

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**ЧЕХМЕСТРУК РОМАН ЮРІЙОВИЧ**

УДК 621.317

**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ РАДІОЧАСТОТНИХ  
ІМІТАНСНИХ ЛОГІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ**

Спеціальність 05.11.08 – радіовимірювальні прилади

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Вінниця – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Вінницькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: – доктор технічних наук, професор  
**Філінюк Микола Антонович**,  
Вінницький національний технічний університет,  
професор кафедри електроніки та наносистем.

Офіційні опоненти: – доктор технічних наук, професор  
**Яненко Олексій Пилипович**,  
Національний технічний університет України «КПІ»,  
професор кафедри радіоконструювання та виробництва  
радіоапаратури

– кандидат технічних наук, доцент  
**Чухов Владислав Вікторович**,  
Житомирський державний технологічний університет,  
доцент кафедри радіотехніки, радіоелектронних апаратів та  
телекомунікацій.

Захист дисертації відбудеться «20» травня 2016 року о 9:30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 05.052.02 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95, ауд. 210 ГНК.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Вінницького національного технічного університету ( 21021, м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95).

Автореферат розісланий «19» квітня 2016 року.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради

К. В. Огородник

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Прогрес суспільства багато у чому визначається успіхами розвитку комп'ютерних технологій, які здатні обробляти великі об'єми інформації. На даний час найбільш широкого застосування отримали засоби оброблення інформації, які базуються на відеоімпульсних логічних елементах. Ряд сучасних системи передачі інформації використовують радіочастотні канали. Наприклад, системи мобільного, супутникового зв'язку, системи наведення ракет, технології Wi-Fi, Bluetooth тощо. Оброблення інформації в технічних системах потребує виконання попередніх процедур: приймання сигналів, демодуляція та аналого-цифрове перетворення.

Розвивається, також напрямок, пов'язаний з використанням радіочастотних логічних елементів і з обробкою сигналу безпосередньо на несучій частоті. Вагомий вклад в розвиток цього напрямку внесли дослідження М. С. Неймана, К. Г. Кнорре, В. М. Кичака, І. Н. Розенберга, В.М. Тузова, В.С. Осадчука, М.А. Філінюка, С. Д. Тезис, П. Ф. Янг-Ханг, П. Ф. Бауде, Л. Б. Ліщинської та інших вчених. Більшість досліджень в цьому напрямку базуються на використанні нелінійних властивостей активних приладів, що обмежує технічні можливості радіочастотних систем обробки інформації.

Останнім часом почав розвиватися новий напрямок пов'язаний з застосуванням радіочастотних імітансних логічних елементів (ІЛЕ), які можуть працювати в квазілінійному режимі. Інформаційним параметром в таких схемах є імітанс. При проектуванні ІЛЕ та пристроїв на їх основі виникає проблема вимірювання їх параметрів. Проведений аналіз сучасних методів та засобів вимірювання параметрів відеоімпульсних та радіочастотних логічних елементів показав, що існуючі методи та засоби, які застосовуються для вимірювання параметрів відеоімпульсних мікросхем, не можуть бути застосовані для імітансних логічних елементів. При цьому методи та засоби вимірювання ряду параметрів радіочастотних логічних елементів взагалі відсутні. Тому актуальним є розробка нових методів і засобів вимірювання імітансних та робочих параметрів радіочастотних ІЛЕ, які забезпечать потрібну точність та зменшать трудомісткість вимірювань.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Розробки, представлені в роботі, виконувалися в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт:

1. 50-Д-309 «Аналіз та синтез RLC – негатронів на базі інжекційно-польових ефектів в багатоелектродних напівпровідних структурах Шоткі та створення на їх основі високоефективних інформаційних пристроїв» від 01.01.2010р., номер держреєстрації №0108U000660.

2. 50-Д-329 «Розробка теоретичних основ побудови та створення енергозберігаючих інформаційних пристроїв на базі багатопараметричних узагальнених перетворювачів імітансу» від 01.09.2011 р., номер держреєстрації №0111U001112.

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є підвищення точності та зменшення трудомісткості вимірювання адмітансних та робочих параметрів радіочастотних ІЛЕ.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:

1. Розробка нових методів і засобів вимірювання адмітансних параметрів радіочастотних ІЛЕ.

2. Розробка нових методів і засобів вимірювання робочих параметрів радіочастотних ІЛЕ.

3. Розробка та дослідження інструментального забезпечення методів вимірювання параметрів радіочастотних ІЛЕ, а саме коефіцієнту стійкості, динамічного діапазону, коефіцієнту шуму, перехідної характеристики, швидкодії, завадозахищеності.

*Об'єктом дослідження* є процес вимірювання імітансних та робочих параметрів ІЛЕ.

*Предметом дослідження* є радіочастотні методи і засоби вимірювання імітансних та робочих параметрів радіочастотних ІЛЕ.

**Методи дослідження** базуються на використанні: основних положень теорії функції комплексної змінної – для розробки методу «плаваючого» навантаження на основі короткого замикання (КЗ), методів теорії аналізу електронних схем – для розробки засобів вимірювання, методів математичного аналізу та теорії похибок – для дослідження розроблених засобів вимірювання, теорії конформних відображень та матричних методів – для дослідження методів «плаваючого» навантаження, чисельних методів розв'язання рівнянь, а також методів фізичного і комп'ютерного моделювання – для дослідження та перевірки розроблених методів.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Наукова новизна роботи полягає в отриманні наступних результатів:

1. Вперше розроблено метод вимірювання інваріантного коефіцієнта стійкості радіочастотних ІЛЕ, який відрізняється від існуючих тим, що може застосовуватися до багатоканальних пристроїв, дозволяє проводити вимірювання запасу стійкості радіочастотних ІЛЕ та визначати значення компенсуючого адмітансу, при якому досягається абсолютна стійкість радіочастотних ІЛЕ у всьому діапазоні зміни величини перетворених імпедансів  $Z_1$  і  $Z_2$ .

2. Вперше розроблено графоаналітичний метод вимірювання інваріантного коефіцієнта стійкості ІЛЕ, який відрізняється тим, що коефіцієнт стійкості знаходиться графічним шляхом через визначення параметрів імітансних кіл, що дозволило підвищити точність та знизити трудомісткість вимірювань за рахунок зменшення кількості вимірювань вхідного та вихідного адмітансу.

3. Подальшого розвитку отримав метод «плаваючих навантажень», який відрізняється тим, що ряд параметрів нестандартної системи адмітансних параметрів радіочастотних ІЛЕ знаходяться в режимі короткого замикання (КЗ), це дозволило підвищити точність і зменшити трудомісткість їх вимірювань на 30%.

4. Подальшого розвитку отримав метод вимірювання динамічного діапазону ІЛЕ, який відрізняється від існуючих тим, що математичний апарат розрахунку враховує вплив вхідного та вихідного від'ємного імітансу радіочастотного ІЛЕ, що

дало змогу оцінити динамічний діапазон різних видів радіочастотних ІЛЕ, реалізованих на потенційно-нестійких напівпровідникових структурах.

5. Удосконалено метод вимірювання повного опору, який відрізняється від відомого тим, що дозволяє визначити значення повного опору  $Z_X$  шляхом вимірювання лише потужності прямого  $P_{вх}$  і зворотного  $P_{вих}$  сигналу, який проходить через невзаємний чотириполосник з імітансом в спільній шині, що спрощує процес вимірювання при збереженні його високої точності.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає у наступному:

1. Вперше запропоновано новий вид елементів вимірювальних пристроїв – обмежувачів імітансу, які дозволяють задати логічний рівень радіочастотних ІЛЕ.

2. Розроблено комплект радіочастотних пристроїв перетворення відеоімпульсних сигналів в імітансні та навпаки, а також пристрій індикації характеру імітансу, які забезпечують спрощення процесу налаштування і експериментальних вимірювань основних параметрів радіочастотних ІЛЕ.

3. Проведено аналіз методичних похибок розроблених методів вимірювання нестандартних систем адмітансних параметрів ІЛЕ, який показав, що похибка вимірювання адмітансних параметрів не перевищує 10 %, що нижче, у порівнянні з існуючими методами, і підтверджує практичну придатність використання запропонованих методів.

4. Вперше запропоновані методики вимірювання параметрів радіочастотних ІЛЕ: коефіцієнту стійкості, динамічного діапазону, коефіцієнту шуму, перехідної характеристики, швидкодії, завадозахищеності, що дозволило визначити діапазони зміни вхідного імітансу, який визначає стан логічного «нуля» та «одиниці».

5. Розроблено комп'ютерну програму для розрахунку адмітансних параметрів радіочастотних ІЛЕ, яка автоматизує процес вимірювання і може бути використана при подальшому проектуванні радіочастотних ІЛЕ.

**Особистий внесок здобувача.** Основні положення і результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. В роботах опублікованих у співавторстві, здобувачеві належать: [1, 2, 9-14] – аналіз видів та основних параметрів радіочастотних ІЛЕ; [3, 15-16] – модифікований метод «плаваючого імітансу» та оцінка похибки вимірювань параметрів; [4, 26] – метод вимірювання повного опору; [5, 17-18] – метод вимірювання у-параметрів конвеєра струму; [30] – комп'ютерна програма розрахунку імітансних параметрів чотириполосника; [6, 19] – метод оцінки динамічного діапазону; [20] – оцінка коефіцієнта стійкості каналу перетворення імітансу, [21, 27] – аналітична оцінка коефіцієнту стійкості; [7, 22, 25] – принципова схема пристрою індикації характеру реактивності та експериментальні дослідження; [8, 23] – математичні моделі обмежувачів імітансу; [24, 28, 29] – принципові схеми перетворювачів відеоімпульсних сигналів в імітансні та імітансних у відеоімпульсні.

**Апробація результатів дослідження.** Основні результати наукових досліджень доповідалися і обговорювалися на XIII Міжнародній науково-технічній конференції «Современные информационные и электронные технологии» (СИЭТ 2012), м. Одеса, 2012 р.; 22-й Міжнародній Кримській конференції «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2012). м. Севастополь, 2012 р.; II міжнародній науковій конференції «Вимірювання, контроль та діагностика в

технічних системах» (ВКДТС - 2013), м. Вінниця, 2013 р; Proceedings of the International Conference TCSET'2014 Dedicated to the 170th anniversary of Lviv Polytechnic National University «Modern problems of radio engineering, telecommunications, and computer science», Львів-Славське, 2014; III Міжнародній науково-практичній конференції «Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації», м. Вінниця, 2011 р.; 22-й Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика», м. Москва, 2015 р.; 23-й Міжнародній Кримській конференції «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2013). м. Севастополь, 2013 р.; XV международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике», м. Санкт-Петербург, 2013 р.; IV міжнародній науково-практичній конференції «Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки» м. Чернівці, 2014 р.; Міжнародній науково-технічній конференції «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи», м. Київ, 2015 р.; XII міжнародній науково-технічній конференції «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах», м. Одеса, 2014р.; XII Міжнародній конференції «Контроль і управління в складних системах (КУСС-2014)», м. Вінниця, 2014р.; IX Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми телекомунікацій» ПТ-2015, м. Київ, 2015 р.; VII міжнародній науково-технічній конференції «Оптоелектронні інформаційні технології (Фотоніка ОДС–2015)», м. Вінниця, 2015 р..

Результати дисертаційної роботи представлялися і обговорювалися на щорічних науково-технічних конференціях кафедри проектування комп'ютерної та телекомунікаційної апаратури Вінницького національного технічного університету.

**Публікації.** Основні положення дисертаційної роботи висвітлено у 30 наукових працях у тому числі: 8 статей у наукових фахових виданнях та 6 з них в наукометричних базах, 16 статей та тез доповідей міжнародних науково-технічних конференцій, отримано 5 патентів України на корисну модель та 1 свідоцтво про реєстрації авторського права на твір.

**Структура й обсяг дисертації.** Дисертація складається із вступу, 4 розділів, загального висновку, переліку використаної літератури, який містить 174 найменувань вітчизняних і зарубіжних джерел. Матеріали дисертаційної роботи викладено на 152 сторінках основного тексту, включаючи 8 таблиць, 87 рисунків та 3 додатки. Загальний обсяг роботи - 205 сторінок.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційного дослідження, визначено мету, об'єкт, предмет і основні завдання дисертації, розкрито наукову новизну, теоретичне та практичне значення одержаних результатів.

**Перший розділ** присвячений аналізу сучасних методів та засобів вимірювання параметрів логічних елементів. У розділі подано визначення логічного елемента, наведено класифікацію логічних елементів фізично різних за своїм змістом. Проведено аналіз основних параметрів та характеристик електронних логічних

елементів, до яких віднесено відеоімпульсні логічні елементи та радіочастотні логічні елементи. Проаналізовано існуючі методи визначення параметрів імітансних радіочастотних логічних елементів. Параметри логічних елементів поділені на дві групи: адмітансні (параметри імітансної матриці; вхідний (вихідний) імітанс); робочі (коефіцієнт шуму, смуга пропускання, коефіцієнт стійкості та швидкодія).

Аналіз методів вимірювання параметрів імітансної матриці показав, що стандартні методи, такі як методи короткого замикання (КЗ) та холостого ходу (ХХ) складно застосувати до радіочастотних ІЛЕ, оскільки важко забезпечити режими КЗ і ХХ на високих і надвисоких частотах. Існуючі методи «плаваючого навантаження» можна застосовувати для вимірювання параметрів ІЛЕ, але вони є трудомісткими та мають значну похибку вимірювань на рівні 10%.

Вимірювання вхідного та вихідного імітансу можливо здійснювати різними методами: мостовим методом омметра, непрямими способами вимірювання. Дані методи не забезпечують необхідну точність в діапазоні НВЧ. Найбільш точним методом є метод, який використовує вимірювальну лінію. Але він є трудомістким.

Відомі методи вимірювання інваріантного коефіцієнта стійкості не дозволяють оцінити інваріантний коефіцієнт стійкості при зміні перетворених імітансів та визначити значення компенсуючого імітансу для забезпечення абсолютної стійкості. Вони є трудомісткими та потребують зменшення трудомісткості при збереженні точності.

Існуючі методи та стандартна апаратура вимірювання коефіцієнта шуму не враховують вплив від'ємного диференційного вхідного та вихідного опорів радіочастотного ІЛЕ, тому не можуть бути застосовані для вимірювання динамічного діапазону.

Методи вимірювання швидкодії радіочастотних ІЛЕ відсутні, що вказує на необхідність їх розробки.

Аналіз перелічених методів та їх метрологічного забезпечення вказує на їх значну трудомісткість та апаратурні затрати. Виходячи з цього завданнями досліджень є розробка більш простих методів і засобів вимірювання адмітансних та робочих параметрів радіочастотних ІЛЕ та оцінка їх методичних та інструментальних похибок.

**Другий розділ** присвячений розробці методів та засобів вимірювання адмітансних параметрів радіочастотних імітансних логічних елементів.

З метою спрощення трудомісткості методу «плаваючого навантаження» запропоновано метод «плаваючого навантаження» на основі режиму КЗ. Зміст методу полягає у вимірюванні двох значень вхідного ( $W_{вх.1}$ ,  $W_{вх.2}$ ) і вихідного ( $W_{вих.1}$ ,  $W_{вих.2}$ ) імітансів чотиріполюсника за довільних активних імітансів навантаження  $ReW_H$  ( $ImW_H = 0$ ) - var і генератора  $ReW_\Gamma$  - ( $ImW_\Gamma = 0$ ) - var, а також двох значень вхідного  $W_{вх}$  імітансу чотиріполюсника за довільних активних імітансів навантаження (рис. 1).

При використанні навантаження  $y_\Gamma = y_H = \infty$ , що забезпечується закороченням вхідного або вихідного ланцюга чотиріполюсника, отримуємо:

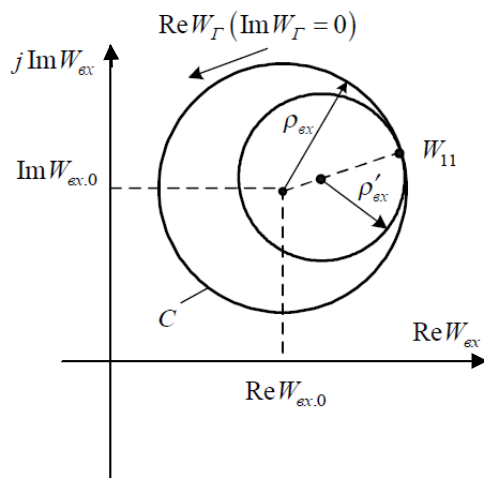
$$y_{ex.1} = y_{11}, y_{вх.1} = y_{22}. \quad (1)$$

Параметри  $y_{11}$  та  $y_{22}$  будуть третіми точками при побудові імітансних кіл, що спрощує процес вимірювань. Розраховуються радіуси  $\rho_{ex}$ ,  $\rho_{ввх}$  і координати центру  $y_{0ex}$ ,  $y_{0ввх}$  імітансних кіл і в результаті знаходяться нестандартні параметри матриці чотирьохполосника:

$$|y_{11}y_{22}| = 2\rho_{ex} \operatorname{Im} y_{22}, \quad (2)$$

$$\operatorname{Re}(y_{12}y_{21}) = 2 \operatorname{Im} y_{22} (\operatorname{Im} y_{ex.0} - \operatorname{Im} y_{11}), \quad (3)$$

$$\operatorname{Im}(y_{12}y_{21}) = \sqrt{|y_{12}y_{21}|^2 - \operatorname{Re}^2(y_{12}y_{21})}. \quad (4)$$



Проведена порівняльна оцінка відносних похибок непрямих вимірювань нестандартних адмітансних параметрів ІЛЕ, які включають похибки визначення координат центра та радіусів імітансних кіл для трьох методів «плаваючого навантаження». Результати наведені у табл. 1.

Рисунок 1 – Імітансні кола чотирьохполосника при зміні  $\operatorname{Re} W_{\Gamma}$  ( $\operatorname{Im} W_{\Gamma} = 0$ )

Таблиця 1 - Похибки вимірювання адмітансних параметрів за допомогою різних методів «плаваючого навантаження»

Метод Параметр	Класичний метод «плаваючого навантаження»	Удосконалений метод «плаваючого «навантаження»	Метод «плаваючого навантаження» на основі КЗ
	Відносна похибка, %		
$\operatorname{Re} y_{11}$	1,8	4,3	1,7
$\operatorname{Re} y_{22}$	6,4	3,04	2,7
$\operatorname{Im} y_{11}$	4,66	1,3	1,1
$\operatorname{Im} y_{22}$	1,57	1,48	1,37
$\operatorname{Re}(y_{12}y_{21})$	4,66	3,1	2,8
$\operatorname{Im}(y_{12}y_{21})$	2,16	2,16	1,94
$ y_{12}y_{21} $	1,5	2,3	1,8
Трудомісткість	9 вимірювань	9 вимірювань	6 вимірювань

Аналіз результатів табл.1 показує, що класичний метод та удосконалений метод «плаваючого» навантаження дають приблизно рівні значення відносної похибки непрямих вимірювань імітансних параметрів. Але реалізація



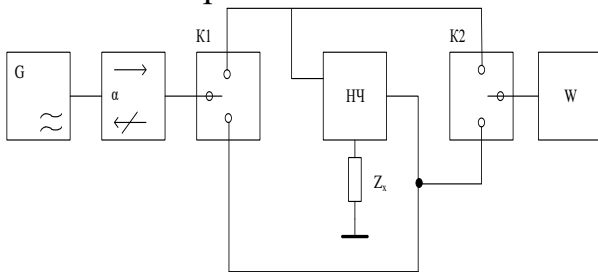
удосконаленого методу «плаваючого» навантаження простіша, що пов'язано з використанням низькодобротних навантажень. Метод «плаваючого навантаження» на основі КЗ забезпечує найменшу похибку та трудомісткість.

Розглянуті методи базуються на вимірювання адмітансу. Класичний метод вимірювання імітансу базується на використанні вимірювальної лінії. Цей метод є найбільш точним, але занадто трудомістким. Тому поставлена та вирішена задача розробки більш простого методу вимірювання імітансу в діапазоні НВЧ.

Зміст методу полягає у вимірювання максимально досяжного стійкого коефіцієнта передачі транзистора на межі стійкості шляхом вимірювання вхідної та вихідної потужності сигналу, який проходить через вимірювальний чотириполіусник. Значення шуканого імпедансу розраховується за формулами:

$$\operatorname{Re} Z_x = \operatorname{Re} Z_{21} \sqrt{\frac{P_{\text{вх}}}{P_{\text{вих}}}}, \operatorname{Im} Z_x = \operatorname{Im} Z_{21} \sqrt{\frac{P_{\text{вх}}}{P_{\text{вих}}}}. \quad (5)$$

Структурна схема та загальний вид установки для реалізації даного методу показано на рис. 2.



а)

б)

Рисунок 2 – Структурна схема вимірювальної установки (а) та її загальний вигляд (б): НЧ-невзаємний чотириполіусник, К1 – перший комутатор, К2 – другий комутатор, G – генератор, W – ватметр,  $\alpha$  - вентель

Експериментальні дослідження показали, що похибка вимірювання не перевищує 10% для активної складової адмітансу та 11% для реактивної складової у приведеному діапазоні частот  $\Omega=0 \dots 0,35$ , де  $\Omega$  – приведена частота.

У **третьому розділі** розроблені методи вимірювання робочих параметрів ІЛЕ: інваріантного коефіцієнта стійкості, динамічного діапазону та коефіцієнта шуму.

Зміст аналітичного методу вимірювання інваріантного коефіцієнта стійкості радіочастотних ІЛЕ полягає в розгляді ІЛЕ як багатоканального приладу, кожний канал перетворення імітансу якого є незалежним від іншого. Проводиться вимірювання інваріантного коефіцієнта стійкості кожного каналу і визначається значення компенсуючого адмітансу для досягнення абсолютної стійкості ІЛЕ (рис. 3).

Розроблений алгоритм вимірювань та експериментальна установка, структурна схема, якої показана на рис. 3. Похибка методу не перевищує 7,8%.

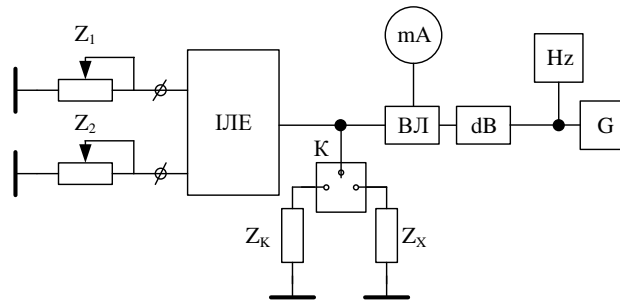


Рисунок 3 – Структурна схема експериментальної установки для оцінки інваріантного коефіцієнта стійкості ІЛЕ: ВЛ – вимірювальна лінія, dB – атенюатор, Hz – частотомір, mA – міліамперметр

$$K_{y.вн}^{(1)} = \frac{2 \operatorname{Re}(Y_{11}^{(1)} Y_{22}^{(1)}) - \operatorname{Re}(Y_{12}^{(1)} Y_{21}^{(1)})}{|Y_{12}^{(1)} Y_{21}^{(1)}|}. \quad \operatorname{Re} Y_{\text{вих.мін}} = \frac{(1 - K_{y.вн.})}{(K_y - K_{y.вн.})} \operatorname{Re} Y_K. \quad (6)$$

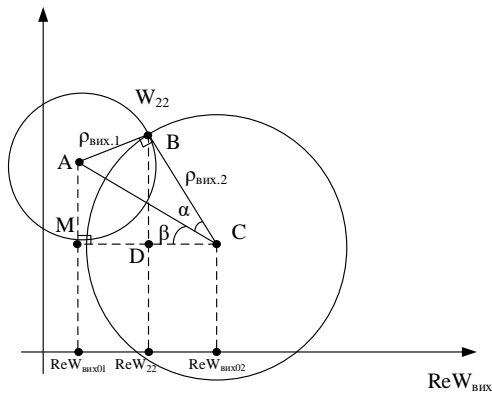


Рисунок 4 – Імітансні кола для визначення інваріантного коефіцієнта стійкості

Попередній метод є трудомістким, тому запропонований графоаналітичний метод, який дозволяє спростити процес вимірювання. Метод полягає в вимірюванні трьох точок імітансного кола при різних значеннях імітансу низькодобротного навантаження з подальшим математичним розрахунком інваріантного коефіцієнта стійкості по координатам центра та радіуса імітансного кола (рис. 4):

$$K_y = \frac{\operatorname{Re} W_{\text{вих.02}} - \sqrt{\rho_{\text{вих.1}}^2 + \rho_{\text{вих.2}}^2} \cos \beta}{\rho_{\text{вих.1}} \operatorname{Im} W_{11}}. \quad (7)$$

В основі оцінки динамічного діапазону лежить співвідношення потужності сигналу насичення ІЛЕ до потужності шумів на його вході. Це стандартне визначення динамічного діапазону будь-якого активного пристрою, але потребується вимірювання мінімально досяжного коефіцієнта шуму. Тут виникає проблема, пов'язана з тим, що ІЛЕ, який використовує узагальнений перетворювач імітансу (УПІ), працює в режимі коли на його вході чи виході виникає від'ємний диференціальний опір. Тому стандартна апаратура не може бути застосована.

Запропонований метод, який базується на узагальненій формулі Смогільова, але для її використання знадобилося визначити шумові коефіцієнти, які враховують вплив від'ємного диференційного опору. Отримано значення мінімально досяжного коефіцієнта шуму, вираженого через ці шумові коефіцієнти для R та LC логічного елемента «НІ». Отримано математичні вирази для визначення динамічного діапазону R та LC логічного елемента «НІ»:

$$D_R = P_{\text{MAX}} / kT_0 \Pi_{ш} q_{\text{ex}} (F_{ш.мін} (\alpha_{\Gamma} \rightarrow 0)), \quad (8)$$

$$D_{LC} = P_{MAX} / kT_0 \Pi_{\text{ш}} q_{\text{ex}} (F_{\text{ш}, \text{min}} (\text{Re} Y_{\text{BX.OPT}})), \quad (9)$$

де  $T_0$  – температура навколишнього середовища,  $q_{\text{ex}}$  – розладнання кола,  $k$  – стала Больцмана,  $\Pi_{\text{ш}}$  – шумова полоса,  $F_{\text{ш}}$  – коефіцієнт шуму,  $P_{MAX}$  – максимальна потужність сигналу.

На похибку визначення динамічного діапазону  $D$  (рис. 5) однаково впливають як похибка визначення коефіцієнту шуму  $F_{\text{ш}}$ , так і похибка допустимого значення потужності сигналу  $P_{MAX}$ . При визначенні коефіцієнта шуму та потужності сигналу з похибкою 10%, похибка визначення динамічного діапазону не перевищує 11,2 %.

У **четвертому розділі** запропоновано ряд нестандартних засобів для створення вимірювальних установок при реалізації розроблених методів вимірювання.

Розроблено пристрій для визначення характеру реактивності навантаження довгої лінії (рис. 6), що забезпечує діапазон індикації  $(-\infty < X_H < \infty)$ .

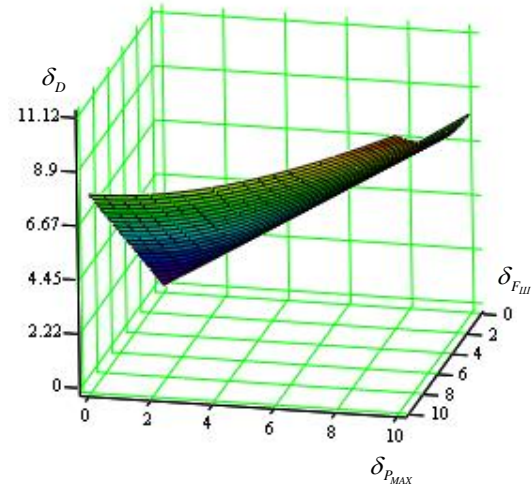


Рисунок 5 – Залежності відносної похибки визначення динамічного діапазону імітансного логічного елемента  $D$  від потужності  $P_{MAX}$  та коефіцієнту шуму  $F_{\text{ш}}$

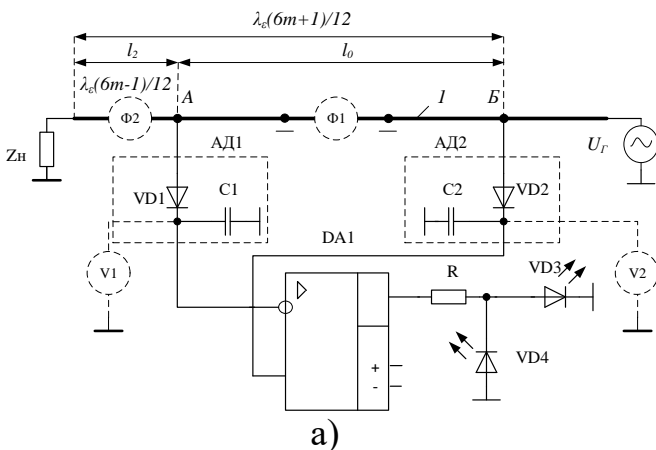


Рисунок 6 – Функціональна схема (а) та загальний вигляд (б) широкопasmового індикатора характеру реактивності навантаження

На відміну від використання вимірювальної лінії, розроблена установка має меншу вартість, а її застосування є менш трудомістке. Крім того, після

налаштування, вона на відміну від вимірювальної лінії працює в автоматичному режимі і може бути використана в автоматичній системі контролю параметрів імітансних логічних елементів. Для забезпечення однозначності індикації, визначені координати підключення амплітудних детекторів до довгої лінії, кратні  $\lambda_\varepsilon/6$  відстані один від одного, і відстані  $\pm\lambda_\varepsilon/12$ , щодо вузла стоячої хвилі напруги. Максимальна робоча частота приладу визначається відстанню  $l_0/\sqrt{\varepsilon}$  між амплітудними детекторами ( $f_{max} = c/6l_0\sqrt{\varepsilon}$ ), а мінімальна робоча частота - максимальною величиною фазового зсуву  $\varphi_{1max}$ , який створений прохідним фазообертачем  $\Phi_1$ , включеним між амплітудними детекторами ( $f_{min} = c(\pi - 3\varphi_1)/6\pi l_0\sqrt{\varepsilon}$ ). Функціональна схема вимірювальної установки для визначення характеру реактивності ІЛЕ та її загальний вигляд показаний на рис. 6.

Розроблено комплект радіочастотних пристроїв перетворення відеоімпульсних сигналів в імітансні та навпаки, які забезпечують спрощення процесу налаштування і експериментальних вимірювань основних параметрів радіочастотних ІЛЕ. Експериментальні дослідження показали, що пристрої працюють у відповідності до логічних рівнів ТТЛ логіки.

Запропоновано новий вид елементів вимірювальних пристроїв – обмежувачів імітансу, які дозволяють задати логічний рівень радіочастотних ІЛЕ. Розроблені R, L, C-обмежувачі імітансу, що являють собою чотириполосники вихідний імітанс, яких  $W_{вих}$  до значення  $W_{вих,0}$ , залежить від вхідного імітансу. Наведено класифікацію обмежувачів імітансу і обґрунтовано їх основні параметри. Розроблено математичні моделі пасивних R, L, C-обмежувачів з можливістю обмеження «знизу»:

$$\begin{aligned} W_{вих1} &= R_{вих1} = R_{ex1} + R_1, \\ W_{вих1L} &= X_{вих1L} = X_{ex1L} + X_{1L} = \omega(L_{ex1} + L_1), \\ W_{вих1C} &= X_{вих1C} = X_{ex1C} + X_{1C} = (C_{ex1} + C_1)/\omega C_1 C_{ex1}, \end{aligned}$$

де  $R_{вих1}$ ,  $X_{вих1L}$ ,  $X_{вих1C}$  – вихідний опір, індуктивний та ємнісний імітанс обмежувача «знизу»;  $R_{ex1}$ ,  $X_{ex1L}$ ,  $X_{ex1C}$  – вхідний опір, індуктивний та ємнісний імітанс обмежувача «знизу»;  $R_1$ ,  $X_{1L}$ ,  $X_{1C}$  – опір, індуктивний та ємнісний імітанс обмежувального елемента обмежувача «знизу».

Розроблені математичні моделі обмежувача імітансу «зверху»:

$$\begin{aligned} W_{вихR} &= R_{вих2} = (R_{ex2} + R_2)/(R_{ex2} + R_2), \\ W_{вих2L} &= X_{вих2L} = (X_{ex2L} \cdot X_{2L})/(X_{ex2L} + X_{2L}) = \omega(L_{ex2} \cdot L_2)/(L_{ex2} + L_2), \\ W_{вих2C} &= X_{вих2C} = (X_{ex2C} \cdot X_{2C})/(X_{ex2C} + X_{2C}) = 1/\omega(C_{ex2C} + C_2), \end{aligned}$$

де  $R_{вих2}$ ,  $X_{вих2L}$ ,  $X_{вих2C}$  – вихідний опір, індуктивний та ємнісний імітанс обмежувача «зверху»;  $R_{ex2}$ ,  $X_{ex2L}$ ,  $X_{ex2C}$  – вхідний опір, індуктивний та ємнісний імітанс обмежувача «зверху»;  $R_2$ ,  $X_{2L}$ ,  $X_{2C}$  – опір, індуктивний та ємнісний імітанс обмежувального елемента обмежувача «зверху».

Проведено оцінку впливу вхідних паразитних складових імітансу на імітансні передатні характеристики обмежувачів. У більшості випадків паразитні імітанси не впливають на роботу розглянутих пристроїв, при добротностях вхідного елемента  $Q_{R(L_{вхн})} = 0,1 \dots 0,2$  для R-обмежувачів «зверху», і при високодобротних вхідних елементах  $Q_{L(R_{вхн})} > 2$  для L-обмежувачів «зверху». Для C-обмежувачів при вхідному

паразитному імпедансі необхідно прагнути до високодобротних елементів  $Q_C(R_{вхлC}) > 3$ , а при паразитному імпедансі обмежувального елемента  $W1$  і  $W2$  слід підбирати низкодобротні елементи з добротністю  $Q_C(R_{ПЧ}) > 0,2$ .

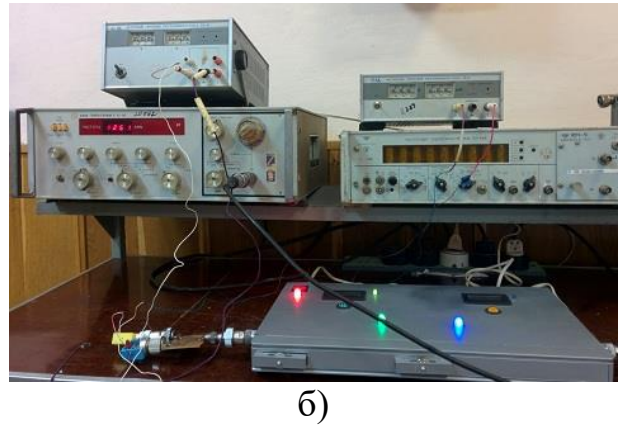
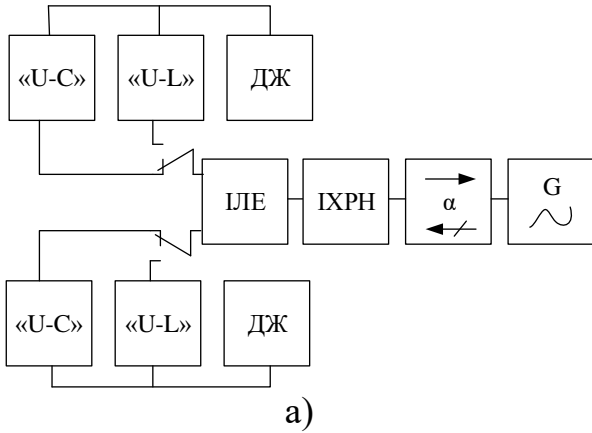


Рисунок 7 – Структурна схема (а) та загальний вид (б) вимірювальної установки для визначення характеру реактивності навантаження: ДЖ – джерело живлення; «U-C» – перетворювач напруга-ємнісний імпеданс; «U-L» – перетворювач напруга-індуктивний імпеданс, ІХРН – індикатор характеру реактивності навантаження;

Розроблено методики вимірювання передавальної характеристики ЛПЕ та її швидкодії. Для вимірювання передавальної характеристики імпедансного логічного елемента «НІ» запропоновано вимірювальну установку, структурна схема якої показана на рис. 8, а. Передавальна характеристика продемонстрована на рис. 8, б.

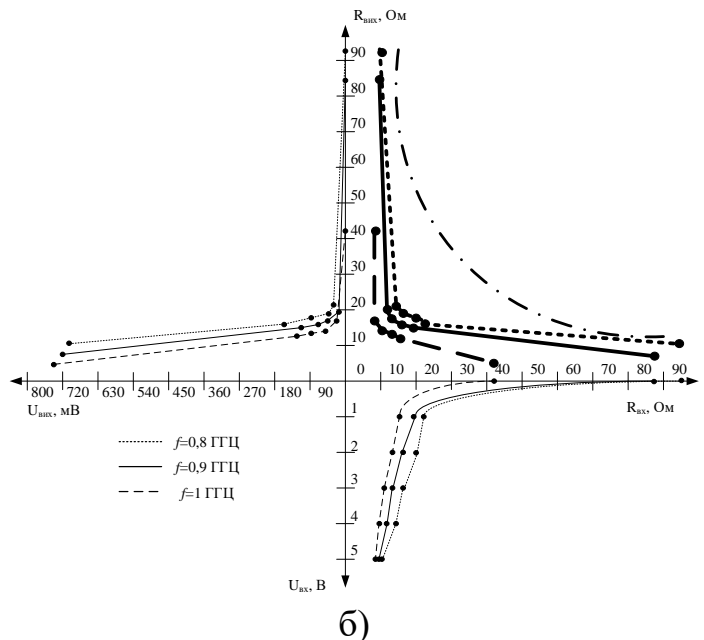
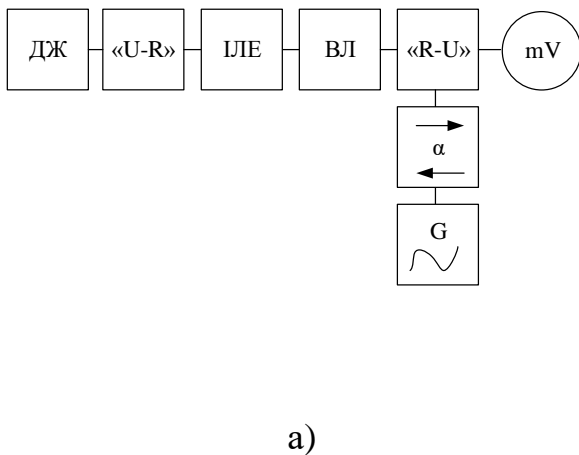


Рисунок 8 – Структурна схема (а) вимірювальної установки для вимірювання передавальної характеристики та експериментальна передавальна характеристика (б) активного імпедансного логічного елемента R-елемента «НІ»

З рис. 8, б видно, що експериментальні криві повторюють форму ідеальної характеристики, але відрізняються від неї кількісними значеннями, це пов'язано з тим що в експерименті не врахована реактивна складова опору. За допомогою залежності рис. 8, б можливо задати логічні рівні реальному радіочастотному ІЛЕ.

Швидкодія ІЛЕ визначається часом проходження електромагнітної хвилі від входу до виходу елемента і залежить від довжини відрізка лінії передачі  $l$  і швидкості  $v$  електромагнітної хвилі в лінії передачі. Сумарна затримка установки визначається як:

$$t_3 = t_{3E} + Nt_{3(ІЛЕ)},$$

де  $t_{3E}$  – затримка додаткових елементів;  $N$  – кількість ІЛЕ.

Розроблено алгоритм вимірювання та експериментальну установку для проведення досліджень.

Оскільки час затримки одного ІЛЕ досить малий, тому запропоновано вимірювати час затримки декількох ІЛЕ, з подальшим математичним розрахунком часу затримки в одному ІЛЕ:

$$t_{3(ІЛЕ)} = \frac{t_3 - t_{3E}}{N}.$$

Експериментальні дослідження підтвердили адекватність розроблених методик.

## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі розв'язана актуальна задача вимірювання імітансних та робочих параметрів ІЛЕ. На сьогоднішній день дані елементи швидко розвиваються і мають ряд переваг у порівнянні з відеоімпульсними. Насамперед, це висока завадостійкість, відсутність необхідності джерел живлення, висока швидкодія роботи. Оскільки на даний час не існує методів визначення параметрів радіочастотних ІЛЕ, то вирішена проблема створення математичного, алгебраїчного та програмного забезпечення, яке б дозволило ефективно розв'язувати задачі вимірювання імітансних та робочих параметрів ІЛЕ.

1. Аналіз основних методів та засобів вимірювання параметрів логічних елементів показав, що для вимірювання ряду параметрів ІЛЕ не придатні стандартні методи та апаратура, яка використовується для вимірювання параметрів відеоімпульсних логічних елементів. Запропоновані два шляхи вирішення завдання з вимірювання параметрів ІЛЕ – розробка спеціалізованих вимірювальних комплексів, для визначення кожного з параметрів; використання непрямих методів вимірювання із застосуванням для визначення параметрів відомих методів і засобів з подальшим розрахунком параметрів ІЛЕ за вище наведеними формулами. Перевагою другого рішення є його відносна дешевизна і простота реалізації. Недолік – значна трудомісткість різнопланових вимірювань і можливе збільшення похибки в процесі аналітичних розрахунків. Аналіз перелічених методів та їх технічного забезпечення вказує на велику трудомісткість і апаратурні витрати. Виходячи з цього, одним із завдань подальших досліджень у цій області слід вважати пошук більш простих методів і засобів вимірювання адмітансних та

робочих параметрів ІЛЕ. Важливим завданням також є оцінка методичних та інструментальних похибок таких вимірювань.

2. Подальшого розвитку отримав метод «плаваючих навантажень», який відрізняється тим, що ряд параметрів нестандартної системи адмітансних параметрів радіочастотних ІЛЕ знаходяться в режимі КЗ, що дозволило підвищити точність і зменшити трудомісткість їх вимірювань на 30%.

3. Удосконалено метод вимірювання повного опору, який відрізняється від відомого тим, що дозволяє визначити значення повного опору  $Z_X$  шляхом вимірювання лише потужності прямого  $P_{вх}$  і зворотного  $P_{вих}$  сигналу, який проходить через невзаємний чотириполіусник, з використанням імітансом в спільній шині, що спрощує процес вимірювання при збереженні його високої точності.

4. Вперше розроблено метод вимірювання інваріантного коефіцієнта стійкості радіочастотних ІЛЕ, який відрізняється від існуючих тим, що може застосовуватися до багатоканальних пристроїв, дозволяє проводити вимірювання запасу стійкості радіочастотних ІЛЕ та визначати значення компенсуючого адмітансу, при якому досягається абсолютна стійкість радіочастотних ІЛЕ у всьому діапазоні зміни величини перетворених імпедансів  $Z_1$  і  $Z_2$ .

5. Вперше розроблено графоаналітичний метод вимірювання інваріантного коефіцієнта стійкості ІЛЕ, який відрізняється тим, що коефіцієнт стійкості знаходиться графічним шляхом через визначення параметрів імітансних кіл, що дозволило підвищити точність та знизити трудомісткість вимірювань за рахунок зменшення кількості вимірювань вхідного та вихідного адмітансу.

6. Подальшого розвитку отримав метод вимірювання динамічного діапазону, який відрізняється від існуючих тим, що математичний апарат розрахунку включає вплив вхідного та вихідного від'ємного імітансу радіочастотного ІЛЕ, що дало змогу оцінити динамічний діапазон радіочастотних ІЛЕ, реалізованих на потенційно- нестійких напівпровідникових структурах. Проведена оцінка динамічного діапазону радіочастотних ІЛЕ дала наступні результати: динамічний діапазон ІЛЕ визначається залежністю вихідного імітансу ІЛЕ від потужності сигналу і рівнем шумів, приведених до його входу. Для аналітичної оцінки динамічного діапазону ІЛЕ використаний коефіцієнт рівний відношенню максимальної потужності сигналу, при якій величина перетвореного імітансу на виході ІЛЕ змінюється не більше ніж на 10%, до мінімальної потужності шумів, приведених до входу ІЛЕ; чисельна оцінка динамічного діапазону імітансних логічних елементів «НЕ» R- і LC-типу на основі біполярного транзистора показала, що їх динамічний діапазон дорівнює відповідно, 92 і 110 дБ і може бути збільшений шляхом звуження шумової смуги частот; максимальна похибка визначення динамічного діапазону рівна 11,2%.

7. Розроблено пристрій для визначення характеру реактивності навантаження довгої лінії, що забезпечує діапазон індикації  $(-\infty < X_H < \infty)$ . На відміну від використання вимірювальної лінії, розроблена установка має меншу вартість, а її застосування є менш трудомістке. Крім того, після налаштування, вона на відміну від вимірювальної лінії працює в автоматичному режимі і може бути використана в автоматичній системі контролю параметрів імітансних логічних елементів. Для

забезпечення однозначності індикації, визначені координати підключення амплітудних детекторів до довгої лінії, кратні  $\lambda_{\varepsilon}/6$  відстані один від одного і відстані  $\pm\lambda_{\varepsilon}/12$  щодо вузла стоячої хвилі напруги. Максимальна робоча частота приладу визначається відстанню  $l_0/\sqrt{\varepsilon}$  між амплітудними детекторами ( $f_{max} = c/6l_0\sqrt{\varepsilon}$ ), а мінімальна робоча частота – максимальною величиною фазового зсуву  $\varphi_{1max}$ , який створений прохідним фазообертачем, включеним між амплітудними детекторами  $f_{min} = c(\pi - 3\varphi_1)/6\pi l_0\sqrt{\varepsilon}$ .

8. Вперше запропоновано новий вид елементів вимірювальних пристроїв – обмежувачів імітансу, які дозволяють задати логічний рівень радіочастотних ІЛЕ. Запропоновано R, L, C-обмежувачі імітансу, що являють собою чотириполосник вихідний імітанс, якого  $W_{вих}$  в діапазоні до значення  $W_{вих.0}$  залежить від вхідного імітансу. Наведена класифікація обмежувачів імітансу і обґрунтовані їхні основні параметри. Розроблено пасивні R, L, C-обмежувачі, з можливістю обмеження «зверху» і «знизу». Проведено оцінку впливу вхідних паразитних складових імітансу на імітансні передатні характеристики обмежувачів. У більшості випадків паразитні імітанси не впливають на роботу розглянутих пристроїв, при вхідних добротностях елемента  $Q_{R(L_{вхн})} = 0,1 \dots 0,2$  для R-обмежувачів «зверху» і при високодобротних вхідних контурах  $Q_{L(R_{вхп})} > 2$  для L-обмежувачів «зверху». Для C-обмежувачів при вхідному паразитному імітансі необхідно прагнути до високодобротних контурів  $Q_{C(R_{вхпC})} > 3$ , а при паразитному імітансі обмежувального елемента  $W1$  і  $W2$  слід підбирати низкодобротні контури з добротністю  $Q_{C(R_{пC})} > 0,2$ .

9. Розроблено комплект радіочастотних пристроїв перетворення відеоімпульсних сигналів в імітансні та навпаки, а також пристрій індикації характеру імітансу, які забезпечують спрощення процесу налаштування і експериментальних вимірювань основних параметрів радіочастотних ІЛЕ. Експериментальні дослідження показали, що пристрої працюють у відповідності до режиму роботи ТТЛ логіки. При вхідній напрузі 0-5 В пристрої узгодження змінюють свій вихідний імітанс у межах від 200 до 3 Ом для перетворювача «активний опір – напруга», від -587 до -195 Ом перетворювача «ємнісний імітанс – напруга» та від 0,8 до 8 Ом перетворювача «індуктивний імітанс – напруга». Зворотні пристрої перетворення теж показали працездатність як в комп'ютерному моделюванні так і в експериментальних дослідженнях.

10. Вперше запропоновано методики вимірювання параметрів радіочастотних ІЛЕ: коефіцієнту стійкості, динамічного діапазону, коефіцієнту шуму, перехідної характеристики, швидкодії, завадозахищеності, що дозволило визначити діапазони зміни вхідного імітансу, який визначає стан логічного «нуля» та «одиниці».

Результати роботи впроваджено в ТОВ-Фірми «РАДІО».

Результати роботи впроваджено в навчальний процес кафедри ПКТА ВНТУ для студентів за напрямом підготовки 6.050903 «Телекомунікації».



## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Филинюк Н. А. Анализ метрологического обеспечения, разработки и применения иммитансных логических элементов / Н. А. Филинюк, Л. Б. Лищинская, Р. Ю. Чехмestрук // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2014. – № 2. – С. 251 – 255. – ISSN: 2307–5732.
2. Пасивний імітансний LC–логічний елемент АБО–НІ / М. А. Філінюк, Л. Б. Ліщинська, О. В. Войцеховська, Р. Ю. Чехмestрук // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2014. – № 3. – С. 72–77. – ISSN: 1999–9941.
3. Филинюк Н. А. Метод измерения параметров адмитансной матрицы четырехполюсника / Н. А. Филинюк, Л. Б. Лищинская, Р. Ю. Чехмestрук // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2014. – № 3. – С. 27–34. – ISSN: 2219–9365.
4. Лищинская Л. Б. Метод измерения полного сопротивления / Л. Б. Лищинская, Е. В. Войцеховская, Р. Ю. Чехмestрук // Восточно–Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – № 1/10. – С. 8–11. – ISSN: 1729–3774
5. Філінюк М. А. Аналітична залежність між параметрами конвеєра струму II–го покоління та його у–параметрами // М. А. Філінюк, Л. Б. Ліщинська, Р. Ю. Чехмestрук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2015. – №2(119). – С. 143–150. – ISSN: 1997–9266.
6. Оценка динамического диапазона работы иммитансных логических элементов / Н. А. Филинюк, Л. Б. Лищинская, Р. Ю. Чехмestрук, С. Е. Фурса // Восточно–Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 1(3). – С. 21–25. – ISSN: 1729–3774
7. Філінюк М. А. Пристрій визначення характеру реактивності імітансу навантаження довгої лінії / М. А. Філінюк, Л. Б. Ліщинська, Р. Ю. Чехмestрук // Метрологія та прилади. – 2014. – № 1. – С. 47–50. – ISSN: 2307–2108.
8. Филинюк Н. А. Пассивные ограничители иммитанса / Н. А. Филинюк, Л. Б. Лищинская, Р. Ю. Чехмestрук // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2015. – № 2–3. – С. 3–9. – ISSN: 2225–5818.
9. Сравнительная оценка параметров иммитансных логических элементов / Н. А. Филинюк, Л. Б. Лищинская, М. В. Барабан [и др.] // Материалы XIII Международной научно-практической конференции «Современные информационные и электронные технологии», Одесса, ОНПУ. – 04.06.2012 г. – С. 50
10. Микроволновые иммитансные логические элементы / Л. Б. Лищинская, М. А. Филинюк, Р. Ю. Чехмestрук, Я. С. Рожкова // 22-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2012). Севастополь, 10—14 сентября 2012 г. : материалы конф. в 2 т. — Севастополь : Вебер, 2012. — С. 137–138. — ISBN 978-966-335-399-9.
11. Філінюк М. А. Аналіз методів та засобів вимірювання основних параметрів імітансних логічних схем / М. А. Філінюк, Л. Б. Ліщинська, Р. Ю. Чехмestрук // Друга міжнародна наукова конференція «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах» (ВКДТС – 2013), 29-30 жовтня, 2013 р. Збірник тез доповідей. — Вінниця: ПП ТД «Едельвейс І К», 2013 — С. 107–108. – ISBN 978–966–2462–35–7.

12. Passive Immitance LC–Logic Gates / R. Yu. Chekhmestrouck, L. B. Lishchinskaya, N.A. Filinyuk, E.V. Voytsekhovskaya // Modern problems of radio engineering, telecommunications, and computer science. Proceedings of the International Conference TCSET'2014 Dedicated to the 170th anniversary of Lviv Polytechnic National University Lviv–Slavske, Ukraine February 25 – 1 March 1, 2014 — P. 107–108. — ISBN: 978–617–607–556–1.

13. Імітансні логічні схеми підвищеної завадостійкості / Л. Б. Ліщинська, О.В. Войцеховська, М. В. Барабан [та ін.] // III Міжнародна науково–практична конференція “Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації”. – С.200–201.– Вінниця: ВНТУ.– 2011.– С. 2. – ISBN 978–966–641–304–1.

14. Стахов В. П. Моноиммитансные логические RLC–элементы / В. П. Стахов, Р. Ю. Чехмestрук // Микроэлектроника и информатика – 2015. 22–я Всероссийская межвузовская научно–техническая конференция студентов и аспирантов: Тезисы докладов. – М.: МИЭТ, 2015. – С. 380. – ISBN 978–5–7256–0782–6.

15. Измерение параметров многопараметрических обобщенных преобразователей иммитанса / Л. Б. Лищинская, Р. Ю. Чехмestрук, Я. С. Ткачук [и др.] // 23–я Международная Крымская конференция «СВЧ–техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2013). Севастополь, 8–13 сентября 2013 г. : материалы конф. в 2 т. — Севастополь : Вебер, 2013. — С. 936–937. — ISBN 978–966–335–399–9.

16. Лищинская Л. Б. Радиочастотные измерения параметров многопараметрических ОПИ<sub>N</sub> / Л. Б. Лищинская, Е.В. Войцеховская, Р. Ю. Чехмestрук [и др.] // Высокие технологии, исследования, финансы. Т. 1: сборник статей Пятнадцатой международной научно–практической конференции «фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике». 25–26 апреля 2013 года, Санкт–Петербург, Россия – СПб.: Изд–во Политехн. ун–та, 2013. – С. 37–39. – ISBN: 978–5–7422–3907–9.

17. Измерение параметров конвеера тока II–го поколения / Р. Ю. Чехмestрук, В. П. Стахов, Л. Б. Лищинская, Н. А. Филинюк // Фізико–технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано– та мікроелектроніки: Матеріали IV–ої міжнародної науково–практичної конференції. – Чернівці : «Місто», 2014. – С. 32. – ISBN 978–617–652–091–7.

18. Філінюк М. А. Визначення параметрів конвеєру струму через вимірювання його у–параметрів / М. А. Філінюк, Р. Ю. Чехмestрук, В. П. Стахов // Міжнародна науково–технічна конференція «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи». Київ, 16 – 22 березня 2015 р.: матеріали конференції — Київ, 2015. — С. 286. – ISSN 2311–4169

19. Вимірювання динамічного діапазону роботи імітансних логічних елементів / М. А. Філінюк, Л. Б. Ліщинська, Р. Ю. Чехмestрук, С. Є. Фурса // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах : матеріали XII міжнар. наук.–техн. конференції (6–12 червня 2014р., м. Одеса); Одес. нац. акад. зв'язку ім. О. С. Попова. — Одеса–Хмельницький: ХНУ, 2014 — С. 107. – ISBN 978–966–330–203–4

20. Филинюк Н. А. Определение условия обеспечения устойчивости иммитансных логических элементов / Н. А. Филинюк, Р. Ю. Чехместрук // Контроль і управління в складних системах (КУСС–2014). XII Міжнародна конференція. Тези доповідей. Вінниця 14–16 жовтня, 2014р. — Вінниця: ВНТУ. — 2014. — С. 68. — ISBN 978–966–2462–66–1.

21. Ліщинська Л. Б. Нові методи вимірювання параметрів багатоелектродних напівпровідникових структур / М. А. Філінюк, Р. Ю. Чехместрук // Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах ВКДТС–2011.– С.22–22.– Вінниця: ВНТУ.– 2011.– С. 22 – ISBN 978–966–641–429–1.

22. Пристрій індикації характеру реактивного навантаження / Л. Б. Ліщинська, Р. Ю. Чехместрук, С. Е. Фурса [та ін.] // Современные информационные и электронные технологии. Материалы конференции. 27 — 31 мая Одесса, Украина, 2013 г. — С. 108 – 109.

23. Филинюк Н. А. Классификация, основные понятия и параметры ограничителей иммитанса / Н. А. Филинюк, Р. Ю. Чехместрук, В. П. Стахов // IX Міжнародна науково–технічна конференція «Проблеми телекомунікацій» ПТ–2015: Збірник матеріалів конференції. К.: НТУУ «КПІ», 2015. – С. 437–493. – ISSN: 2312–4121

24. Пристрої узгодження відеоімпульсних і імітансних логічних схем / М. А. Філінюк, Р. Ю. Чехместрук, В. П. Стахов, В. Л. Ковальський // Збірник тез доповідей сьомої міжнародної науково–технічної конференції Оптоелектронні інформаційні технології «Фотоніка ОДС–2015», м. Вінниця, 21–23 квітня 2015 року. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – С. 109 – ISBN 978–966–641–619–6.

25. Пат. 91731 Україна, Н03К 19/20 (2006.01) Радіочастотний індикатор характеру реактивності навантаження / М. А. Філінюк, Л. Б. Ліщинська, Р. Ю. Чехместрук.; — № u201402112; заявл. 03.03.2014; опубл. 10.07.2014, Бюл. № 13.

26. Пат. 60554 Україна №, МПК (2011.01) G01R 27/00 Спосіб вимірювання повного опору / Л. Б. Ліщинська, О. В. Войцеховська, М. А. Філінюк, Р. Ю. Чехместрук.; заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет. — № u201013614; заявл. 16.11.2010; опубл. 25.06.2011, Бюл. № 12.

27. Пат. 97804 Україна G01R 27/28 (2006.01). Спосіб вимірювання інваріантного коефіцієнта стійкості / М. А. Філінюк, Р. Ю. Чехместрук, Д. В. Бондарюк; — № u201410063; заявл. 15.09.2014; опубл. 10.04.2015, Бюл. № 7.

28. Пат. 92038 Україна, Н03К 19/20 (2006.01) Перетворювач напруга–імітанс / М. А. Філінюк, Л. Б. Ліщинська, Р. Ю. Чехместрук.; — № u201402120; заявл. 03.03.2014; опубл. 25.07.2014, Бюл. № 14, 2014 р.

29. Пат. 95339 Україна, МПК (2011.01) Н03К 19/20 (2006.01) Імітансно–відеоімпульсний перетворювач / М. А. Філінюк, І. О. Письменюк, Р. Ю. Чехместрук.; заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет. — № u201405914; заявл. 30.05.2014; опубл. 25.12.2014, Бюл. № 24.

30. Ліщинська Л. Б. Програма розрахунку імітансних параметрів чотириполюсника / Л. Б. Ліщинська, М. А. Філінюк, Р. Ю. Чехместрук // Свідectво про реєстрацію авторського права на твір № 47575. Україна; опубл. 04. 02. 2013. – Київ, 2013 р.

## АНОТАЦІЯ

**Чехместрук Р. Ю.** Методи та засоби вимірювання параметрів радіочастотних імітансних логічних елементів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.08 – радіовимірювальні прилади. – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2016.

Дисертація присвячена розробці методів та засобів вимірювання параметрів радіочастотних імітансних логічних елементів, принцип роботи яких полягає у використанні від'ємного імітансу, що дає можливість використання даних методів для оцінки параметрів радіочастотних імітансних логічних елементів при їх подальшому проектуванні та оцінці їх ефективності.

У дисертаційній роботі розроблено методи вимірювання адмітансних та робочих параметрів радіочастотних імітансних логічних елементів, які дали змогу знизити похибку вимірювань та трудомісткість. Вперше розроблені та перевірені на адекватність аналітичний та графоаналітичний методи вимірювання інваріантного коефіцієнту стійкості радіочастотного імітансного логічного елемента, що дозволило оцінити коефіцієнт стійкості імітансних логічних елементів у всьому діапазоні зміни вхідних імітансів. Подальшого розвитку отримав метод «плаваючого навантаження», який дозволив знизити трудомісткість вимірювань на 30%. Розроблено метод вимірювання адмітансу для спрощення методу «плаваючого навантаження». Вдосконалено метод вимірювання динамічного діапазону, який дозволив оцінити динамічний діапазон різних за типом логічних елементів. Розроблено комплект нестандартних засобів, які використовуються у вимірювальних установках. Наведено результати експериментальних перевірок розроблених методів.

**Ключові слова:** радіочастотний імітансний логічний елемент, імітанс, інваріантний коефіцієнт стійкості, повний опір, метод «плаваючого» навантаження, динамічний діапазон, коефіцієнт шуму.

## АННОТАЦИЯ

**Чехместрук Р. Ю.** Методы и средства измерения параметров радиочастотных иммитансных логических элементов. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.08 - радиоизмерительные приборы. – Винницкий национальный технический университет, Винница, 2016.

Диссертация посвящена разработке методов и средств измерения параметров радиочастотных иммитансных логических элементов, принцип работы которых базируется на использовании отрицательного иммитанса, что дает возможность использования данных методов для оценки параметров радиочастотных иммитансных логических элементов при дальнейшем проектировании и оценке их эффективности.

В работе проведен анализ основных методов и средств измерения параметров логических элементов, который показал, что для измерения параметров ИЛЭ не пригодны стандартные методы и аппаратура, используемая для измерения параметров видеоимпульсных логических элементов.

Рассмотрены методы измерения адмитансных и рабочих параметров ИЛЭ, а именно: параметров адмитансной матрицы ОПИ, адмитанса нагрузки, коэффициента устойчивости, динамического диапазона.

Исходя из того, что рассмотренные методы и их техническое обеспечение имеют большую трудоемкость и аппаратные затраты, показана актуальность разработки более простых методов и средств измерения адмитансных и рабочих параметров радиочастотных ИЛЭ. Проведена оценка методических и инструментальных погрешностей таких измерений.

В работе впервые разработан метод измерения инвариантного коэффициента устойчивости радиочастотных ИЛЭ. Метод позволяет проводить измерения запаса устойчивости радиочастотных ИЛЭ. Определены значения компенсирующего адмитанса, при котором достигается абсолютная устойчивость радиочастотных ИЛЭ во всем диапазоне изменения величины преобразованных импедансов  $Z_1$  и  $Z_2$ .

Впервые разработан графоаналитический метод измерения инвариантного коэффициента устойчивости ИЛЭ, который позволил повысить точность и снизить трудоемкость измерений за счет уменьшения количества измерений входного и выходного адмитанса. Для измерения инвариантного коэффициента устойчивости применяется усовершенствованный метод «плавающей» нагрузки на основе короткого замыкания.

Дальнейшее развитие получил метод «плавающей» нагрузки. Данный метод позволяет определить ряд параметров нестандартной системы адмитансных параметров радиочастотных ИЛЭ при режиме короткого замыкания. Метод позволил повысить точность и уменьшить трудоемкость измерения нестандартных параметров на 30%, что в свою очередь привело к снижению погрешности измерений.

Дальнейшее развитие получил метод измерения динамического диапазона ИЛЭ. Математический аппарат расчета включает влияние входного и выходного отрицательного иммитанса радиочастотного ИЛЭ. Это позволило оценить динамический диапазон различных радиочастотных ИЛЭ реализованных на потенциально-неустойчивых полупроводниковых структурах. Проведены экспериментальные исследования адекватности метода, которые позволили оценить динамический диапазон R- и LC- иммитансных логических элементов.

Усовершенствованный метод измерения полного сопротивления, позволяет определить значение полного сопротивления  $Z_x$  только путем измерения мощности прямого  $P_{вх}$  и обратного  $P_{вых}$  сигнала, который проходит через невзаимный четырехполюсник, с используемым иммитансом в общей шине. Это позволило упростить процесс измерений, как полного сопротивления, так и системы нестандартных параметров матрицы четырехполюсника, при сохранении их высокой точности.

В работе разработан ряд нестандартных средств, используемых при проверке разработанных методов. Впервые предложен новый вид элементов измерительных устройств – ограничителей иммитанса, которые позволяют задать логический уровень радиочастотных ИЛЭ. Разработан комплект радиочастотных устройств – преобразования видеоимпульсных сигналов в имитансные и наоборот, а также устройство индикации характера иммитанса, которые обеспечивают упрощение процесса настройки и экспериментальных измерений основных параметров радиочастотных ИЛЭ.

Предложены методики измерения параметров радиочастотных ИЛЭ: коэффициента устойчивости, динамического диапазона, коэффициента шума, переходной характеристики, быстродействия, помехозащищенности, что позволило определить диапазоны изменения входного иммитанса, который определяет логический уровень «нуля» и «единицы».

Разработана компьютерная программа для расчета адмитансных параметров радиочастотных ИЛЭ, которая автоматизирует процесс измерения и может быть использована при дальнейшем проектировании радиочастотных ИЛЭ.

**Ключевые слова:** радиочастотный иммитансный логический элемент, иммитанс, инвариантный коэффициент устойчивости, полное сопротивление, метод «плавающей» нагрузки, динамический диапазон, коэффициент шума.

#### ANNOTATION

**Chekhmestruk R. Y.** Methods and devices for measuring parameters of radio frequency (RF) immitance logic gates. - Manuscript.

The dissertation for the degree PhD of technical sciences, specialty 05.11.08 - radio metering devices. - Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, 2016.

The work is devoted to developing methods and devices for measuring parameters of RF immitance logic gates, the principle of which is to use negative immitance. It allows to use these methods for estimating the parameters of RF immitance logic gates in their further design and evaluation of effectiveness.

In the paper developed methods for measuring the works and admittance parameters of RF immitance logic gates were developed that helped to reduce error and complexity of measurement. First was developed and tested for adequacy analytical and graphic-analytical methods for measuring radio frequency invariant coefficient of stability RF immitance logic gates, which allowed to provide stability coefficient RF immitance logic gates in the whole range of input immitance. Further were developed of the method of “floating” load, that allowed measurements to reduce error of measuring by 30%. The method of admittance was designed to simplify the method of “floating” load. Improved Method of measurement dynamic range was improved, which allowed to estimate the dynamic range of different type of logic gates. A set of innovative devices were used and measurement units were designed. The results of experimental verifications of developed methods are presented.

**Keywords:** RF immitance logic gate, immitance, invariant coefficient of stability, impedance, a method of "floating" load, dynamic range, noise coefficient.

Підписано до друку 15.04.2016 р. Формат 29.7×42 ¼

Наклад 100 прим. Зам. № 2016-062

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі

Вінницького національного технічного університету  
м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95. Тел. 59-81-59