**ДОСЛІДЖЕННЯ ГРАФОАНАЛІТИЧНОГО МЕТОДА ВИЗНАЧЕННЯ СТАНДАРТНИХ  
W- ПАРАМЕТРІВ ЧОТИРИПОЛЮСНИКА**

**Возняк Олександр Миколайович**, к.т.н., доцент,  
**Видмиш Андрій Андрійович**, к.т.н., доцент,  
**Штуць Андрій Анатолійович**, асистент.  
Вінницький національний аграрний університет

**Wozniak Alexander**, Ph.D., Associate Professor,  
**Vidmysh Andriy**, Ph.D., Associate Professor,  
**Andrey Stuts**, Assistant.  
Vinnytsia National Agrarian University

*Рівень соціального та економічного розвитку сучасного суспільства визначається об'ємом, швидкістю і якістю обробки інформації за допомогою методів та технічних засобів. Системи вимірювання та обробки інформації стають невід'ємною частиною засобів автоматизації виробництва.*

*Розвиток радіоелектроніки нерозривно пов'язаний із розвитком вимірювань, а стан сучасної радіоелектроніки в значній мірі визначається рівнем розвитку методів вимірювання та наявністю достатньо досконалої вимірювальної апаратури вимірювання параметрів радіоелектронних приладів, зокрема транзисторів, дозволяє: по-перше, визначити їх потенційні експлуатаційні можливості; по-друге, дати вихідний матеріал для розрахунку пристроїв; по-третє, посереднім чином судити про їх внутрішні властивості і технологічні особливості, по-четверте, розробляти нові, високоякісні пристрої.*

*Інтенсифікація та автоматизація процесів виробництва, ускладнення і розширення фронту наукових експериментів тягне за собою необхідність розробки принципово нових методів та засобів вимірювання параметрів транзисторів на базі нових алгоритмів і обчислювальної техніки.*

*Підвищення рівня напівпровідникових приладів, удосконалення їх характеристик неодмінно впливає на потенційну стійкість у широкому діапазоні частот. Класичні методи і стандартна вимірювальна апаратура не розраховані на вимірювання параметрів потенційно нестійких транзисторів. Вимірювальні системи неконтрольовано збуджуються, що збільшує похибку вимірювання. Тому нині стоїть актуальна задача вимірювання параметрів, як транзисторів зокрема, так і чотириполосників взагалі, у частотному діапазоні потенційної нестійкості.*

*Тактова частота, на якій працює сучасна комп'ютерна техніка, впритул підійшла до діапазону НВЧ (надвисоких частот), що робить проблему вимірювання та розрахунку різних функціональних вузлів обчислювальної техніки та операційних елементів досить актуальною.*

*Розробка нових методів та засобів вимірювання параметрів потенційно нестійких чотириполосників у діапазоні НВЧ є актуальним науковим напрямком, який дозволяє значно підвищити точність їх вимірювання на стандартній апаратурі.*

*Покращення характеристик пристроїв НВЧ діапазону може бути досягнуто як за рахунок використання принципово нової елементної бази, так і за допомогою використання нових схем технічних рішень. Перспективним в цьому плані є напрямок використання реактивних властивостей транзисторів, а також транзисторних структур з від'ємним опором для побудови інформаційно-вимірювальних систем і операційних й обчислювальних пристроїв діапазону НВЧ.*

*Проаналізовано графічні методи визначення параметрів еквівалентного чотириполосника за результатами вимірювання виявляються, як правило, значно більш зручними, ніж аналітичні. Маючи математичне рівняння і його графічну інтерпретацію, можна порівняно легко визначити потрібні величини, вирішуючи задачу шляхом графічних прийомів. Відомо декілька способів графічного зображення співвідношень, які характеризують повний опір (провідність). Наступні два з них є найбільше зручними:*

*1) кругова діаграма повного опору в прямокутних координатах [1];*

*2) кругова діаграма повного опору в полярних координатах, запропонована вперше радянським вченим А.Р. Вольпертом [2].*

**Ключові слова:** дослідження, чотириполосник, параметри, графічний метод, математичні рівняння, конформні відображення імітансів, схеми вимірювань.

**Рис 6. Літ 11.**

### 1. Мета статті

Аналітичне обґрунтування графоаналітичного методу визначення стандартних W-параметрів чотириполосника.

Графічне представлення повних імпедансів із його аналітичними виразами і на підставі цього розробимо метод визначення стандартних W-параметрів чотириполосника. Для цього скористаємося методом конформних відображень функції комплексного змінного [3].

### 2. Постановка проблеми

Запишемо вираз для вхідного і вихідного імпедансів чотириполосника в узагальнених W-параметрах:

$$W_{вх} = W_{11} - \frac{W_{12}W_{21}}{W_{22} - W_H}, \quad (1)$$

$$W_{вих} = W_{22} - \frac{W_{12}W_{21}}{W_{11} - W_G}, \quad (2)$$

де  $W_{11}, W_{22}, W_{12}, W_{21}$  - узагальнені параметри матриці чотириполосника;

$W_{вх}, W_{вих}$  - вхідні і вихідні імпеданси чотириполосника;

$W_H, W_G$  - імпеданси навантаження і генератора (рис. 1).



Рис. 1. Активний чотириполосник із підключеними навантаженнями

Перетворимо вирази для вхідного і вихідного імпеданса (1) і (2) до виду:

$$W_{вх} = \frac{W_{11}W_{22} - W_{11}W_H - W_{12}W_{21}}{W_{22} - W_H} = \frac{b - cW_H}{a - W_H}, \quad (3)$$

$$W_{вих} = \frac{W_{22}W_{11} - W_{22}W_G - W_{12}W_{21}}{W_{11} - W_G} = \frac{b - aW_G}{c - W_G}, \quad (4)$$

де  $a = W_{22}$ ,  $b = W_{22}W_{11} - W_{12}W_{21}$ ,  $c = W_{11}$ .

Як видно з (3) і (4),  $W_{вих}$  ( $W_{вх}$ ) можна розглядати як дробово-лінійну функцію, яка відображає комплексну площину  $W_G$  на площину  $W_{вих}$  і комплексну площину  $W_H$  на площину  $W_{вх}$ . Можливим значенням імпедансів навантаження  $W_G$  відповідає на півплощина  $\text{Re}W_G \geq 0$ , а значенням навантаження  $W_H$  відповідає на півплощина  $\text{Re}W_H \geq 0$  (рис.2).

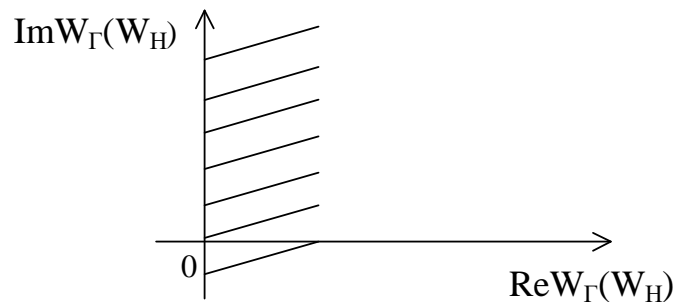


Рис. 2. Напівплощина імпедансу  $W_G(W_H) = \text{Re}W_G(W_H) + j\text{Im}W_G(W_H)$ .

Відповідно до теорії конформних відображень [3], пряма лінія  $\text{Re}W_G(W_H) = 0$  відображається на площині  $W_{вих}(W_{вх})$  окружностями



$|W_{вих} - W_{вих0}| = \rho_{вих}$  і  $|W_{вх} - W_{вх0}| = \rho_{вх}$ ,  
із центрами  $W_{вих0}$  і  $W_{вх0}$  і радіусами  $\rho_{вих}$  і  $\rho_{вх}$ . В цьому випадку

$$W_{вих0} = W_{22} - \frac{W_{12}W_{21}}{2 \operatorname{Re} W_{11}}, \quad (5)$$

$$W_{вх0} = W_{11} - \frac{W_{12}W_{21}}{2 \operatorname{Re} W_{22}}, \quad (6)$$

$$\rho_{вих} = \frac{|W_{12}W_{21}|}{2 \operatorname{Re} W_{11}}, \quad (7)$$

$$\rho_{вх} = \frac{|W_{12}W_{21}|}{2 \operatorname{Re} W_{22}}. \quad (8)$$

При  $\operatorname{Re} W_{\Gamma} > 0$  уся права напівплощина  $W_{\Gamma}$  відображається всередину кола на площині  $W_{вих}$ , а при  $\operatorname{Re} W_{\text{н}} > 0$  вся права напівплощина  $W_{\text{н}}$  відображається всередину кола на площині  $W_{вх}$  (рис. 3).

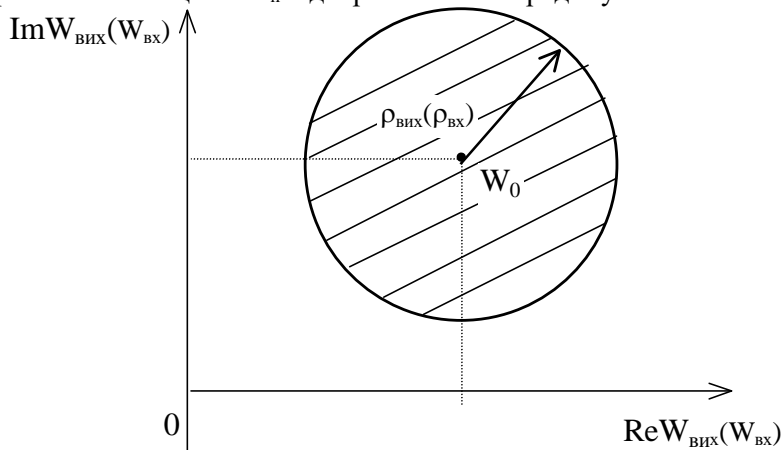


Рис. 3. Конформні відображення імпедансів  $W_{\Gamma}(W_{\text{н}})$

Розглянемо залежності вхідного  $W_{вх}$  (вихідного  $W_{вих}$ ) імпеданса чотириполюсника від реактивної складової імпеданса навантаження  $\operatorname{Im} W_{\text{н}}$  (генератора  $\operatorname{Im} W_{\Gamma}$ ), що представляють собою окружності (рис. 4).

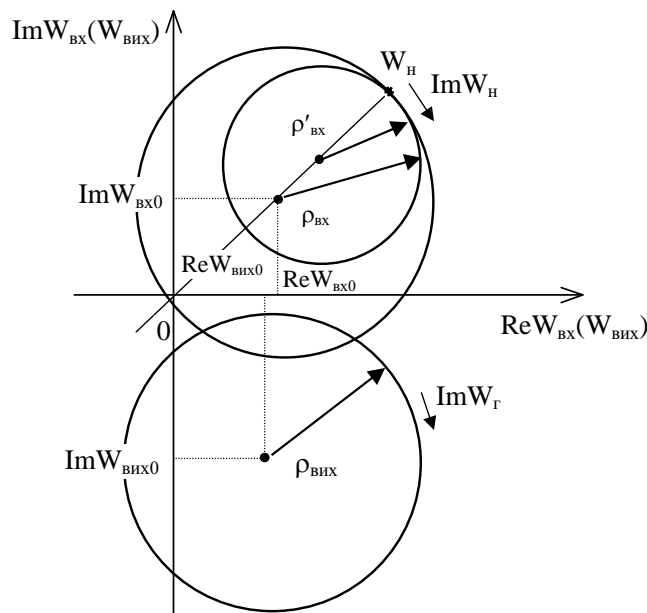


Рис. 4. Залежність вхідного  $W_{вх}$  (вихідного  $W_{вих}$ ) імпеданса чотириполюсника від реактивної складової імпеданса навантаження  $W_{\text{н}}$  (генератора  $W_{\Gamma}$ )



На рис. 4 окружність радіусом  $\rho'_{\text{вх}}$  являє собою геометричне місце точок значень вхідного імпеданса при активній складовій навантаження  $\text{Re}W_{\text{н}} > 0$  і рівної  $W_{\text{н}}$ . Для цієї графічної інтерпретації вхідних і вихідних імпедансів запишемо систему аналітичних виразів:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_{\text{вх}} = \frac{|W_{12}W_{21}|}{2 \text{Re}W_{22}}, \\ \rho'_{\text{вх}} = \frac{|W_{12}W_{21}|}{2 \text{Re}(W_{22} + W_{\text{н}})}, \\ \rho_{\text{вих}} = \frac{|W_{12}W_{21}|}{2 \text{Re}W_{11}}, \\ \text{Re}W_{\text{вх}0} = \text{Re}W_{11} - \frac{\text{Re}(W_{12}W_{21})}{2 \text{Re}W_{22}}, \\ \text{Im}W_{\text{вх}0} = \text{Im}W_{11} - \frac{\text{Im}(W_{12}W_{21})}{2 \text{Re}W_{22}}, \\ \text{Re}W_{\text{вих}0} = \text{Re}W_{22} - \frac{\text{Re}(W_{12}W_{21})}{2 \text{Re}W_{11}}, \\ \text{Im}W_{\text{вих}0} = \text{Im}W_{22} - \frac{\text{Im}(W_{12}W_{21})}{2 \text{Re}W_{11}}, \end{array} \right. \quad (9)$$

де  $\text{Re}W_{\text{н}}$  - активна складова імпеданса навантаження;

$W_{11}, W_{12}, W_{21}, W_{22}$  - шукані параметри матриць еквівалентного чотириполюсника.

Розв'язавши систему (9), знаходимо параметри  $W_{11}$  і  $W_{22}$ , що у геометричному представленні є точками перетинання імпедансних окружностей по входу (із різними значеннями  $\text{Re}W_{\text{н}}$ ) і по виходу (із різними значеннями  $\text{Re}W_{\text{н}}$ ):

$$\text{Re}W_{22} = \frac{\rho_{\text{вх}} \text{Re}W_{\text{н}}}{(\rho_{\text{вх}} - \rho'_{\text{вх}})}, \quad (10)$$

$$\text{Re}W_{11} = \frac{\rho_{\text{вх}} \text{Re}W_{22}}{\rho_{\text{вих}}}, \quad (11)$$

$$\text{Im}W_{11} = \text{Im}W_{\text{вх}0} + \sqrt{\rho_{\text{вх}}^2 - \text{Re}^2(W_{11} - W_{\text{вх}0})}, \quad (12)$$

$$\text{Im}W_{22} = \text{Im}W_{\text{вих}0} + \frac{\rho_{\text{вих}} \sqrt{\rho_{\text{вх}}^2 - \text{Re}^2(W_{11} - W_{\text{вх}0})}}{\rho_{\text{вх}}}. \quad (13)$$

Розглянувши розв'язок системи (9), можна зробити висновок, що для визначення параметрів  $W_{11}$  і  $W_{22}$  еквівалентного чотириполюсника достатньо визначити параметри імпедансної окружності  $W_{\text{вх}0}, W_{\text{вих}0}, \rho_{\text{вх}}, \rho_{\text{вих}}$  і  $\rho'_{\text{вх}}$  [4].

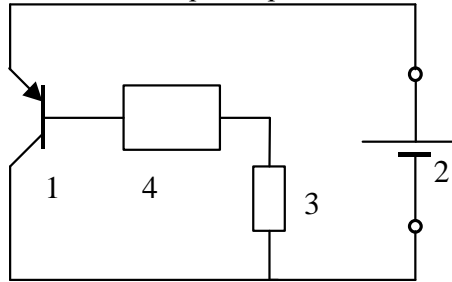
### 3. Розробка експериментальної установки і методики проведення експерименту

Одним із шляхів підвищення ефективності вимірювань якісних характеристик напівпровідникових приладів є одержання більш достовірної інформації про прилад за рахунок



До нестандартних елементів вимірювальної установки відноситься регульована комплексна провідність  $Y$  (або опір  $Z$ ). При активній провідності  $\text{Re}Y = 0$  у якості провідності  $Y$  використовується провідність регульованого короткозамикаючого поршня, при зміні провідності  $\text{Re}Y > 0$  паралельно входу поршня підключається відома активна провідність  $\text{Re}Y = \text{Re}Y_n$ .

Регульований комплексний опір  $Z$  реалізується у вигляді пристрою [6], що складається із транзистора, емітер якого підключений до однієї клеми джерела зсуву, а колектор з'єднаний з другою клемою джерела зсуву і з опором, який містить включений між базою транзистора й опором смугозапираючий фільтр (рис.6). Даний імпедансний пристрій, що імітує регульовані активні і реактивні імпеданси, за рахунок включення смугозапираючого фільтра, забезпечує від'ємне значення активної складової імпедансу, чим досягається розширення частотного діапазону пристрою [6].



**Рис. 6. Принципова схема імпедансного пристрою, що імітує реактивні та активні імпеданси:**  
1 - транзистор; 2 - джерело зсуву; 3 - опір; 4 - смугозапираючий фільтр.

Регульований комплексний опір  $Z$ , реалізований у вигляді імпедансного пристрою (рис.6) необхідний для створення режимів роботи досліджуваного чотириполосника при яких відсутня передача по потужності в прямому або зворотному напрямках.

Процес вимірювання повної матриці провідності  $Y$  чотириполосника складається з двох етапів, на яких, спочатку, вимірюють власні параметри ( $y_{11}$  і  $y_{22}$ ), а потім взаємні параметри ( $y_{12}$  і  $y_{21}$ ). На першому етапі до тримача чотириполосника  $\|Y\|$  за допомогою ключа  $K_4$  на вихід підключається вимірювач повної провідності ВПр. Ключем  $K_2$  на вихід досліджуваного чотириполосника  $\|Y\|$  підключається генератор електромагнітних коливань  $\Gamma$ , що задає НВЧ сигнал необхідної частоти. Регульований комплексний опір  $Z$  устатковується рівним нулю. При дійсній складовій провідності  $\text{Re}Y_n=0$ , геометричне місце точок вхідної провідності  $Y_{вх}$  буде являти собою граничну окружність на комплексній площині залежності  $Y_{вх}$  від реактивної складової провідності  $\text{Im}Y_n$  (рис.3.7). Враховуючи, що на імітансних окружностях геометричного місця точок вхідної і вихідної провідності чотириполосника завжди існують такі точки, які знаходяться в правій напівплощині комплексної площини, можна домогтися виключення збудження досліджуваного активного чотириполосника в процесі вимірювання.

Шляхом зміни довжини короткозамикаючого поршня ( $\text{Re}Y_n=0$ ), домагаються стійких показань вимірювача провідності ВПр і роблять вимірювання трьох значень вхідної провідності чотириполосника  $Y_{вх1}$ ,  $Y_{вх2}$  та  $Y_{вх3}$ , значення якої лежать у правій напівплощині комплексної площини.

Розв'язком системи рівнянь будуть значення параметрів імітансної окружності по входу чотириполосника — координати центру  $\text{Re}Y_{вх0}$  та  $\text{Im}Y_{вх0}$ , значення радіуса  $\rho_{вх}$  імітансної окружності:

$$\text{Re}Y_{вх0} = \frac{\text{Re}Y_{вх2}^2 - \text{Re}Y_{вх1}^2 + \text{Im}Y_{вх2}^2 - \text{Im}Y_{вх1}^2 - 2\text{Im}Y_{вх0}(\text{Im}Y_{вх2} - \text{Im}Y_{вх1})}{2(\text{Re}Y_{вх2} - \text{Re}Y_{вх1})}, \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \text{Im}Y_{вх0} = & \frac{(\text{Re}Y_{вх2}^2 - \text{Re}Y_{вх1}^2 + \text{Im}Y_{вх2}^2 - \text{Im}Y_{вх1}^2)(\text{Re}Y_{вх2} - \text{Re}Y_{вх3}) -}{2[(\text{Im}Y_{вх3} - \text{Im}Y_{вх2})(\text{Re}Y_{вх2} - \text{Re}Y_{вх1}) -} \\ & - (\text{Re}Y_{вх2}^2 - \text{Re}Y_{вх3}^2 + \text{Im}Y_{вх2}^2 - \text{Im}Y_{вх3}^2)(\text{Re}Y_{вх2} - \text{Re}Y_{вх3})] - } \\ & - (\text{Im}Y_{вх1} - \text{Im}Y_{вх2})(\text{Re}Y_{вх2} - \text{Re}Y_{вх3})], \end{aligned} \quad (15)$$

$$\rho_{вх} = \sqrt{(\text{Re}Y_{вх1} - \text{Re}Y_{вх0})^2 + (\text{Im}Y_{вх1} - \text{Im}Y_{вх0})^2}. \quad (16)$$





Далі необхідно знайти радіус будь-якої імітансної окружності  $\rho'_{\text{вх}}$  при значенні активної складової провідності навантаження  $\text{Re}Y = \text{Re}Y_{\text{н}} > 0$ . Для цього паралельно входу поршня регульованого комплексного навантаження  $Y$  підключається відома активна провідність  $\text{Re}Y = \text{Re}Y_{\text{н}}$ . Повторивши вимірювання трьох вхідних значень провідності  $Y'_{\text{вх}1}$ ,  $Y'_{\text{вх}2}$ , та  $Y'_{\text{вх}3}$ , задавшись величиною  $\text{Re}Y_{\text{н}}$ , визначаємо  $\rho'_{\text{вх}}$ :

$$\rho'_{\text{вх}} = \sqrt{(\text{Re}Y'_{\text{вх}1} - \text{Re}Y'_{\text{вх}0})^2 + (\text{Im}Y'_{\text{вх}1} - \text{Im}Y'_{\text{вх}0})^2}. \quad (17)$$

Наступним кроком є знаходження імітансних параметрів активного чотириполосника по виходу. Для цього за допомогою ключа  $K_3$  на вхід тримача чотириполосника підключається регульована комплексна провідність  $Y$ , при цьому з короткозамикаючого поршня знімається паралельно підключене активне навантаження  $\text{Re}Y_{\text{н}}$ , тобто  $\text{Re}Y = 0$ . Провідність короткозамикаючого поршня, буде мати тільки реактивну складову. До виходу досліджуваного чотириполосника за допомогою ключа  $K_2$  підключається вимірювач повної провідності ВПр. За допомогою ключа  $K_1$  підключаємо генератор  $\Gamma$  до входу досліджуваного чотириполосника  $\|Y\|$ . Шляхом зміни довжини короткозамикаючого поршня регульованої комплексної провідності  $Y$ , змінюючи уявну складову провідності  $\text{Im}Y$ , домагаємося стійкого показання вимірювача провідності ВПр, що гарантує нам стійкість вимірювальної установки. Робимо вимірювання трьох значень вихідної провідності активного чотириполосника  $Y_{\text{вих}1}$ ,  $Y_{\text{вих}2}$  і  $Y_{\text{вих}3}$ , по яких за вище викладеною методикою визначаємо вихідні параметри імітансної окружності досліджуваного активного чотириполосника (рис. 4):

$$\text{Im}Y_{\text{вих}0} = \frac{(\text{Re}Y_{\text{вих}2}^2 - \text{Re}Y_{\text{вих}1}^2 + \text{Im}Y_{\text{вих}2}^2 - \text{Im}Y_{\text{вих}1}^2)(\text{Re}Y_{\text{вих}2} - \text{Re}Y_{\text{вих}1}) - 2[(\text{Im}Y_{\text{вих}3} - \text{Im}Y_{\text{вих}2})(\text{Re}Y_{\text{вих}2} - \text{Re}Y_{\text{вих}1}) - (\text{Re}Y_{\text{вих}2}^2 - \text{Re}Y_{\text{вих}3}^2 + \text{Im}Y_{\text{вих}2}^2 - \text{Im}Y_{\text{вих}3}^2)(\text{Re}Y_{\text{вих}2} - \text{Re}Y_{\text{вих}3}) - (\text{Im}Y_{\text{вих}1} - \text{Im}Y_{\text{вих}2})(\text{Re}Y_{\text{вих}2} - \text{Re}Y_{\text{вих}3})]}{(\text{Re}Y_{\text{вих}2}^2 - \text{Re}Y_{\text{вих}1}^2 + \text{Im}Y_{\text{вих}2}^2 - \text{Im}Y_{\text{вих}1}^2) - 2\text{Im}Y_{\text{вих}0}(\text{Im}Y_{\text{вих}2} - \text{Im}Y_{\text{вих}1})} \quad (18)$$

$$\text{Re}Y_{\text{вих}0} = \frac{\text{Re}Y_{\text{вих}2}^2 - \text{Re}Y_{\text{вих}1}^2 + \text{Im}Y_{\text{вих}2}^2 - \text{Im}Y_{\text{вих}1}^2 - 2\text{Im}Y_{\text{вих}0}(\text{Im}Y_{\text{вих}2} - \text{Im}Y_{\text{вих}1})}{2(\text{Re}Y_{\text{вих}2} - \text{Re}Y_{\text{вих}1})} \quad (19)$$

$$\rho_{\text{вих}} = \sqrt{(\text{Re}Y_{\text{вих}1} - \text{Re}Y_{\text{вих}0})^2 + (\text{Im}Y_{\text{вих}1} - \text{Im}Y_{\text{вих}0})^2} \quad (20)$$

В результаті зроблених вимірювань і обчислень ми одержали параметри двох імітансних окружностей по входу досліджуваного активного чотириполосника  $\text{Im}Y_{\text{вх}0}$ ,  $\text{Re}Y_{\text{вх}0}$ ,  $\rho_{\text{вх}}$  і  $\rho'_{\text{вх}}$ , та імітансної окружності по виходу  $\text{Re}Y_{\text{вих}0}$ ,  $\text{Im}Y_{\text{вих}0}$  та  $\rho_{\text{вих}}$ . Також ми задалися активною складовою навантаження  $\text{Re}Y_{\text{н}}$ . Отримані результати достатні для знаходження параметрів  $Y_{11}$  і  $Y_{22}$ :

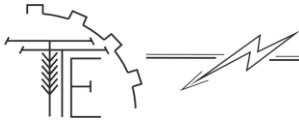
$$\text{Re}Y_{22} = \frac{\rho'_{\text{вх}} \text{Re}Y_{\text{н}}}{(\rho_{\text{вх}} - \rho'_{\text{вх}})}, \quad (21)$$

$$\text{Re}Y'' = \frac{\rho_{\text{вх}} \text{Re}Y_{22}}{\rho_{\text{вих}}}, \quad (22)$$

$$\text{Im}Y_{11} = \text{Im}Y_{\text{вх}0} + \sqrt{\rho_{\text{вх}}^2 - \text{Re}^2(Y_{11} - Y_{\text{вх}0})}, \quad (23)$$

$$\text{Im}Y_{22} = \text{Im}Y_{\text{вих}0} + \frac{\sqrt{\rho_{\text{вх}}^2 - \text{Re}^2(Y_{11} - Y_{\text{вх}0})} \cdot \rho_{\text{вих}}}{\rho_{\text{вх}}}. \quad (24)$$

На другому етапі відбувається визначення взаємних параметрів  $Y_{12}$  та  $Y_{21}$  [35, 36]. Визначення цих параметрів зводиться до визначення вхідних і вихідних провідностей досліджуваного чотириполосника з підключеним до його спільної шини комплексним регульованим опором [6], підібраним таким чином, щоб була відсутня передача по потужності в знов утвореному чотириполоснику ( $Y'_{12}=0$  та  $Y'_{21}=0$ ). Крім цього, необхідно визначити максимальний коефіцієнт



передачі по потужності  $K_{mS}$ . Вимірювання відбуваються в такий спосіб. На вхід чотириполосника  $\|Y\|$  подається сигнал від генератора  $\Gamma$  (рис.5). До виходу чотириполосника за допомогою ключа  $K_2$  підключається вимірювач потужності ВП. Ключі  $K_3$  і  $K_4$  знаходяться в розімкненому положенні. Комплексний опір  $Z$  знаходиться в нульовому положенні. Відбувається вимірювання потужності  $P_1$  на виході чотириполосника. Ключами  $K_1$  і  $K_2$  змінюємо місцями генератор  $\Gamma$  та вимірювач потужності ВП, робимо вимірювання потужності на вході досліджуваного чотириполосника  $P_2$ . По відомій формулі [7] знаходимо максимальний коефіцієнт передачі по потужності

$$K_{mS} = \sqrt{\frac{P_1}{P_2}} \quad (25)$$

Далі переводимо вимірювальну установку в початкове положення і за допомогою зміни величини комплексного опору  $Z$  до деякої величини, домагаємося нульового показання вимірювача потужності, що свідчить про виконання умови  $Y'_{21}=0$ . В цьому режимі замість вимірювача потужності підключаємо вимірювач провідності ВПр за допомогою ключа  $K_2$  і вимірюємо вихідну провідність знов утвореного чотириполосника  $Y_{вих}$ . Потім переключаємо генератор  $\Gamma$  ключем  $K_2$  на вихід чотириполосника  $\|Y\|$ , вхід якого з'єднуємо ключем  $K_1$  із вимірювачем потужності ВП. Змінюючи величину комплексного опору  $Z$ , домагаємося нульових показань вимірювача потужності ВП, що свідчить про виконання умови  $Y'_{12}=0$ . Замість вимірювача потужності ключем  $K_1$  підключаємо на вхід чотириполосника вимірювач провідності ВПр і в усталеному режимі нульової передачі по потужності робимо вимірювання вхідної провідності  $Y_{вх}$ . По отриманих результатах розраховуємо  $Y_{12}$  і  $Y_{21}$  [4]:

$$Y_{12} = \frac{Y_{вих}Y_{11} - Y_{вх}Y_{22}}{Y_{вх}K_{mS} - Y_{вих}}, \quad (26)$$

$$Y_{21} = \frac{Y_{вих}Y_{11} - Y_{вх}Y_{22}}{Y_{вх} - Y_{вих}/K_{mS}}, \quad (27)$$

де  $K_{mS}$  - максимальний коефіцієнт передачі по потужності;

$Y_{11}$  і  $Y_{22}$  - параметри матриці провідності досліджуваного чотириполосника;

$Y_{вх}$  і  $Y_{вих}$  - вхідна і вихідна провідності знов утвореного чотириполосника (за допомогою комплексного опору  $Z$ ) у режимі нульової передачі по потужності.

Підводячи підсумок, можна сказати, що в процесі вимірювань немає необхідності здійснювати закорочування вхідних і вихідних клем чотириполосника (зокрема - транзистора), а це забезпечує стійкість вимірювальної установки в широкому діапазоні частот. На відміну від вимірювання S-параметрів матриці розсіювання, відсутня необхідність робити фазові вимірювання сигналу, який проходить через чотириполосник [8], що спрощує процес вимірювань і зменшує похибку, яка виникає за рахунок неузгодженості вхідної і вихідної провідності з провідністю вимірювального тракту.

#### 4. Оцінка методичної похибки визначення $W_{12}$ - і $W_{21}$ - параметрів

З розрахункових формул видно, що методична похибка визначення  $W_{12}$ - та  $W_{21}$ -параметрів залежить від похибки вимірювання повних провідностей. З урахуванням цього запишемо вихідну формулу для визначення методичної похибки:

$$\Delta W_{ij} = \partial W_{ij} \partial Y_{\%} \cdot 2 \cdot \sigma_Y + \partial W_{ij} \partial Y_{\%} \cdot 2 \cdot \sigma_Y, \quad (28)$$

де  $\sigma_Y$  - похибка вимірювання повних провідностей.

Продиференціювавши вирази (26) і (27), одержимо:

$$\Delta W_{12} = \frac{\sigma_Y}{(Y_{вх}K_{mS} - Y_{вих})^2} \sqrt{(Y_{вих}Y_{11} - Y_{вх}Y_{22})^2 + (Y_{11}^2 + Y_{22}^2)(Y_{вх}K_{mS} - Y_{вих})^2}, \quad (29)$$

$$\Delta W_{21} = \frac{\sigma_Y}{(Y_{вх} - Y_{вих}/K_{mS})^2} \sqrt{(Y_{вих}Y_{11} - Y_{вх}Y_{22})^2 + (Y_{11}^2 + Y_{22}^2)(Y_{вх} - Y_{вих}/K_{mS})^2}. \quad (30)$$





Оцінка похибки вимірювань проводилася на частоті 1ГГц шляхом вимірювання W-параметрів транзисторів типу BFP722 із використанням вимірювальної лінії типу P1-3 і вимірювача потужності M4-1. Методичні значення похибки склали  $\Delta \text{Re}Y_{12}=4.7\%$ ,  $\Delta \text{Im}Y_{12}=2.4\%$ ,  $\Delta \text{Re}Y_{21}=3.1\%$ ,  $\Delta \text{Im}Y_{21}=4.5\%$ .

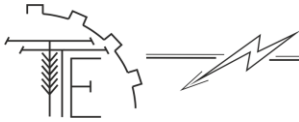
### 5. Висновки та пропозиції

В результаті проведених досліджень розроблено нову методику визначення повної системи стандартних W-параметрів еквівалентного чотириполосника для НВЧ діапазону. При розробці даної методики використаний найбільш перспективний підхід до здійснення вимірювань чотириполосникових параметрів досліджуваних приладів, потенційна нестабільність яких, при певних значеннях навантажень (звичайно невідомих), вносить додаткову похибку в результат вимірювань або робить вимірювання відомими методами неможливими:

- новий метод вимірювання імітансних W-параметрів чотириполосників придатний як для низьких, так і для надвисоких частот;
- в основі методу лежать дві головні ідеї: метод «плаваючих навантажень» і метод нейтралізації, використання яких забезпечує стабільність експериментальної установки і вимірювання повної системи W-параметрів будь-якого чотириполосника;
- запропонований метод найбільш ефективний у діапазоні НВЧ, де так дотепер не вирішено проблему вимірювань S-параметрів потенційно нестійких чотириполосників;
- стандартні W-параметри, що характеризують досліджуваний прилад як еквівалентний чотириполосник, не можуть бути визначені в НВЧ діапазоні шляхом безпосередніх вимірювань. Тому отримані математичні вирази, які встановлюють взаємозв'язок між ними й імітансними параметрами активного чотириполосника;
- процес визначення W-параметрів шляхом вимірювання імітансів значно спрощується при використанні кругових діаграм Вольперта-Сміта, що виражають залежність зміни вхідного або вихідного імітансів чотириполосника на комплексній площині від довільної, не контролюваного по величині, зміни реактивної складової імітанса навантаження при різних величинах активної складової, які представляють собою сімейство окружностей, радіуси яких зменшуються при збільшенні активної складової імітанса навантаження;
- для реалізації методу розроблений новий вимірювальний комплекс, до складу якого, крім стандартних компонентів, було включено нестандартні елементи, що дозволяють імітувати активні і реактивні імпеданси;
- у главі виведені вирази для визначення методичної похибки даного методу, що не перевищує 5%.

### Список літератури

1. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. М.: Высшая школа, 1973. 752 с.
2. Смит Ф. Круговые диаграммы в радиоэлектронике / Перевод с английского. М.: Связь, 1976. 144 с.
3. Богачев В. М., Никифоров В. В. Транзисторные усилители мощности. М.: Энергия. 1978. 344 с.
4. Возняк О. М., Рудик А. В. Метод вимірювання повної системи Y-параметрів матриці провідності НВЧ чотириполосників. *Сборник трудов международного симпозиума. Приложение к Всеукраинскому научно-техническому журналу «Вибрации в технике и технологии»*. 1998. С. 308–310.
5. Бова А. Т., Лайтман И. Б. Измерение параметров волноводных элементов. Киев: Техника, 1968. 157 с.
6. Імпедансний пристрій : пат. 18059 А Україна : НОЗН 11/00. М. А. Філінюк, О. М. Возняк, Я. І. Курзанов, О.В. Огороднік. заявл. 22.03.94; опубл. 31.10.97, Бюл. № 5. 3 с.
7. Филинук Н. А., Песков С. Н., Павлов С. Н. Определение параметров физической эквивалентной схемы ВЧ транзисторов. *Радиоэлектроника (Изв. высш. учебных заведений)*. 1982. Т. 25. № 12. С. 38–43.
8. Абубакиров Б. А., Гудков К. Г., Нечаев Э. В. Измерение параметров радиотехнических цепей. / под ред. В. Г. Андрущенко, Б. П. Фатива. М.: Радио и связь, 1984. 248 с.
9. Філінюк М. А., Огородник К. В. Інформаційно-вимірювальна система визначення параметрів активних чотириполосників. *Контроль і управління в складних системах* : тези доповіді VIII міжнародної конференції. Вінниця, 2005. С. 73.



10. Филинюк Н. Активные СВЧ фильтры на транзисторах. М. : Радио и связь, 1987. 112 с.
11. Спосіб вимірювання нестандартної системи S-параметрів в чотириполюсника : пат. 7267 Україна : МКИ G01R27/28. № 20041109340. М. А. Філінюк, К. В. Огородник, О. О. Лазарєв ; заявл. 15.11.2004 ; опубл. 15.06.2005, Бюл. №6. 3 с.

#### References

- [1] Bessonov, L. A. (1973). *Theoretical foundations of electrical engineering*. M.: High school. [in Russian].
- [2] Smith, F. (1976). *Pie charts in radio electronics*. (English Trans.). M. : Svyaz. [in Russian].
- [3] Bogachev, V. M., Nikiforov, V. V. (1978). *Transistor power amplifiers*. M. : Energy. [in Russian].
- [4] Wozniak, O. M., Rudik, A. V. (1998). The method of measuring the complete system of Y-parameters of the conductivity matrix of microwave quadruplets. *Proceedings of the International Symposium : Appendix to the All-Ukrainian scientific and technical journal "Vibrations in Engineering and Technology"*. (pp. 308–310). WITH. [in Ukrainian].
- [5] Bova, A. T., Leichtman, I. B. (1968). *Measurement of parameters of waveguide elements*. Kyiv: Technology. [in Russian].
- [6] Filinyuk, M. A., Wozniak, O. M., Kurzanov I. I., Ogorodnik O. V. (2017). *Ukrainian patent No.18059 A, NOZN 11/00, Impedansnyi prystrii*. Ukraine: State Intellectual Property Service of Ukraine. [in Ukrainian].
- [7] Filinyuk, N. A., Peskov S. N., Pavlov, S. N. (1982). Determination of parameters of the physical equivalent circuit of RF transistors. *Radioelectronics (Izv. Higher education institutions)*, 12, 38–43. [in Russian].
- [8] Abubakirov, B. A., Gudkov, K. G., Nechaev, E. V. (1984). *Measurement of parameters of radio circuits*. In V. G. Andrushchenko, B. P. Fativa (Eds.). M. : Radio and Communication. [in Russian].
- [9] Filinyuk, M. A., Ogorodnik, K. V. (2005). Information-measuring system for determining the parameters of active quadrupeds. *Control and Control in Complex Systems : Abstracts of the VIII International Conference* (pp. 73). Vinnytsia. [in Ukrainian].
- [10] Filinyuk, N. (1987). *Active microwave filters on transistors*. M.: Radio and communication. [in Russian].
- [11] Filinyuk, M. A., Ogorodnik, K. V., Lazarev, O. O. (2005). *Ukrainian patent No. 7267, MКИ G01R27/28. Method of measuring non-standard system of S-parameters in quadrupole*. Ukraine: State Intellectual Property Service of Ukraine. [in Ukrainian].

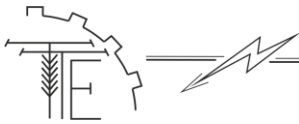
#### ИССЛЕДОВАНИЕ ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТАНДАРТНОЙ W- ПАРАМЕТРОВ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКА

*Уровень социального и экономического развития современного общества определяется объемом, скорости и качеству обработки информации с помощью методов и технических средств. Системы измерения и обработки информации становятся неотъемлемой частью средств автоматизации производства.*

*Развитие радиоэлектроники неразрывно связан с развитием измерений, а состояние современной радиоэлектроники в значительной степени определяется уровнем развития методов измерения и наличием достаточно совершенной измерительной аппаратуры измерения параметров радиоэлектронных приборов, в частности транзисторов, позволяет: во-первых, определить их потенциальные эксплуатационные возможности; во-вторых, дать исходный материал для расчета устройств; в-третьих, посредством судить об их внутренние свойства и технологические особенности, в-четвертых, разрабатывать новые, высококачественные устройства.*

*Интенсификация и автоматизация процессов производства, усложнение и расширение фронта научных экспериментов влечет за собой необходимость разработки принципиально новых методов и средств измерения параметров транзисторов на базе новых алгоритмов и вычислительной техники.*

*Повышение уровня полупроводниковых приборов, совершенствование их характеристик непременно влияет на потенциальную устойчивость в широком диапазоне частот. Классические методы и стандартная измерительная аппаратура не рассчитаны на измерения параметров потенциально неустойчивых транзисторов. Измерительные системы*



неконтролируемо возбуждаются, что увеличивает погрешность измерения. Поэтому сейчас стоит актуальная задача измерения параметров, как транзисторов в частности, так и четырехполюсников вообще, в частотном диапазоне потенциальной неустойчивости.

Тактовая частота, на которой работает современная компьютерная техника, вплотную подошла к диапазону СВЧ (сверхвысоких частот), что делает проблему измерения и расчета различных функциональных узлов вычислительной техники и операционных элементов весьма актуальной.

Разработка новых методов и средств измерения параметров потенциально неустойчивых четырехполюсников в диапазоне СВЧ является актуальным научным направлением, позволяет значительно повысить точность их измерения на стандартной аппаратуре.

Улучшение характеристик устройств СВЧ диапазона может быть достигнуто как за счет использования принципиально новой элементной базы, так и с помощью использования новых схемотехнических решений. Перспективным в этом плане направление использования реактивных свойств транзисторов, а также транзисторных структур с отрицательным сопротивлением для построения информационно-измерительных систем и операционных и вычислительных устройств диапазона СВЧ.

Проанализированы графические методы определения параметров эквивалентного четырехполюсника по результатам измерения оказываются, как правило, значительно более удобными, чем аналитические. Имея математическое уравнение и его графическую интерпретацию, можно сравнительно легко определить нужные величины, решая задачу путем графических приемов. Известно несколько способов графического изображения соотношений, характеризующих полное сопротивление (проводимость). Следующие два из них являются наиболее удобными:

- 1) круговая диаграмма полного сопротивления в прямоугольных координатах [1];
- 2) круговая диаграмма полного сопротивления в полярных координатах, предложенная впервые советским ученым А. Р. Вольперт [2].

Ключевые слова: исследование, четырехполюсник, параметры, графический метод, математические уравнения, конформные отображения иммитанса, схемы измерений

#### INVESTIGATION OF THE GRAPHOANALYTICAL METHOD OF DETERMINING THE STANDARD W-PARAMETERS OF THE FOUR-POLE

*The level of social and economic development of modern society is determined by the volume, speed and quality of information processing by methods and technical means. Measurement and information processing systems are becoming an integral part of production automation.*

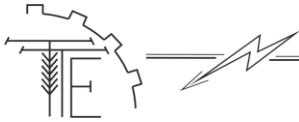
*The development of radio electronics is inextricably linked with the development of measurements, and the state of modern radio electronics is largely determined by the level of development of measurement methods and the availability of sufficiently advanced measuring equipment to measure the parameters of radio-electronic devices, in particular transistors, allows: first, exploitation; second, to provide the source material for calculating the devices; third, to judge their internal properties and technological features in an average way; fourth, to design new, high-quality devices.*

*The intensification and automation of the processes of production, complication and expansion of the front of scientific experiments entails the need to develop fundamentally new methods and means of measuring transistor parameters based on new algorithms and computers.*

*Increasing the level of semiconductor devices, improving their performance, will inevitably affect potential stability over a wide frequency range. Classical methods and standard measuring equipment are not designed to measure the parameters of potentially unstable transistors. The measurement systems are uncontrollably excited, which increases the measurement error. Therefore, the current task is to measure the parameters of both transistors in particular and quadruplets in general, in the frequency range of potential instability.*

*The clock speed at which modern computer technology operates is very close to the microwave range (ultra high frequencies), which makes the problem of measuring and calculating various functional units of computers and operating elements quite relevant.*

*The development of new methods and means for measuring the parameters of potentially unstable quadruplets in the microwave range is an important scientific area, which can significantly improve the accuracy of their measurement on standard equipment.*



*Improving the performance of the microwave range devices can be achieved both through the use of a fundamentally new element base and through the use of new circuit designs. Promising in this regard is the direction of using the reactive properties of transistors, as well as transistor structures with a negative resistance for the construction of information-measuring systems and operating and computing devices of the microwave range.*

*The graphical methods for determining the parameters of an equivalent four-pole according to the measurement results are, as a rule, much more convenient than analytical ones. Having a mathematical equation and its graphical interpretation, it is relatively easy to determine the required quantities by solving graphical techniques. There are several ways of graphically depicting the relationships that characterize the impedance (conductivity). The following two are the most convenient:*

- 1) pie chart of total resistance in rectangular coordinates [1];*
- 2) circular diagram of the total resistance in polar coordinates, proposed for the first time by Soviet scientist AR Volpert [2].*

**Keywords:** *research, quadrupole, parameters, graphical method, mathematical equations, conformal imittance maps, measurement schemes*

### ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

**Возняк Олександр Миколайович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, email: [alex.voz1966@gmail.com](mailto:alex.voz1966@gmail.com)).

**Видмиш Андрій Андрійович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, email: [andrijvydmysh1966@gmail.com](mailto:andrijvydmysh1966@gmail.com)).

**Штуць Андрій Анатолійович** – асистент Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, email: [shtuts1989@gmail.com](mailto:shtuts1989@gmail.com)).

**Возняк Александр Николаевич** - кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроэнергетики, электротехники и электромеханики» Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, 21008, Украина, email: [alex.voz1966@gmail.com](mailto:alex.voz1966@gmail.com)).

**Выдмыш Андрей Андреевич** - кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроэнергетики, электротехники и электромеханики» Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, 21008, Украина, email: [andrijvydmysh1966@gmail.com](mailto:andrijvydmysh1966@gmail.com)).

**Штуць Андрей Анатольевич** - ассистент Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, 21008, Украина, email: [shtuts1989@gmail.com](mailto:shtuts1989@gmail.com)).

**Oleksandr Wozniak** - candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics of Vinnitsa National Agrarian University (3 Soniachna St., Vinnitsa, 21008, Ukraine, email: [alex.voz1966@gmail.com](mailto:alex.voz1966@gmail.com)).

**Andriy Vidmysh** - Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics of Vinnitsa National Agrarian University (3 Soniachna St., Vinnitsa, 21008, Ukraine, email: [andrijvydmysh1966@gmail.com](mailto:andrijvydmysh1966@gmail.com)).

**Andriy Stuts** - assistant Professor at Vinnitsa National Agrarian University (3 Soniachna St., Vinnitsa, 21008, Ukraine, email: [shtuts1989@gmail.com](mailto:shtuts1989@gmail.com)).