

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

**М. А. Філінюк, К. В. Огородник,
Л. Б. Ліщинська**

**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ
ПАРАМЕТРІВ ПОТЕНЦІЙНО-НЕСТІЙКИХ
ЧОТИРИПОЛЮСНИКІВ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2010

УДК 621.317
ББК 31.221
Ф 56

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 9 від 23.04.2009 р.)

Рецензенти:

О. П. Яненко, доктор технічних наук, професор

В. П. Манойлов, доктор технічних наук, професор

В. О. Поджаренко, доктор технічних наук, професор

Філінюк, М. А.

Ф 56 Методи та засоби вимірювання параметрів потенційно-нестійких чотириполосників : монографія / М. А. Філінюк, К. В. Огородник , Л. Б. Ліщинська. — Вінниця : ВНТУ, 2010. — 176 с.

ISBN 978-966-641-342-3

В монографії проведено аналіз існуючих методів та засобів вимірювання стандартних та нестандартних систем імітансних та хвильових параметрів потенційно-нестійких чотириполосників. Звернено увагу також на метрологічне забезпечення розглянутих методів вимірювання.

УДК 621.317

ББК 31.221

ISBN 978-966-641-342-3

© М. Філінюк, К. Огородник, Л. Ліщинська, 2010

ЗМІСТ

ВСТУП	6
Розділ 1. Класифікація чотириполіусників та їх параметрів	8
1.1. Вихідні визначення	8
1.2. Вхідний опір чотириполіусника. Режими холостого ходу і короткого замикання	21
1.3. Оборотні (взаємні) чотириполіусники	23
1.4. Симетричні й антисиметричні чотириполіусники	24
1.5. Реактивні чотириполіусники	27
1.6. Матриці деяких найпростіших чотириполіусників	27
1.7. Система характеристичних параметрів чотирипо- люсника і її зв'язок з матрицею [a]	29
1.8. Хвильові матриці. Вихідні співвідношення	30
1.9. Принципи нормування рівнянь чотириполіусника	34
1.10. Зв'язок між елементами різних матриць	37
1.11. Вхідний коефіцієнт відбиття чотириполіусника. Фізичний зміст елементів хвильових матриць	40
1.12. Умови оборотності, симетрії, антисиметрії та реак- тивності в термінах хвильових матриць	41
1.13. Хвильові матриці деяких найпростіших чотирипо- люсників	47
1.14. Мінімальна кількість параметрів, що визначає властивості чотириполіусника	49
Література до розділу 1	50
Розділ 2. Методи вимірювання стандартної системи імітансних параметрів потенційно-нестійких чотириполіусників	53
2.1. Класичні методи вимірювання імітансних парамет- рів чотириполіусників	53
2.2. Метод «плаваючих» навантажень	56
2.2.1. Графоаналітичний метод визначення W- параметрів чотириполіусника	56
2.2.2. Алгоритм розрахунку параметрів імітансних кіл	62
2.2.3. Параметри діапазону стійкості потенційно- нестійкого чотириполіусника	69

2.2.4. Вдосконалений метод «плаваючих навантажень» вимірювання імітансних параметрів чотириполосника	72
2.2.5. Структурні схеми установок для методу «плаваючих» навантажень	75
2.3. Метод нейтралізації	79
Література до розділу 2	82
Розділ 3. Методи вимірювання нестандартної системи імітансних параметрів потенційно-нестійких чотириполосників	85
3.1. Теоретичне обґрунтування методу	85
3.2. Теоретичне обґрунтування алгоритму відображення діаграми Вольперта–Смітта на комплексну площину вхідних імітансів	88
3.3. Експериментальна перевірка адекватності відображення діаграми Вольперта–Смітта на комплексну площину вхідних імітансів	90
3.4. Метод вимірювання інваріантного коефіцієнта стійкості чотириполосника	92
Література до розділу 3	95
Розділ 4. Методи вимірювання хвильових параметрів потенційно-нестійких чотириполосників	96
4.1. Класичні методи вимірювання хвильових параметрів	96
4.2. Метод вимірювання нестандартної системи хвильових параметрів Шварца	100
4.3. Методи вимірювання хвильових параметрів, що базуються на аналізі параметрів сигналу	103
4.4. Метод Філінука–Огородника	105
4.4.1. Теоретичне обґрунтування методу вимірювання нестандартної системи хвильових параметрів чотириполосника	105
4.4.2. Методи та засоби вимірювання модуля та фази коефіцієнта відбиття	108
Література до розділу 4	113

Розділ 5. Інструментальне забезпечення методів вимірювання імітансних та хвильових параметрів потенційно-нестійких чотириполосників.....	116
5.1. Методика оцінювання похибок вимірювання параметрів чотириполосників	116
5.2. Оцінювання методичних похибок визначення W-параметрів потенційно-нестійкого чотириполосника....	118
5.3. Оцінювання методичних похибок визначення хвильових параметрів потенційно-нестійкого чотириполосника.....	125
5.4. Методи та засоби вимірювання максимально досяжного стійкого коефіцієнта передачі по потужності	131
5.5. Засоби вимірювання імітансних та хвильових параметрів потенційно-нестійких чотириполосників.....	138
5.5.1. Вимірювання імпедансних характеристик за допомогою вимірювальної лінії.....	138
5.5.1.1. Вимірювальні лінії.....	138
5.5.1.2. Загальні вимоги до засобів вимірювання.....	142
5.5.1.3. Вимірювання коефіцієнта відбиття вимірювальної лінії	144
5.5.1.4. Вимірювання фази коефіцієнта відбиття	148
5.5.1.5. Вимірювання повного опору	148
5.5.2. Автоматизація вимірювання повного опору.....	151
5.6. Обґрунтування засобів вимірювання параметрів чотириполосників та фізичних еквівалентних схем транзисторів.....	154
5.7. Експериментальна перевірка методів вимірювання імітансних та хвильових параметрів чотириполосників .	163
5.8. Експериментальні дослідження імітансних та хвильових параметрів транзисторів	165
Література до розділу 5	173

ВСТУП

Автоматизація процесів виробництва, ускладнення і розширення фронту наукових експериментів тягне за собою необхідність розробки принципово нових методів та засобів вимірювання параметрів електронних приладів на базі нових алгоритмів і обчислювальної техніки.

Якість проектування сучасної радіоелектронної апаратури в основному визначається похибкою визначення параметрів компонентів та пристроїв, що входять до її складу. Вдосконалення елементної бази призвело до явища потенційної нестійкості низки компонентів та пристроїв в певному діапазоні частот та значень навантажень. Це призводить до неконтрольованого самозбудження вимірювальних установок в процесі вимірювань і, як наслідок, до росту похибки вимірювання параметрів. В зв'язку з цим актуальною є задача розробки таких методів та засобів вимірювань, які б в процесі вимірювань забезпечували стійкість вимірювальної установки, навіть в випадках, коли самі компоненти та пристрої є потенційно-нестійкими. Питання, пов'язані з цим науковим напрямом досліджень, розглядалися у роботах А. М. Ляпунова, А. А. Куликовського, М. А. Філінюка, Н. З. Шварца, С. М. Павлова, М. М. Семеренко, М. О. Возняка та ін.

У сучасному проектуванні радіоелектронної апаратури широке застосування отримало використання імітансних та хвильових параметрів чотириполюсників. Перші, як правило, використовуються в діапазоні низьких та високих частот, а другі – в діапазоні надвисоких частот. Недоліком стандартних методів вимірювання перших та других параметрів є те, що вони вимірюються при фіксованих імітансах навантаження та генератора, при яких потенційно-нестійкий чотириполюсник може зайти в область нестійкості, що призводить до значної похибки вимірювання.

Сучасні наукові досягнення в області радіоелектроніки призвели до появи великої кількості компонентів, що призначені для роботи в діапазоні надвисоких частот. Більшість чотириполюсників в цьому діапазоні володіють потенційною нестійкістю [1]. Існуючі методи та побудована на їх основі вимірювальна апаратура або взагалі не

пристосована до вимірювання параметрів таких чотириполіусників, або потребує вдосконалення з метою розширення функціональних можливостей і поліпшення метрологічних характеристик.

У монографії узагальнені результати досліджень з розробки методів і засобів вимірювання параметрів потенційно-нестійких чотириполіусників.

В першому розділі проведено класифікацію чотириполіусників та їх параметрів. У другому розділі розглянуті методи вимірювання стандартної системи імітансних параметрів потенційно-нестійких чотириполіусників. В третьому розділі розглядаються методи вимірювання нестандартних систем імітансних параметрів. У четвертому розділі розглянуто методи вимірювання хвилевих параметрів потенційно-нестійких чотириполіусників. Оцінка похибок та експериментальна перевірка методів вимірювання імітансних та хвилевих параметрів потенційно-нестійких чотириполіусників розглянута у п'ятому розділі.

Монографія розрахована на наукових і інженерно-технічних працівників, що займаються дослідженням і проектуванням елементів, пристроїв і систем вимірювальної техніки, радіоелектроніки і систем керування, а також на аспірантів, магістрів і студентів вищих навчальних закладів.

РОЗДІЛ 1. КЛАСИФІКАЦІЯ ЧОТИРИПОЛЮСНИКІВ ТА ЇХ ПАРАМЕТРІВ

1.1. Вихідні визначення

Основне призначення будь-якої моделі, що повинна лежати в основі розрахунку, розробки чи дослідження, – надати в розпорядження розробників вичерпну та зручну інформацію про поведінку приладу під час його роботи. Розробників цікавить поведінка не взагалі схем чи транзисторів, а поведінка конкретного приладу чи конкретного транзистора або, в крайньому випадку, поведінка деякого середнього з цієї партії. Фізичні моделі могли б надати таку інформацію, якби параметри їх елементів були виміряні з високою точністю. На жаль, сучасна техніка не дозволяє здійснити такі вимірювання, тому розрахунок приладів, що базується на результатах неточних вимірювань, є більше якісним, ніж кількісним.

Існує декілька шляхів подолання вказаних труднощів. Один з них – повна відмова від фізичних (структурних) моделей та опис схеми на основі її зовнішніх характеристик. Такі безструктурні моделі є достатньо точними, оскільки, будучи отриманими при безпосередньому вимірюванні параметрів приладу, автоматично враховують всі взаємозв'язки в ньому. Фізична ж модель, якою б складною вона не була, завжди є наближеною.

Найпоширенішою з згаданих безструктурних моделей, що узагальнює характерні властивості лінійних електричних схем, є чотириполосник. Електричне коло будь-якої складності може бути представлене у вигляді об'єкта, що описується співвідношенням сигналів на певній кількості пар вхідних (вихідних) контактів. Так, в якості чотириполосника можуть бути представлені довга лінія, транзистор, електричний фільтр, трансформатор, підсилювач та взагалі будь-який інший пристрій з двома парами виводів, включений між джерелом і споживачем електричної енергії, коли предметом дослідження є струми і напруги поза самим чотириполосником. Внутрішня структура кола не враховується при аналізі, в цьому випадку об'єкт являє собою «чорний ящик».

Поняття чотириполюсника виникло як зручне узагальнення характерних властивостей лінійних електричних схем. Чотириполюсником називається пристрій, що має чотири затискачі (полюси). Передбачається, що полюси розділені на дві групи – вхідну і вихідну, і струми в затискачах чотириполюсника попарно рівні і протилежні за напрямом. Аналогом чотириполюсника в НВЧ діапазоні є так званий двоплечний пристрій. Цим терміном позначається замкнутий металевий об'єм, що має вхід і вихід у вигляді відрізків регулярної передавальної лінії; передбачається, що в них може поширюватися лише один тип хвилі.

Якщо в передавальних лініях вибрати контрольні перерізи досить віддаленими від області збудженого поля і записати рівняння, що пов'язують однакові за змістом величини в цих перерізах (наприклад, поле E або H в деяких фіксованих точках), то ці рівняння за формою тотожні рівнянням чотириполюсника. Причина такої подібності в тому, що рівняння чотириполюсника описують загальні фізичні закономірності, пов'язані з процесами проходження, відображення і поглинання енергії в направляючих лінійних системах. Ці закономірності незмінні у всіх діапазонах частот і вивчати їх можливо в тому діапазоні та у тих термінах, що є більш зручними. Найпоширенішою є класична теорія чотириполюсників, у якій поняття струму і напруги мають однозначний канонічний зміст. Прийняті за позитивні напрямки струмів при прямій (зліва – направо) та зворотній (справа – наліво) передачах показані відповідно на рис. 1.1а та 1.1б. Затискачі, до яких приєднано генератор, називають вхідними затискачами чотириполюсника, а затискачі, до яких приєднано приймач (навантаження) – вихідними.

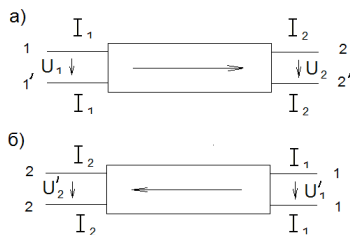


Рис.1.1. Напрями струмів у чотириполюснику

Чотириполюсники можна класифікувати за багатьма ознаками. Основні з них представлені на рис. 1.2.

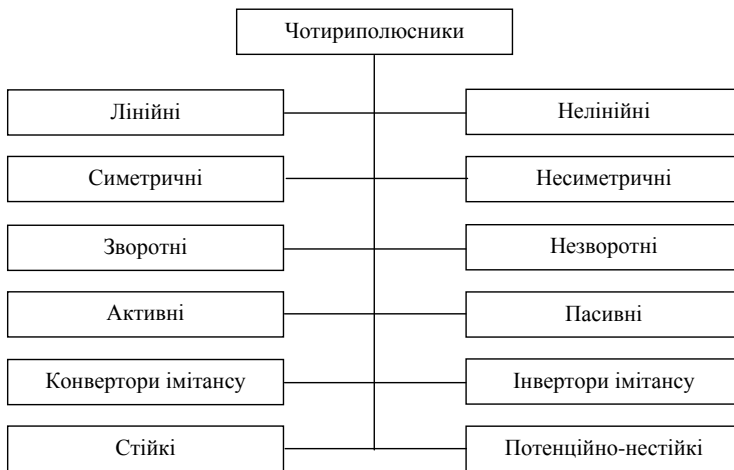


Рис. 1.2. Класифікація чотириполюсників

За ознакою лінійності елементів, що входять до них, чотириполюсники поділяють на лінійні та нелінійні. Лінійними називаються чотириполюсники, у яких струми і напруги на полюсах (U_1 , U_2 , I_1 , I_2) пов'язані лінійною залежністю. Одержали розповсюдження три види цієї залежності:

$$\begin{aligned} U_1 &= a_{11}U_2 + a_{12}I_2, \\ I_1 &= a_{21}U_2 + a_{22}I_2, \end{aligned} \quad (1.1)$$

$$\begin{aligned} U_1 &= z_{11}U_2 + z_{12}I_2, \\ I_1 &= z_{21}U_2 + z_{22}I_2, \end{aligned} \quad (1.2)$$

$$\begin{aligned} U_1 &= y_{11}U_2 + y_{12}I_2, \\ I_1 &= y_{21}U_2 + y_{22}I_2. \end{aligned} \quad (1.3)$$

Тут a_{11} , a_{22} – безрозмірні, a_{12} , z_{11} , z_{12} , z_{21} , z_{22} мають розмірність опорів; a_{21} , y_{11} , y_{12} , y_{21} , y_{22} – розмірність провідностей. Сучасна теорія багатополусників і, зокрема, чотириполюсників базується на основі використання математичного апарату теорії матриць [2]. У матричному записі [3] рівняння (1.1) – (1.3) набувають вигляду

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}a_{12} \\ a_{21}a_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix} = [a] \times \begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix}, \quad (1.4)$$

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{11}z_{12} \\ z_{21}z_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = [z] \times \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}, \quad (1.5)$$

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11}y_{12} \\ y_{21}y_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = [y] \times \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix}, \quad (1.6)$$

де $[a]$ – матриця передачі; $[z]$ – матриця опорів; $[y]$ – матриця провідностей.

Зв'язок між елементами різних матриць має вигляд:

$$\begin{bmatrix} a_{11}a_{12} \\ a_{21}a_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{z_{11}}{z_{21}} & -\frac{|z|}{z_{21}} \\ \frac{1}{z_{21}} & -\frac{z_{22}}{z_{21}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{y_{22}}{y_{21}} & -\frac{y}{y_{21}} \\ \frac{y_{21}}{y_{21}} & \frac{y_{11}}{y_{21}} \end{bmatrix}, \quad (1.7)$$

$$\begin{bmatrix} z_{11}z_{12} \\ z_{21}z_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{a_{11}}{a_{21}} & -\frac{|a|}{a_{21}} \\ \frac{1}{a_{21}} & -\frac{a_{22}}{a_{21}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{y_{22}}{|y|} & -\frac{y_{12}}{|y|} \\ -\frac{y_{21}}{|y|} & -\frac{y_{11}}{|y|} \end{bmatrix}, \quad (1.8)$$

$$\begin{bmatrix} y_{11}y_{12} \\ y_{21}y_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{z_{22}}{|z|} & -\frac{z_{21}}{|z|} \\ -\frac{z_{21}}{|z|} & \frac{z_{11}}{|z|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{a_{22}}{a_{12}} & -\frac{|a|}{a_{12}} \\ \frac{1}{a_{12}} & -\frac{a_{11}}{a_{12}} \end{bmatrix}, \quad (1.9)$$

де

$$|y| = \frac{1}{|z|} = y_{11}y_{22} - y_{12}y_{21} = -\frac{a_{21}}{a_{12}}, \quad (1.10)$$

$$|z| = \frac{1}{|y|} = z_{11}z_{22} - z_{12}z_{21} = -\frac{a_{12}}{a_{21}}, \quad (1.11)$$

$$|a| = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21} = -\frac{z_{21}}{z_{12}} = -\frac{y_{21}}{y_{12}}. \quad (1.12)$$

Рівняння (1.4–1.6) відповідають передачі енергії зліва направо (рис. 1.1а). При передачі в зворотному напрямку (рис. 1.1б) міняються місцями вхідні і вихідні затискачі (тобто індекси 1 і 2), враховується зміна напрямку струмів і, нарешті, на відміну від випадку прямої передачі усім величинам надається значок «штрих».

Виконуючи в (1.4) – (1.6) зазначені підстановки

$$U'_2 \rightarrow U_1; U'_1 \rightarrow U_2; -I'_2 \rightarrow I_2$$

і, виконуючи потім перетворення необхідні для того, щоб форма запису рівнянь відрізнялася від (1.4) – (1.6) тільки значком «штрих», одержуємо матричні рівняння, що відповідають зворотному напрямку передачі енергії:

$$\begin{bmatrix} U'_1 \\ I'_1 \end{bmatrix} = \frac{1}{|a|} \begin{bmatrix} a_{22} & a_{12} \\ a_{21} & a_{11} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} U'_2 \\ I'_2 \end{bmatrix}, \quad (1.13)$$

$$\begin{bmatrix} U'_1 \\ U'_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{|a|} \begin{bmatrix} -z_{22} & -z_{12} \\ -z_{21} & -z_{11} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I'_1 \\ I'_2 \end{bmatrix}, \quad (1.14)$$

$$\begin{bmatrix} I'_1 \\ I'_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{|a|} \begin{bmatrix} -y_{22} & -y_{12} \\ -y_{21} & -y_{11} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} U'_1 \\ U'_2 \end{bmatrix}. \quad (1.15)$$

Чотириполюсники також розділяють на симетричні та несиметричні. Симетричним чотириполюсник називається тоді, коли зміна місць його вхідних та вихідних виводів не змінить величин струмів і напруг в колі, з яким з'єднаний чотириполюсник. У іншому разі чотириполюсник є несиметричним.

Чотириполюсники називаються оборотними, якщо виконується теорема оберненості, тобто відношення напруги на вході до струму на виході не залежить від того, яка з двох пар виводів є вхідною і яка вихідною. Якщо ж ця умова не виконується, чотириполюсник називається необоротним. Симетричні чотириполюсники завжди оборотні.

Чотириполюсники можуть бути активними і пасивними. Якщо чотириполюсник містить всередині джерела (джерело) електричної енергії, то він називається активним [4, 5]. При цьому, якщо ці джерела є незалежними, то у випадку лінійного чотириполюсника обов'язковою додатковою умовою активності є наявність на одній або обох парах його розімкнених виводів напруги, зумовленої джерелами електричної енергії, що знаходяться всередині, тобто необхідно, щоб дія цих джерел не компенсувалася всередині чотириполюсника. Якщо ж джерела всередині чотириполюсника є залежними, то від'єднання його від іншої частини кола призводить до того, що напруги на розімкнених виводах немає.

Пасивним називається чотириполюсник, який не містить джерел електричної енергії. Пасивний лінійний чотириполюсник може мі-

стити джерела електричної енергії, які взаємно компенсуються таким чином, що напруги на обох парах розімкнених виводів дорівнюють нулю.

Чотириполюсники можна також розглядати у якості узагальнених перетворювачів імітансу (УПІ). Узагальненим перетворювачем імітансу називається чотириполюсник (рис. 1.3), імітанс між однією парою клем якого $W_{Bx}(W_{Bux})$ є функцією імітансу $W_H(W_G)$, підключеного до другої пари його клем [6]:

$$W_{Bx} = f(W_H), \quad W_{Bux} = f(W_G).$$

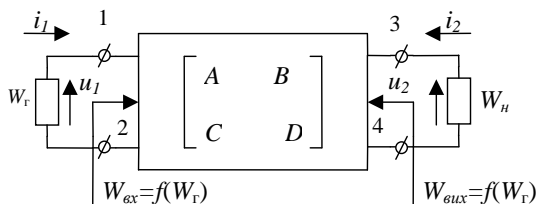


Рис. 1.3. Структурна схема узагальненого перетворювача імітансу

Всі види УПІ можна поділити на дві групи – ті, що використовують схемотехнічні розв’язки для одержання необхідного коефіцієнта перетворення імітансу, і ті, що використовують для цієї мети фізичні ефекти в твердому тілі, в частоті, в транзисторних структурах.

Всі типи чотириполюсників в якості УПІ можна розділити на конвертори та інвертори імітансу [6]. Під імітансом W розуміється опір Z (імпеданс) або провідність Y (адмітанс), які у загальному випадку є комплексними [7]. Конвертором імітансу (КІ) називається чотириполюсник, імітанс між однією парою виводів якого прямо пропорційно залежить від імітансу, під’єданого до іншої пари виводів. Наприклад, в випадку перетворення конвертором імітансу повного опору Z_H (пряме перетворення) його вхідний повний опір $Z_{ex} = (A/\Delta)Z_H$, де A і D – елементи $[ABCD]$ матриці чотириполюсника (в загальному випадку комплексні), що пов’язують струми та напруги на його записках [8] (рис. 1.3).

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_2 \\ -I_2 \end{bmatrix}. \quad (1.16)$$

Для ідеального конвертора імітансу матриця (1.16) має вигляд:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_2 \\ -I_2 \end{bmatrix}. \quad (1.17)$$

Із (1.17) випливає, що ідеальний конвертор імітансу є незасмним та активним, якщо $A \cdot D = 1$ [9]. Відношення

$$A/D = T_k \quad (1.18)$$

називають коефіцієнтом конверсії прямого перетворення імітансу W_H , а відношення $T'_k = 1/T_k$ – коефіцієнтом конверсії зворотного перетворення імітансу W_2 .

В загальному випадку коефіцієнт конверсії – це комплексна величина. В окремому випадку, коли параметри ланцюгової матриці (1.17) є дійсними числами, коефіцієнт конверсії також дійсна величина. Конвертори імітансу, що характеризуються таким коефіцієнтом конверсії, називаються дійсними конверторами імітансу.

Якщо параметри ланцюгової матриці (1.17) характеризуються уявними числами, коефіцієнт конверсії також є уявною величиною, а відповідні КІ називаються уявними конверторами імітансу. Ідеальним конвертором імітансу називається чотириполосник, коефіцієнт конверсії якого не залежить від перетворюваного імітансу.

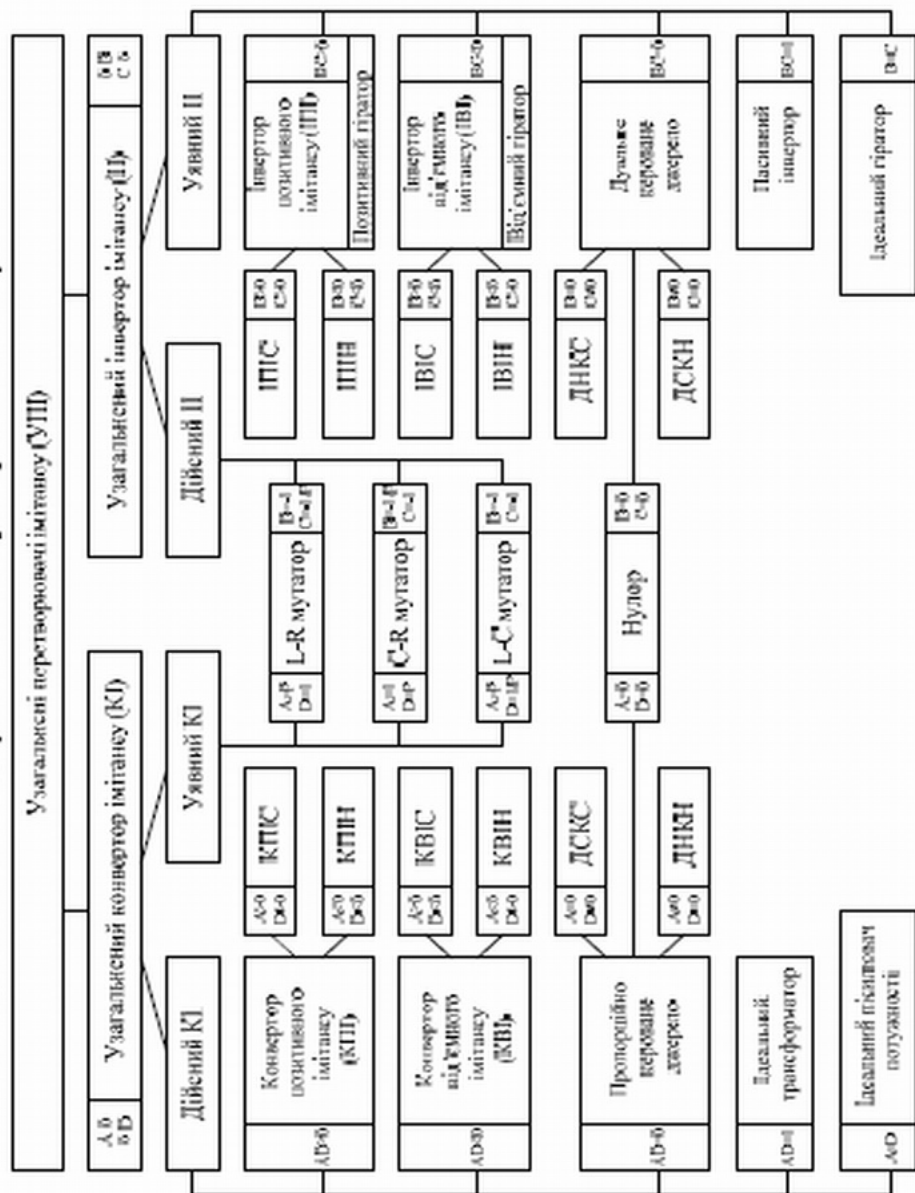
Значення коефіцієнта конверсії T_k не служить повним описом конвертора імітансу, матриця якого (1.17) має два параметра A і D . В залежності від співвідношення між параметрами A і D , дійсні конвертори імітансу поділяються на п'ять видів (табл. 1.1).

Інвертором імітансу називають чотириполосник, імітанс між однією парою виводів якого обернено пропорційно залежить від імітансу, під'єданого до іншої пари виводів. Наприклад, у випадку перетворення інвертором імітансу повного опору навантаження Z_H (пряме перетворення) його вхідний повний опір $Z_{ex} = (B/C)Z_H$.

Для ідеального інвертора імітансу матриця (1.16) має вигляд:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & B \\ C & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_2 \\ -I_2 \end{bmatrix}. \quad (1.19)$$

Таблиця 1.1. Основні види узагальнених перетворювачів імітансу



Із (1.19) випливає, що ідеальний інвертор імітансу також є не-заємним та активним чотириполюсником [9]. Відношення $B/C = T_i$ називають коефіцієнтом інверсії прямого перетворення імітансу W_H , а величину $W_{sp} = \sqrt{T_i}$ – імітансом гірації прямого перетворення. В загальному випадку це комплексна величина. В окремому випадку, коли параметри ланцюгової матриці (1.19) 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.

Властивості та реалізація ідеальних дійсних інверторів і конвекторів імітансу розглянуті в роботах [6, 9–13].

Якщо параметри матриці (1.19) характеризуються уявними числами, відповідні інвертори імітансу називаються уявними.

Значення коефіцієнта інверсії T_i не слугує повним описом інвертора імітансу, матриця якого (1.19) має два параметри B і C . В залежності від співвідношення між параметрами B і C , дійсні інвертори імітансу поділяються на п'ять видів (див. табл. 1.1).

За допомогою дійсних і уявних перетворювачів імітансу можна реалізувати, в якості входних функцій або функцій передачі, будь-який раціональний дріб з дійсними коефіцієнтами і довільним співвідношенням ступеня числівника та знаменника [10]. В діапазоні низьких частот при розв'язанні цих задач використовується математична модель УПП, що складається з коефіцієнта перетворення імітансу T і чутливості якості цього коефіцієнта до зміни параметрів α_I УПП – $S_{\alpha_I}^T$. При цьому, як правило, передбачається, що коефіцієнт перетворення імітансу є дійсною (як правило рівною 1 або -1) або уявною величиною.

При практичному використанні УПП необхідна не тільки реалізація заданої функції, але й забезпечення визначених експлуатаційних вимог за стійкістю, рівнем шуму, коефіцієнтом передачі й т. п. Вибір виду та типу УПП в даному випадку не може бути виконаний

тільки за коефіцієнтом перетворення та «якості», 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 УПП, 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 параметрами (наприклад Y, Z, S і т.п.), які використовуються при розрахунку інших видів електронних пристроїв.

Виходячи з перерахованих вимог, у роботі [14] запропоновано таку систему робочих параметрів УПП:

прямий коефіцієнт перетворення – T ;

зворотний коефіцієнт перетворення – T' ;

похибка перетворення – γ_T ;

інваріантний коефіцієнт стійкості – $K_{c.вн}$;

гранична частота – f_T ;

чутливість коефіцієнта перетворення (якість) – $S_{\alpha_l}^T$;

максимально-досяжний коефіцієнт стійкої передачі

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 – $F_{ш \min}$;

ефективність – E .

Кожен з вище перерахованих параметрів може бути виражений через параметри узагальненої W-матриці чотириполосника [14].

При розгляді чотириполосника на предмет стійкості, виникає необхідність розподілу чотириполосників на потенційно-нестійкі та стійкі. Відповідно до загальної теорії стійкості, основи якої закладені А.М. Ляпуновим [15], про стійкість будь-якого лінійного або лінеаризованого активного чотириполосника можна судити з розташування коренів його характеристичного рівняння в площині комплексної частоти $P = \lambda + j\omega$. Для стійкого чотириполосника необхідно і достатньо, щоб всі корені $P_i = \lambda_i + j\omega_i$ знаходилися в лівій напівплощині P , тобто мали негативні дійсні частини ($\lambda_i < 0$). Розрахунок коренів в більшості випадків складний, тому зазвичай використовують непрямі методи. У радіоелектроніці широке застосування одержав один з таких методів – імітансний критерій стійкості [16].

Про стійкість кола згідно з цим критерієм судять за знаком дійсної частини сумарного вхідного імітансу $W_{\Sigma_{вх}} = W_{\Gamma} + W_{ex}$ у точках 1–2 або сумарного вихідного імітансу $W_{\Sigma_{вих}} = W_{H} + W_{вих}$ у точках 3–4 (див. рис. 1.3). Для абсолютної стійкості необхідно і достатньо, щоб дійсна частина сумарного імітансу $W_{\Sigma_{вх}}$ або $W_{\Sigma_{вих}}$ була позитивною на тій частоті, на якій уявна складова його дорівнює нулю [17].

Якщо $\text{Re}W_{ex(вих)}(j\omega) \geq 0$ у всій області частот, то досліджуване коло абсолютно стійке, тому що завжди $\text{Re}W_{\Gamma(H)}(j\omega) \geq 0$. Якщо ж на деякій частоті (або в смузі частот) $\text{Re}W_{ex(вих)}(j\omega) < 0$, то такий чотириполосник потенційно-нестійкий.

Потенційно-нестійкий чотириполосник схильний до самозбудження при деяких величинах $W_{\Gamma}(j\omega)$ і $W_{H}(j\omega)$. Для оцінки запасу стійкості вводиться інваріантний коефіцієнт стійкості $K_{c.вн}$ [7, 17]. Активний чотириполосник стійкий, якщо $K_{c.вн} > 1$, і потенційно-нестійкий, якщо $K_{c.вн} < 1$. Величина $K_{c.вн}$ лежить в інтервалі $(-1; +\infty)$. Границі потенційної стійкості відповідає значення $K_{c.вн} = 1$. Коефіцієнт $K_{c.вн}$, що дуже важливо, інваріантний до виду W -матриці, тобто його значення не залежить від вибору системи Z -, Y -, g - чи h -параметрів.

Система, що описує зв'язок струмів і напруг в термінах параметрів класичних матриць провідності або опору ще називається системою імітансних параметрів чотириполосника. Вона має вигляд [7, 18–20]:

$$W_{ij} = \begin{vmatrix} W_{11} & W_{12} \\ W_{21} & W_{22} \end{vmatrix}, \quad (1.20)$$

де W_{ij} – імітансні параметри.

Узагальнені параметри чотириполосника $W_{i,j}$ є коефіцієнтами лінійних рівнянь. Їх можна або виміряти, або отримати, перерахувавши з іншої системи параметрів. Перераховувати можна або початково виміряні значення параметрів чотириполосника або параметри, отримані при аналізі його внутрішньої структури. Найбільш зручною і точною є система, параметри якої визначені за допомогою прямих вимірювань.

Параметри, що можуть бути виміряні безпосередньо, називаються робочими. Параметри ж, які не можуть бути отримані за допомогою прямих вимірювань, а являються лише результатом розрахунків, називаються розрахунковими. І ті, і інші системи параметрів можуть розглядатися як безструктурні моделі чотириполосників [21-23].

На сьогоднішній день при проектуванні радіоелектронних пристроїв та контролі їх параметрів найбільш широко використовуються дві системи параметрів чотириполосників: вже згадана система узагальнених імітансних W -параметрів та система параметрів матриці розсіювання (S -параметри). Система W -параметрів характеризується імітансуми генератора W_g та навантаження W_n . Вибір системи параметрів визначається здебільшого умовами задачі та зручністю її вирішення [7, 24].

Вимірювання струму та напруги в діапазоні НВЧ пов'язане зі значними труднощами або взагалі неможливе [21]. Чотириполосник в цьому випадку необхідно розглядати як елемент передавальної лінії. Чотириполосники НВЧ діапазону описуються за допомогою параметрів, що характеризують хвильовий процес – S - та T -параметри. Як і в пристроях НЧ діапазону, внутрішні процеси в об'єкті не беруться до уваги. Для зручності розуміння та розрахунків використовують «хвилю напруги», амплітуда якої являє собою величину – корінь квадратний з потужності сигналу. В діапазоні НВЧ S -параметри простіше вимірюються, але розрахункові співвідношення, виражені через них, складніші та менш наочні. Інколи через виміряні S -параметри знахо-

дять за формулами розрахунку відповідні Y -, Z -, h - або g -параметри. Але при цьому імовірна велика похибка перерахунку.

На практиці також часто застосовують нестандартні системи параметрів чотириполосників [25, 26]. Наприклад, нестандартну систему S -параметрів. Подібні системи можуть бути як повними, коли з їх допомогою можливо визначення всіх елементів стандартної системи параметрів, так і частковими (неповними), коли через них можна виразити лише частину елементів системи стандартних параметрів. Введення неповної системи параметрів, яка не є універсальною, властивою повній системі, доцільно у випадку, якщо введена система достатня для розрахунку певного класу пристроїв та має при цьому істотні переваги при вимірюванні у порівнянні з повною системою параметрів чотириполосника.

Для певних класів електронних пристроїв існують спеціальні системи, що складаються з робочих параметрів. Так, наприклад, для активних НВЧ фільтрів, як потенційно-нестійких чотириполосників, застосовують математичну модель, яка складається з внутрішнього інваріантного коефіцієнта стійкості $K_{c.вн}$, максимально досяжного стійкого коефіцієнта передачі по потужності K_{ms} , вхідного $W_{вх}$ та вихідного $W_{вих}$ імітансів [27].

Нині існує велика кількість методів вимірювання параметрів чотириполосників: стандартні методи вимірювання параметрів у режимі КЗ і ХХ, методи з використанням режимів двостороннього узгодження, графічні методи з використанням статичних характеристик, методи прирощення постійних струмів і напруг тощо [28]. Але з переходом у НВЧ діапазон більшість з них виявляють свою непридатність. Значні труднощі, пов'язані з можливістю неконтрольованого самозбудження вимірювальної системи, виникають також при вимірюванні параметрів потенційно-нестійких чотириполосників. В нашій роботі аналізуються існуючі методи та засоби вимірювання параметрів потенційно-нестійких чотириполосників з метою виявлення їх переваг та недоліків. Розглянемо перераховані вище параметри чотириполосників дещо детальніше.

Для симметричного чотириполюсника маємо

$$[T] = \begin{bmatrix} T_{11} & \mp i\sqrt{|T_{11}|^2 - 1} \\ \pm i\sqrt{|T_{11}|^2 - 1} & T_{11}^* \end{bmatrix}, \quad (1.150)$$

і для антисиметричного

$$[T] = \begin{bmatrix} T_{11} & \mp \sqrt{|T_{11}|^2 - 1} \\ \pm \sqrt{|T_{11}|^2 - 1} & T_{11}^* \end{bmatrix}. \quad (1.151)$$

Використовуючи перехідні співвідношення (1.90), можна записати відповідні вирази для матриці $[a]$. Для симетричного чотириполюсника при $\rho_1 = \rho_2 = \rho$

$$[a] = \begin{bmatrix} \operatorname{Re} T_{11} & i\rho \left(\operatorname{Im} T_{11} - \sqrt{|T_{11}|^2 - 1} \right) \\ i \frac{1}{\rho} \left(\operatorname{Im} T_{11} - \sqrt{|T_{11}|^2 - 1} \right) & \operatorname{Re} T_{11} \end{bmatrix}, \quad (1.152)$$

а для антисиметричного (для будь-якого співвідношення між ρ_1 і ρ_2)

$$[a] = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2}} \left(\operatorname{Re} T_{11} - \sqrt{|T_{11}|^2 - 1} \right) & i\sqrt{\rho_1 \rho_2} \operatorname{Im} T_{11} \\ i \frac{1}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} \operatorname{Im} T_{11} & \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}} \left(\operatorname{Re} T_{11} - \sqrt{|T_{11}|^2 - 1} \right) \end{bmatrix}. \quad (1.153)$$

Література до розділу 1

1. Филинюк Н. А. Краткий исторический обзор развития научного направления «Негатроника» // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 1999. – №3. – С. 38–43.
2. Мальцев А. Основы линейной алгебры / А. Мальцев. – М. : Гостехиздат, 1956. – 328 с.
3. Зелях Э. Основы общей теории линейных электрических схем / Э. Зелях. – М. : Изд. АН СССР, 1951. – 286 с.
4. Бессонов Л. Теоретические основы электротехники / Л. Бессонов. – М. : Высшая школа, 1973. – 752 с.
5. Фельдштейн А.Л. Синтез четырехполюсников и восьмиполюсников на СВЧ / А. Л. Фельдштейн, Л. Р. Явич. – М. : Связь, 1971. – 388 с.

6. Филяновский Н.М. Схемы с преобразователями сопротивления / Н. М. Филяновский, А. Ю. Персианов, В. К. Рыбин. – Л. : Энергия, 1973. – 192 с.
7. Богачев В.М. Транзисторные усилители мощности / В. М. Богачев, В. В. Никифоров. – М. : Энергия, 1978. – 344 с.
8. Маттей Д.Л. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи : пер. с англ. / Д. Л. Маттей, Л. Янг, Е. М. Т. Джонс. – М. : Связь, 1971. – 240 с.
9. Хейнлейн В.Е. Активные фильтры для интегральных схем / В. Е. Хейнлейн, В. Х. Холмс. – М. : Сов. Радио, 1975. – 288 с.
10. Ионкин П.А. Синтез RC-схем с активными невзаимными элементами / П. А. Ионкин, В. Г. Миронов. – М. : Энергия, 1976. – 240 с.
11. Маклюков М. Инженерный синтез активных RC фильтров низких и инфранизких частот / М. Маклюков. – М. : Энергия, 1971. – 184 с.
12. Славский Г. Активные RC и RCL-фильтры и избирательные усилители / Г. Славский. – М. : Связь, 1960. – 216 с.
13. Хьюлсман Л. Активные фильтры / Л. Хьюлсман. – М. : Мир, 1972. – 318 с.
14. Філінюк М. Аналіз і синтез інформаційних пристроїв на базі потенційно–нестійких узагальнених перетворювачів імітансу. Монографія / М. Філінюк. – Вінниця : ВДГУ, 1998. – 85 с.
15. Ляпунов А. Собрание сочинений / А. Ляпунов. – М. : Из. АН СССР, 1956. – Т.3. – 421 с.
16. Бенинг Ф. Отрицательные сопротивления в электронных схемах / Ф. Бенинг. – М. : Сов. Радио, 1975. – 656 с.
17. Куликовский А. Устойчивость активных линейризованных цепей с усилительными приборами новых типов / А. Куликовский. – М. : Госэнергоиздат, 1962. – 192 с.
18. Кобболд Р. Теория и применение полевых транзисторов: Перевод с английского / Р. Кобболд. – Л. : Энергия, 1975. – 304 с.
19. Сигорский В.П. Основы теории электронных схем / В. П. Сигорский, А. И. Петренко. – К. : Вища школа, 1971. – 567 с.

20. Федотов Я. Основы физики полупроводниковых приборов / Я. Федотов. – М. : Советское радио, 1970. – 591 с.
21. Абубакиров Б.А. Измерение параметров радиотехнических цепей / Б. А. Абубакиров, К. Г. Гудков, Э. В. Нечаев. – М. : Радио и связь, 1984. – 248 с.
22. Транзисторы. Параметры, методы измерений и испытаний / Под ред. И.Г. Бергельсона, Ю.А. Каменецкого, И.Ф. Николаевского. – М. : Сов. радио, 1968. – 504 с.
23. Столярский Э. Измерение параметров транзисторов: Перевод с польского / Э. Столярский. – М. : Советское радио, 1976. – 268 с.
24. Шварц Н. Линейные Транзисторные усилители СВЧ / Н. Шварц. – М. : Советское радио, 1980. – 368 с.
25. Филинюк Н.А. Нестандартная система параметров четырехполосника. – К. : [б. в.], 1984. – 15 с. – (Препр. Укр НИИНТИ. – № 49. Ук – Л84 – 11.01.1984).
26. Шварц Н.З. Система нестандартных S-параметров // Микроэлектроника и полупроводниковые приборы. – М. : Советское радио, 1976. – Выпуск 1. – С. 302–310.
27. Филинюк Н. Активные СВЧ фильтры на транзисторах / Н. Филинюк. – М. : Радио и связь, 1987. – 112 с.
28. Филинюк Н. Анализ методов измерения иммитансных i волновых параметров активных четырехполосников / Н. А. Филинюк, К. В. Огородник // Вісник Хмельницького національного університету. – 2005. – Т. 2, №4, Ч.1. – С. 207–209.
29. Теория связи по проводам / Акульшин П.К. [и др.]. – М. : Связь-издат, 1940. – 298 с.
30. Зелях Э. Идеальный преобразователь мощности – новый элемент электрической цепи / Э. Зелях. – М. : Электросвязь, 1957. – 68 с.
31. Фельдштейн А.Д. Неоднородные линии // Радиотехника. – 1951. – т.6, №5. – С.15-28.
32. Справочник по волноводам. Перевод с англ. – М. : Сов. Радио, 1952. – 324 с.
33. Вайнштейн Л. Электромагнитные волны / Л.Вайнштейн. – М. : Сов. Радио, 1957. – 234 с.

Література до розділу 2

1. Богачев В. М. Транзисторные усилители мощности / В. М. Богачев, В. В. Никифоров. – М. : Энергия, 1978. – 344 с.
2. А. с. 1141346А СССР, МКИ G 01 R 27/28. Устройство для измерения полных сопротивлений многополюсников / Н. А. Филинюк (СССР). – №3453753/24-09 ; Заявлено 25.05.82 ; Опубл. 23.02.85, Бюл. №7. – 4 с.
3. Филинюк Н. Определение параметров математических моделей информационных устройств на основе негатронов // Негатроника / Н. Филинюк. – Новосибирск : Наука, 1995. – 315 с.
4. Филинюк Н. А. Измерение Y-параметров матрицы проводимости СВЧ транзисторов // Изв. вузов МВ и ССО СССР. Радиотехника. – 1984. - Т. 27. – № 3. – С. 81–82.
5. Філінюк М. А. Аналіз методів і засобів вимірювання параметрів безструктурних моделей багатоелектродних напівпровідникових пристроїв / М. А. Філінюк, Д. В. Гаврілов, С. А. Ліщенко // Вісник Житомирського інженерно-технологічного інституту. – 2002. – №1. – С. 6–10.
6. А. с. 1095102 СССР, МКИ G 01 R 27/28. Устройство для измерения матрицы Y-проводимости четырехполюсника / Н. А. Филинюк (СССР). – №3487978/18-21 ; Заявлено 19.08.82 ; Опубл. 30.05.84, Бюл. № 20. – 6 с.
7. Фельдштейн А. Л. Синтез четырехполюсников и восьмиполюсников на СВЧ / А. Л. Фельдштейн, Л. Р. Явич. – М. : Связь, 1971. – 388 с.
8. Спиридонов Н. Основы теории транзисторов / Н. Спиридонов. – К. : Техника, 1975. – 360 с.
9. Столярский Э. Измерение параметров транзисторов : Перевод с польского / Э. Столярский. – М. : Советское радио, 1976. – 268 с.
10. Аронов В.Л. Испытание и исследование полупроводниковых приборов / В. Л. Аронов, М. А. Федотов. – М. : Высшая школа, 1975. – 325 с.
11. Степаненко И. Основы теории транзисторов и транзисторных схем / И. Степаненко. – М. : Энергия, 1977. – 672 с.
12. Бессонов Л. Теоретические основы электротехники / Л. Бессонов. – М. : Высшая школа, 1973. – 752 с.
13. Транзисторы. Параметры, методы измерений и испытаний / Под ред. И. Г. Бергельсона, Ю. А. Каменецкого, И. Ф. Николаевско-го. – М. : Сов. радио, 1968. – 504 с.

- 14.Абубакиров Б. А.Измерение параметров радиотехнических цепей / Б. А. Абубакиров, К. Г. Гудков, Э. В. Нечаев. – М. : Радио и связь, 1984. – 248 с.
- 15.А. с. 1564571 СССР, МКИ G 01 R 27/28. Способ определения Y-параметров матрицы проводимости четырехполюсников / М. М. Семеренко (СССР). – №4098724/24-21 ; Заявлено 30.07.86 ; Оpubл. 15.05.90, Бюл. № 18. – 6 с.
- 16.А. с. 315126 СССР, МКИ G 01 R 27/28. Устройство для измерения параметров активных четырехполюсников / В. М. Кейн (СССР). – №1399714/26-9 ; Заявлено 19.01.70 ; Оpubл. 21.09.71, Бюл. № 28. – 2 с.
- 17.А. с. 171287 СССР, МКИ G 01 R 27/28. Способ определения Y-параметров электрических (N+1)-полюсников / А. М. Афанасев, С. М. Госкин, И. А. Степанов (СССР). – №4346242/21 ; Заявлено 18.12.87 ; Оpubл. 15.02.92, Бюл. № 6. – 5 с.
- 18.Каменецкий Ю.А. Методы измерения параметров транзисторов на высоких частотах // Полупроводниковые приборы и их применение. – М. : Советское радио. – 1960. – Выпуск 4. – С. 101–127.
- 19.Смит Ф. Круговые диаграммы в радиоэлектронике : перевод с английского / Ф. Смит. – М. : Связь, 1976. – 144 с.
- 20.Жалуд В. Шумы в полупроводниковых устройствах / В. А. Жалуд, В. Н. Кулешов. – М. : Советское радио, 1977. – 416 с.
- 21.Лебедев И. Техника и приборы СВЧ / И. Лебедев. – М. : Высшая школа, 1970. – Т. 1. – 440 с.
- 22.Возняк О. Метод вимірювання повної системи Y-параметрів матриці провідності НВЧ чотириполюсників / О. М. Возняк, А. В. Рудик // Приложение к Всеукраинскому научно-техническому журналу «Вибрации в технике и технологии». Сборник трудов международного симпозиума. – 1998. – С. 308–310.
- 23.Возняк О. Алгоритм розрахунку імітансних параметрів активного чотириполюсника з використанням діаграми повних провідностей Вольперта–Сміта / О. М. Возняк, Ле Туан Ту, М. А. Філінюк // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 1998. – № 1. – С. 89–92.
- 24.Возняк О. М. Нестандартна система екстремальних параметрів чотириполюсників // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 1997. – № 3. – С. 88–92.

- 25.Філінюк М. Вимірювання інваріантного коефіцієнту стійкості чотириполюсника / М. А. Філінюк, Д. В. Гаврілов, К. В. Огородник // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2003. – №1. – С. 88–91.
- 26.Филинук Н. Активные СВЧ фильтры на транзисторах / Н. Филинук. – М. : Радио и связь, 1987. – 112 с.
- 27.Огородник К. В. Исследование диапазона устойчивости потенциально-неустойчивого четырехполюсника // Тр. V МНТК, «Микроэлектронные преобразователи и приборы на их основе». – Баку (Азербайджан). – 2005. – С. 285–287.
- 28.Филинук Н. Модернизированный метод “плавающей нагрузки” определения иммитансных параметров линейных четырехполюсников / Н. А. Филинук, Д. В. Гаврилов, К. В. Огородник // Вісник Технологічного університету Поділля. – 2003. – Т. 2, №3. – С. 107–109.
- 29.Лебедев И. Техника и приборы СВЧ / И. Лебедев. – М. : Высшая школа, 1970. – Т. 2. – 460 с.
- 30.Патент України на винахід 18059 А, Н 03 Н 11/00. Імпедансний пристрій / М. А. Філінюк, О. М. Возняк, Я. І. Курзанов, О. В. Огородник. – №83225654 ; Заявлено 22.03.94 ; Опубл. 31.10.97, Бюл. № 5. – 3 с.
- 31.Шварц Н. Линейные транзисторные усилители СВЧ / Н. Шварц. – М. : Советское радио, 1980. – 368 с.
- 32.Чернушенко А. М. Измерение параметров электронных приборов дециметрового и сантиметрового диапазона волн / А. М. Чернушенко, А. В. Майбородин. – М. : Радио и связь, 1986. – 336 с.
- 33.А. с. 531098 СССР, МКИ G 01 R 27/28. Измеритель составляющих комплексного сопротивления / В. Ф. Бахмутский, Н. И. Горелик и др. (СССР). – Опубл. 15.08.77, Бюл. №37. – 4 с.
- 34.А. с. 490042 СССР, МКИ G 01 R 27/28. Устройство для измерения комплексных сопротивлений / М. А. Гаврилюк, Е. П. Соголовский (СССР). – Опубл. 22.12.75, Бюл. №40. – 4 с.
- 35.Справочник по радиоизмерительным приборам. Т. 1 / Б.А. Абубакиров, А. А. Авдеев и др. ; Под ред. В. С. Насонова. — М. : Сов. радио, 1976. – 227 с.
- 36.Bodway G.E. Two port power flow analyses using generalized scattering parameters. – Microwave J. – 1967. – №5. – P. 61–69.

Література до розділу 3

1. Филинюк Н. Модернизированный метод «плавающей нагрузки» определения иммитансных параметров линейных четырехполосников / Н. А. Филинюк, Д. В. Гаврилов, К. В. Огородник // Вісник Технологічного університету Поділля. – 2003. – Т. 2, №3. – С. 107–109.
2. Филинюк Н. Новые методы определения параметров активного четырехполосника / Н. А. Филинюк, К. В. Огородник // Тр. МНТК «Информационные и электронные технологии в дистанционном зондировании». – Баку (Азербайджан). – 2004. – С. 418–421.
3. Филинюк Н. Способ измерения нестандартных систем Z- и S-параметров СВЧ четырехполосников / Н. А. Филинюк, К. В. Огородник, М. М. Журбан Салех // Материалы 15-й Международной Крымской конференции «СВЧ–техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо-2005). – Севастополь. – 2005. – С. 739–740.
4. Филинюк Н. А. Измерение y-параметров матрицы проводимости СВЧ транзисторов // Известия вузов МВ и ССО СССР. – К. : Радиоэлектроника, 1984. – Т. 27, №3. – С.81–82.
5. Богачев В. М. Транзисторные усилители мощности / В. М. Богачев, В. В. Никифоров. – М. : Энергия, 1978. – 344 с.
6. Декл. пат. 11967 Україна, МКИ G01R27/28. Спосіб вимірювання параметрів чотириполосника з використанням діаграми Вольперта–Смітта / М. А. Філінюк, К. В. Огородник, Салех М. М. Журбан (Україна). – № u200507033 ; Заявл. 15.07.2005 ; Опубл. 16.01.2006, Бюл. № 1. – 4 с.
7. Филинюк Н. А. Определение параметров математических моделей информационных устройств на основе негатронов / Н. А. Филинюк // Негатроника. – Новосибирск : Наука, 1995. – 315 с.
8. Шварц Н. Линейные транзисторные усилители СВЧ / Н. Шварц. – М. : Советское радио, 1980. – 368 с.
9. Декл. пат. 16644 Україна, МКИ G01R27/28. Спосіб вимірювання інваріантного коефіцієнта стійкості чотириполосника / К. В. Огородник, М. А. Філінюк, І. В. Булига (Україна). – № u200602161 ; Заявл. 27.02.2006 ; Опубл. 15.08.2006, Бюл. № 8. – 3с.

Література до розділу 4

1. Абубакиров Б.А. Измерение параметров радиотехнических цепей / Б. А. Абубакиров, К. Г. Гудков, Э. В. Нечаев. – М. : Радио и связь, 1984. – 248 с.
2. Расчет параметров мощных высокочастотных транзисторов / В. М. Богачев [и др.] // Радиотехника и электроника. – 1975. – № 3. – С. 610–620.
3. Изгагин Л. Осциллографический метод измерения S-параметров ВЧ и СВЧ транзисторов / Л. Н. Изгагин, А. Ю. Казаков, Н. З. Шварц // Полупроводниковые приборы и их применение. – М. : Советское радио, 1974. – Выпуск 28. – С. 184–187.
4. Мальтер Т. З. Параметры рассеяния высокочастотных транзисторов и методы их измерения. – М. : Средства связи. – 1978. – № 3. – С. 29–34.
5. Пыхтунова А. И. СВЧ полевые транзисторы на GaAs. / А. И. Пыхтунова // Обзоры по электронной технике. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – М. : ЦНИИ Электронике, 1976. – 46 с.
6. Манойлов В. Анализ чувствительности модулей S-параметров волноводной измерительной ячейки в случае слабопоглощающего диэлектрика / В. Ф. Манойлов, В. В. Чухов // Материалы 15-й Международной Крымской конференции «СВЧ–техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо-2005). – Севастополь. – 2005. – С. 743–744.
7. Шварц Н. Линейные транзисторные усилители СВЧ / Н. Шварц. – М. : Советское радио, 1980. – 368 с.
8. Бова А. Т. Измерение параметров волноводных элементов / А. Т. Бова, И. Б. Лайхтман. – К. : Техника, 1968. – 157 с.
9. Радиотехнические измерения в физических исследованиях / Под редакцией А. Г. Лундина. – М. : Наука, 1977. – 167 с.
10. Чернушенко А. М. Измерение параметров электронных приборов дециметрового и сантиметрового диапазона волн / А. М. Чернушенко, А. В. Майборodin. – М. : Радио и связь, 1986. – 336 с.

11. 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.
12. Бахтин Н. А. Измерение S-параметров СВЧ транзисторов / Н. А. Бахтин, Н. З. Шварц // Полупроводниковые приборы и их применение / Под ред. Я. А. Федотова. – М. : Сов. радио, – 1970. – Вып. 23. – С. 276–284.
13. Фельдштейн А. Л. Синтез четырехполосников и восьмиполосников на СВЧ / А. Л. Фельдштейн, Л. Р. Явич. – М. : Связь, 1971. – 388 с.
14. Байорунас Э. Анализ погрешностей импульсного метода измерения электрических величин рассеяния СВЧ транзисторов / Э. К. Байорунас, Д. Ю. Эйдукас // Радиоэлектроника : Тр. Научно-технических конференций. – Каунас. – 1972. – Т.8. – С.254–285.
15. Davic F. Time-de transistor bipolaire / F. Davic, S. Loed // Onde elec: 1976. – Vol. 56, № 12. – P. 505–513.
16. Пат. 2069862 РФ, МКИ G 01 R 27/04. Способ А. С. Елизарова определения S-параметров / А. С. Елизаров (РФ); Минский радиотехнический институт. – № 4771057/09; Заявл. 18.12.89; Оpubл. 27.11.96, Бюл. 10. – 4 с.
17. Пат. 2010248 РФ, МКИ G 01 R 27/28. Измеритель S-параметров невязимного СВЧ–четыреxpолосника / Г. П. Харитонов, В. В. Саламатин, А. В. Кондрашихин (РФ); Севастопольский приборостроительный институт. – №5027270/21; Заявл. 12.02.92; Оpubл. 30.03.94, Бюл. 7. – 7 с.
18. Пат. 2233454 РФ, МКИ G 01 R 27/06. Способ измерения параметров СВЧ–четыреxpолосников и устройство для его осуществления / С. М. Никулин, В. П. Хилов, М. Е. Налькин (РФ); ФГУП “СКБ РИАП”. – №2002123474/09; Заявл. 02.09.02; Оpubл. 27.07.04, Бюл. 34. – 6 с.
19. А. с. 1608593 СССР, МКИ G 01 R 27/28/ Измеритель S-параметров невязимного четыреxpолосника / А. В. Мельников, В. В. Саламатин, А. В. Кондрашихин (СССР). – №4453753/24; Оpubл. 23.02.90, Бюл. № 43. – 4 с.

20. Смит Ф. Круговые диаграммы в радиоэлектронике : перевод с английского / Ф. Смит. – М. : Связь, 1976. – 144 с.
21. А. с. 1622844 СССР, МКИ G 01 R 27/28. Измеритель S-параметров четырехполосника / О. А. Свирский (СССР). – №4444894/21 ; Заявлено 20.06.88 ; Опубл. 23.01.91, Бюл. № 30. – 3 с.
22. А. с. 1672384 СССР, МКИ G 01 R 27/28. Измеритель S-параметров СВЧ-четырёхполосника / А. Н. Трушкин, Н. А. Грудина, А. Ю. Юдин (СССР). – №4693720/09 ; Заявлено 17.05.89 ; Опубл. 23.08.91, Бюл. № 31. – 6 с.
23. А. с. 1677669 СССР, МКИ G 01 R 27/28. Измеритель S-параметров элементов СВЧ-тракта / И. К. Бондаренко, Ю. Б. Гимпилевич (СССР). – №4462638/09 ; Заявлено 18.07.88 ; Опубл. 15.09.91, Бюл. № 34. – 4 с.
24. Філінюк М. Спосіб вимірювання S-параметрів чотириполосника / М. А. Філінюк, К. В. Огородник, О. О. Лазарев // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2005. – №1. – С. 86–89.
25. Декл. пат. 7267 Україна, МКИ G01R27/28. Спосіб вимірювання нестандартної системи S-параметрів чотириполосника / М. А. Філінюк, К. В. Огородник, О. О. Лазарев (Україна). – № 20041109340 ; Заявл. 15.11.2004 ; Опубл. 15.06.2005, Бюл. №6. – 3 с.
26. Богачев В. М. Транзисторные усилители мощности / В. М. Богачев, В. В. Никифоров. – М. : Энергия, 1978. – 344 с.
27. Валитов Р. А. Радиотехнические измерения / Р. А. Валитов, В. Н. Сретенский. – М. : Сов. радио, 1980. – 360 с.
28. Філінюк М. Вимірювання модуля коефіцієнта відбиття потенційно-нестійкого багатополосника / М. А. Філінюк, Д. В. Гаврилов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2003. – №3. – с. 89–91.
29. Філінюк М. А. Спосіб вимірювання максимально-досяжного коефіцієнта підсилення чотириполосника на границі стійкості / М. А. Філінюк, Д. В. Гаврілов, С. А. Ліщенко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2001. – №3. – С. 49–51.
30. Філінюк М. А. Метрологічні основи негатроніки / М. А. Філінюк, Д. В. Гаврілов. – Вінниця : УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2006. – 188 с.

Література до розділу 5

1. Метрологія. Терміни і визначення : ДСТУ 2681–94. – К. : Держстандарт України, 1994. – 245 с.
2. Поджаренко В. О. Вимірювання і комп'ютерно-вимірювальна техніка : навчальний посібник / В. О. Поджаренко, В. В. Кухарчук. – К. : НМК ВО, 1991. – 240 с.
3. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю : навчальний посібник / Є. Т. Володарський, В. В. Кухарчук, В. О. Поджаренко, Г. Б. Сердюк. – Вінниця : ВДГУ, 2001. – 219 с.
4. Кухарчук В. Оцінка статичних метрологічних характеристик опосередкованих вимірювань / В. В. Кухарчук, В. Ю. Кучерук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2003. – № 2. – С. 54–58.
5. Павленко Ю. Ф. Измерение параметров частотно-модулированных колебаний / Ю. Ф. Павленко, П. А. Шканвон. – М. : Радио и связь, 1986. – 208 с.
6. Зайцев А. Н. Измерения на сверхвысоких частотах и их метрологическое обеспечение / А. Н. Зайцев, П. А. Иващенко, А. В. Мельников. – М. : Изд. стандартов, 1989. – 238 с.
7. Новицкий П. В. Оценка погрешностей результатов измерений / П. В. Новицкий, И. А. Зограф. – Л. : Энергоатомиздат, 1991. – 304 с.
8. Філінюк М. А. Оцінка методичних похибок вимірювання S-параметрів чотириполосника / М. А. Філінюк, К. В. Огородник // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2005. – №4. – С. 93–99.
9. Богачев В. М. Транзисторные усилители мощности / В. М. Богачев, В. В. Никифоров. – М. : Энергия, 1978. – 344 с.
10. Філінюк М. А. Аналіз методів і засобів вимірювання параметрів безструктурних моделей багатоелектродних напівпровідникових пристроїв / М. А. Філінюк, Д. В. Гаврілов, С. А. Ліщенко // Вісник Житомирського інженерно-технологічного інституту. – 2002. – С. 6–10.

11. Филинюк Н. А. Активные УКВ фильтры / Н. А. Филинюк. – М. : Радио и связь, 1984. – 110 с.
12. Филинюк Н. А. Определение параметров физической эквивалентной схемы ВЧ транзисторов / Н. А. Филинюк, С. Н. Песков, С. Н. Павлов // Известия вузов МВ и ССО СССР. – К. : Радиоэлектроника. – 1982. – Т. 25, № 12. – С. 38–43.
13. Патент України на винахід 18059 А, Н 03 Н 11/00. Імпедансний пристрій. / М. А. Філінюк, О. М. Возняк, Я. І. Курзанов, О. В. Огороднік. – №83225654 ; Заявлено 22.03.94 ; Опубл. 31.10.97, Бюл. № 5. – 3 с.
14. Лебедев И. Техника и приборы СВЧ / И. Лебедев. – М. : Высшая школа, 1970. – Т. 1. – 440 с.
15. 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.
16. Справочник по радиоизмерительным приборам / Под ред. В. С. Насонова. – Т. 1/Б. – М. : Сов. радио, 1976. – 227 с.
17. Линии измерительные. Технические требования. Методы испытаний : ГОСТ 11294–74.
18. Валитов Р. А. Радиотехнические измерения / Р. А. Валитов, В. Н. Сretenский. – М. : Сов. радио, 1980. – 360 с.
19. Гинзтон Э. Измерения на сантиметровых волнах / Э. Гинзтон. – М. : ИЛ, 1960. – 381 с.
20. Смит Ф. Круговые диаграммы в радиоэлектронике : пер. с англ. / Ф. Смит. – М. : Связь. 1976. – 143 с.
21. Бондаренко И. К. Автоматизация измерений параметров СВЧ трактов / И. К. Бондаренко, Г. А. Дейнега, З. В. Маграчев. – М. : Сов. радио, 1969. – 302 с.
22. Декл. пат. 5780 Україна, МКИ G01R27/28. Спосіб вимірювання нестандартної системи імітансних параметрів чотириполюсника /О. О. Лазарев, М. А. Філінюк, К. В. Огороднік (Україна). – № 20040807002 ; Заявл. 21.08.2004 ; Опубл. 15.03.2005, Бюл. №3. – 3 с.

23. Декл. пат. 7267 Україна, МКИ G01R27/28. Спосіб вимірювання нестандартної системи S-параметрів в чотириполосника / М. А. Філінюк, К. В. Огородник, О. О. Лазарєв (Україна). – № 20041109340 ; Заявл. 15.11.2004 ; Опубл. 15.06.2005, Бюл. №6. – 3 с.
24. Філінюк М. А. Інформаційно-вимірювальна система визначення параметрів активних чотириполосників / М. А. Філінюк, К. В. Огородник // Тези доповіді VIII міжнародної конференції «Контроль і управління в складних системах» (КУСС–2005). – Вінниця. – 2005. – С. 73.
25. Федотов Я. Основы физики полупроводниковых приборов / Я. Федотов. – М. : Советское радио, 1970. – 591 с.
26. Транзисторы. Параметры, методы измерений и испытаний / Под ред. И. Г. Бергельсона, Ю. А. Каменецкого, И. Ф. Николаевского. – М. : Сов. радио, 1968. – 504 с.
27. Федотов Я. А. Классификация моделей транзисторов / Я. А. Федотов, Н. С. Спиридонов // Автоматизация проектирования в электронике. – К. : Техніка. – 1976. – Выпуск 13. – С. 31–36.
28. Безменов Ю. А. Определение параметров транзисторов в схемах СВЧ / Ю. А. Безменов, Ю. А. Вагарин, Д. А. Усанов // Обзор по электронной технике. Серия 1. Электроника СВЧ. – М. : ЦНИИ Электроника. – 1981. – Выпуск 9. – 42 с.
29. Филинюк Н. Активные СВЧ фильтры на транзисторах / Н. Филинюк. – М. : Радио и связь, 1987. – 112 с.
30. Валиев Ю. А. Применение контакта металл-полупроводник в электронике / Ю. А. Валиев, Ю. И. Паминуев, Г. В. Петров. – М. : Радио и связь, 1981. – 304 с.
31. Галкин В. Полевые транзисторы в чувствительных усилителях / В. Галкин. – Л. : Энергия, 1981. – 144 с.

Наукове видання

**Філінюк Микола Антонович
Огородник Костянтин Володимирович
Ліщинська Людмила Брониславівна**

**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ
ПОТЕНЦІЙНО-НЕСТІЙКИХ ЧОТИРИПОЛЮСНИКІВ**

Монографія

Редактор С. Малішевська
Оригінал-макет підготовлено К. Огородником

Підписано до друку 11.03.2010 р.
Формат 29,7×42¼ Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. друк. арк. 10,16
Наклад 100 прим. Зам № 2010-025

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.