные усилители СВЧ / Н. З. Шварц. – М. : Сов. радио, 1980. – 368 с.

64. Gray D. A. High performance Thin-film CARS band receiver / D. A. Gray // Microwave, 73 Conference proceedings. – 1973. – P. 278–282.

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

66. Філінюк М. А. Активні УВЧ і НВЧ фільтри : монографія / М. А. Філінюк, Л. Б. Ліщинська. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 396 с.

67. Lenk F. Negative resistance in GaAs-MESFET nonlinear modeling / F. Lenk, R. Doerner, P. Heymann // INMMС 4th Int. Workshop on Integrated Non-linear Microwave and Millimeterwave Circuits, Gerhard-Mercator University Duisburg. – 1996. – Vol. 47. – P.77–82.

68. Зарубежные микросхемы, транзисторы, тиристоры, диоды : справочник. – СПб. : Наука и техника, 2008. – 272 с.

69. Дьяконов В. Н. Однопереходные транзисторы и их аналоги. Теория и применение. / В. Н. Дьяконов. – М. : СОЛОН-ПРЕСС, 2008. – 240 с.

70. Ліщинська Л. Б. Дослідження узагальненого перетворювача імітансу (УПІ) 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 ресурсу : http://www.nbu.gov.ua/e-journals/vntu/2010-2/2010-2.files/uk/10lblpec_ua.pdf.

71. Недолужко И. Г. Однопереходные транзисторы / И. Г. Недолужко, Е. Ф. Сергиенко. – М. : Энергия, 1974. – 102 с.

72. Colzolari P. H. A numerical analysis of the Schottky barrier / P. H. Colzolari, S. Graffi, C. Pierini // Acta Freqenza. – 1972. – Vol. 16, № 9. – P. 690–695.

73. Braun I. Characteristics of injecting contacts of semiconductor / I. Braun, H. K. Henish // Sol.-St. Electron. – 1966. – Vol. 9, № 10. – P. 981–989.

74. Rhoderick E. H. The physics of Schottky barriers. / E. H. Rhoderick. // J. Phys. D. : Appl. Phys. – 1970. – Vol. 3, № 8. – P. 1153–1167.

75. Пожела Ю. Физика быстродействующих транзисторов : монография / Ю. Пожела. – Вильнюс : Мокслас, 1989. – 264 с.

76. Пат. 2183885. Российская федерация, МКИ H01L 29/812. Интегральный полевой транзистор Шоттки со статической индукцией / Коноплев Б. Г.; Рындин Е. А. : заявитель и патентообладатель Таганрогский государственный радиотехнический университет. – № 2000132028/28 ; заявл. 20.12.2000 ; опубл. 20.06.2002.

77. Непочатов Ю. Тепловой расчет СИТ-транзисторов и узлов силовых модулей с их применением / Ю. Непочатов // Силовая электроника. – 2010. – № 2. – С. 20–27.

78. Shokley W. Negative resistance arising from transit-time in semiconductor diodes / W. Shokley // Bell. Syst. Techn. J. – 1954. – Vol. 23, № 4. – P. 799–826.

79. Схемотехника, моделирование и применение транзисторных устройств с отрицательным сопротивлением / О. Н. Негоденко, К. Е. Румянцева, Л. А. Зинченко, С. И. Липко. – Таганрог : Изд-во ТРТУ, 2002. – 214 с.

80. Schichman N. Modeling and simulation of insulated-gate field-effect transistor switching circuits / N. Schichman, D. Hodges // IEEE J. Solid State Circuits. – 1968. – № 3. – P. 285–289.

81. Преснухин Л. Н. Цифровые вычислительные машины / Л. Н. Преснухин, П. В. Нестеров. – М. : Высш. школа, 1981. – 511 с.
82. Азаров О. Д. Основы теории линейных интегральных схем : навч. посібник / О. Д. Азаров, В. В. Байко, М. Р. Обертюх. – Вінниця : ВДТУ, 2002. – 225 с.
83. Лищинская Л. Б. Математическая модель четырёхполюсника на базе ПТШ₂, включённого по схеме с общими истоком и стоком / Л. Б. Лищинская // Актуальные проблемы физики. – Баку : АНУ, 2008. – Т. 2. – С. 61–63.
84. Ліщинська Л. Б. Узагальнена математична модель ПТШ₂ при включенні його по схемі (3132) / Л. Б. Ліщинська, М. В. Барабан, М. А. Філінюк // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2008. – № 2. – С. 60–63.
85. Ліщинська Л. Б. Математична модель двозатворного польового транзистора в режимі прямого зміщення на затворах / Л. Б. Ліщинська // Моделювання та інформаційні технології. – К. : НАН України ІПМЕ ім. Г.Є.Пухова, 2011. – Вип. 59. – С. 41–48.
86. Ліщинська Л. Б. Математична модель двохзатворного польового транзистора у режимі відкритого першого і закритого другого переходів / Л. Б. Ліщинська // Вісник Хмельницького національного університету. – 2011. – № 2. – С. 202–206.
87. Столярский С. Измерение параметров транзисторов / С. Столярский. – М. : Сов. радио, 1976. – 288 с.
88. Аронов В. Л. Испытание и исследование полупроводниковых приборов / В. Л. Аронов, Я. А. Федотов. – М. : Высшая школа, 1975. – 186 с.
89. Филинюк Н. А. Измерение Y-параметров матрицы проводимости СВЧ транзисторов / Филинюк Н. А. // Изв. вузов МВ и ССО СССР. Радиоэлектроника. – 1984. – Т. 27, № 3. – С. 81–82.
90. Чернушенко А. М. Измерение параметров электронных приборов дециметрового и сантиметрового диапазонов волн / А. М. Чернушенко, А. В. Майбородин. – М. : Радио и связь, 1986. – 336 с.
91. Шварц Н. З. Система нестандартных S-параметров. / Н. З. Шварц // Микроэлектроника и полупроводниковые приборы / под ред. А. А. Васенкова, Я. А. Федотова. – М. : Сов. радио, 1976. – Вып. 1. – С. 302–310.
92. Филинюк Н. А. Нестандартная система параметров четырехполюсника / Филинюк Н. А. – Деп. в НИИНТИ Украины 13.01.84, №499 к–Д84. – 15 с.

93. Богачев В. М. Транзисторные усилители мощности / В. М. Богачев, В. В. Никифоров. – М. : Энергия, 1978. – 344 с.
94. Филинюк Н. А. Определение параметров физической эквивалентной схемы ВЧ транзисторов / Н. А. Филинюк, С. Н. Песков, С. Н. Павлов // Радиоэлектроника. Изв вузов СССР. – 1982. – Т. 25, № 12. – С. 38–43.
95. Терешин А. Е. Справочник по эксплуатации радиоизмерительных приборов / А. Е. Терешин, В. А. Сафронов. – К. : Техніка, 1969. – 232 с.
96. Исследование максимально-достижимого коэффициента усиления двухзатворного полевого транзистора Шоттки / Н. А. Филинюк, Д. В. Гаврилов, Л. Б. Ліщинська, А. М. Куземко // Наука і освіта 2004 : матер. VII міжнар. наук.-практ. конф. – Дніпропетровськ : Наука і освіта, 2004. – Т. 63. – С. 75–78.
97. Ліщинська Л. Б. Моделирование метода пофрагментного интегрирования (МПФИ) для распознавания изображений / Л. Б. Ліщинська // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2001. – С. 112–117.
98. Ліщинська Л. Б. Экспериментальный метод визначення параметрів одноперехідного транзистора / Л. Б. Ліщинська, А. Г. Шведюк, М. А. Філінюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – № 6. – С. 137–140.
99. Огородник К. В. Особенности метрологического обеспечения информационных устройств на базе негатронов / К. В. Огородник, Л. Б. Лищинская // Научно–технический прогресс и современная авиация. – Баку : НАА, 2009. – Т. 1. – С. 317–320.
100. А. с. 1095102 СССР. МКИ G01R 27/28. Устройство для измерения параметров матрицы Y-проводимости четырехполюсника / Н. А. Филинюк. – № 3487978/18–21 ; – заявл. 19.08.1982 ; опубл. 30.05.1984, Бюл. № 20. – 4 с.
101. Негатроника / [Серьезнов А. Н., Степанова Л. Н., Горяинов С. А. и др.] ; под. ред. Л. Н. Степановой. – Новосибирск : Наука, 1995. – 315 с.
102. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 39080, 11.07.2011. Комп'ютерна програма «Негатроніка» / Огородник К. В., Ліщинська Л. Б., Барабан М. В., Філінюк Н. А. : авторські майнові права – ВНТУ.
103. Wai-Kai Chen. Fundamentals of circuits and filters / Wai-Kai Chen. – New York: CRC Press, 2009. – 918 p.

104. Rollett Y. M. Stability and Power-gain Invariants of linear Two-ports / Y. M. Rollett // IRE Trans. Circuit Theory. – 1962. – Vol. CT-9, № 1. – P. 29–32.

105. Шварц Н. З. К определению инвариантного коэффициента устойчивости СВЧ транзисторов / Н. З. Шварц // Полупроводниковые приборы и их применение / Под ред. Я. А. Федотова. – М. : Сов. радио, 1972. – Вып. 26. – С. 245–248.

106. Способ измерения инвариантного коэффициента устойчивости четырёхполосника / [Филинюк Н.А., Огородник К.В., Лищинская Л.Б. и др.] // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. – Севастополь : СевНТУ, 2006. – С.791–792.

107. Ліщинська Л. Б. Метод вимірювання внутрішнього інваріантного коефіцієнта стійкості чотиріполосника / Л. Б. Ліщинська // Вісник Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського. – Кременчук : КрНУ, 2011. – Вип. 6 (71), Ч. 1. – С. 17–19.

108. Огородник К. В. Методи і засоби вимірювання імітансних та хвильових параметрів потенційно-нестійких чотиріполосників : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.11.08 «Радіовимірювальні прилади» / К. В. Огородник ; Вінниц. нац. техн. ун-т. – Вінниця, 2007. — 20 с.

109. Фрадкин А. З. Измерения параметров антенно-фидерных устройств / А. З. Фрадкин, Е. В. Рыжков. – М. : Связь, 1972. – 352 с.

110. Пат. 45888 Україна, МПК G01R 27/28. Спосіб вимірювання активного опору / Огородник К. В., Ліщинська Л. Б., Мазорчук Н. Б., Філінюк М. А. : заявник і патентовласник ВНТУ. – № u200907327; заявл. 13.07.2009 ; опубл. 25.11.2009, Бюл. № 22. – 4 с.

111. Ліщинська Л. Б. Метод измерения полного сопротивления / Л. Б. Ліщинська, О. В. Войцеховська, Р. Ю. Чехместрук // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – № 1/10 (49). – С. 8–11.

112. Ліщинська Л. Б. Експериментальний метод визначення параметрів транзистора / Л. Б. Ліщинська, А. Г. Шведюк, М. А. Філінюк // Контроль і управління в складних системах. – Вінниця : Універсум-Вінниця, 2008. – С. 10–14.

113. Березиков С. А. Определение параметров эквивалентной схемы активной области кристалла полевого транзистора с затвором Шоттки / С. А. Березиков, А. И. Толстой // Радиотехника. – 1992. – № 10–11. – С. 19–25.

114. Филинюк Н. А. Определение параметров физической эквивалентной схемы активной области кристалла полевого транзистора / Н. А. Филинюк // Изв. Вузов. Сер. Радиоэлектроника. – 1983. – Т.26, № 7. – С. 90–92.

115. Лищинская Л. Б. Измерение параметров физических моделей многоэлектродных полупроводниковых структур / Л. Б. Лищинская, А. Г. Шведюк, Н. А. Филинюк // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. – Севастополь : СевНТУ, 2008. – С.704–705.

116. Филинюк Н. А. Определение максимальной частоты генерации транзистора / Н. А. Филинюк // Электронная техника. Полупроводниковые приборы. – 1983. – Вып. 2.

117. Пат. 41314 Україна, МПК G01R 27/28. Установка для вимірювання граничної частоти одноперехідного транзистора / Ліщинська Л. Б., Шведюк А. Г., Філінюк М. А. : заявник і патентовласник ВНТУ. – № u200900490 ; заявл. 21.01.2009 ; опубл. 12.05.2009, Бюл. № 9. – 6 с.

118. Філінюк М. А. Визначення параметрів фізичної моделі двозатворного польового транзистора Шоттки / М. А. Філінюк, Д. В. Гаврілов, Л. Б. Ліщинська // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2004. – № 4. – С. 93–96.

119. Маттей Д. Л. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи / Д. Л. Маттей, Л. Янг, Е. Т. Джонс : под ред. Л. В. Алексеева, Ф. В. Кушнира. – М : Связь, 1971. – 240 с.

120. Филинюк Н. А. Экспериментальное определение граничной частоты активной области кристалла полевого транзистора / Н. А. Филинюк // Изв. вузов СССР. Радиоэлектроника. – 1987. – № 12. – С. 90–92.

121. Забелишинська М. Я. Математика : Навчально-практичний довідник / М. Я. Забелишинська. – К. : Ранок, 2010. – 384 с.

122. Горяинов С. А. Полупроводниковые приборы с отрицательным сопротивлением. / С. А. Горяинов, И. Д. Абезгауз. – М. : Энергия, 1970. – 320 с.

123. Філінюк М. А. Елементи та пристрої автоматики на основі нелінійних властивостей динамічних негатронів : монографія. / М. А. Філінюк, О. В. Войцеховська. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 188 с.

124. Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ. – М. : Высш. школа, 1970. – Т. 1. – 440 с.

125. Ліщинська Л. Б. Функціональний синтез двохпараметричних генераторних датчиків / Л. Б. Ліщинська, Я. С. Рожкова // Вісник СевНТУ. – Севастополь : СевНТУ, 2011. – Вип. 114. – С. 168–171.

126. Филинюк Н. А. Метод плаваючих нагрузок – путь повышения точности определения параметров СВЧ транзисторов / Н. А. Филинюк // Труды Всесоюзной НТК «Радиотехнические измерения в диапазонах высоких частот (ВЧ) и сверхвысоких частот (СВЧ)». – Новосибирск, 1984. – С. 30–31.

127. Смит Ф. Круговые диаграммы в радиоэлектронике / Ф. Смит; пер. с англ. М. Н. Бергера, Б. Ю. Капилевича. – М. : Сов. радио, 1976. – 142 с.

128. Филинюк Н. А. Малосигнальные модели четырехполюсников на базе двухзатворного транзистора Шоттки / Н. А. Филинюк, Салех М. М. Журбан // Вісник Хмельницького національного університету. – 2005. – Т. 1, Ч. 1, № 4. – С. 112–115.

129. Ліщинська Л. Б. Математична модель узагальненого перетворювача імітансу на базі трьохполюсника / Л. Б. Ліщинська // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – 2010. – Т. 15, №3. – С. 165–171.

130. Дубовой В. М. Моделювання систем контролю та керування : навч. посібник / В. М. Дубовой. – Вінниця : ВНТУ, 2005. – 175 с.

131. Ліщинська Л. Б. Методи оптимізації напівпровідникової структури для однокристальних узагальнених перетворювачів імітансу / Л. Б. Ліщинська // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2010. – № 2(20). – С. 131–134.

132. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров / А. Анго; пер. с франц. К. С. Шифрина. – М. : Наука, 1967. – 780 с.

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

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

135. Ліщинська Л. Б. Аналіз «якості» однокристальних конверторів імітансу / Л. Б. Ліщинська, Я. С. Рожкова, М. А. Філінюк // Наукові праці ВНТУ. – 2010. – № 3. – С. 1–12. – Режим доступу до журналу : http://www.nbu.gov.ua/e-journals/vntu/2010_3/2010-3.files/uk/10llboic_ua.pdf.

Наукове видання

Ліщинська Людмила Броніславівна

**БАГАТОПАРАМЕТРИЧНІ УЗАГАЛЬНЕНІ
ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ІМІТАНСУ
НА ОСНОВІ ОДНОКРИСТАЛЬНИХ
НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СТРУКТУР**

Монографія

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено Л. Ліщинською

Підписано до друку 22.05.2012 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. др. Арк. 14,09
Наклад 100 прим. Зам № 2012-069

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 у Вінницькому національному технічному університеті,
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-81-59

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