

Вінницький національний технічний університет

Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова

праця на правах рукопису

Стахов Володимир Петрович

УДК 004.312.222; 621.396

ДИСЕРТАЦІЯ
МЕТОД СИНТЕЗУ МОНОІМІТАНСНИХ ЛОГІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ
ТА СПЕЦІАЛІЗОВАНІ ПРИСТРОЇ НА ЇХ ОСНОВІ

05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти

технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

В.П. Стахов

Наукові керівники: Філінюк Микола Антонович, доктор технічних наук, професор

Білинський Йосип Йосипович, доктор технічних наук, професор

Вінниця – 2018

АНОТАЦІЯ

Стахов В. П. Метод синтезу моноімітансних логічних елементів та спеціалізовані пристрої на їх основі. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 «Комп'ютерні системи та компоненти». – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2018.

Дисертаційна робота присвячена розробці методу синтезу моноімітансних логічних елементів, дослідження їх математичних моделей і експериментальних зразків; побудови комбінаційних схем та транспондерних систем на їх основі. Як інформативний параметр в моноімітансних логічних елементах використовується один із видів імітансу – активний, індуктивний або ємнісний. Використання імітансу як інформативного параметра дає можливість підвищити завадостійкість логічних елементів завдяки тому, що вихідний інформативний параметр моноімітансних логічних елементів не залежить від електромагнітних завад, стрибків напруги та струму. Це дозволяє використовувати моноімітансну логіку у промислових, бортових, спеціальних обчислювальних системах, які працюють в умовах високих завад та для яких важлива не мінімізація, а висока завадостійкість. Також моноімітансна логіка забезпечує високу швидкодію, оскільки у її складі не використовуються транзистори і тому відсутні перехідні процеси, що забезпечує робочу частоту порядку сотні гігагерц та час перемикання, який дорівнює десяткам і навіть одиницям пікосекунд, що значно перевищує показники сучасної напівпровідникової логіки. Крім того, моноімітансна логіка практично не має обмежень за мінімальною потужністю вхідного сигналу, що дозволяє працювати з напругами, значно меншими за порогову напругу живлення напівпровідникових елементів, та підвищує енергетичну ефективність логічних елементів.

У роботі проаналізовано сучасні досягнення в галузі розробки логічних елементів, які використовують різні фізичні явища як інформативний параметр.

Розглянуто напівпровідникові, оптичні, гідравлічні, пневматичні, біохімічні, магнітні, радіочастотні, мультиімітансні та моноімітансні логічні елементи, наведено їх характеристики та параметри. Проведено критеріальне оцінювання їх ефективності за швидкодією, тривалістю затримки сигналу, споживаною потужністю потужністю перемикачів та габаритними розмірами. Результати критеріального оцінювання і аналізу показують високу ефективність моноімітансної логіки, зокрема за параметрами швидкодії, завадостійкості та енергоспоживання, що підтверджує доцільність їх подальшої розробки.

Для обґрунтування розробки давачів з моноімітансними логічними схемами розглянуто існуючі радіочастотні транспондери та проаналізовано їхні параметри. В результаті їх порівняння з транспондерами на основі моноімітансних пристроїв визначено переваги останніх, які полягають у меншому енергоспоживанні, кращій швидкодії, вищому частотному діапазоні та потенційно меншій вартості через відсутність чипів у складі схеми.

Подальшого розвитку отримав імітансний метод синтезу логічних елементів шляхом одночасного використання імітансу тільки одного виду додатного значення та використання як фізичної основи трансформувальних властивостей чвертьхвильових і півхвильових відрізків лінії передачі у НВЧ діапазоні. Використовуючи розроблений метод, запропоновано математичні моделі та схеми реалізації пасивних моноімітансних логічних елементів на основі півхвильових і чвертьхвильових відрізків лінії передачі, які виконують логічні функції «НЕ», «АБО» та «І» при використанні активного опору як інформативного параметра та елементів «І» при використанні ємнісного та індуктивного опорів.

За допомогою комп'ютерного моделювання поведінки математичних моделей моноімітансних логічних елементів у програмному пакеті Mathcad 14 досліджено вплив на вихідний інформативний параметр розроблених моноімітансних логічних елементів таких дестабілізуювальних факторів: похибка хвильового опору відрізків лінії передачі, паразитна реактивність або добротність у вхідних опорах, зміна частоти вхідного сигналу генератора або похибка довжини відрізків лінії передачі.

Дослідження підтвердили високу стабільність роботи моноімітансних елементів при зміні дестабілізуювальних факторів у заданому діапазоні.

Проведено комп'ютерне моделювання у програмному пакеті AWR Microwave Office 9.00 та побудовано експериментальні макети моноімітансних логічних елементів «НЕ», «АБО» та «І», які підтверджують їх роботоздатність. За допомогою побудованих макетів досліджено параметри реальних моноімітансних логічних елементів, що підтверджують правильність розрахунків і переваги моноімітансних логічних елементів над напівпровідниковими елементами та полягають у зниженому порозі мінімальної робочої напруги, підвищеній швидкодії і завадостійкості за умов електромагнітних завад.

Розроблено суматор за модулем 2, півсуматор та суматор на основі моноімітансних логічних елементів, що використовують активний опір як інформативний параметр. Завдяки використанню моноімітансного методу проведено додаткову оптимізацію за рахунок взаємного скорочення довжини відрізків лінії передачі. За допомогою розроблених математичних моделей суматора за модулем 2, півсуматора та суматора побудовано передавальні характеристики, які відповідають їх логічним функціям. Запропоновано діапазони вхідних опорів, які дозволяють досягнути сумісності вхідних і вихідних опорів. Перевагами розроблених комбінаційних схем є пасивний спосіб живлення, відсутність активних елементів у схемі, висока швидкодія, висока стійкість до впливу електромагнітних завад, зменшений поріг мінімальної робочої напруги.

Розроблено радіочастотні пасивні передавачі, сумісні з моноімітансними пристроями. На їх основі запропоновано транспондери з моноімітансними пристроями: моноімітансним логічним елементом «АБО», моноімітансним логічним елементом «І», масивом моноімітансних логічних елементів «НЕ», масивом моноімітансних логічних елементів «НЕ» з різними хвильовими опорами, моноімітансними суматорами за модулем 2, моноімітансним шифратором, моноімітансним пріоритетним шифратором. Проведено комп'ютерне моделювання роботи таких транспондерів у програмному пакеті AWR Design Environment 9.00, яке підтвердило їх роботоздатність, та запропоновано можливі варіанти практичного

використання таких транспондерів. На основі розроблених транспондерів можливо побудувати давачі, які будуть мати такі переваги: живлення від вхідного НВЧ сигналу, можливість роботи в умовах малопотужних вхідних сигналів, висока швидкодія та виконання логічних операцій без використання чипів.

Наукова новизна отриманих результатів. У роботі отримано такі наукові результати:

1. Отримав подальшого розвитку імітансний метод синтезу логічних елементів, в якому, на відміну від відомого, логічна функція реалізується на моноімітансному базисі за рахунок трансформувальних властивостей відрізків ліній передачі у НВЧ діапазоні, що дозволяє виконати пряме та зворотне перетворення імітансу та забезпечити потенційно вищу швидкодію, частотний діапазон роботи і завадостійкість при низькому енергоспоживанні логічних елементів.

2. Вперше запропоновано математичні моделі пасивних моноімітансних логічних елементів, які, на відміну від відомих, використовують властивості чвертьхвильових і півхвильових відрізків лінії передачі і не залежать від статичних параметрів електричного сигналу, що дозволило отримати передавальні характеристики, які відповідають логічним функціям і дають змогу розрахувати значення логічних рівнів при певних параметрах хвильового опору відрізків лінії передачі.

3. Запропоновано математичні моделі комбінаційних логічних схем, побудованих на основі пасивних моноімітансних логічних R-елементів «НЕ», «АБО» та «І», які, на відміну від відомих, мають можливість додаткової оптимізації та скорочення компонентів за рахунок властивостей чвертьхвильових та півхвильових відрізків лінії передачі.

Практичне значення отриманих результатів. У роботі отримано такі практичні результати:

1. Розроблено логічні R-елементи «НЕ», «АБО» та «І», С-елемент «І», L-елемент «І», які відрізняються від існуючих тим, що побудовані на чвертьхвильових та півхвильових відрізках лінії передачі, що дозволило підвищити швидкодію та завадостійкість, зменшити поріг мінімальної робочої напруги логічних елементів.

2. Розроблено методику розрахунку впливу дестабілізувальних факторів на інформативний параметр розроблених моноімітансних логічних елементів R-елементів «НЕ», «АБО» та «І», С-елемента «І», L-елемента «І» від дестабілізувальних факторів, що дозволяє їх оптимізувати.

3. Розроблено моноімітансний суматор за модулем 2, півсуматор та суматор на основі моноімітансних логічних R-елементів «НЕ», «АБО» та «І», які, на відміну від відомих, побудовані на чвертьхвильових та півхвильових відрізках лінії передачі, споживають тільки енергію вхідного сигналу і не містять активних елементів, що дозволило підвищити швидкодію, завадостійкість та зменшити поріг мінімальної робочої напруги таких схем.

4. Розроблено пасивний радіочастотний передавач на принципах зворотного відбиття або помноження частоти, які, на відміну від існуючих, сумісні з моноімітансними логічними схемами, що дозволило на їх основі розробити пасивні радіочастотні транспондери з використанням різних моноімітансних логічних схем, та провести комп'ютерні моделювання, які доводять їх роботоздатність.

Практичні результати дисертаційного дослідження впроваджено у науково-виробничому підприємстві «ВТН» (м. Вінниця) у рамках науково-дослідної роботи 43-Д-387 «Радіочастотні інформаційні елементи та пристрої з покращеною завадостійкістю і швидкодією» для побудови обчислювальної техніки та радіотехнічних пристроїв з підвищеною завадостійкістю і швидкодією, а також у навчальний процес Вінницького національного технічного університету за спеціальністю 6.050903 – «Телекомунікації» в дисципліні «Пристрої на елементах з від'ємним опором».

Ключові слова: метод синтезу моноімітансних логічних елементів, імітанс, моноімітансна логіка, надвисокочастотна електроніка, логічні елементи, комбінаційна логіка, транспондери, пасивні обчислювальні системи.

Список публікацій здобувача

- [1] Н. А. Филинюк и др. *Имитансные логические элементы и устройства*. Винница, Украина: ВНТУ, 2016.

- [2] М. А. Філінюк, Л. Б. Ліщинська, О. В. Войцеховська, та В. П. Стахов, «Моноиммитансные логические RLC-элементы», *Вісник Хмельницького національного університету*, № 3 (225), с. 117-121, 2015.
- [3] М. А. Філінюк, Л. Б. Ліщинська, О. В. Войцеховська, та В. П. Стахов, «Моноімітансний логічний R-елемент «НІ»», *Міжнародний науково-технічний журнал «Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія»*, № 2, с. 71-76, 2015.
- [4] М. А. Філінюк, С. Є. Фурса, та В. П. Стахов, «Исследование моноиммитансного логического R-элемента «ИЛИ»», *Вісник НТУ «ХПИ»*, № 33, с. 175-184, 2015.
- [5] М. А. Філінюк, Л. Б. Ліщинська, О. В. Войцеховська, та В. П. Стахов, «Моноиммитансний логический R-элемент «И»», *Міжнародний науково-технічний журнал «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах»*, № 1, с. 68-74, 2016.
- [6] М. А. Filynyuk, L. B. Lishchynska, E. V. Voytsekhovskaya, and V. P. Stakhov, «Evaluation of interference stability of monoimmittance logic L-element AND», *Науковий вісник національного гірничого університету*, № 1, р. 100-107, ISSN 2071-2227.
- [7] М. А. Філінюк, Л. Б. Ліщинська, С. Є. Фурса, та В. П. Стахов, «Оценка помехоустойчивости моноиммитансного логического C-элемента «И»», *Вісник Хмельницького національного університету*, № 6, с. 176-184, 2016.
- [8] М. А. Filynyuk, L. B. Lishchynska, A. A. Lazarev, and V. P. Stakhov, «Investigation of circuit features of the immittance modulo-2 adder realization», *Proc. of SPIE*, Vol. 10445, 2017.
- [9] М. А. Філінюк, Л. Б. Ліщинська, О. О. Лазарєв, та В. П. Стахов, «Иммитансний полусумматор», *Міжнародний науково-технічний журнал «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах»*, № 2, с. 97-100, 2017.

- [10] М. А. Філінюк, Л. Б. Ліщинська, О. О. Лазарєв, та В. П. Стахов, «Имитансный сумматор», *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, № 3, Вінниця, ВНТУ, с. 69-71, 2017.
- [11] Й. Й. Білінський, О. О. Лазарєв, та В. П. Стахов, «Пасивний радіочастотний моноімітансний передавач» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 3, с. 114 – 118, 2017.
- [12] Й. Й. Білінський, та В. П. Стахов, «Пасивні радіочастотні моноімітансні транспондери», *Наукові праці ВНТУ*, № 3, Вінниця, ВНТУ, с. 1 – 6, 2017.
- [13] М. А. Філінюк, Р. Ю. Чехмestрук, та В. П. Стахов, «Перетворювач активного імітанса в напругу», МПК H02M 3/06, № u201505071, опубл. 10.12.2015.
- [14] М. А. Філінюк, Л. Б. Ліщинська, О. В. Войцеховська, та В. П. Стахов, «Моноімітансний логічний L-елемент I», МПК H03K 19/20, № u201505868, 10.12.2015.
- [15] М. А. Філінюк, Л. Б. Ліщинська, О. В. Войцеховська, та В. П. Стахов, «Моноімітансний логічний R-елемент АБО», МПК H03K 19/20, № u201505869, 10.12.2015.
- [16] М. А. Філінюк, Л. Б. Ліщинська, О. В. Войцеховська, та В. П. Стахов, «Моноімітансний логічний R-елемент I», МПК H03K 19/00, № u201505870, 25.12.2015.
- [17] М. А. Філінюк, Р. Ю. Чехмestрук, та В. П. Стахов, «Перетворювач ємнісного імітанса в напругу», МПК H02M 3/00, № u201505077, опубл. 25.11.2015.
- [18] М. А. Філінюк, Л. Б. Ліщинська, О. В. Войцеховська, та В. П. Стахов, «Моноімітансний логічний C-елемент I», МПК H03K 19/00, № u201505873, 25.11.2015.
- [19] М. А. Філінюк, Р. Ю. Чехмestрук, та В. П. Стахов, «Перетворювач індуктивного імітанса в напругу», МПК H02M 3/00, № u201505072, опубл. 25.11.2015.
- [20] Й. Й. Білінський, та В. П. Стахов, «Безпроводний моноімітансний логічний R-елемент «Виключне АБО»», МПК H03K 19/00, № u201704897, 25.10.2017.

- [21] Й. Й. Білінський, та В. П. Стахов, «Пасивний радіочастотний моноімітансний передавач», МПК H04L 25/04, № u201704897, 11.12.2017.
- [22] М. А. Філінюк, Л. Б. Ліщинська, О. В. Войцеховська, та В. П. Стахов, «Monoimmittance logic R-elements», на *П'ятій міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія»*, Івано-Франківськ, 2015, с. 6-7.
- [23] В. П. Стахов, и Р. Ю. Чехмestрук, «Моноиммитансные логические RLC-элементы», на *22-ой Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика 2015»*, Москва, 2015, с. 380, ISBN 978-5-7256-0782-6.
- [24] Н. А. Филинчук, Л. Б. Лищинская, Е. В. Войцеховская, и В. П. Стахов, «Радиочастотные моноиммитансные логические R-элементы», на *Первой международной научно-технической конференции «Проблемы электромагнитной совместимости перспективных беспроводных сетей связи ЭМС»*, Харьков, 2015, с. 147 – 150.
- [25] М. А. Філінюк, Л. Б. Ліщинська, О. В. Войцеховська, та В. П. Стахов, «Дослідження моноімітансного логічного R-елемента «АБО»», на *Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми інформатики та моделювання»*, Одеса, 2015, с. 104.
- [26] Н. А. Филинчук, Л. Б. Лищинская, О. В. Войцеховская, и В. П. Стахов, «Сравнительный анализ радиочастотных иммитансных логических элементов», на *XIX Всероссийской научно-технической конференции «Современные проблемы радиоэлектроники»*, Красноярск, 2016, с. 369 – 372.
- [27] М. А. Філінюк, Л. Б. Ліщинська, та В. П. Стахов, «Исследование помехоустойчивости моноиммитансного логического R-элемента «И», на *X Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми Телекомунікацій 2016»*, Київ, 2016, с. 122 – 124.
- [28] М. А. Філінюк, Л. Б. Ліщинська, та В. П. Стахов, «Моноиммитансный логический L-элемент «И», на *17-тій Міжнародній науково-практичній*

конференції «Сучасні інформаційні та електронні технології», Одеса, 2016, с. 191-192.

- [29] Н. А. Филинук, Л. Б. Лищинская, О. В. Войцеховская, и В. П. Стахов, «Сравнительный анализ пассивных иммитансных логических элементов», на *26-ой Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии»*, Севастополь, 2016.
- [30] М. А. Філінюк, Л. Б. Ліщинська, О. В. Войцеховська, та В. П. Стахов, «Анализ помехоустойчивости моноиммитансного логического С-элемента «И»», на *16-тій Міжнародній науково-технічній конференції «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах»*, Одеса, 2016, с. 86-87.
- [31] М.А. Філінюк та ін., «Моноімітансні перетворювачі напруги» на *Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні інформаційні та електронні технології»*, Одеса, 2015, с. 113-114.
- [32] Й. Й. Білінський, О. О. Лазарев, та В. П. Стахов «Пасивні радіочастотні моноімітансні давачі», на *Міжнародній науково-технічній конференції «СПРТП-2017»*, Вінниця, 2017, с. 129 – 131.
- [33] Й. Й. Білінський, та В. П. Стахов, «Пасивний радіочастотний моноімітансний давач з аналого-цифровим перетворювачем», на *4-ій Міжнародній науковій конференції «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах»*, Вінниця, 2017, с. 79 – 81.

ANNOTATION

Stakhov V. P. Method of monoimmittance logic gates synthesis and specialized devices based on them. – Qualification scientific work with the manuscript copyright.

The thesis for a candidate of technical sciences degree in speciality 05.13.05 «Computer systems and components». – Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, 2018.

The dissertation is devoted to the development of the method of monoimmittance logic gates synthesis, the study of their mathematical models and experimental models, and the construction of combinational circuits and transponder systems on their basis. As informative parameter in monoimmittance logic gates one type of immittance is used - active, inductive or capacitive. The use of immittance as an informative parameter makes possible to increase the noise immunity of logic gates due to the fact that the initial informative parameter of monoimmittance logic gates does not depend on electromagnetic interference, voltage and current jumps. This allows for the use of monoimmittance logic gates in industrial, on-board, special computer systems, which operate in conditions of high noise and which are not need a miniaturization. Also, monoimmittance logic provides high speed because it does not use transistors that provide a working frequency of the order of hundreds of gigahertz and switching times equal to tens of picoseconds, which far exceeds the values of the compound semiconductor logic gates. In addition, monoimmittance logic has no limits on the minimum power of the input signal, which allows to work with voltages that are much smaller than the threshold voltage of the semiconductor gates and increases the energy efficiency of the logic gates.

The modern achievements in the field of development of logic gates that use different physical phenomena as informative parameter are analyzed. Semiconductor, optical, hydraulic, pneumatic, biochemical, magnetic, radio frequency, multi-immittance and mono-immittance logic gates are considered, their characteristics and parameters are presented. Criterial evaluation of their efficiency is performed on the speed, signal delay, power consumption, switching power and overall dimensions. The results of the criterial evaluation and analysis show the high efficiency of monoimmittance logic, in particular,

with parameters of speed, noise immunity and energy consumption. It confirms the expediency of their further development.

To substantiate the development of sensors with mono-immittance logic circuits, existing radio frequency transponders are considered and their parameters are analyzed. As a result of their comparison with transponders based on mono-imitance devices, the benefits of mono-immittance transponders, which consist of lower power consumption, better performance, higher frequency range and potentially lower cost due to the lack of chips within the circuit, are identified.

The immittance method of logic gates synthesis was further developed by using simultaneously the immittance of only one kind of positive value and using as the physical basis transforming properties of the lines of the transmission line in the microwave range. Using the developed method, mathematical models and schemes of realization of passive mono-immittance logic gates on the basis of half-wave and quarter-wave lines of the transmission line that perform logical functions "NOT", "OR" and "AND" are proposed with the use of active resistance as informative parameter, and function "AND" using capacitive and inductive resistances.

Using computer simulation of the behavior of mathematical models of mono-immittance logic gates in the software package Mathcad 14 the influence of the destabilizing factors on the output informative parameter of the developed mono-immittance logic gates is investigated: the error of the wave resistance of the transmission line, the parasitic reactivity or Q factor in the input immittance, the change of frequency of the input signal of the generator or the error of length of the transmission line. Studies have confirmed the high stability of the monoimmittance gates when changing of destabilizing factors are in a given range.

The computer simulation was carried out in the software package AWR Microwave Office 9.00 and experimental models of mono-immittance logic gates "NOT", "OR" and "AND" were constructed, confirming their efficiency. With the help of constructed models, the parameters of real monoimitance logical elements are investigated. These studies confirm the correctness of the calculations and the advantages of monoimmittance logic gates over semiconductor gates, which consist in a reduced threshold of minimum

operating voltage, high speed and noise immunity in the conditions of electromagnetic interference.

The modulo-2 adder, half adder and adder are developed on the basis of monoimmittance logic gates that use active resistance as an informative parameter. Through using of the monoimmittance method, additional optimization was performed due to the reduction of length of the transmission line segments. On base of developed mathematical models of the modulo-2 adder, half adder and adder, transmission characteristics are calculated which correspond to their logical functions. Ranges of input resistance are proposed which allow to achieve compatibility of input and output resistance. The advantages of the developed combination schemes are passive power supply, absence of active elements in the circuit, high performance, high immunity to electromagnetic interference, reduced threshold of minimum operating voltage.

Radio frequency passive transmitters, compatible with mono-immittance devices, have been developed. On their basis, transponders with monoimmittance devices are proposed: mono-immittance logical gate "OR", monoimmittance logic gates "AND", array of mono-immittance logic gates "NOT", array of mono-immittance logical gates "NO" with different wave impedance, mono-immittance modulo-2 adder, monoimmittance encoder, monoimmittance priority encoder. The computer simulation of such transponders in the software package AWR Design Environment 9.00 was carried out, which confirmed their efficiency, and suggested possible variants of the practical use of such transponders. Based on developed transponders it is possible to construct sensors that will have the following advantages: power from the input microwave signal, the ability to work with low-power inputs signal, high-speed performance, and execution of logical operations without using of chips.

Scientific novelty of the obtained results. The following scientific results were obtained in the work:

1. The immittance method of logical gates synthesis has been further developed, in which unlike the known ones logical function is realized on a mono-immittance basis due to the transforming properties of the transmission lines in the microwave range, which allows perform the direct and indirect transformation of the immittance and provides a

potentially higher speed, frequency range work, noise immunity and low power consumption of logic gates.

2. The mathematical models of passive monoimpedance logic gates are proposed, which unlike the known ones use properties of the quarter-wave and half-wave segments of the transmission line and do not depend on the static parameters of the electric signal, which allowed to obtain transmission characteristics that correspond to the logical functions and allow to calculate the values of the logical levels at certain parameters of the wave resistance of the transmission line.

3. The mathematical models of combinational logic circuits constructed on the basis of passive mono-impedance logic R-gates "NOT", "OR" and "AND" are proposed, which unlike the known ones have the possibility of additional optimization and reduction of components due to the properties of the quarter-wave and half-wave segments of the transmission line.

The practical value of the results. The following practical results are obtained:

1. The logic R-gates "NO", "OR" and "AND", C-gate "AND", L-gate "AND" are developed, which differ from the ones that are built on the quarter-wave and half-wave segments of the transmission line, which allowed to increase the speed and noise immunity, reduce the threshold of minimum working voltage of the logic gates.

2. The method of calculating the influence of destabilizing factors on the informative parameter of the developed mono-impedance logic R-gates "NO", "OR" and "AND", C-gate "AND", L-gate "AND" on destabilizing factors is developed, which allows optimize it.

3. The mono-impedance modulo-2 adder, half-adder and adder based mono-impedance logic R-gates "NOT", "OR" and "AND", which unlike the known ones are based on quarter-wave and half-wave segments of the transmission line, consuming only energy of input signal and do not contain active elements, what allowed to increase the speed, noise immunity and reduce the threshold of the minimum operating voltage of such circuits.

4. A passive radio frequency transmitters based on the principles of inverse reflection or frequency multiplication has been developed, which unlike the known ones,

are compatible with mono-immittance logic circuits, what allow to develop passive radio frequency transponders using different mono-immittance logic circuits and to carry out computer simulations that prove their ability to work.

The practical results of the dissertation research (Method of calculation and optimization of the parameters of proposed passive immittance logic circuits and information devices based on them) was introduced at VTN Research and Production Enterprise, Vinnytsia.

Key words: method of representation of digital signals, immittance, mono-immittance logic, ultrahigh-frequency electronics, logic gates, combinational logic, transponders, passive computing systems.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	18
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ДОСЯГНЕНЬ У ГАЛУЗІ РОЗРОБКИ ЛОГІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ. РАДІОЧАСТОТНІ ТРАНСПОНДЕРИ.....	25
1.1 Класифікація та основні параметри логічних елементів і схем	25
1.2 Критеріальне оцінювання ефективності логічних елементів	36
1.2.1 Обґрунтування критеріїв ефективності	36
1.2.2 Порівняльне критеріальне оцінювання ефективності логічних елементів, що використовують різні фізичні принципи роботи.....	39
1.3 Аналіз та порівняння методів мультиімітансної та моноімітансної логік	43
1.4 Аналіз існуючих радіочастотних транспондерів і аналіз їх параметрів.....	46
1.5 Висновки та формулювання задач досліджень	50
РОЗДІЛ 2 УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ СИНТЕЗУ ІМІТАНСНИХ ЛОГІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТА РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ МОНОІМІТАНСНИХ ЛОГІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ.....	53
2.1 Метод синтезу моноімітансних логічних елементів.....	53
2.1.1 Вибір інформативного параметра моноімітансних логічних елементів.....	54
2.1.22 Вибір фізичної основи для реалізації моноімітансних логічних елементів.....	56
2.1.3 Розробка математичних моделей моноімітансних логічних елементів.....	62
2.2 Дослідження математичних моделей моноімітансних логічних елементів	64
2.2.1 Моноімітансний логічний елемент «НЕ»	65
2.2.2 Моноімітансний логічний елемент «І».....	68
2.2.3 Моноімітансний логічний елемент «АБО»	83
2.3 Висновки до розділу 2	86

РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ КОМБІНОВАНИХ ЛОГІЧНИХ СХЕМ НА ОСНОВІ МОНОІМІТАНСНИХ ЛОГІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ	91
3.1 Розробка та дослідження моноімітансного суматора за модулем 2.....	91
3.2 Розробка та дослідження моноімітансного півсуматора.....	105
3.3 Розробка та дослідження моноімітансного суматора.....	110
3.3 Висновки до розділу 3.....	118
РОЗДІЛ 4 АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ЗАСТОСУВАННЯ ПРИСТРОЇВ НА ОСНОВІ МОНОІМІТАНСНИХ ЛОГІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ	120
4.1 Основи конструювання моноімітансних логічних схем	120
4.2 Апаратна реалізація моноімітансних логічних елементів «НЕ», «АБО» та «І» на мікрополоскових лініях	130
4.3 Розробка пасивних радіочастотних транспондерів, сумісних з моноімітансною логікою, та моделювання їх роботи.....	139
4.5 Висновки до розділу 4.....	162
ЗАКЛЮЧЕННЯ	164
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	167
ДОДАТКИ.....	179

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Основними компонентами обчислювальних систем є логічні елементи, які реалізують найпростіші логічні функції і є базисом для побудови більш складних логічних схем. На сьогодні широке застосування отримали логічні елементи, побудовані на напівпровідникових структурах. Однак постійний розвиток інформаційного суспільства потребує безупинного покращення параметрів вже існуючих електронних компонентів, особливо в напрямку підвищення швидкодії елементів і та їх енергоефективності. Незважаючи на великий обсяг досліджень, завдяки яким параметри напівпровідникових елементів постійно покращуються, технологія наближається до своєї теоретичної межі. Для збільшення швидкодії та зменшення енергоспоживання напівпровідникових елементів необхідно зменшувати їх розміри. На сьогодні вже опановано 14-нм технологічний процес, однак подальший розвиток напівпровідникових логічних елементів стикається зі значними труднощами. Причинами сповільнення стали надзвичайно складні технологічні умови виготовлення та обмеження через закони квантової фізики [1]. Тому актуальним є питання про пошук альтернативного базису логічних елементів, завдяки якому було б можливо досягнути нового рівня покращення параметрів обчислювальної техніки. Крім того, сьогодні існують обмеження для деяких галузей застосування, які унеможливають використання класичних логічних елементів, що потребує використання спеціалізованих логічних елементів, які б були стійкі до завад та шкідливих факторів.

Це обумовлює актуальність пошуку нових фізичних явищ, на основі яких було б можливим побудувати принципово нові логічні елементи. На сьогодні існує вже достатня кількість логічних елементів, які використовують як інформативні параметри світло [2], тиск рідини або пари [3], магнітні поля [4] та інші фізичні явища. Вибір виду інформативного параметра логічного елемента найчастіше зумовлюється їхньою фізичною природою або потребою у покращенні певного параметра. Наприклад, поліпшення завадостійкості або підвищення швидкодії

досягається за рахунок використання оптичних сигналів. Хоча такі логічні елементи програють за багатьма показниками напівпровідниковим логічним елементам, вони знаходять застосування в спеціалізованих системах, які, наприклад, вирішують завдання обробки інформації на частоті сигналу, без перетворення її на сигнали відеоімпульсної форми.

Такі завдання можуть бути вирішені з використанням радіочастотних моноімітансних логічних елементів [5]. Як інформативний параметр в моноімітансних логічних елементах використовується один із видів імітансу – активний, індуктивний або ємнісний. За умови використання імітансу стає можливим підвищити завадостійкість логічних елементів завдяки тому, що вихідний інформативний параметр моноімітансних логічних елементів не залежить від електромагнітних завад, стрибків напруги та струму. Це дозволяє використовувати моноімітансну логіку у промислових, бортових, спеціальних обчислювальних системах, які працюють в умовах високих завад та для яких важлива не мінітюаризація, а висока завадостійкість [6]. Також моноімітансна логіка забезпечує високу швидкодію, оскільки у її складі не використовуються транзистори і тому відсутні перехідні процеси, що забезпечує робочу частоту порядку сотні гігагерц та час перемикання, який дорівнює десяткам і навіть одиницям пікосекунд, що значно перевищує показники сучасної напівпровідникової логіки. Крім того, моноімітансна логіка практично не має обмежень за мінімальною потужністю вхідного сигналу, що дозволяє працювати з напругами, значно меншими за порогову напругу живлення напівпровідникових елементів, та підвищує енергетичну ефективність логічних елементів [7].

Моноімітансні логічні елементи є галуззю імітансних логічних елементів, які також відносять до радіочастотних логічних елементів. Такі елементи характеризуються тим, що обробляють інформацію на частоті сигналу без перетворення її на відеоімпульсний сигнал [8]. Радіочастотні логічні елементи досліджували вчені Довгий І. Д., Кулькін А. Г., Кичак В. М., Семенова О. О. та інші. Однак виділення імітансних логічних елементів як окремого логічного базису було

зроблено нещодавно. Значний вклад в розвиток таких логічних елементів зробили вчені Філінюк М. А., Ліщинська Л. Б., Лазарєв О. О.

Однак поки що цей напрямок знаходиться на початковій стадії розвитку і тому потребує подальших досліджень. До цих пір імітансні логічні елементи були активними і використовували транзистори у своєму складі [9]. Питання синтезу пасивних імітансних логічних елементів і логічних схем на їхній основі залишається відкритим. З огляду на це, тема цієї дисертаційної роботи, яку присвячено розвитку імітансного методу подання логічних рівнів, розробці моноімітансних елементів і логічних схем на його основі, є актуальною науково-практичною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана на кафедрі електроніки і наносистем Вінницького національного технічного університету у рамках держбюджетних тем: «Розробка теоретичних основ побудови та створення енергозберігаючих інформаційних пристроїв на базі багатопараметричних узагальнених перетворювачів імітансу» (№ держ. реєстрації 0111U001112), «Радіочастотні інформаційні елементи та пристрої з покращеною заводостійкістю та швидкодією» (№ держ. реєстрації 0117U000571).

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є покращення статичних і динамічних параметрів логічних елементів шляхом застосування інформативного параметра у вигляді імітансу та синтез компонентів обчислювальних систем на їх основі.

Для досягнення поставленої мети у роботі поставлені і вирішуються

завдання:

- Проаналізувати сучасні досягнення в галузі розробки логічних елементів, які використовують різні фізичні явища як інформативний параметр, та провести критеріальне оцінення їх ефективності для визначення доцільності подальших досліджень.

- Розробити математичні моделі та схеми реалізації моноімітансних логічних елементів, які входять до мінімального логічного базису і виконують логічні функції «НЕ», «АБО» і «І».

- Дослідити роботу розроблених моноімітансних логічних елементів за допомогою комп'ютерного моделювання.
- Розробити комбінаційні логічні схеми на основі моноімітансних логічних елементів.
- Розробити компоненти обчислювальних радіосистем на основі моноімітансної логіки.

Об'єктом дослідження є процес перетворення інформації у двійковому вигляді в моноімітансних логічних елементах та комбінаційних схемах.

Предметом дослідження є моноімітансні логічні елементи та схеми.

Методи дослідження базуються на використанні критеріальної оцінки для визначення ефективності логічних елементів різних видів, алгебри логіки для розробки основ побудови моноімітансних елементів, теорії поширення електричного НВЧ сигналу у мікрополоскових лініях для створення математичних моделей моноімітансних логічних елементів та комбінаційних схем, методів синтезу комбінаційних логічних схем для розробки моноімітансних комбінаційних схем, принципів обміну інформацією радіочастотних транспондерів у НВЧ діапазоні для створення транспондерів, сумісних з моноімітансними пристроями, теорії планування експерименту і комп'ютерного моделювання для перевірки отриманих результатів.

Наукова новизна отриманих результатів. У роботі отримано такі наукові результати:

1. Отримав подальшого розвитку імітансний метод синтезу логічних елементів, в якому, на відміну від відомого, логічна функція реалізовується на моноімітансному базисі за рахунок трансформувальних властивостей відрізків ліній передачі у НВЧ діапазоні, що дозволяє виконати пряме та зворотне перетворення імітансу та забезпечити потенційно вищу швидкодію, частотний діапазон роботи і завадостійкість при низькому енергоспоживанні логічних елементів.

2. Вперше запропоновано математичні моделі пасивних моноімітансних логічних елементів, які, на відміну від відомих, використовують властивості чвертьхвильових і півхвильових відрізків лінії передачі і не залежать від статичних

параметрів електричного сигналу, що дозволило отримати передавальні характеристики, які відповідають логічним функціям і дають змогу розрахувати значення логічних рівнів при певних параметрах хвильового опору відрізків лінії передачі.

3. Запропоновано математичні моделі комбінаційних логічних схем, побудованих на основі пасивних моноімітансних логічних R-елементів «НЕ», «АБО» та «І», які, на відміну від відомих, мають можливість додаткової оптимізації та скорочення компонентів за рахунок властивостей чвертьхвильових та півхвильових відрізків лінії передачі.

Практичне значення отриманих результатів. У роботі отримано такі практичні результати:

1. Розроблено логічні R-елементи «НЕ», «АБО» та «І», С-елемент «І», L-елемент «І», які відрізняються від існуючих тим, що побудовані на чвертьхвильових та півхвильових відрізках лінії передачі, що дозволило підвищити швидкодію та завадостійкість, зменшити поріг мінімальної робочої напруги логічних елементів.

2. Розроблено методику розрахунку впливу дестабілізувальних факторів на інформативний параметр розроблених моноімітансних логічних елементів R-елементів «НЕ», «АБО» та «І», С-елемента «І», L-елемента «І» від дестабілізувальних факторів, що дозволяє їх оптимізувати.

3. Розроблено моноімітансний суматор за модулем 2, півсуматор та суматор на основі моноімітансних логічних R-елементів «НЕ», «АБО» та «І», які, на відміну від відомих, побудовані на чвертьхвильових та півхвильових відрізках лінії передачі, споживають тільки енергію вхідного сигналу і не містять активних елементів, що дозволило підвищити швидкодію, завадостійкість та зменшити поріг мінімальної робочої напруги таких схем.

4. Розроблено пасивний радіочастотний передавач на принципах зворотного відбиття або помноження частоти, які, на відміну від існуючих, сумісні з моноімітансними логічними схемами, що дозволило на їх основі розробити пасивні радіочастотні транспондери з використанням різних моноімітансних логічних схем, та провести комп'ютерні моделювання, які доводять їх роботоздатність.

Практичні результати дисертаційного дослідження впроваджено у науково-виробничому підприємстві «ВТН» (м.Вінниця) у рамках науково-дослідної роботи 43-Д-387 «Радіочастотні інформаційні елементи та пристрої з покращеною завадостійкістю і швидкодією» для побудови обчислювальної техніки та радіотехнічних пристроїв з підвищеною завадостійкістю і швидкодією, а також у навчальний процес Вінницького національного технічного університету за спеціальністю 6.050903 – «Телекомунікації» в дисципліні «Пристрої на елементах з від’ємним опором».

Особистий внесок здобувача. Всі результати, що становлять основний зміст роботи, отримані автором самостійно. У публікаціях, написаних у співавторстві, автору належать: критеріальний аналіз ефективності моноімітансних логічних елементів [9], [10], синтез передавальних характеристик моноімітансних логічних елементів [11] – [18], дослідження залежності інформативного параметра моноімітансних логічних елементів від дестабілізувальних факторів [19] – [28], комп’ютерне моделювання роботи пристроїв імітансної логіки [29] – [32], розробка математичних моделей та передавальних характеристик комбінованих схем на основі моноімітансних логічних елементів [33] – [35], розробка пасивних радіочастотних передавачів, сумісних з моноімітансною логікою [36] – [38], розробка пасивних радіочастотних транспондерів з основі моноімітансних пристроїв [39] – [41].

Апробація матеріалів дисертації. Результати досліджень обговорено на: XIIIth International Conference «Modern problems of radio engineering, telecommunications, and computer science», (Lviv-Slavske, 2014 р.); IV Міжнародна науково-практична конференція «Фізико-технологічні проблеми передавання, обробки та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах», (Чернівці, 2014); Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи», (Київ, 2015); Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні інформаційні та електронні технології», (Одеса, 2015); V Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології та комп’ютерна інженерія», (Івано-Франківськ, 2015); 22-я Всероссийская межвузовская научно-техническая

конференция студентов и аспирантов, (Москва, 2015); Первая международная научно-техническая конференция «Проблемы электромагнитной совместимости перспективных беспроводных сетей связи ЭМС», (Харьков, 2015); Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми інформатики та моделювання», (Одеса, 2015); XIX Всероссийская научно-техническая конференция «Современные проблемы радиоэлектроники», (Красноярск, 2016); X Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми Телекомунікацій 2016», (Київ, 2016); 17-та Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні та електронні технології», (Одеса, 2016); 26-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», (Севастополь, 2016); 16-та Міжнародна науково-технічна конференція «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах», (Одеса, 2016); V-а Міжнародна науково-практична конференція «Фізико-технологічні проблеми передавання, оброблення та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах», (Чернівці, 2016); Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування», (Вінниця, 2017); 4-а Міжнародна наукова конференція «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах», (Вінниця, 2017).

Публікації. Результати досліджень опубліковано в 33 наукових працях, зокрема в 11 статтях у наукових журналах, з яких 2 статті проіндексовано у міжнародній базі Scopus, 12 тезах конференцій, 9 патентах України на корисну модель та 1 монографії.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 195 сторінок, з яких основний зміст викладено на 146 сторінках друкованого тексту. Дисертація містить 93 рисунка, 6 таблиць, список використаних джерел складається зі 121 найменування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Тарас Саламанюк, “У призерках Мура: про причини та наслідки сповільнення цифрового поступу”, Спільне, 2017. [Електронний ресурс]. Доступно: commons.com.ua/uk/u-prismerkah-mura. Дата звернення: Груд. 12, 2017.
- [2] Н. Arsenault, *Optical processing and computing*. Cambridge, USA: Academic Press, 2012.
- [3] А. В. Шейпак, А. А. Лепешкин, и А. А. Михайлин, *Гидравлика и гидроневмопривод*. Москва, Россия: МГИУ, 2007.
- [4] D. A. Allwood, G. Xiong, C. Faulkner, and R. Cowburn, “Magnetic domain wall logic”, *Science (New York)*, vol. 309, pp. 1668-1692, 2005.
- [5] Л. Б. Ліщинська, та М. А. Філінюк, “Імітансна логіка”, *Інформаційні технології та комп’ютерна інженерія*. № 2, с. 25–31, 2010.
- [6] В. С. Глухов, і М. В. Ногаль «Спеціалізований однорозрядний процесор для захисту інформації в гарантоздатних системах», *Радіоелектронні і комп’ютерні системи*. № 5, с. 104–108, 2008.
- [7] Л. Б. Ліщинська, “Оцінка основних параметрів імітансних логічних елементів”, *Інформаційні технології та комп’ютерна інженерія*. № 3, с. 45–52, 2011.
- [8] В. М. Кичак, та О. О. Семенова, *Радіочастотні та широтно-імпульсні елементи цифрової техніки*, Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008.
- [9] Н. А. Филинюк, Л. Б. Лищинская, Е. В. Войцеховская, и В. П. Стахов, “Сравнительный анализ радиочастотных иммитансных логических элементов”, на *XIX Всероссийской научно-технической конференции “Современные проблемы радиоэлектроники”*, Красноярск, 2016.
- [10] Н. А. Филинюк, Л. Б. Лищинская, О. В. Войцеховская, и В. П. Стахов, “Сравнительный анализ пассивных иммитансных логических элементов”, на *26-ой Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии»*, Севастополь, 2016.

- [11] М. А. Філінюк, Л. Б. Ліщинська, О. В. Войцеховська, та В. П. Стахов, “Моноиммитансные логические RLC-элементы”, *Вісник Хмельницького національного університету*, № 3 (225), с. 117-121, 2015.
- [12] В. П. Стахов, и Р. Ю. Чехмestрук, «Моноиммитансные логические RLC-элементы», на *22-ой Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика 2015»*, Москва, 2015, с. 380.
- [13] Н. А. Филинчук, Л. Б. Лищинская, Е. В. Войцеховская, и В. П. Стахов, “Радиочастотные моноиммитансные логические R-элементы”, на *Первой международной научно-технической конференции “Проблемы электромагнитной совместимости перспективных беспроводных сетей связи ЭМС”*, Харьков, 2015, с. 147-150.
- [14] М. А. Філінюк, Л. Б. Ліщинська, О. В. Войцеховська, та В. П. Стахов, “Моноімітансний логічний L-елемент I”, МПК H03K 19/20, № u201505868, 10.12.2015.
- [15] М. А. Філінюк, Л. Б. Ліщинська, О. В. Войцеховська, та В. П. Стахов, “Моноімітансний логічний C-елемент I”, МПК H03K 19/00, № u201505873, 25.11.2015.
- [16] М. А. Філінюк, Л. Б. Ліщинська, О. В. Войцеховська, та В. П. Стахов, “Моноімітансний логічний R-елемент АБО”, МПК H03K 19/20, № u201505869, 10.12.2015.
- [17] М. А. Філінюк, Л. Б. Ліщинська, О. В. Войцеховська, та В. П. Стахов, «Моноімітансний логічний R-елемент I», МПК H03K 19/00, № u201505870, 25.12.2015.
- [18] Н. А. Филинчук и др., *Имитансные логические элементы и устройства*. Винница, Украина: ВНТУ, 2016.
- [19] М. А. Філінюк, Л. Б. Ліщинська, О. В. Войцеховська, та В. П. Стахов, “Моноімітансний логічний R-елемент II”, *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, № 2, с. 71-76, 2015.

- [20] М. А. Філінюк, С. Є. Фурса, та В. П. Стахов, “Исследование моноиммитансного логического R-элемента ИЛИ”, *Вісник НТУ «ХПИ»*, № 33, с. 175-184, 2015.
- [21] М. А. Філінюк, Л. Б. Ліщинська, О. В. Войцеховська, та В. П. Стахов, “Моноиммитансный логический R-элемент И”, *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, № 1, с. 68-74, 2016.
- [22] M. A. Filynyuk, L. B. Lishchynska, E. V. Voytsekhovskaya, and V. P. Stakhov, “Evaluation of interference stability of monoimmittance logic L-element AND”, *Науковий вісник національного гірничого університету*, № 1, p. 100-107, ISSN 2071-2227.
- [23] М. А. Філінюк, Л. Б. Ліщинська, С. Є. Фурса, та В. П. Стахов, “Оценка помехоустойчивости моноиммитансного логического С-элемента И”, *Вісник Хмельницького національного університету*, № 6, с. 176-184, 2016.
- [24] М. А. Філінюк, Л. Б. Ліщинська, О. В. Войцеховська, та В. П. Стахов, “Monoimmittance logic R-elements”, на *П'ятій міжнародній науково-практичній конференції “Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія”*, Івано-Франківськ, 2015, с. 6-7.
- [25] М. А. Філінюк, Л. Б. Ліщинська, О. В. Войцеховська, та В. П. Стахов, “Дослідження моноімітансного логічного R-елемента АБО”, на *Міжнародній науково-технічній конференції “Проблеми інформатики та моделювання”*, Одеса, 2015, с. 104.
- [26] М. А. Філінюк, Л. Б. Ліщинська, та В. П. Стахов, “Исследование помехоустойчивости моноиммитансного логического R-элемента И”, на *X Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми Телекомунікацій 2016»*, Київ, 2016, с. 122-124.
- [27] М. А. Філінюк, Л. Б. Ліщинська, та В. П. Стахов, “Моноиммитансный логический L-элемент И”, на *17-тій Міжнародній науково-практичній конференції “Сучасні інформаційні та електронні технології”*, Одеса, 2016, с. 191-192.

- [28] М. А. Філінюк, Л. Б. Ліщинська, О. В. Войцеховська, та В. П. Стахов, “Анализ помехоустойчивости моноиммитансного логического С-элемента И”, на 16-тій Міжнародній науково-технічній конференції «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах», Одеса, 2016, с. 86-87.
- [29] М. А. Філінюк та ін., “Моноімітансні перетворювачі напруги” на Міжнародній науково-технічній конференції “Сучасні інформаційні та електронні технології”, Одеса, 2015, с. 113-114.
- [30] М. А. Філінюк, Р. Ю. Чехместрук, та В. П. Стахов, “Перетворювач активного імітанса в напругу”, МПК H02M 3/06, № u201505071, опубл. 10.12.2015.
- [31] М. А. Філінюк, Р. Ю. Чехместрук, та В. П. Стахов, “Перетворювач ємнісного імітанса в напругу”, МПК H02M 3/00, № u201505077, опубл. 25.11.2015.
- [32] М. А. Філінюк, Р. Ю. Чехместрук, та В. П. Стахов, “Перетворювач індуктивного імітанса в напругу”, МПК H02M 3/00, № u201505072, опубл. 25.11.2015.
- [33] M. A. Filynyuk, L. B. Lishchynska, A. A. Lazarev, and V. P. Stakhov, “Investigation of circuit features of the immittance modulo-2 adder realization”, *Proc. of SPIE*, Vol. 10445, 2017.
- [34] М. А. Філінюк, Л. Б. Ліщинська, О. О. Лазарєв, та В. П. Стахов, “Иммитансный полусумматор”, *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, № 2, с. 97-100, 2017.
- [35] М. А. Філінюк, Л. Б. Ліщинська, О. О. Лазарєв, та В. П. Стахов, “Иммитансный сумматор”, *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, № 3, с. 69-71, 2017.
- [36] Й. Й. Білінський, О. О. Лазарєв, та В. П. Стахов, “Пасивний радіочастотний моноімітансний передавач”, *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 3, с. 114-118, 2017.
- [37] Й. Й. Білінський, О. О. Лазарєв, та В. П. Стахов, “Пасивні радіочастотні моноімітансні давачі”, на *СПРТП-2017*, Вінниця, 2017, с. 129-131.
- [38] Й. Й. Білінський, та В. П. Стахов, «Пасивний радіочастотний моноімітансний передавач», МПК H04L 25/04, № u201704897, 11.12.2017.

- [39] Й. Й. Білінський, та В. П. Стахов, “Пасивні радіочастотні моноімітансні транспондери”, *Наукові праці ВНТУ*, № 3, с. 1-6, 2017.
- [40] Й. Й. Білінський, та В. П. Стахов, “Пасивний радіочастотний моноімітансний давач з аналого-цифровим перетворювачем”, на *4-ій Міжнародній науковій конференції «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах»*, Вінниця, 2017, с. 79-81.
- [41] Й. Й. Білінський, та В. П. Стахов, “Безпроводний моноімітансний логічний R-елемент “Виключне АБО”, МПК H03K 19/00, № u201704897, 25.10.2017.
- [42] Н. Г. Захаров, и Р. А. Сайфутдинов, *Вычислительная техника*. Ульяновск, Россия: УлГТУ, 2007.
- [43] П. Хоровиц, и В. Хилл, *Искусство схемотехники*. Москва, Россия: БИНОМ, 2004.
- [44] Н. П. Бабич, и И. А. Жуков, *Компьютерная схемотехника: методы построения и проектирования*. Москва, Россия: МК-Пресс, 2004.
- [45] О. М. Воробйова, и В. Д. Іванченко, *Основи схемотехніки*. Одеса, Україна: Фенікс, 2009.
- [46] И. М. Николаев, и Н. А. Филинюк, *Микроэлектронные устройства и основы их проектирования*. Москва, Россия: Энергия, 1979.
- [47] Г. Л. Лысенко, и Д. С. Костюченко, “Построение элементов оптоэлектронной памяти с использованием электроабсорбционных модуляторов света”, *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*, № 1 (23), с. 88–92, 2012.
- [48] Mohamed Nady, Khalid F. A. Hussein, and Abd-El-hadi A. Ammar, “Ultrafast all-optical full adder using quantum-dot semiconductor optical amplifier-based mach-zehnder interferometer”, *Progress In Electromagnetics Research B.*, vol. 54, pp. 69–88, 2013.
- [49] Пневматический и электропневматический триггеры. ПневмоЭлектроСервис [Електронний ресурс]. Доступно: <http://pes-rus.ru/catalog/pnevmaticheskiy-i-elektropnevmaticheskiy-triggery>. Дата звернення: Берез. 24, 2015.

- [50] А. И. Бирман, А. П. Бененсон, и Г. И. Зальцберг, “Пневматический сумматор”, Пат. 951325 СССР, опубл. 15.08.82.
- [51] Ю. А. Тупчий, “Імітансний суматор по модулю два”, на *XVI науково-технічній конференції підрозділів ВНТУ*, Вінниця, 2017. [Електронний доступ]. Доступно: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-frtzp/all-frtzp-2017/paper/view/3086>. Дата звернення: Жовт. 3, 2017.
- [52] Л. Б. Ліщинська, С. Є. Фурса, та М. А. Філінюк “Імітансний RS-тригер”, МПК Р03К 3/01, № u201110894, опубл. 10.04.2012.
- [53] А. Шестеркин, *Система моделирования и исследования радиоэлектронных устройств Multisim 10*, Москва, Россия: Litres, 2014.
- [54] С. Н. Лехин, *Схемотехника ЭВМ*, Санкт-Петербург, Россия: БХВ-Петербург, 2010.
- [55] Н. М. Соломатин, *Логические элементы ЭВМ*, Москва, Россия: Высшая школа, 1990.
- [56] Vibha Soni, and Nitin Naiyar, “Comparison of logic families using nand gate”, *IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology*, vol. 2, Issue 10, pp. 573-576, 2013. [Online] Available: http://www.academia.edu/5227774/COMPARISON_OF_LOGIC_FAMILIES_USING_NAND_GATE. Accessed on: May 18, 2015.
- [57] В. Д. Попов, “Проблемы и возможности применения коммерческих интегральных схем в военной и космической технике”, *Инженерная микроэлектроника*, № 5, с. 28-32, 1999.
- [58] R. P. Clayton, *Introduction to Electromagnetic Compatibility*, Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2006.
- [59] E. Abraham, C. T. Seaton, and S. D. Smith, “The optical computer”, *Scientific American*, vol. 248, pp. 85–93, 1983.
- [60] А. А. Акаев, и С. А. Майоров, *Оптические методы обработки информации*, Москва, Россия: Высшая школа, 1988.
- [61] В. Н. Гудинов, *Устройства гидроневмоавтоматики*, Омск, Россия: ОмГТУ, 2008.

- [62] В. А. Федорев, *Гидроприводы и гидронневмоавтоматика станков*, Москва, Россия: Рипол Классик, 1987.
- [63] М. Ю. Рачков, *Пневматические средства автоматизации*, Москва, Россия: МГИУ, 2007.
- [64] B. Wang, and M. Buck, “Rapid engineering of versatile molecular logic gates using heterologous genetic transcriptional modules”, *Chem. Commun.*, vol. 50, no. 79, pp. 11642–11644, 2014.
- [65] B. Wang, and M. Buck, “Customizing cell signaling using engineered genetic logic circuits”, *Trends in Microbiology*, vol. 20, no. 8, pp. 376–384, 2012.
- [66] M. A. Sakhbetdinov, and P. F. Kartsev “Schemes of effective magnetic and and xor logic elements”, *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, vol. 71, no. 8, pp. 1115–1117, 2007.
- [67] Dietl et al., “Zener model description of ferromagnetism in zinc-blende magnetic semiconductors”, *Science (New York)*, vol. 287, no. 5455, pp. 1019–1022, 2000.
- [68] В. М. Кичак, *Синтез частотно-імпульсних елементів цифрової техніки*, Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005.
- [69] А. А. Волков “Сравнительная оценка помехоустойчивости систем с однополосной и балансной модуляцией”, *Радиотехника*, № 1, 2, с. 27–34, 1995.
- [70] И. В. Кузьмін, та В. А. Кедрус, *Основы теории информации и кодирования*, Київ, Україна: Вища школа, 1977.
- [71] Ф. Д. Касимов, Ф. Г. Агаев, и Н. А. Филинюк, *Физико-технические особенности проектирования кремниевых микроэлектронных преобразователей на основе негатронов*, Баку, Азербайджан: ЭЛМ, 1999.
- [72] К. Г. Кнорре, В. М. Тузов, и Г. И. Шур, *Фазовые и частотные информационные СВЧ элементы*, Москва, Россия: Советское радио, 1975.
- [73] В. И. Борисов, *Помехозащищенность систем радиосвязи: основы теории и принципы реализации*, Москва, Россия: Наука, 2009.

- [74] Н. А. Филинюк, А. А. Лазарев, Л. Б. Лищинская, и В. П. Стахов, “Критериальная оценка эффективности токовых конвейеров”, *Восточно-Европейский Журнал Передовых Технологий*, т. 4, № 8 (64), с. 17-21, 2013.
- [75] Ле Гуан Ту, Р. А. Анфилов, и Н. А. Филинюк, “Аналитические требования к критериям эффективности информационных устройств”, *УНІВЕРСУМ-Вінниця*, т. 3, с. 56-62, 1997.
- [76] М. А. Філінюк, О. О. Лазарев, Л. Б. Ліщинська, та В. П. Стахов, “Критериальная оценка эффективности токовых конвейеров”, на 3 міжнародній науково-практичній конференції “Інформаційні технології та комп’ютерна інженерія”, Вінниця, ВНТУ, 2012, с. 264-265.
- [77] П. Т. Горчица, Н. А. Филинюк, А. А. Лазарев, и Е. В. Войцеховская, “Имитансные многозначные логические элементы на R-, L-, C-негатронах на ОПИ”, *Физика, электроника и электротехника*, 2014. [Электронный ресурс]. Доступно: <http://elitconf.sumdu.edu.ua:8080/index.php.orig/electronics/fee14/paper/view/1320>. Дата обращения: Окт. 3, 2016.
- [78] Robin Dare, *Transponder: a device for receiving a radio signal and automatically transmitting a different signal*, Rank Stranger Press, 2006.
- [79] В. Л. Дшхунян, и В. Ф. Шаньгин, *Электронная идентификация. Бесконтактные электронные идентификаторы и смарт-карты*, Москва, Россия: НТ Пресс, 2004.
- [80] Arnaud Vena, Etienne Perret, and Smail Tedjini, *Chipless RFID based on RF encoding particle: realization, coding and reading system*, New York, USA: Elsevier, 2016.
- [81] Nemaï Chandra Karmakar, Emran Md Amin, and Jhantu Kumar Saha, *Chipless RFID sensors*, Hoboken, USA: John Wiley & Sons, 2016.
- [82] Nemaï Chandra Karmakar, Mohammad Zomorodi, and Chamath Divarathne, *Advanced chipless RFID: MIMO-based imaging at 60 GHz - ML detection*, Hoboken, USA: John Wiley & Sons, 2016.
- [83] “Sps1m002. Smart Passive Sensor for Direct Moisture Sensing”, Semiconductor Components Industries, Rev. 6, 2017. [Online]. Available:

<http://www.mouser.com/ds/2/308/SPS1M002-D-1094698.pdf>. Accessed on: Dec. 5, 2017.

- [84] “Spsxt001. Smart Passive Sensor for Temperature Sensing”, Semiconductor Components Industries, Rev. P0, 2017. [Online]. Available: http://www.onsemi.ru.com/PowerSolutions/document/SPSXT_001-D_PDF. Accessed on: Dec. 5, 2017.
- [85] “SensTAG UHF RFID Passive Temperature Sensor Kit Product Description”, PHASE IV ENGINEERING, INC. [Online]. Available: http://www.phaseivengr.com/wp-content/uploads/2014/02/61-100042_-Data-Sheet-UHF-RFID-Surface-Temp-Kit.pdf. Accessed on: Dec. 5, 2017.
- [86] S. L. Farsens “Battery-less wireless sensors based on low power UHF RFID tags”, on *ESSCIRC 2010, Workshop ULTRAsponder project*, Seville, 2010. [Online]. Available: http://www.ultrasponder.org/resources/The-project/Dissemination/Publications/Numb10_Talk_Rebollo.pdf. Accessed on: Dec. 5, 2017.
- [87] Nadine Pesonen et al., *Smart RFID Tags*, Vienna, Austria: I-Tech, 2009. [Online]. Available: http://www.vtt.fi/files/research/mel/smart_rfid_tags.pdf. Accessed on: Dec. 6, 2017.
- [88] Л. Б. Ліщинська, “Розвиток теорії і методів побудови інформаційних пристроїв на основі однокристальних багатопараметричних узагальнених перетворювачів імітансу”, дис. д-ра техн. наук, ВНТУ, Вінниця, 2014.
- [89] М. С. Нейман, *Электронные радиоимпульсные вычислительные системы дискретного действия*, Москва, Россия: Оборонгиз, 1962.
- [90] J. Bhattacharya, *Rudiments of Computer Science*, New York, USA: Academic Publishers, 2010.
- [91] M. Rafiquzzaman, *Fundamentals of digital logic and microcomputer design*, Hoboken, USA: John Wiley & Sons, 2005.
- [92] Brian Holdsworth, and Clive Woods, *Digital logic design*, 4th ed, Oxford, Great Britain: Elsevier, 2002.
- [93] И. В. Лебедев, *Техника и приборы СВЧ*, Москва, Россия: Высшая школа, 1970.

- [94] С. И. Бахарев и др., *Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств*, Москва, Россия: Радио и связь, 1982.
- [95] *Проектирование полосковых устройств СВЧ*, Ульяновск, Россия: Ульяновский гос. тех. университет, 2001.
- [96] Л. Г. Малорадский, и Л. Р. Явич, *Проектирование и расчет СВЧ элементов на полосковых линиях*, Москва, Россия: Советское радио, 1972.
- [97] Г. Д. Малушков, *Антенны и устройства сверхвысоких частот. Часть 1. Линии передачи и устройства сверхвысоких частот*, Москва, Россия: МИРЭА, 1973.
- [98] Д. М. Сазонов, *Антенны и устройства СВЧ*, Москва, Россия: Высшая школа, 1988.
- [99] Філінюк М. А., Лазарев О. О., та Ліщинська Л. Б., “Пристрої узгодження відеоімпульсних та імітансних схем”, *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 4, с. 106-111, 2013.
- [100] Н. А. Филинюк, Л. Б. Лищинская, и Р. Ю. Чехместрук, “Анализ метрологического обеспечения, разработки и применения иммитансных логических элементов”, *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, № 3, с. 62–66, 2013.
- [101] Р. Ю. Чехместрук, “Методи та засоби вимірювання параметрів радіочастотних імітансних логічних елементів”, дис. канд. техн. наук, ВНТУ, Вінниця, 2016.
- [102] Є. В. Походило, та В. В. Хома, *Вимірювачі CLR з перетворення “імітанс-напруга”*, Львів, Україна: Видавництво Львівської політехніки, 2011.
- [103] “CMOS, the Ideal Logic Famile”, Fairchild Semiconductor, Application Note 77, 12 p. [Online]. Available: <https://www.fairchildsemi.com/application-notes/AN/AN-77.pdf>. Accessed on: May 21, 2017.
- [104] В. В. Ракитин, *Интегральные схемы на КМОП-транзисторах*, Москва, Россия, 2007.
- [105] R. Jacob Baker, *CMOS: Circuit Design, Layout, and Simulation. Third Edition*, Piscataway, USA: IEEE Press Series on Microelectronic Systems, 2010.

- [106] Neil H. E. Weste, and David Money Harris, *CMOS VLSI Design. A Circuits and Systems Perspective*, Boston, USA: Addison-Wesley, 2009.
- [107] О. М. Кобяков, А. С. Опанасюк, І. Є. Бражник, та О. А. Любивий, *Твердотільна електроніка. Мікросхемотехніка*, Суми, Україна: Сумський Державний Університет, 2015.
- [108] Клаус Финкенцеллер, *RFID-технологии*, Москва, Россия: Додэка-XXI, 2010.
- [109] Alanson P. Sample, Daniel J. Yeager, Pauline S. Powledge, Alexander V. Mamishev, and Joshua R. Smith, "Design of an RFID-Based Battery-Free Programmable Sensing Platform", *on Instrumentation and Measurement IEEE Transactions*, vol. 57, pp. 2608-2615, 2008.
- [110] Daniela De Venuto, Eduard Stikvoort, "Low power smart sensor for accurate temperature measurements", *on Advances in Sensors and Interfaces (IWASI) 2011 4th IEEE International Workshop*, pp. 71-76, 2011.
- [111] MD. Shamim Shahriar Hossain, and Nemaï Karmakar, "An Overview on RFID Frequency Regulations and Antennas", *on Electrical and Computer Engineering 2006. ICECE '06. International Conference*, pp. 424-427, 2006.
- [112] Sara Abou Chakra, Usamah O. Farrukh, and Beatriz Amante Garcia, "Electrical Model Simulation for a UHF RFID System", *on Computational Intelligence Communication Systems and Networks 2009. CICSYN '09. First International Conference*, pp. 155-159, 2009.
- [113] Sangkil Kim et al., "No Battery Required: Perpetual RFID-Enabled Wireless Sensors for Cognitive Intelligence Applications", *on Microwave Magazine IEEE*, vol. 14, pp. 66-77, 2013.
- [114] А. П. Кашкаров, *Фото- и термодатчики в электронных схемах*, Москва, Россия: Альтекс, 2004.
- [115] Г. О. Оборський, та П. Т. Слободяник, *Вимірювання неелектричних величин*, Київ, Україна: Наука и техника, 2005.
- [116] H. Hauser, G. Stangl, W. Fallmann, R. Chabicovsky, and K. Riedling, *Magnetoresistive Sensors*, Vienna, Austria: Institut für Industrielle Elektronik und Materialwissenschaften, 2000.

- [117] R. Waser, and M. Aono, “Nanoionics-based resistive switching memories”, *Nature Mater*, vol. 6, pp. 833–840, 2007.
- [118] L. O. Chua, “Memristor - the missing circuit element”, *IEEE Trans. Circuit Theory*, vol. 18, pp. 507–519, 1971.
- [119] S. S. Rekhviashvili, and A. A. Potapov, “Memristor and the integral quantum Hall effect”, *Journal of Communications Technology and Electronics*, vol. 57, № 2, pp. 189-191, 2012.
- [120] О. В. Головин, *Радиоприемные устройства*, Москва, Россия: Горячая Линия-Телеком, 2002.
- [121] И. Ч. Ризкин, *Умножители и делители частоты*, Москва, Россия: Связь, 1976.