

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра біомедичної інженерії та оптико-електронних систем

Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему:

РОЗРОБЛЕННЯ ІМІТАНСНОГО ЕЛЕКТРОННОГО КЛЮЧА

Виконав: студент 4 курсу,
групи ЕЛ-216,
спеціальності 171 Електроніка

 Повар Д. В.

Керівник: к. т. н., доцент каф. БМІОЕС

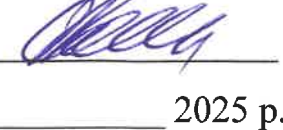
 Штофель Д. Х.
« 13 » 06 2025 р.

Рецензент: к. т. н., ст. викладач каф. ІРТС

 Пінаєв Б. О.
« 12 » 06 2025 р.

Допущено до захисту

Зав. кафедри БМІОЕС

Коваль Л. Г. 
« 16 » 06 2025 р.

Вінниця ВНТУ – 2025 рік

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра біомедичної інженерії та оптико-електронних систем
Бакалавр
Спеціальність 171 Електроніка

ЗАТВЕРДЖУЮ
завідувач кафедри БМІОЕС
к. т. н., доцент Коваль Л. Г.



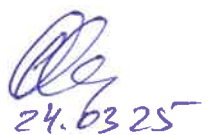
«20» 03 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на бакалаврську кваліфікаційну роботу
студенту Повару Даніїлу Вікторовичу, гр. ЕЛ-216

1. Тема БДР «Розроблення імітансного електронного ключа», керівник роботи доцент каф. БМІОЕС Штофель Дмитро Хуанович, к. т. н., доцент, затверджені наказом ВНТУ від 20 березня 2025 року № 97.
2. Строк подання студентом роботи – до 02.06.2025 р.
3. Вихідні дані для роботи: мініатюрний прилад на основі елементів з від'ємним опором, напруга живлення 3 В, споживана потужність – не більше 1 Вт, габаритні розміри – не більше 70 x 70 x 40 мм, маса – не більше 100 г, об'єм – не більше 300 см³, ймовірність відмови – не більше 10,0 × 10⁻⁶ год⁻¹.
4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити): 1. Аналітичний огляд питання; 2. Дослідницький розділ; 3. Конструювання плати; 4. Опрацювання питань охорони праці.
5. Зміст ілюстративної частини (з точним зазначенням обов'язкових креслеників): класифікація логічних елементів, схема структурна, схема електрична принципова, плата друкована, модель плати з елементами.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Штофель Д. Х., к. т. н., доцент кафедри БМІОЕС	 20.03.2025	 13.06.2025
Охорона праці	Дембіцька С. В., д. п. н., професор кафедри БЖДПБ	 24.03.25	 30.05.25

7. Дата видачі завдання 20 березня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів БДР	Строк виконання етапів БДР	Примітка
1	Формування та затвердження теми бакалаврської кваліфікаційної роботи (БКР)	До 20.03.2025	
2	Виконання спеціальної частини БДР. Перший рубіжний контроль виконання БКР	До 21.04.2025	
3	Виконання спеціальної частини БДР. Другий рубіжний контроль виконання БКР	До 19.05.2025	
4	Виконання розділу «Охорона праці»	До 30.05.2025	
5	Попередній захист БДР	02.06.2025	
6	Нормоконтроль БДР	09.06.2025	
7	Рецензування БДР	13.06.2025	
8	Захист БДР	19.06.2025	

Студент


(підпис)

Даніїл ПОВАР

Керівник роботи


(підпис)

Дмитро ШТОФЕЛЬ

АНОТАЦІЯ

Повар Д. В. БКР на тему «Розроблення імітансного електронного ключа». Вінниця : ВНТУ, 2025. 76 с.

Українською мовою. 28 рис., 13 табл., бібліогр. 37 найм.

В бакалаврській кваліфікаційній роботі проаналізовано принципи побудови і роботи імітансної логіки та пристроїв на її основі. Досліджено питання використання елементів з від'ємним опором для розроблення багатозначних електронних ключів. Розроблено структурну і принципову схему активного і пасивного електронного ключа. Запропоновано макет друкованої плати, створений на основі САПР. Опрацьовані питання охорони праці при виробництві електронних засобів.

ABSTRACT

Povar D. V. Bachelor thesis on the topic «Development of an immittance electronic key». Vinnytsia : VNTU, 2025. 76 p.

In Ukrainian. Figs. 28, Tables 13, Refs. 37.

The bachelor's thesis analyzed the principles of construction and operation of immittance logic and devices based on it. The issue of using elements with negative resistance for the development of multi-valued electronic keys was investigated. The structural and principle diagram of an active and passive electronic key was developed. A printed circuit board layout created on the basis of CAD was proposed. Labor protection issues in the production of electronic devices were studied.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 ОГЛЯД ІМІТАНСНИХ ЛОГІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТА ЕЛЕМЕНТІВ БАГАТОЗНАЧНОЇ ЛОГІКИ.....	7
1.1 Багатозначні логічні елементи.....	7
1.2 Класифікація логічних елементів	8
1.3 Імітансні логічні елементи	12
1.4 Перетворювачі імітансу.....	15
1.5 Багатозначні логічні елементи.....	20
2 РОЗРОБЛЕННЯ БАГАТОЗНАЧНИХ ІМІТАНСНИХ ЛОГІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ	23
2.1 Пасивний інвертор імпедансу	23
2.1.1 Моноімітансний логічний елемент «НІ»	23
2.1.2 Вплив зовнішніх чинників на характеристики логічного елемента	25
2.1.3 Пасивний інвертор на базі багатозначної імітансної R-логіки.....	29
2.2 Активний і пасивний електронні ключі.....	33
3 ДОСЛІДЖЕННЯ ІМІТАНСНИХ ЕЛЕКТРОННИХ КЛЮЧІВ.....	39
3.1 Моделювання RLC-елементів імітансних електронних ключів	39
3.2 Конструювання друкованої плати імітансного електронного ключа.....	45
4 ОХОРОНА ПРАЦІ	51
4.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи.....	52
4.1.1 Обладнання приміщення та робочого місця	52
4.1.2. Електробезпека приміщення	53
4.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії.....	54
4.2.1 Мікроклімат	54
4.2.2 Склад повітря робочої зони.....	55
4.2.3 Виробниче освітлення.....	57
4.2.4 Виробничий шум	58

4.2.5 Виробничі випромінювання	59
4.3 Пожежна безпека	60
4.3.1 Технічні рішення системи запобігання пожежі	61
4.3.2 Технічні рішення системи протипожежного захисту	61
ВИСНОВКИ	64
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	66
Додаток А (обов'язковий) Ілюстративна частина	70
Додаток Б (обов'язковий) Протокол перевірки на наявність текстових запозичень	76

ВСТУП

Актуальність теми. Стрімкий прогрес сучасного суспільства значною мірою обумовлений розвитком інформатики та обчислювальної техніки. Відомо, що при розробці систем автоматизації й обчислювальних пристроїв широко застосовується алгебра логіки. Одним із перспективних напрямів її розвитку є створення алгебраїчного апарату для неklasичних логік, зокрема багатозначної та нечіткої логіки. Це зумовлено потребою обробляти дані, які не завжди мають чітке бінарне представлення. Така потреба виникає в ряді інженерних задач: при створенні експертних систем, логічному керуванні роботизованими маніпуляторами, прийнятті складних рішень, аналізі та обробці зображень, а також у задачах оптимізації, синтезу й аналізу дискретних автоматів.

Багатозначна логіка знаходить застосування, зокрема, у дослідженнях багаторівневих схем та автоматів. Однак, попри активне впровадження таких автоматів у системах зв'язку, автоматизації та обчислювальній техніці, теоретичний апарат для їхнього аналізу та синтезу ще перебуває на етапі становлення. Це пояснюється як теоретичними, так і практичними труднощами, що виникають при спробі побудови багатозначного аналога булевої алгебри. Додаткові складнощі пов'язані з технічною реалізацією таких рішень — передусім через відсутність елементної бази, яка б за характеристиками відповідала компонентам двозначної логіки. Це обмеження зумовлено чинниками сучасного рівня технологій [1, 2].

Актуальність теми цієї бакалаврської кваліфікаційної роботи полягає в тому, що традиційні логічні схеми мають обмежені функціональні можливості через використання лише двозначної логіки. Саме тому актуальним є пошук нових підходів до подання логічної інформації та розширення функціональності таких схем.

Метою роботи є підвищення ефективності електронного ключа за рахунок використання багатозначних логічних елементів.

Для досягнення поставленої мети в рамках роботи необхідно вирішити такі завдання:

- виконати аналіз імітансних логічних елементів, а також елементів багатозначної логіки;
- розробити пасивний інвертор для багатозначної імітансної R-логіки;
- здійснити проєктування та дослідження пасивного імітансного електронного ключа;
- розробити активний варіант імітансного електронного ключа.

Об'єкт дослідження – електронні пристрої з негативним опором.

Предметом дослідження є імітансні логічні елементи та інформаційні пристрої на їх основі.

Практична цінність отриманих результатів полягає в тому, що запропоновані схемотехнічні рішення відкривають можливості для створення інформаційних пристроїв з підвищеною завадостійкістю, високою швидкодією та зниженим енергоспоживанням завдяки застосуванню пасивних імітансних логічних елементів.

1 ОГЛЯД ІМІТАНСНИХ ЛОГІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТА ЕЛЕМЕНТІВ БАГАТОЗНАЧНОЇ ЛОГІКИ

1.1 Багатозначні логічні елементи

На сьогодні розроблено велику кількість типів функціонально повних систем логічних елементів. У більшості з них принцип дії полягає в тому, що вхідний сигнал одного логічного рівня перетворюється на вихідний сигнал іншого рівня відповідно до реалізованої логічної функції. Основою цифрових систем, зокрема сучасних комп'ютерів, є двійкова система числення, яка оперує лише двома станами: 0 і 1.

Проте всі ці логічні схеми мають спільну особливість — вони створені на основі радіоелементів, параметри яких не є ідеальними й можуть суттєво відхилятися внаслідок технологічного розкиду. Це є істотним недоліком, оскільки такі елементи не тільки вносять власні шуми й завади, а й можуть посилювати завади, що надходять з інших частин схеми. У зв'язку з цим актуальним є використання логічних елементів, конструкція яких орієнтована на зменшення впливу нестабільності параметрів компонентів і підвищення якості обробки сигналів завдяки зниженню рівня шумів та зовнішніх завад. За однакових габаритів та функціонального призначення, логічні елементи, побудовані на основі імітансної логіки, можуть забезпечити кращу швидкодію, вищу завадостійкість і більш ефективне використання компонентної бази, що, в свою чергу, сприяє зниженню вартості виробу.

Паралельно з розвитком традиційних логічних схем створювались також радіочастотні логічні пристрої, в яких інформація передається не тільки через рівні напруги, а й за допомогою частоти, фази та амплітуди гармонічних сигналів. З теоретичної точки зору, такі схеми, особливо при реалізації багатозначної логіки, мають потенціал перевищити традиційні двійкові логічні схеми за швидкодією та ефективністю використання апаратних ресурсів. Тому розробка багатозначних логічних схем на основі альтернативних інформаційних параметрів

відкриває перспективні можливості для розвитку інформаційної техніки, зокрема спеціалізованого призначення [2].

1.2 Класифікація логічних елементів

Логічні елементи є базовими компонентами пристроїв для дискретної обробки інформації та цифрових автоматичних систем. Вони призначені для виконання елементарних логічних операцій та обробки даних у цифровій формі. Суть логічної операції полягає у перетворенні вхідних даних X у вихідні дані Y відповідно до визначених логічних правил [3, 4].

У сучасних комп'ютерних системах основою є двійкова система числення, оскільки вона легко реалізується у вигляді електронних схем завдяки наявності лише двох стійких станів: 0 і 1. Саме ці два значення використовуються як логічні рівні.

До основних логічних елементів відносяться: "І" (AND), "АБО" (OR) та "НІ" (NOT). Ці базові операції дозволяють реалізувати будь-яку складну логічну функцію, що описує поведінку цифрових пристроїв.

Наприклад, логічний елемент "І" (рис. 1.1 а) виконує операцію кон'юнкції — логічного множення кількох вхідних сигналів. Для двох змінних

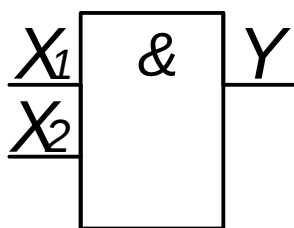
$$x_i: y = x_1 \wedge x_2 \text{ або } y = x_1 x_2$$

і для двох значень x_i значення результатів цієї логічної операції наведені в таблиці істинності (рис. 1.2 б).

Логічний елемент «АБО» (рис. 2.2 а) реалізує диз'юнкцію (логічне додавання) двох і більше логічних значень

$$x_i: y = x_1 \vee x_2 \text{ або } y = x_1 + x_2$$

і для двох значень x_i визначається таблицею істинності логічного елемента «АБО» (рис. 1.2 б).

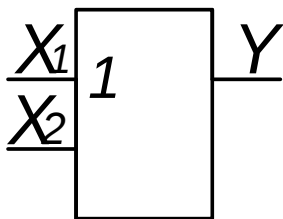


а)

X_1	X_2	Y
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

б)

Рисунок 1.1 – Позначення (а) та таблиця істинності логічного елемента «І»



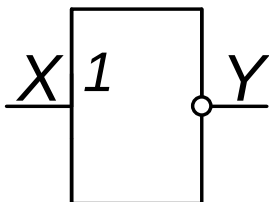
а)

X_1	X_2	Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

б)

Рисунок 1.2 – Позначення (а) та таблиця істинності логічного елемента «АБО»

Логічний елемент «НІ» (рис. 1.3 а) реалізує логічне заперечення (інверсію). Логічне заперечення функції x позначається $Y = \bar{X}$ та визначається таблицею істинності логічного елемента «НІ» (рис. 1.3 б).



а)

X	Y
0	1
1	0

б)

Рисунок 1.3 – Позначення (а) і таблиця істинності для логічного елемента «НІ»

На основі базових логічних елементів, таких як «І», «АБО» та «НІ», реалізуються більш складні пристрої для цифрової обробки інформації. Саме ці елементи є фундаментом для побудови логічних схем різного рівня складності.

На сьогодні розроблено велику кількість типів логічних елементів, які утворюють функціонально повні системи. Така різноманітність зумовлює потребу в їх класифікації за основними ознаками, що відображають принципи побудови та особливості функціонування.

Головною класифікаційною характеристикою логічного елемента є фізичний принцип дії, на якому базується процес обробки цифрової інформації. Схема класифікації логічних елементів представлена на рисунку 1.4.

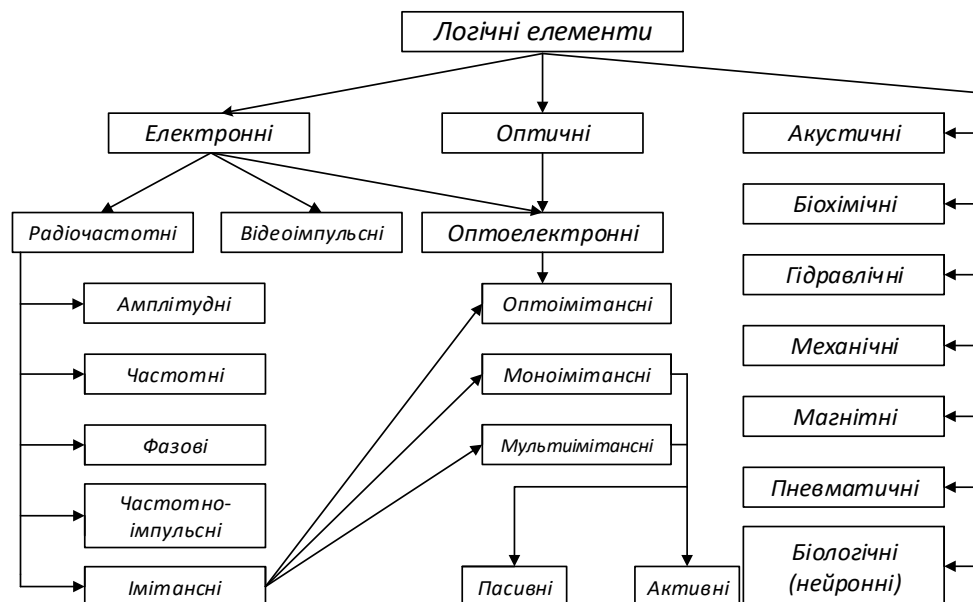


Рисунок 1.4 – Класифікація логічних елементів

Логічні елементи можна класифікувати за фізичним принципом дії на такі типи: електронні, електромеханічні, акустичні, оптичні, біохімічні, гідравлічні, механічні, магнітні та пневматичні. Проте найбільшого поширення набули саме електронні логічні елементи, у яких інформаційним параметром є електричний струм. У сучасних інформаційних системах широко застосовуються відеоімпульсні логічні елементи, де логічний стан визначається значенням постійної напруги або струму.

Паралельно з цими системами активно розробляються радіочастотні логічні елементи, які як інформаційні параметри використовують частоту, фазу та амплітуду змінного струму надвисоких частот (НВЧ). Такі елементи дають змогу усунути недоліки, пов'язані з дискретною передачею даних за допомогою імпульсно-потенціальних сигналів. У цьому контексті також знаходять застосування логічні елементи, що оперують радіочастотними та широтно-імпульсними сигналами.

Зазначені типи логічних елементів є електронними пристроями, що працюють у нелінійному режимі, що, своєю чергою, обмежує їх завадостійкість і швидкодію при обробці та передачі інформації. Цього недоліку позбавлені радіочастотні імітансні логічні елементи, які використовують як інформаційний параметр імітанс електричного кола, підключеного до входу логічного елемента. Завдяки цьому вони демонструють кращі характеристики щодо швидкодії та захищеності від завад.

Під імітансом W розуміють повний опір (імпеданс)

$$Z = ReZ + jImZ$$

та повну провідність (адмітанс)

$$Y = ReY + jImY.$$

В основі роботи імітансних логічних елементів лежить принцип «нечіткого імітансу», а їх базовою основою являються узагальнені перетворювачі імітансу (УПІ) [5], що працюють в малосигнальному режимі [6].

Також велику кількість логічних елементів можна характеризувати єдиною системою основних параметрів:

– коефіцієнт об'єднання по входу $K_{об}$, що вказує на число входів логічного елемента;

- коефіцієнт розгалуження по входу $K_{роз}$, що вказує на скільки входів логічних елементів може бути навантажений вихід даного логічного елемента;
- час затримки розповсюдження сигналу $t_{зат}$, що характеризує швидкодію елементів;
- завадостійкість, що характеризується здатністю логічного елемента не змінювати свій стан при дії шумів, які можуть виникати внаслідок різних дестабілізуючих факторів;
- потужність розсіювання логічного елемента;
- вихідний рівень, що відповідає логічному нулю і логічній одиниці;
- поріг перемикання схеми;
- діапазон робочих температур;
- час наростання і спаду фронту вихідного сигналу;

Також виділяють додаткові параметри для радіочастотних логічних елементів:

- центральна робоча частота f_0 ;
- полоса робочих частот Δf ;
- запас стійкості K_y [7].

1.3 Імітансні логічні елементи

Одним із новітніх технічних підходів у сфері обробки інформації, що передається за допомогою радіочастотних сигналів, є впровадження концепції «нечіткого імітансу» при проектуванні імітансних логічних елементів.

Ця концепція передбачає оперування якісними характеристиками імітансу електричного кола на певному етапі аналізу чи синтезу логічних схем — без обов'язкового проведення точних кількісних розрахунків. Зокрема, враховуються лише ознаки наявності або відсутності таких параметрів, як активний опір або провідність ($\pm R$ або $\pm G$), індуктивність ($\pm L$), та ємність ($\pm C$).

Імітанс будь-якого електричного кола є комплексною величиною, яка складається з дійсної та уявної частин, що змінюються залежно від частоти сигналу. Таким чином, використання нечітких імітансних характеристик відкриває нові можливості для побудови логічних елементів, орієнтованих на роботу з радіочастотними інформаційними сигналами без необхідності високоточної параметризації.

Дійсна частина являється диференціальним параметром: опором $R = \operatorname{Re} Z = \partial u / \partial i$, або провідністю $G = \operatorname{Re} Y = \partial i / \partial u$, які можуть бути як позитивними $R^{(+)}(G^{(+)}) > 0$, так і негативними $R^{(-)}(G^{(-)}) < 0$ [8].

Уявна частина також є диференціальним параметром і характеризується диференціальною ємністю $C = 1/p \operatorname{Im} Z = \operatorname{Im} Y / p$ або диференціальною індуктивністю $L = 1/p \operatorname{Im} Y = \operatorname{Im} Z / p$, які можуть бути як позитивними $C^{(+)}(L^{(+)}) > 0$, так і негативними $C^{(-)}(L^{(-)}) < 0$ [8].

Таким чином, у загальному випадку стан електричного кола на змінному струмі можна характеризувати такими диференціальними параметрами: $R^{(+)}$, $R^{(-)}$, $G^{(+)}$, $G^{(-)}$, $C^{(+)}$, $C^{(-)}$, $L^{(+)}$, $L^{(-)}$. Тому, виходячи з цього, логічний стан схеми можна характеризувати не значенням струму чи напруги, а характером імітансного параметра.

Відповідно до концепції «нечіткого імітансу», логічні стани «0» та «1» можуть бути представлені у вигляді шести варіантів імітансних відповідностей, наведених у таблиці 1.1. У такому підході кожному логічному рівню відповідає лише загальний характер (знак) параметра імітансу — без потреби в його точному числовому значенні. Такий спосіб подання логічної інформації істотно підвищує стійкість системи до завад, оскільки робота логічних елементів не залежить від точних значень компонентів, а лише від напрямку зміни параметра.

Під час вибору можливих варіантів імітансного подання логічних рівнів не розглядалися ті комбінації, у яких логічні «0» та «1» відповідають нульовим значенням імітансних параметрів, оскільки такі ситуації не мають фізичної реалізації. Це пов'язано з тим, що в реальних електричних колах не існує чисто

дійсного ($\text{Im}W = 0$) або чисто уявного ($\text{Re}W = 0$) імітансу. Тому наведені в таблиці 1.1 варіанти мають ідеалізований характер і можуть бути реалізовані лише з певними допущеннями або наближеннями.

Таблиця 1.1 – Варіанти імітансного представлення логічного «0» та «1»

Варіант 1		Варіант 2		Варіант 3	
Логічний рівень	Імітансний рівень	Логічний рівень	Імітансний рівень	Логічний рівень	Імітансний рівень
Позитивна логіка					
0	$R^{(-)}$	0	$G^{(-)}$	0	$C^{(+)}$
1	$R^{(+)}$	1	$G^{(+)}$	1	$L^{(+)}$
Негативна логіка					
0	$R^{(+)}$	0	$G^{(+)}$	0	$L^{(+)}$
1	$R^{(-)}$	1	$G^{(-)}$	1	$C^{(+)}$
Варіант 4		Варіант 5		Варіант 6	
Логічний рівень	Імітансний рівень	Логічний рівень	Імітансний рівень	Логічний рівень	Імітансний рівень
Позитивна логіка					
0	$L^{(-)}$	0	$C^{(-)}$	0	$C^{(-)}$
1	$L^{(+)}$	1	$C^{(+)}$	1	$L^{(-)}$
Негативна логіка					
0	$L^{(+)}$	0	$C^{(+)}$	0	$L^{(-)}$
1	$L^{(-)}$	1	$C^{(-)}$	1	$C^{(-)}$

Логічні елементи, у яких логічні стани відрізняються характером або знаком імітансу, називаються мультиімітансними логічними елементами.

У практичних застосуваннях доцільно використовувати логічні елементи, що базуються на одному типі імітансного параметра, наприклад: тільки активному опорі (R-елемент), лише ємнісному імітансі (C-елемент), або виключно індуктивному імітансі (L-елемент).

Такі елементи називаються моноімітансними логічними елементами. Їх логічні рівні характеризуються певним діапазоном значень відповідного параметра, що наведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Варіанти імітансного представлення логічних «0» та «1»

Варіант 1		Варіант 2		Варіант 3	
Логічний рівень	Імітансний рівень	Логічний рівень	Імітансний рівень	Логічний рівень	Імітансний рівень
Позитивна логіка					
0	$R^{(0)} < R_0$	0	$X_L^{(0)} < X_{L0}$	0	$X_C^{(0)} < X_{C0}$
1	$R^{(1)} > R_0$	1	$X_L^{(1)} > X_{L0}$	1	$X_C^{(1)} > X_{C0}$
Негативна логіка					
0	$R^{(0)} > R_0$	0	$X_L^{(0)} > X_{L0}$	0	$X_C^{(0)} > X_{C0}$
1	$R^{(1)} < R_0$	1	$X_L^{(1)} < X_{L0}$	1	$X_C^{(1)} < X_{C0}$

Значення R_0 , X_{L0} та X_{C0} відповідають умовній межі між імітансними рівнями, що відповідають логічним «0» та «1».

Таким чином, імітансні логічні елементи являють собою перетворювачі імітансу, параметри яких визначають основні технічні характеристики імітансних логічних елементів [2].

1.4 Перетворювачі імітансу

Перетворювачем імітансу називається чотириполіусник, імітанс між однією парою клем чотириполіусника $W_{\text{Вх}}(W_{\text{Вих}})$ являється функцією імітансу $W_{\text{Н}}(W_{\text{Г}})$, що підключений до другої пари клем даного чотириполіусника (рис. 1.5).

В загальному випадку ця залежність описується виразами:

$$W_{\text{Вх}} = W_{11} - W_{12}W_{21}/(W_{22}+W_{\text{Н}}); \quad (1.1)$$

$$W_{\text{Вих}} = W_{22} - W_{12}W_{21}/(W_{11}+W_{\text{Г}}); \quad (1.2)$$

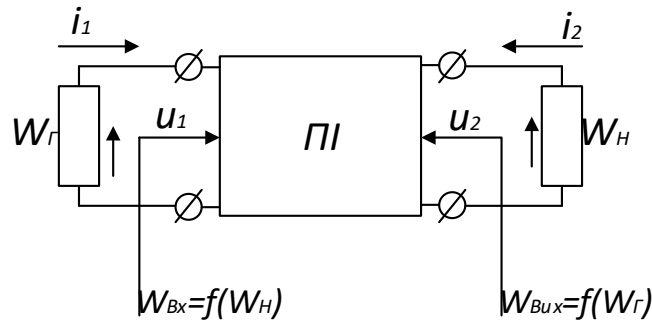


Рисунок 1.5 – Структурна схема перетворювача імпедансу

З виразів (1.1) та (1.2) можна зробити висновок, що чотириполіусник буде мати властивості перетворювача імпедансу, якщо:

$$W_{12} \neq 0 \text{ і } W_{21} \neq 0. \quad (1.3)$$

Конвертором імпедансу називається чотириполіусник, імпеданс між однією парою виводів якого прямо пропорційно залежить від імпедансу, що підключений до другої пари виводів чотириполіусника. Перетворення повного опору $Z_{BX} = (A/D)Z_H$, де A і D – перетворювачі (комплексні), що зв'язують струми та напруги на виводах перетворювача імпедансу.

Коефіцієнт конверсії прямого перетворювача:

$$A/D = T_K. \quad (1.4)$$

Коефіцієнт зворотного перетворення імпедансу:

$$T'_K = 1/T_K. \quad (1.5)$$

Якщо T_K – дійсна величина, тоді перетворювачі імпедансу називають «дійсними».

Інвертором імітансу називається чотириполіусник, імітанс між однією парою виводів якого обернено пропорційно залежить від імітансу, що підключений до другої пари виводів чотириполіусника.

У випадку перетворення опору навантаження Z_H (пряме перетворення) маємо $Z_{BX} = (B/C)Z_H$.

Коефіцієнт інверсії прямого перетворення:

$$B/C = T_I. \quad (1.6)$$

Значення коефіцієнта інверсії T_I не тотожне повному опису інвертора імітансу, матриця якого має два параметра, а саме B та C .

У діапазоні низьких частот в якості основних параметрів ПІ використовують математичні моделі ПІ, що складаються з коефіцієнта перетворення імітансу T та чутливості даного коефіцієнта до зміни параметрів a_i ПІ – $S_{a_i}^T$. Коефіцієнт перетворення імітансу приймається дійсним, або уявним значенням. На практиці ПІ необхідно забезпечувати певні експлуатаційні вимоги по стійкості, рівня шуму та коефіцієнта передачі. Тому, необхідно використовувати систему робочих параметрів, які повинні бути достатніми для визначення основних експлуатаційних параметрів ПІ. У реальних ПІ, що призначені для роботи у діапазонах ультрависоких частот та надвисоких частот, коефіцієнти перетворення імітансу являються комплексними величинами.

Узагальнені перетворювачі імітансу мають таку систему робочих параметрів:

- прямий коефіцієнт перетворення – T ;
- зворотній коефіцієнт перетворення – T' ;
- похибка перетворення – γ_T ;
- інваріантний коефіцієнт стійкості – $K_{c.vh}$;
- гранична частота – f_T ;

- чутливість коефіцієнта перетворення (якість УП) – $S_{a_i}^T$;
- максимально досяжне значення від'ємної дійсної складової перетворюваного імпедансу – $ReW_{max}^{(-)}$;
- оптимальна частота перетворення – f_{opt} ;
- мінімально досяжне значення коефіцієнта шуму – $F_{ш.min}$.

Перевагою даної системи параметрів являється те, що кожний параметр може бути вимірним або розрахованим, виходячи з реальних початкових умов.

При схемотехнічній реалізації можлива комбінація чотирьох полюсників (паралельно-паралельна, послідовно-послідовна, паралельно-послідовна та послідовно-паралельна) (рис. 1.6).

Перетворювачі імпедансу реалізують на активних підсилювальних пристроях (біполярні та польові транзистори операційні підсилювачі та ін.) з позитивним зворотнім зв'язком [9].

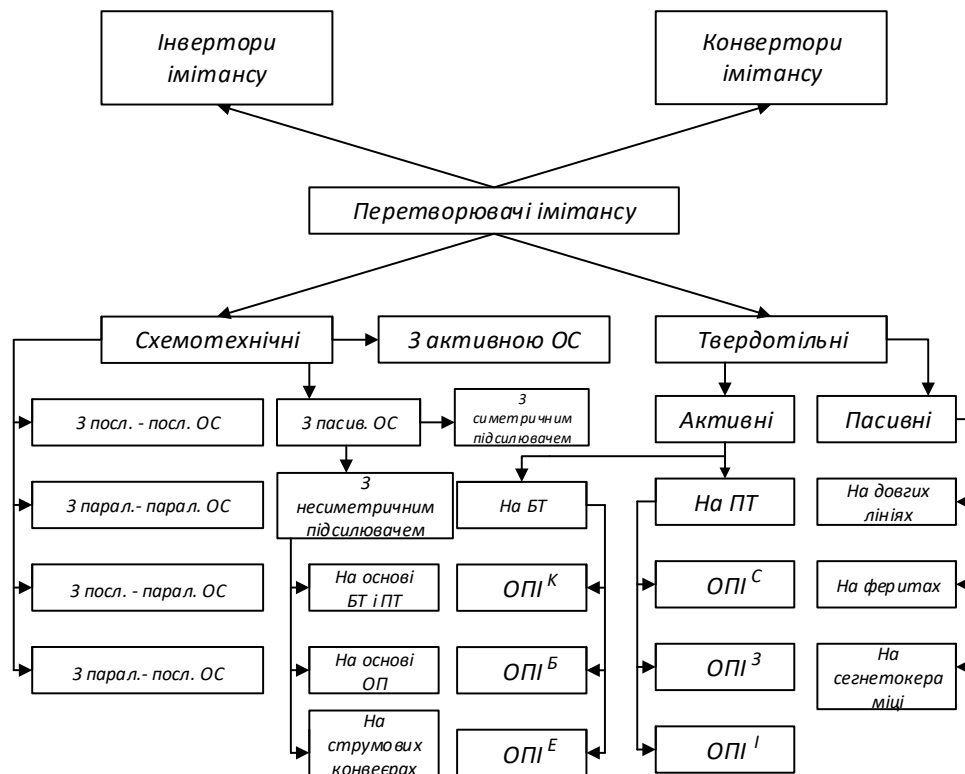


Рисунок 1.6 – Класифікація перетворювачів імпедансу за видом реалізації

Із виразів (1.1–1.2) можна зробити висновок, що будь-який чотириполіусник, для якого виконуються умови (1.3), є перетворювачем імітансу. З цього випливає, що пасивні перетворювачі імітансу, реалізовані на основі довгих ліній, феритах і акустокераміки [10].

Відомо, що вхідний опір $Z_{\text{вх}}$ відрізка довгої лінії без втрат залежить від комплексного опору навантаження $Z_{\text{н}}$:

$$Z_{\text{вх}} = Z_0 \frac{Z_{\text{н}} + jZ_0 \operatorname{tg}(2\pi l/\lambda)}{Z_0 + jZ_{\text{н}} \operatorname{tg}(2\pi l/\lambda)}. \quad (1.7)$$

де Z_0 – характеристичний (хвильовий) опір лінії; l – геометрична довжина лінії; λ – робоча довжина лінії.

Задаючись значенням l , можна регулювати перетворювальні властивості довгої лінії. Наприклад, при $l = \lambda/4$ маємо:

$$Z_{\text{вх}}(l = \lambda/4) = Z_0 \frac{Z_{\text{н}} + jZ_0 \operatorname{tg}(\pi/2)}{Z_0 + jZ_{\text{н}} \operatorname{tg}(\pi/2)} = \frac{Z_0^2}{Z_{\text{н}}}. \quad (1.8)$$

З виразу (1.8) слідує, що відрізок довгої лінії передачі має властивості пасивного інвертора імпедансу.

При підключенні до виходу довгої лінії ємності $C_{\text{н}}$ значення еквівалентної вхідної ємності $C_{\text{вх}}$ буде визначатися виразом:

$$C_{\text{вх}} = \operatorname{Im} \frac{Z_0 \omega C_{\text{н}} + \operatorname{tg}(2\pi l/\lambda)}{\omega Z_0 [1 - Z_0 \omega C_{\text{л}} \operatorname{tg}(2\pi l/\lambda)]},$$

а знак еквівалентної вхідної ємності $C_{\text{вх}}$ залежить від довжини лінії.

При виконанні однієї з умов:

$$Z_0 \omega C_L \operatorname{tg} \beta l > 1 \cap \frac{\operatorname{tg} \beta l}{Z_0 \omega C_L} > -1; \quad \frac{\operatorname{tg} \beta l}{Z_0 \omega C_L} < -1 \cap Z_0 \omega C_L \operatorname{tg} \beta l < 1,$$

значення еквівалентної вхідної ємності було від'ємним.

Таким чином, довга лінія не лише дозволяє перетворювати додатну ємність у від'ємну, а й сприяє збільшенню абсолютного значення цієї від'ємної ємності, причому величина ефекту залежить від довжини самої лінії.

Використання пасивних елементів для реалізації перетворювачів імітансу має низку переваг: спрощення схемотехнічної реалізації; зниження рівня шумів і енергоспоживання завдяки відсутності активних компонентів; можливість ефективної роботи на високих частотах.

Однак, у діапазонах низьких і високих частот (НЧ, ВЧ), а також у нижній частині НВЧ-діапазону, такі рішення виявляються малоефективними через значні геометричні розміри елементів. Крім того, параметри подібних перетворювачів суттєво залежать від дисипативних втрат у довгих лініях, які зростають із підвищенням частоти, що, у свою чергу, призводить до збільшення рівня шумів.

1.5 Багатозначні логічні елементи

Багатозначні логічні елементи — це клас логічних елементів, у яких вихідні сигнали можуть набувати більше ніж двох дискретних значень. При цьому кожне з таких значень однозначно визначається станом одного вихідного сигналу схеми.

Дослідження багатозначних логічних елементів пов'язане з низкою задач, подібних до тих, що виникають при вивченні дискретних технічних схем. Розгляд таких елементів може здійснюватися з різних позицій: особливостей зберігання й обробки інформації, принципів побудови, методів реалізації.

Зміна кількості можливих логічних станів у таких елементах зумовлює суттєві якісні зміни в їх структурі, логіці функціонування, підходах до технічної реалізації, а також у виборі фізичних явищ, що лежать в основі їх роботи. У зв'язку з цим багатозначні логічні елементи мають свої характерні особливості, які

становлять не лише теоретичний інтерес, а й мають важливе прикладне значення для розвитку сучасної інформаційної техніки.

Характеристики багатозначних логічних елементів, розглянуті з точки зору способу кодування стійких станів (незалежно від фізичної природи використаних явищ), подано у вигляді класифікаційної схеми на рисунку 1.7. У загальному випадку виділяють два типи схем: ті, що лише допускають наявність стійких станів, та ті, що дійсно здатні зберігати інформацію.

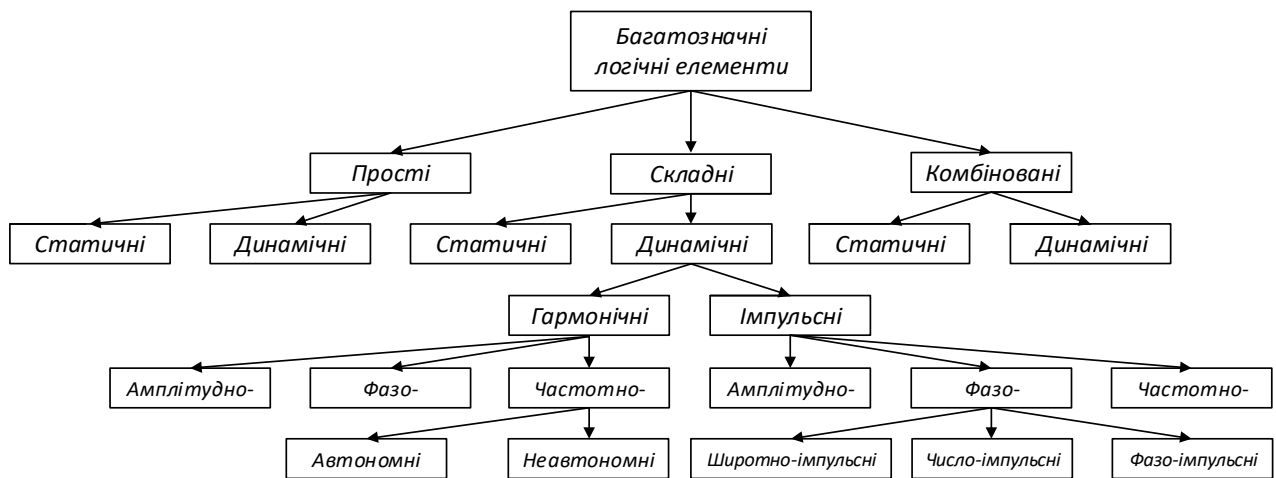


Рисунок 1.7 – Класифікація багатозначних логічних елементів

Багатозначні логічні елементи, які мають здатність утримувати інформаційний стан протягом деякого часу, у науково-технічній літературі часто називають багатостійкими схемами, або схемами з множинними стійкими станами.

Натомість у багатозначних логічних елементах, які не мають властивості зберігання інформації (незалежно від того, чи здійснюється затримка сигналу), стійкість режиму роботи досягається за рахунок відповідного вибору параметрів інформаційного сигналу — шляхом квантування його значень. Загальний принцип побудови таких схем ґрунтується на застосуванні прохідного чотириполіусника, у якому вхідний сигнал може набувати певної кількості дискретних значень, а вихідний сигнал змінюється монотонно у відповідь на зміну вхідного.

Один із найбільш широко використаних принципів побудови багатозначних логічних елементів оснований на використанні чотириполюсника з нелінійною амплітудною характеристикою $U'_{\text{Вих}} = \varphi(U'_{\text{Вх}})$, з зворотнім зв'язком β , $U''_{\text{Вих}} = \beta(U''_{\text{Вх}})$. При цьому повинні виконуватись відношення: $U'_{\text{Вх}} = U''_{\text{Вих}} = U_1$ та $U'_{\text{Вих}} = U_{\text{Вх}} = U_2$.

Базова ідея створення чотириполюсника з нелінійною амплітудною характеристикою основана на тому, щоб забезпечити можливість перетворення нелінійної залежності між певними величинами $x_1, x_2, \dots, x_n$, які мають різну фізичну природу, у необхідну амплітудну характеристику. В загальному випадку така можливість реалізується в результаті виконання ряду почергових перетворень $U_{\text{Вих}} = \varphi_1(x_1), \quad x_2 = \varphi_2(x_1), \dots, \quad x_n = \varphi_n(U_{\text{Вх}})$. При цьому, результативна характеристика чотириполюсника приймає вигляд:

$$U_{\text{Вих}} = \varphi_1[\varphi_2(U_{\text{Вх}})]. \quad (1.9)$$

Залежно від схемотехнічного підходу до реалізації елементів, які забезпечують необхідну нелінійність принаймні одного з перетворень (1.1), багатозначні логічні елементи, побудовані на основі нелінійного чотириполюсника, поділяються на прості, складні та комбіновані.

Застосування багатозначних логічних елементів у практиці дозволяє спростити архітектуру пристроїв, зменшити витрати на апаратне забезпечення, енергоспоживання, габарити та вартість, а також сприяє підвищенню надійності й покращенню інших техніко-експлуатаційних характеристик пристроїв [11].

2 РОЗРОБЛЕННЯ БАГАТОЗНАЧНИХ ІМІТАНСНИХ ЛОГІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

2.1 Пасивний інвертор імпедансу

2.1.1 Моноімітансний логічний елемент «НІ»

Структурна реалізація логічної функції «НІ» з використанням імітансного інформаційного базису розглянемо на прикладі позитивної імітансної логіки, коли логічній одиниці відповідає від'ємний дійсний імпеданс « $1 \rightarrow R^{(-)}$ », а логічному нулю позитивний дійсний імпеданс « $0 \rightarrow R^{(+)}$ ». Структурна схема логічного елемента «НІ» зображена на рисунку 2.1. Таблиця істинності імітансного логічного R-елемента «НІ» наведена у таблиці 3.1.

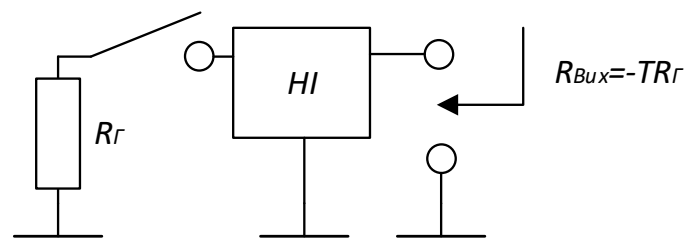


Рисунок 2.1 – Структурна схема логічного R-елемента «НІ»

Таблиця 2.1 – Таблиця істинності імітансного логічного R-елемента «НІ»

R_{Γ}	X	$R_{\text{вих}}$	Y
$R_{\Gamma}^{(+)} > 0$	1	$-TR_{\Gamma} < 0$	0
$R_{\Gamma}^{(-)} < 0$	0	$TR_{\Gamma} > 0$	1

Структурна схема логічного елемента типу «НІ» являє собою багатополосну систему, у якій вихідне значення дійсного імпедансу $R_{\text{вих}}$ визначається залежно від вхідного імітансу R_{Γ} . Кількісна взаємозалежність між цими величинами описується коефіцієнтом перетворення імітансу T_i , який у

загальному випадку є комплексною величиною. Правильний вибір цього коефіцієнта дозволяє реалізувати потрібну логічну функцію.

Оснoву побудови такого логічного елемента становлять узагальнені перетворювачі імітансу (УПІ). Завдяки використанню комплексної природи коефіцієнтів T_K і T_I можна за допомогою відповідної комбінації УПІ реалізувати різноманітні логічні операції.

Зокрема, для реалізації логічного елемента типу «НІ» достатньо застосувати перетворювач імітансу з коефіцієнтом перетворення $T_K < 0$. Побудова більш складних логічних елементів вимагає відповідних структурних ускладнень і розробки спеціальної методики синтезу таких структур [2].

Для практичної реалізації логічної функції, зображеної на рисунку 2.1, можна скористатися властивостями чвертьхвильового відрізка лінії передачі, що використовується як чвертьхвильовий трансформатор (рис. 2.2).

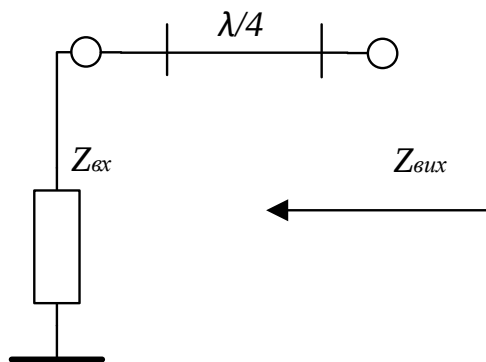


Рисунок 2.2 – Чвертьхвильовий трансформатор, який реалізований на моноімітансному логічному R-елементі «НІ»

Вихідний опір $Z_{\text{вих}}$ такого відрізка лінії передачі залежить від вхідного опору $Z_{\text{вх}}$:

$$Z_{\text{вих}} = \frac{Z_0^2}{Z_{\text{вх}}}, \quad (2.1)$$

де Z_0 – хвильовий опір лінії передачі.

Якщо, $Z_{\text{вх}} = R_{\text{вх}}$, тоді

$$Z_{\text{вих}} = R_{\text{вих}} = Z_0^2 / R_{\text{вх}}.$$

Враховуючи, що Z_0 має дійсне фіксоване значення, характеристика передачі такого елемента має вигляд, що зображений на рисунку 2.3.

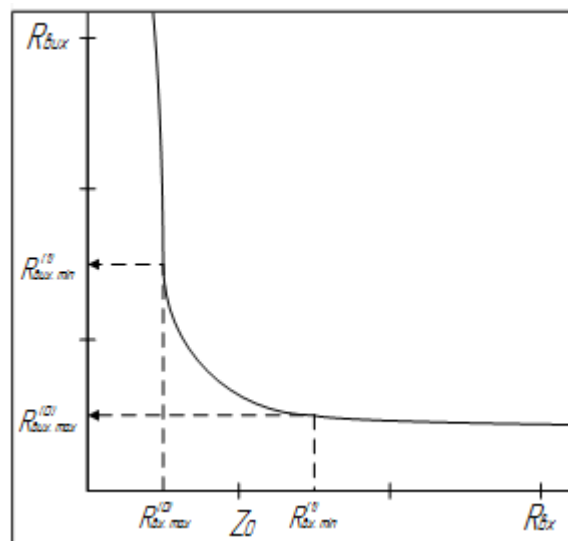


Рисунок 2.3 – Характеристика передачі моноімпедансного логічного R-елемента «НІ»

Із графіку видно, що при $R_{\text{вх}} > Z_0$, $R_{\text{вих}} < Z_0$ і навпаки, що відповідає сформульованим вище умовам побудови моноімпедансного логічного R-елемента «НІ» [12].

2.1.2 Вплив зовнішніх чинників на характеристики логічного елемента

Параметри реального моноімпедансного логічного R-елемента «НІ» будуть відрізнятися від параметрів, що розглядалися раніше «ідеального» елемента через вплив на цього дестабілізуючих факторів. Для забезпечення завадостійкості у реальному елементі границя між логічним «0» та «1» не визначається Z_0 , а діапазоном $R_{\text{вх}}$ та $R_{\text{вих}}$:

$$R_{\text{вх.}max}^{(0)} < R_{\text{вх}} < R_{\text{вх.}min}^{(1)}; \quad (2.2)$$

$$R_{\text{вих.}max}^{(0)} < R_{\text{вих}} < R_{\text{вих.}min}^{(1)}. \quad (2.3)$$

У цьому випадку діапазон можливих значень активного імпедансу, що відповідає логічному «0» та «1» рівний:

для вхідного імпедансу:

$$0 < R_{\text{вх}}^{(0)} \leq R_{\text{вх.}max}^{(0)}; \quad (2.4)$$

$$R_{\text{вх.}min}^{(1)} < R_{\text{вх}}^{(1)} < \infty. \quad (2.5)$$

Для вихідного імпедансу:

$$0 < R_{\text{вих}}^{(0)} \leq R_{\text{вих.}max}^{(0)}; \quad (2.6)$$

$$R_{\text{вих.}min}^{(1)} < R_{\text{вих}}^{(1)} < \infty. \quad (2.7)$$

В реальному моноітансному логічному елементі вихідний імітанс $Z_{\text{вих}}$ пов'язаний із вхідним імітансом $Z_{\text{вх}}$ співвідношенням:

$$\bar{Z}_{\text{вих}} = \frac{\bar{Z}_{\text{вх}} + j \cdot \text{tg} \beta}{1 + j \cdot \bar{Z}_{\text{вх}} \cdot \text{tg} \beta} = \text{Re} \bar{Z}_{\text{вих}} + j \cdot \text{Im} \bar{Z}_{\text{вих}}, \quad (2.8)$$

де

$$\text{Re} \bar{Z}_{\text{вих}} = \bar{R}_{\text{вих}} = \frac{\bar{R}_{\text{вх}} \cdot (1 - \bar{X}_{\text{вх}} \cdot \text{tg} \beta) + \bar{R}_{\text{вх}} \cdot \text{tg} \beta \cdot (\bar{X}_{\text{вх}} + \text{tg} \beta)}{(1 - \bar{X}_{\text{вх}} \cdot \text{tg} \beta)^2 + (\bar{R}_{\text{вх}} \cdot \text{tg} \beta)^2}, \quad (2.9)$$

$$Im\bar{Z}_{вих} = \bar{X}_{вих} = \frac{(1-\bar{X}_{вх} \cdot tg\beta) \cdot (\bar{X}_{вх} + tg\beta) - \bar{R}_{вх}^2 \cdot tg\beta}{(1-\bar{X}_{вх} \cdot tg\beta)^2 + (\bar{R}_{вх} \cdot tg\beta)^2}, \quad (2.10)$$

де $\beta = 2\pi l/\lambda$ – фазова стала, а

$$\bar{R}_{вих} = \frac{R_{вих}}{Z_0}; \bar{X}_{вих} = \frac{X_{вих}}{Z_0}; \bar{R}_{вх} = \frac{Re Z_{вх}}{Z_0}; \bar{X}_{вх} = \frac{Im Z_{вх}}{Z_0}.$$

Вираз (2.8) представляє характеристику передачі реального моноімітансного логічного R-елемента «НІ». Виходячи з аналізу цієї характеристики видно, що основними дестабілізуючими чинниками, що впливають на виконання нерівностей (2.4–2.7), є такі:

- зміна хвильового опору Z_0 відрізка лінії передачі;
- зміна фазової сталої β ;
- поява у вхідному імітансі паразитної реактивної складової $X_{вх}$.

Проведено оцінку впливу нестабільності хвильового опору лінії передачі на чутливість вихідного активного опору логічного елемента за умови, що всі інші дестабілізуючі чинники відсутні. В такому випадку характеристика передачі логічного елемента описується рівнянням (2.1), з якого знаходимо:

$$S_{Z_0}^{R_{вих}} = \frac{\delta R_{вих}}{\delta Z_0} / \frac{R_{вих}}{Z_0} = 2. \quad (2.11)$$

З цього виразу видно, що чутливість вихідного активного опору не залежить від зміни хвильового опору лінії передачі постійна і рівна 2.

Під час оцінювання чутливості вихідного активного опору $R_{вих}$ логічного елемента від впливу паразитного реактивного опору $X_{вх}$ будемо вважати, що Z_0 , f відповідають ідеальному логічному елементу. В такому випадку, на основі виразу (2.9), знаходимо:

$$S_{X_{\text{ВХ}}}^{R_{\text{ВХ}}} = \frac{\delta R_{\text{ВХ}}}{\delta X_{\text{ВХ}}} / \frac{R_{\text{ВХ}}}{X_{\text{ВХ}}} = - \frac{2\bar{X}_{\text{ВХ}}^2 - 2\bar{X}_{\text{ВХ}} \text{ctg} \beta}{\bar{R}_{\text{ВХ}}^2 + \bar{X}_{\text{ВХ}}^2 - 2\bar{X}_{\text{ВХ}} \text{ctg} \beta + \text{ctg}^2 \beta}. \quad (2.12)$$

Виходячи з (2.12) отримані розрахунки залежності чутливості $S_{Z_0}^{R_{\text{ВХ}}}$ при різних значеннях $\bar{R}_{\text{ВХ}}$. Розрахунки показують, що чим менші наведені значення $\bar{X}_{\text{ВХ}}$ і $\bar{R}_{\text{ВХ}}$, тим менше $S_{X_{\text{ВХ}}}^{R_{\text{ВХ}}}$. Це дозволяє зробити висновок про можливість зменшення цієї нестабільності шляхом використання лінії передачі з великим хвильовим опором Z_0 . Інший шлях пониження похибки полягає в обмеженні на добротність $Q = \bar{X}_{\text{ВХ}}/\bar{R}_{\text{ВХ}}$ імпедансу, що визначає логічний рівень $R_{\text{ВХ}}$. При $Q_R < 1$ маємо $S_{X_{\text{ВХ}}}^{R_{\text{ВХ}}} < -1$.

Фазова стала β залежить від опорної частоти сигналу f_0 . Враховуючи, що $l = \lambda_0/4 = c/4f_0$, і використовуючи (2.9), знаходимо:

$$S_f^{R_{\text{ВХ}}} = \frac{\pi f \lambda_0 \bar{R}_{\text{ВХ}}^2 \text{tg}\left(\frac{\pi f \lambda_0}{2c}\right) + \pi f \lambda_0 \bar{X}_{\text{ВХ}}^2 \text{tg}\left(\frac{\pi f \lambda_0}{2c}\right) + \pi f \lambda_0 \bar{X}_{\text{ВХ}}^2 \text{tg}\left(\frac{\pi f \lambda_0}{2c}\right)^2 -}{c \bar{R}_{\text{ВХ}} \text{tg}\left(\frac{\pi f \lambda_0}{2c}\right)^2 + c \bar{X}_{\text{ВХ}}^2 \text{tg}\left(\frac{\pi f \lambda_0}{2c}\right)^2 -} \cdot \frac{-\pi f \lambda_0 \bar{X}_{\text{ВХ}} - \pi f \lambda_0 \text{tg}\left(\frac{\pi f \lambda_0}{2c}\right)}{-2c \bar{X}_{\text{ВХ}} \text{tg}\left(\frac{\pi f \lambda_0}{2c}\right) + c}, \quad (2.13)$$

де f – частота опорного сигналу в діапазоні її нестабільності; c – швидкість електромагнітної хвилі у вакуумі [13].

Таким чином, аналіз впливу паразитних факторів на передаточну характеристику логічного R-елемента «НІ» показав, що Z_0 не впливає на значення $S_f^{R_{\text{ВХ}}}$. Найбільший вплив здійснюють зміни f і $\bar{X}_{\text{ВХ}}$. Для їх зменшення рекомендується використовувати відрізок лінії передачі з максимально можливим значенням Z_0 , а значення $\bar{R}_{\text{ВХ}}$ обирати в діапазоні $0,5 < \bar{R}_{\text{ВХ}} < 1,5$.

2.1.3 Пасивний інвертор на базі багатозначної імітансної R-логіки

Пасивний інвертор багатозначної імітансної R-логіки належить до сфери цифрової електроніки та призначений для реалізації логічної операції інверсії в багатозначних логічних пристроях.

В якості прототипу було використано відомий імітансний логічний елемент типу «НІ», зображений на рисунку 2.4 (патент № 71687) [14].

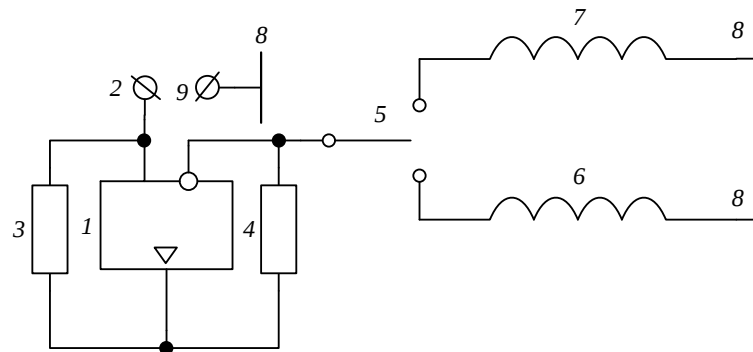


Рисунок 2.4 – Електрична схема імітансного логічного елемента «НІ»

Недоліком цього пристрою є те, що схема має низьку енергетичну ефективність у зв'язку з використанням додаткового джерела живлення та чутливість до іонізуючих випромінювань через використання напівпровідникового елемента.

Також відомий моноімітансний логічний R-елемент «НІ» (рис. 2.5) (патент України № 99776) [15].

Недоліком логічного елемента «НІ», зображеного на рис. 2.5, є обмежені функціональні можливості внаслідок використання лише двозначної логіки.

На рисунку 2.6 наведено електричну схему пасивного інвертора багатозначної імітансної R-логіки.

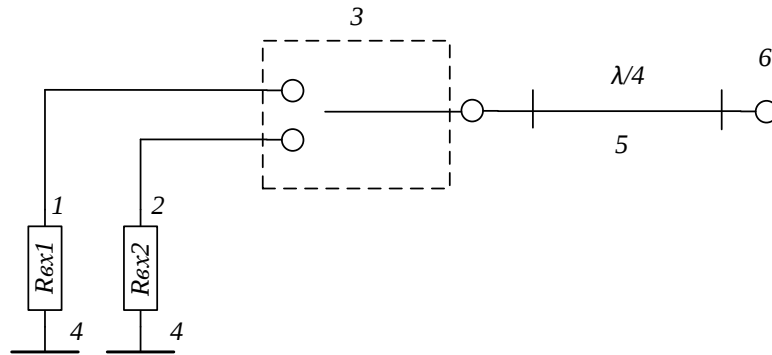


Рисунок 2.5 – Схема моноімітансного логічного R-елемента «НІ»

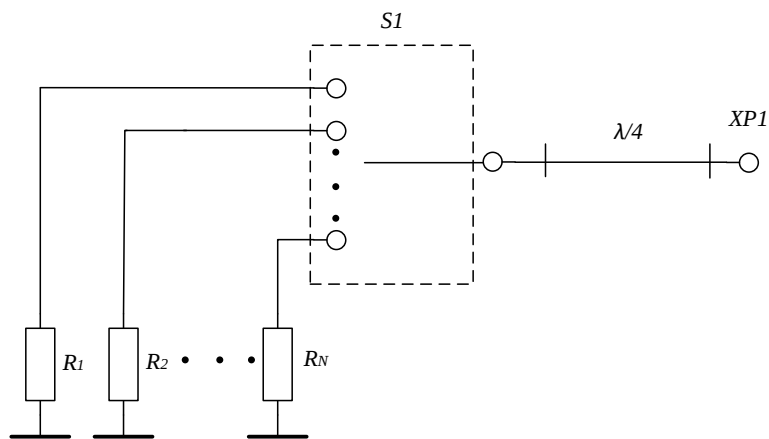


Рисунок 2.6 – Схема пасивного інвертора на основі багатозначної імітансної R-логіки

Відрізок лінії передачі можна розглядати, як перетворювач опору [16], вихідний опір $R_{\text{вих}}$ якого залежить від вхідного опору $R_{\text{вх}}$ і визначається виразом:

$$R_{\text{вих}} = Z_0 * \frac{R_{\text{вх}} + j * Z_0 * \text{tg} \beta}{Z_0 + j * R_{\text{вх}} * \text{tg} \beta},$$

де $Z_0 = 50 \text{ Ом}$ - хвильовий опір лінії передачі; $\text{tg} \beta = 2\pi l / \lambda$, l – довжина відрізка лінії передачі; λ – довжина хвилі, j – комплексне число.

Якщо довжина відрізка лінії передачі $l = \lambda/4$, тоді вихідний опір буде визначатись виразом [2, 17]:

$$R_{\text{вих}} = Z_0^2 / R_{\text{вх}}.$$

При використанні трьохзначної логіки $N=3$, можна створити три імітансних двополюсника ($R_{\text{вх1}}, R_{\text{вх2}}, R_{\text{вх3}}$), значення опорів яких визначені як $R_{\text{вх1}} = 25 \text{ Ом}$, $R_{\text{вх2}} = 50 \text{ Ом}$, $R_{\text{вх3}} = 100 \text{ Ом}$, що відповідає дискретним логічним «0», «1», «2»; тоді як хвильовий опір на ділянці лінії передачі складає $Z_0 = 50 \text{ Ом}$.

При підключенні першого імітансного двополюсника з імітансом $R_{\text{вх1}} = 25 \text{ Ом}$ (що відповідає логічному нулю на вході) до входу ділянки лінії передачі через ключ $S1$, то імітанс на роз'ємі $XP1$ складе $R_{\text{вих1}} = 100 \text{ Ом}$ (що відповідає логічній двійці на виході), якщо до входу ділянки лінії передачі підключається другий імітансний двополюсник з імітансом $R_{\text{вх2}} = 50 \text{ Ом}$ (що відповідає логічній одиниці на вході) через ключ $S1$, то імітанс на вихідному роз'ємі $XP1$ $R_{\text{вих2}} = 50 \text{ Ом}$ (що відповідає логічній одиниці на виході), а якщо до входу ділянки лінії передачі підключається третій імітансний двополюсник з імітансом $R_{\text{вх3}} = 100 \text{ Ом}$ (що відповідає логічній двійці на вході) через ключ $S1$, то імітанс на роз'ємі $XP1$ $R_{\text{вих3}} = 25 \text{ Ом}$ (що відповідає логічному нулю на виході).

Складемо таблицю істинності для пасивного інвертора з використанням трьохзначної імітансної R-логіки (таблиця 2.2).

Таблиця 2.2 – Таблиця істинності пасивного інвертора трьохзначної імітансної R-логіки

$R_{\text{вх}}$	Логічний рівень	$R_{\text{вих}}$	Логічний рівень
$R_{\text{вх1}} = 25 \text{ Ом}$	0	$R_{\text{вих1}} = 100 \text{ Ом}$	2
$R_{\text{вх2}} = 50 \text{ Ом}$	1	$R_{\text{вих2}} = 50 \text{ Ом}$	1
$R_{\text{вх3}} = 100 \text{ Ом}$	2	$R_{\text{вих3}} = 25 \text{ Ом}$	0

Як видно з таблиці, розглянуті логічні рівні відповідають значенням таблиці істинності пасивного інвертора на основі трьохзначної імітансної R-логіки.

Далі розглянемо п'ятизначну логіку з $N=5$. У цьому випадку існує п'ять імітансних двополюсників ($R_{\text{вх}1}$, $R_{\text{вх}2}$, $R_{\text{вх}3}$, $R_{\text{вх}4}$, $R_{\text{вх}5}$), значення опорів яких складають: $R_{\text{вх}1} = 10 \text{ Ом}$, $R_{\text{вх}2} = 25 \text{ Ом}$, $R_{\text{вх}3} = 50 \text{ Ом}$, $R_{\text{вх}4} = 100 \text{ Ом}$, $R_{\text{вх}5} = 250 \text{ Ом}$, що відповідно означають логічні рівні від «0» до «4»; а хвильовий опір ділянки лінії передачі складає $Z_0 = 50 \text{ Ом}$.

При підключенні першого імітансного двополюсника з імітансом $R_{\text{вх}1} = 10 \text{ Ом}$ (що відповідає логічному «0» на вході) до входу ділянки лінії передачі через ключ $S1$ імітанс на вихідному роз'ємі $XP1$ складе $R_{\text{вих}1} = 250 \text{ Ом}$ (що відповідає логічній «4» на виході).

При підключенні другого імітансного двополюсника з імітансом $R_{\text{вх}1} = 25 \text{ Ом}$ (що відповідає логічному «1») до входу ділянки лінії передачі через ключ $S1$ імітанс на вихідному роз'ємі $XP1$ складе $R_{\text{вих}1} = 100 \text{ Ом}$, що відповідає логічній «3» на виході).

При підключенні третього імітансного двополюсника з імітансом $R_{\text{вх}1} = 50 \text{ Ом}$ (що відповідає логічному «2») до входу ділянки лінії передачі через ключ $S1$ імітанс на вихідному роз'ємі $XP1$ складе $R_{\text{вих}1} = 50 \text{ Ом}$, що відповідає логічній «2» на виході).

При підключенні четвертого імітансного двополюсника з імітансом $R_{\text{вх}1} = 100 \text{ Ом}$ (що відповідає логічному «3») до входу ділянки лінії передачі через ключ $S1$ імітанс на вихідному роз'ємі $XP1$ складе $R_{\text{вих}1} = 25 \text{ Ом}$, що відповідає логічній «1» на виході).

При підключенні п'ятого імітансного двополюсника з імітансом $R_{\text{вх}1} = 250 \text{ Ом}$ (що відповідає логічному «4») до входу ділянки лінії передачі через ключ $S1$ імітанс на вихідному роз'ємі $XP1$ складе $R_{\text{вих}1} = 10 \text{ Ом}$, що відповідає логічному «0» на виході).

Складемо таблицю істинності для пасивного інвертора з використанням п'ятизначної імітансної R-логіки (таблиця 2.3).

Таблиця 2.3 – Таблиця істинності пасивного інвертора п’ятизначної імітансної R-логіки

$R_{\text{вх}}$	Логічний рівень	$R_{\text{вих}}$	Логічний рівень
$R_{\text{вх1}} = 10 \text{ Ом}$	0	$R_{\text{вих1}} = 250 \text{ Ом}$	4
$R_{\text{вх2}} = 25 \text{ Ом}$	1	$R_{\text{вих2}} = 100 \text{ Ом}$	3
$R_{\text{вх3}} = 50 \text{ Ом}$	2	$R_{\text{вих3}} = 50 \text{ Ом}$	2
$R_{\text{вх4}} = 100 \text{ Ом}$	3	$R_{\text{вих4}} = 25 \text{ Ом}$	1
$R_{\text{вх5}} = 250 \text{ Ом}$	4	$R_{\text{вих5}} = 10 \text{ Ом}$	0

З таблиці видно, що описані логічні рівні узгоджуються з таблицею істинності для пасивного інвертора на основі п’ятизначної імітансної R-логіки.

Подібний підхід застосовується і для реалізації інших логічних розрядів у складі пасивного інвертора імітансної логіки. Це забезпечує можливість функціонування пристрою в режимі пасивного інвертора багатозначної імітансної R-логіки [17].

За результатами проведених досліджень було отримано патенти на корисну модель, яка має назву «Пасивний інвертор багатозначної логіки».

2.2 Активний і пасивний електронні ключі

Сьогодні новітні технології автентифікації та ідентифікації набувають дедалі більшої популярності як серед приватних користувачів, так і в корпоративному середовищі. Електронний ключ є пристроєм, призначеним для захисту та зберігання конфіденційної інформації, що стосується як особистих, так і корпоративних даних.

Однак на тлі зростання кількості кіберінцидентів, пов'язаних з крадіжкою інформації, традиційні системи автентифікації та ідентифікації демонструють свої обмеження. Основними їхніми недоліками є обмежена кількість кодових комбінацій та незмінність імітансних характеристик ключа, що значно знижує рівень захисту.

Вирішити проблему несанкціонованого доступу можна за рахунок використання нової технології автентифікації та ідентифікації, що базується на принципах багатозначної імітансної логіки.

У цьому контексті пропонуються два типи пристроїв:

Активний імітансний електронний ключ (АІЕК);

Пасивний імітансний електронний ключ (ПІЕК).

Ці пристрої призначені для підтвердження права доступу і можуть бути інтегровані в будь-які електронні або електромеханічні системи, які потребують ідентифікації користувачів. АІЕК і ПІЕК забезпечують ідентифікацію, автентифікацію та персоналізацію і можуть застосовуватися в різноманітних пристроях і системах керування доступом.

Ключовою особливістю активного імітансного ключа є використання нечіткого імітансу як інформаційного базису для формування логічних рівнів. Вихідні імітансні стани кодуються через такі диференційовані параметри: додатній та від'ємний активний опір $R^{(+)}$, $R^{(-)}$, додатна та від'ємна ємність $C^{(+)}$, $C^{(-)}$, додатна та від'ємна індуктивність $L^{(+)}$, $L^{(-)}$.

Цим параметрам відповідають логічні рівні 0, 1, 2, 3, 4 та 5, що утворюють шестирівневу систему числення, як показано в таблиці 2.4 [18].

Такий підхід суттєво підвищує стійкість системи до підробок і зчитування, а також розширює можливості щодо кодування та захисту інформації.

Таблиця 2.4 – Імітансні логічні рівні активного імітансного електронного ключа

Логічний рівень	Імітанс	
0	$R^{(+)}$	$R > 0$
1	$R^{(-)}$	$R < 0$
2	$C^{(+)}$	$X < 0, dX/d\omega > 0$
3	$C^{(-)}$	$X > 0, dX/d\omega < 0$
4	$L^{(+)}$	$X > 0, dX/d\omega > 0$
5	$L^{(-)}$	$X < 0, dX/d\omega < 0$

Відмінністю розробленого пасивного імітансного електронного ключа від існуючих є використання інформаційного базису додатних імітансів для задання логічних рівнів. Характеризується такими диференціальними параметрами: $R^{(+)}$, $C^{(+)}$, $L^{(+)}$. І відповідні їм логічні рівні 0,1,2 що відповідають тризначній системі числення (табл. 2.5).

Таблиця 2.5 – Імітансні логічні рівні пасивного імітансного електронного ключа

Логічний рівень	Імітанс	
0	$R^{(+)}$	$R > 0$
1	$C^{(+)}$	$X < 0, dX/d\omega > 0$
2	$L^{(+)}$	$X > 0, dX/d\omega > 0$

Активний імітансний електронний ключ (рис. 2.7) складається з восьми сегментів (W1–W8), кожен з яких реалізує окремий імітансний стан. Основу кожного сегмента становить операційний підсилювач DA1, який виконує роль конвертора від’ємного опору. Значення коефіцієнта перетворення опору задається резисторами R1 та R2.

У ролі навантаження для конвертора від’ємного опору використовуються елементи: індуктивність L1, конденсатор C2 та резистор R3.

Перемикач SA2 призначений для вибору конкретного навантаження, підключеного до виходу підсилювача, а перемикач SA1 — для вибору типу імпедансу: у одному положенні формується від'ємне значення, у іншому — додатне.

Конденсатор C1 виконує функцію розділового, блокуючи проходження постійної складової сигналу на вихід.

Вихідний імпеданс знімається між клемою XP1 та загальною шиною. Отримані диференціальні параметри включають: додатний активний опір $R(+)$, від'ємний активний опір $R(-)$, додатна ємність $C(+)$, від'ємна ємність $C(-)$, додатна індуктивність $L(+)$, від'ємна індуктивність $L(-)$,

Цим параметрам відповідають логічні рівні 0, 1, 2, 3, 4 та 5 у шестизначній системі числення, що дозволяє суттєво збільшити кількість можливих кодових комбінацій.

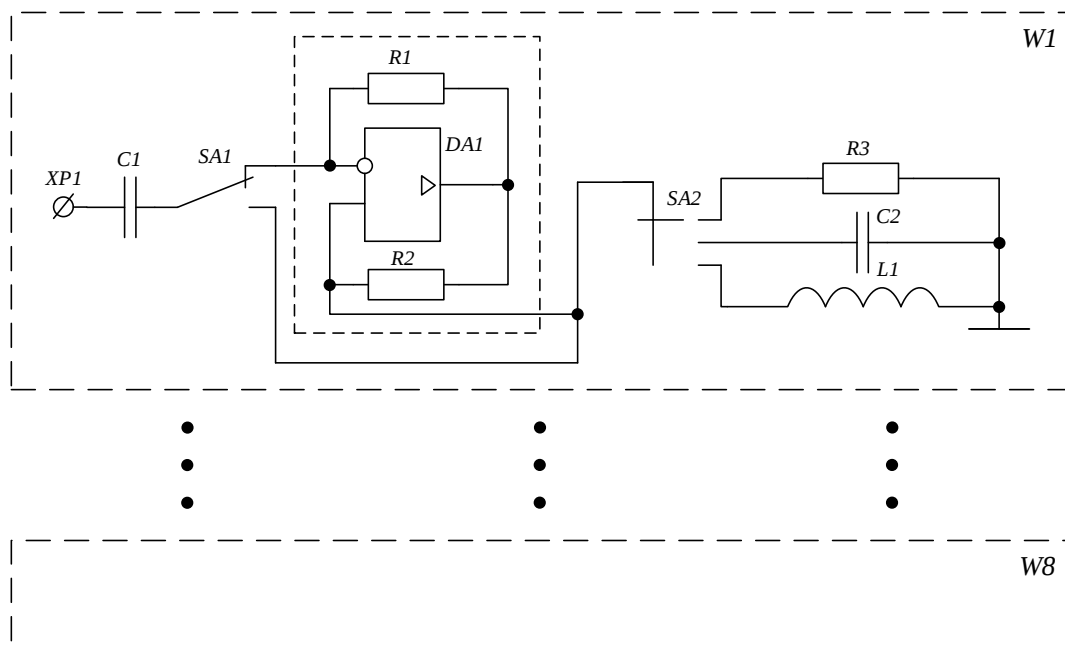


Рисунок 2.7 – Електрична схема АІЕК

Від'ємні значення імпедансних параметрів отримуються за рахунок перетворення додатних значень через використання узагальнених перетворювачів імпедансу на базі операційних підсилювачів.

У результаті, кількість можливих комбінацій для восьмисегментного активного імітансного електронного ключа становить $6^8 = 1\,679\,616$, що у 6561 разів перевищує кількість комбінацій у випадку двозначної (бінарної) логіки.

Необхідна кодова комбінація встановлюється вручну за допомогою перемикачів, що задають імітансний стан кожного сегмента.

Пасивний імітансний електронний ключ (ПІЕК) складається з 12 сегментів (W1–W12), принцип дії кожного з яких однаковий (рис. 2.8). Вхідний сигнал змінного струму подається на клему XP1, проходить через розділовий конденсатор C1 і надходить на перемикач SA1, який визначає тип навантаження, підключеного до схеми.

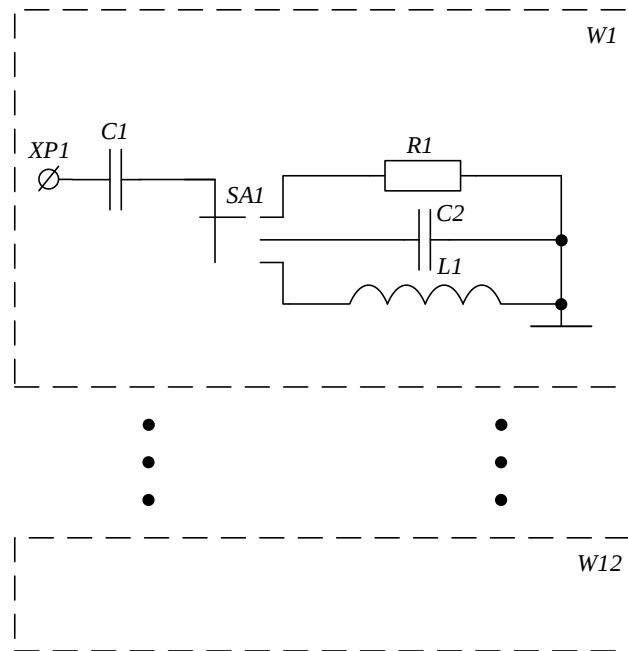


Рисунок 2.8 – Схема електрична принципова ПІЕК

У верхньому положенні перемикача SA1 до ланцюга підключається резистор R1, що формує додатній активний опір $R(+)$.

У середньому положенні — конденсатор C2, який задає додатню ємність $C(+)$.

У нижньому положенні — котушка індуктивності L1, що забезпечує додатню індуктивність $L(+)$.

Таким чином, в залежності від положення перемикача SA1, між вхідною клемою XP1 та загальною шиною формується один із трьох типів додатного імітансу.

Інші сегменти ПЕК (W1–W12) функціонують аналогічно, що дозволяє сформувати на вхідних клеммах набір із 12 додатних імітансів, кожен з яких може набувати одного з трьох можливих значень – R(+), C(+), або L(+).

В результаті, загальна кількість кодових комбінацій для такого ключа становить $3^{12} = 531441$, а це у 130 разів більше, ніж кількість комбінацій, яку можна реалізувати при використанні двозначної (бінарної) системи числення.

Серед основних переваг запропонованих електронних ключів слід відзначити:

- підвищену завадостійкість, що досягається завдяки використанню нечіткого імітансу як інформаційного базису;
- вищу захищеність, обумовлену застосуванням багатозначних систем числення;
- спрощення схемотехнічної реалізації, яке забезпечується використанням RLC-елементів з від'ємним опором.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ІМІТАНСНИХ ЕЛЕКТРОННИХ КЛЮЧІВ

3.1 Моделювання RLC-елементів імітансних електронних ключів

Схемотехнічна реалізація RLC-елементів з від’ємним опором (ЕВО) здійснюється на основі перетворювачів від’ємного імпедансу, побудованих з використанням операційного підсилювача (ОП) (рис. 4.1).

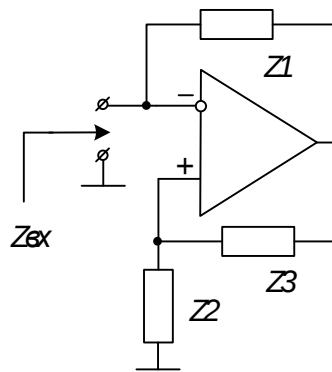


Рисунок 4.1 – Схема реалізації RLC-ЕВО на ОП

Для спрощення аналізу роботи схеми передбачається, що ОП є ідеальним елементом. У такому випадку вхідний імітанс системи можна описати аналітично за допомогою наступного виразу [19]:

$$Z_{\text{вх}} = -\frac{Z_2 Z_1}{Z_3}. \quad (3.1)$$

З аналізу наведеного виразу можна зробити висновок, що при заміні елементів Z_1 або Z_2 на додатну ємність, на виході схеми формується від’ємна ємність — таким чином, схема функціонує як конвертор від’ємного опору.

Якщо ж імпеданс Z_3 є змінним елементом, то схема працює як інвертор від’ємного опору. Наприклад, використовуючи на його місці індуктивність, на вході можна отримати еквівалент від’ємної ємності.

Універсальність схеми дозволяє реалізувати як R- ЕВО, так і L- ЕВО, причому тип реалізованого ЕВО визначається характером навантажувального імпедансу [2].

Надалі розглянемо вхідний імпеданс цієї схеми за умови використання реального (неідеального) операційного підсилювача, з урахуванням частотної залежності коефіцієнта підсилення:

$$\dot{K} = \frac{K_0}{1 + j \frac{f}{f_1} K_0}, \quad (3.2)$$

де K_0 – коефіцієнт підсилення схеми на низьких частотах,

f_1 – частота одиничного підсилення.

На рисунку 3.2 показано еквівалентну схему ОП.

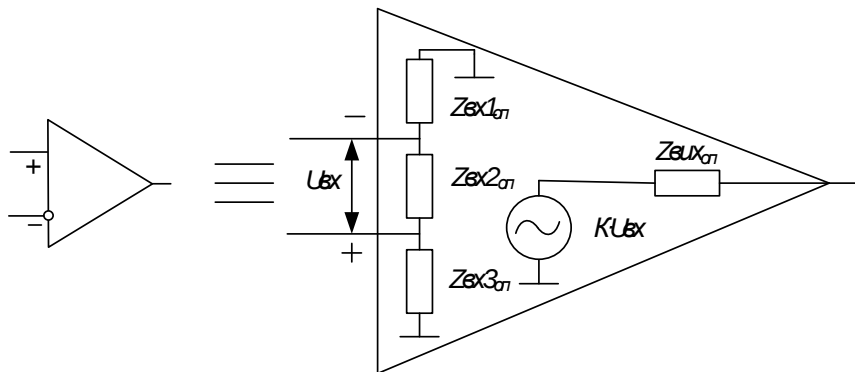


Рисунок 3.2 – Еквівалентна схема операційного підсилювача

Для визначення вхідного імпедансу схеми, зображеної на рисунку 3.1, з урахуванням внутрішньої еквівалентної моделі операційного підсилювача, скористаємося методом контурних струмів. Відповідно, схема на рисунку 3.2 трансформується у вигляд, поданий на рисунку 3.3а.

З метою спрощення математичного аналізу в подальшому вхідним опором ОП знехтуємо, вважаючи його значно більшим за опір джерела сигналу. Вихідним опором ОП також знехтуємо, припускаючи, що він набагато менший за інші

елементи схеми. Опір джерела сигналу приймаємо достатньо малим, щоб ним також можна було знехтувати.

Отже, $Z_{\text{вих0П}} = 0$, $Z_{\text{вх10П}} = \infty$, $Z_{\text{вх20П}} = \infty$, $Z_{\text{вх30П}} = \infty$, $Z_{\Gamma} = 0$,

У результаті цих спрощень схема, зображена на рисунку 3.3а, може бути представлена у спрощеному вигляді, наведеному на рисунку 3.3б.

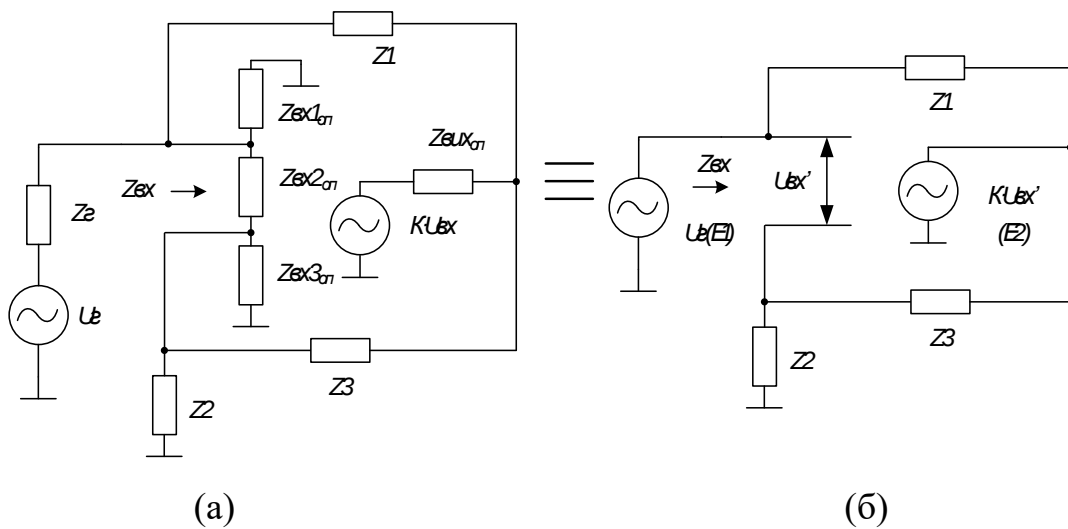


Рисунок 3.3 – Еквівалентні схеми RLC-EBO (а) та його спрощена схема (б)

На отриманій схемі виділимо контурні струми I_{11} та I_{22} (рис. 3.4).

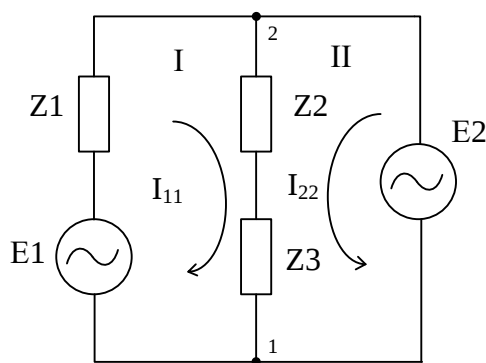


Рисунок 3.4 – Застосування методу контурних струмів для аналізу спрощеної схеми

Скориставшись методом, складемо систему рівнянь:

$$\begin{cases} E_1 = Z_1 I_{11} + (Z_2 + Z_3)(I_{11} + I_{22}) \\ E_1 = \frac{(Z_2 + Z_3)(I_{11} + I_{22}) - Z_2(I_{11} + I_{22})\dot{K}}{-\dot{K}} \end{cases} ; \quad (3.3)$$

$$I_{11} = \frac{E_1 Z_2 + E_1 Z_3 + E_1 \dot{K} Z_3}{Z_1(Z_2 + Z_3 - \dot{K} Z_2)}. \quad (3.4)$$

Вхідний імпеданс схеми розраховуємо за формулою: $Z_{\text{вх}} = \frac{U_{\Gamma}}{I_{\text{вх}}}$, так як $U_{\Gamma} = E_1$ та $I_{\text{вх}} = I_{11}$ одержимо:

$$Z_{\text{вх}} = \frac{Z_1(Z_2 + Z_3 - \dot{K} Z_2)}{Z_2 + Z_3 + \dot{K} Z_3}. \quad (3.5)$$

Розглянемо математичну модель RLC-EBO, які реалізовані на операційному підсилювачі. Розглянемо більш детально L-EBO - пристрій, що володіє від'ємною індуктивністю.

Підставивши в схему на рисунку 3.1 замість Z_3 ємність C , а замість Z_2 та Z_1 опори $R1$, $R2$, отримаємо схемотехнічний L-EBO.

Розрахуємо значення вхідної від'ємної індуктивності $L(-)$ та вхідного від'ємного опору $R(-)$ L-EBO на низьких частотах. На високій частоті, більшій за максимальну частоту L-EBO, від'ємний опір та від'ємна індуктивність зникають.

$$L(-) = \frac{\text{Im}(Z_{\text{вх}})}{2\pi f} = -\frac{C\dot{K}^2 Z_1 Z_2}{4\pi^2 C^2 Z_2^2 f^2 + \dot{K}^2 + 2\dot{K} + 1}; \quad (3.6)$$

$$R(-) = \text{Re}(Z_{\text{вх}}) = \frac{Z_1(\dot{K} + C^2 Z_2^2 \omega^2 - C^2 \dot{K} Z_2^2 \omega^2 + 1)}{C^2 Z_2^2 \omega^2 + \dot{K}^2 + 2\dot{K} + 1}. \quad (3.7)$$

За умови використання ідеального ОП, знехтувавши частотною залежністю коефіцієнта підсилення та приймаючи $\dot{K} \rightarrow \infty$, одержані вирази спростяться до вигляду [20]:

$$L^{(-)} = -CZ_1Z_2; \quad (3.8)$$

$$R^{(-)} = 0. \quad (3.9)$$

Розглянемо частотну залежність від'ємної індуктивності та від'ємного активного опору, що виконаний за допомогою L-EBO. Для задачі моделювання використаємо такі значення елементів схеми:

$$Z_1 = R_1 = 1000 \text{ Ом},$$

$$Z_2 = R_2 = 300 \text{ Ом},$$

$$C = 1 \text{ нФ},$$

параметри операційного підсилювача LF357: $K_0 = 200000$, $f_1 = 20 \text{ МГц}$
(рис. 3.5) [21].

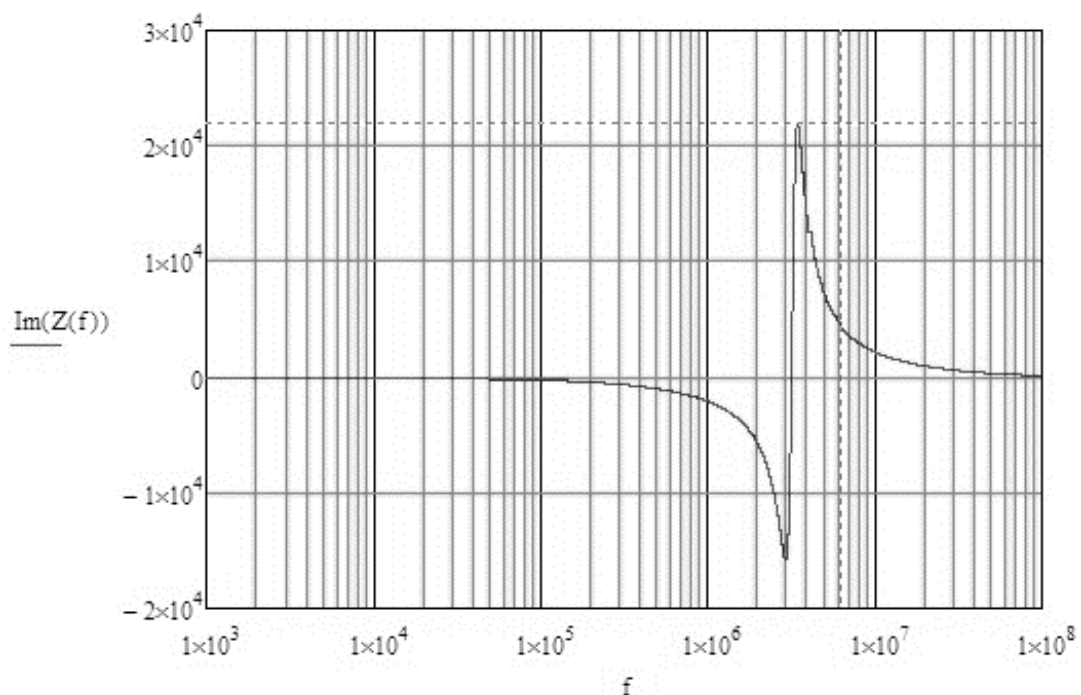


Рисунок 3.5 – Частотна залежність реактивного опору L-EBO

З аналізу наведеного графіка видно, що реактивний опір демонструє поведінку, характерну для від'ємної індуктивності. Із підвищенням частоти його модуль зростає, досягаючи максимального від'ємного значення $-15,8 \text{ кОм}$ при

частоті 2,95 МГц. Ця частота є граничною для роботи даного L-EBO, після якої елемент втрачає властивості від'ємної індуктивності (рис. 3.6).

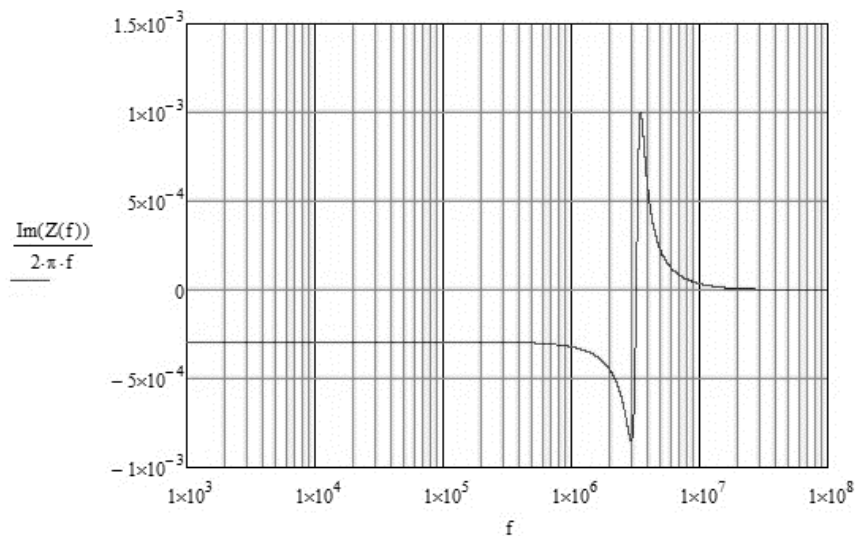


Рисунок 3.6 – Частотна залежність від'ємної індуктивності L-EBO

З аналізу отриманого графіка видно, що значення від'ємної індуктивності становить приблизно -292 мкГн у частотному діапазоні від 1 кГц до 1 МГц. Згідно з теоретичними розрахунками для ідеального операційного підсилювача, отриманими за формулою (3.8), індуктивність має становити -300 мкГн , що відповідає похибці перетворення 2,7 %.

Як показало моделювання, ця похибка зумовлена частотною залежністю коефіцієнта підсилення операційного підсилювача. У разі збільшення граничної частоти f_1 в п'ять разів — до 100 МГц, похибка зменшується до 0,5 %.

Після перевищення частоти 1 МГц, значення від'ємної індуктивності починає зростати за модулем, досягаючи максимуму -851 мкГн при частоті 2,95 МГц.

Максимальна робоча частота L-EBO залежить від параметрів елементів схеми, і ця залежність наочно представлена на рисунку 3.7.

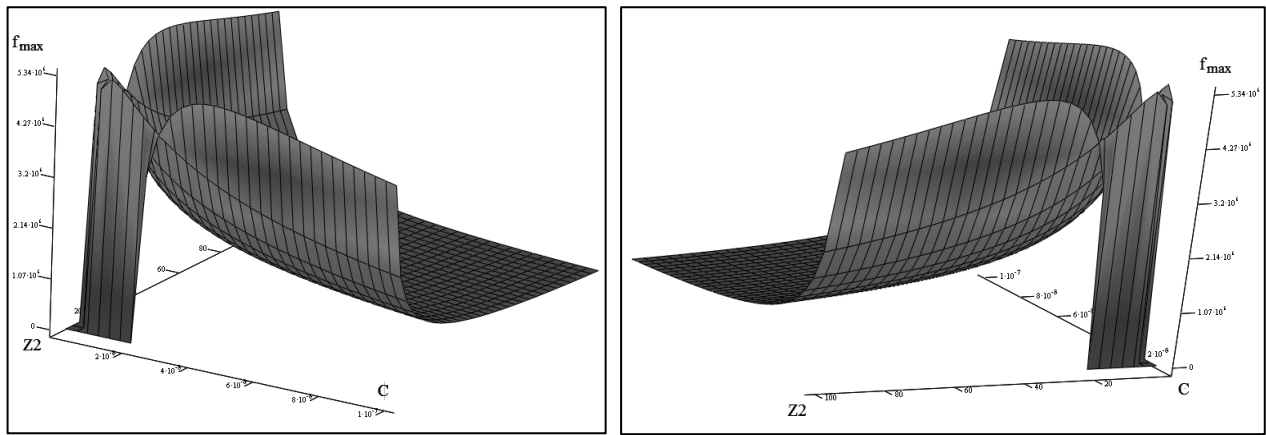


Рисунок 3.7 – Залежність зміни вихідного значення частоти L-EBO від зміни значень Z_2 та C

З наведених графіків можемо зробити висновок, що підбором елементів схеми максимальну частоту EBO можна збільшити до 6 МГц для операційного підсилювача LF357.

3.2 Конструювання друкованої плати імітансного електронного ключа

Використання SMD-компонентів дозволяє значно зменшити габарити пристрою. Монтаж таких елементів на друковану плату виконується відповідно до вимог державних, галузевих стандартів, або технічних умов підприємства.

При трасуванні провідників необхідно прагнути до мінімізації довжини з'єднань, а також зменшення паразитних зв'язків між провідниками та елементами.

З огляду на мініатюрність схеми, було обрано крок координатної сітки 0,625 мм.

Подальші операції виконуються у автоматизованому режимі з використанням пакету САПР Proteus, розробленого британською компанією Labcenter Electronics [22-23].

Proteus є інструментом для схемотехнічного моделювання, побудованим на основі моделей електронних компонентів, сумісних із PSpice. Однією з ключових переваг Proteus є підтримка моделювання роботи програмованих пристроїв –

мікроконтролерів та мікропроцесорів. У складі пакета також наявна довідкова бібліотека компонентів.

Пакет Proteus включає:

ISIS – підпрограму для створення та моделювання електричних схем;

ARES – інструмент для проектування друкованих плат.

Разом із програмою постачаються демонстраційні проекти, що дозволяють швидко ознайомитися з її функціоналом.

Для створення друкованої плати спочатку необхідно розробити електричну принципову схему за допомогою середовища ISIS Professional (див. рис. 3.8).

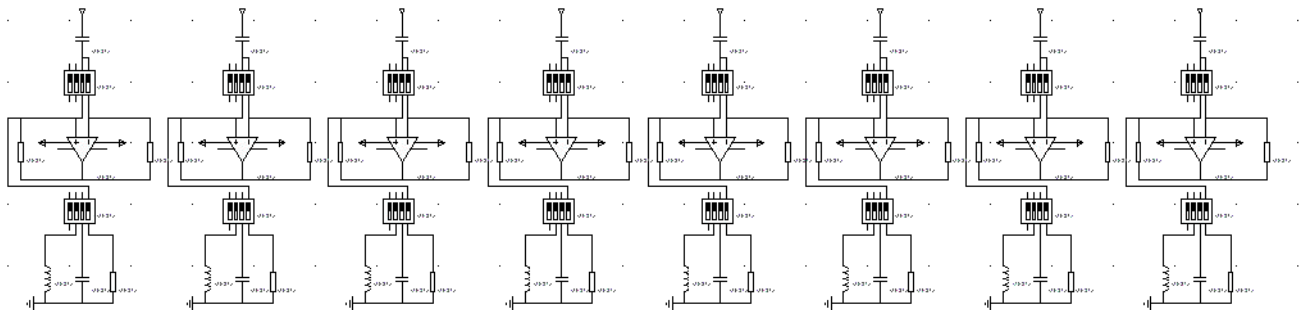


Рисунок 3.8 – Схема електрична принципова активного імітансного електронного ключа, створена у програмі ISIS Professional

Для розведення друкованих доріжок плати потрібно модель перенести у середовище ARES Professional. Для цього потрібно натиснути спеціальну кнопку на панелі інструментів (рис. 3.9).

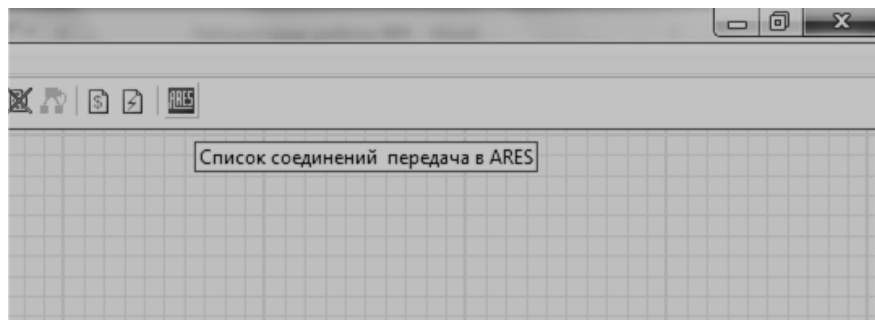


Рисунок 3.9 – Перенесення електричної схеми з програми ISIS у програму ARES

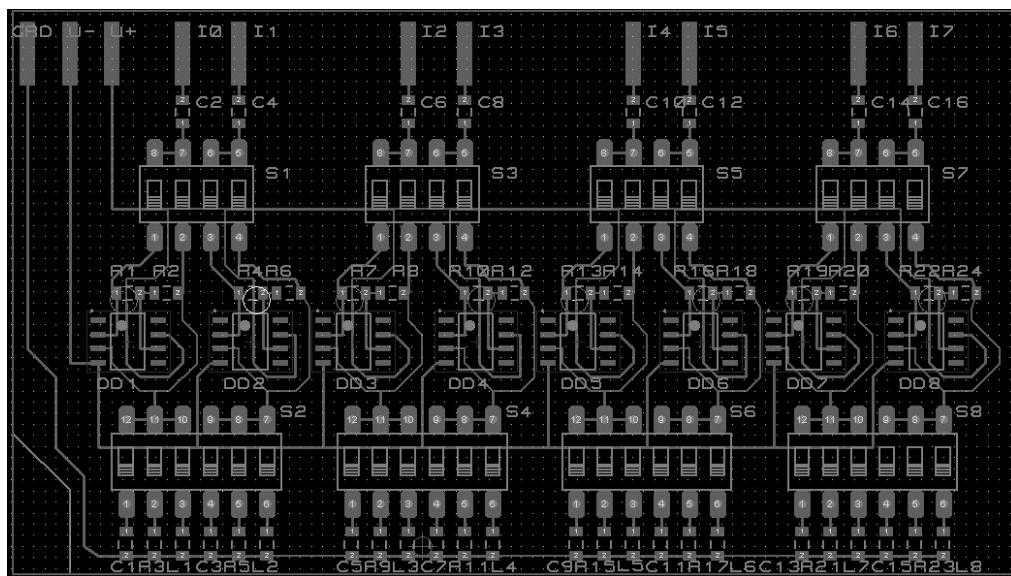
Після створення принципової схеми відкривається вікно додатка ARES, у якому в списку «Компоненти» відображаються всі елементи, використані в проекті.

Для запуску автоматичного компонування слід задати область розміщення компонентів. Далі необхідні елементи розміщуються в межах цієї області, після чого виконується автоматичне трасування плати натисканням кнопки «Автотрасування» (рис. 3.10).



Рисунок 3.10 – Виклик команди «Автотрасування»

В результаті процедури автотрасування одержуємо зовнішній вигляд двосторонньої плати, який показаний на рисунку 3.11.



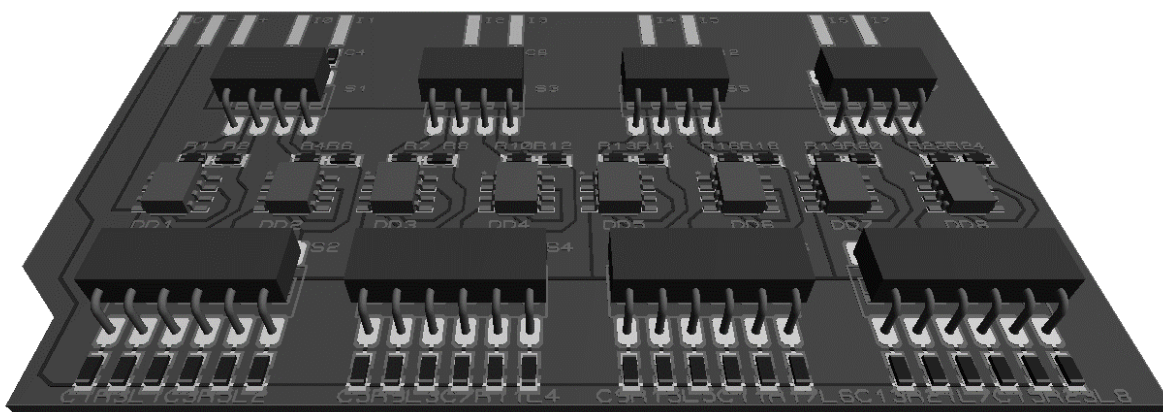


Рисунок 3.12 – 3D-модель активного імітансного електронного ключа

Розробка топології та компонування друкованої плати пасивного імітансного електронного ключа була здійснена із використанням тієї ж послідовності дій та методології, яка застосовувалася при створенні друкованої плати для активного імітансного електронного ключа. Такий підхід забезпечив єдність конструктивних рішень, оптимальну уніфікацію процесу проєктування та зменшення загального часу на розробку.

У процесі роботи використовувалося програмне середовище Proteus ARES, яке дозволяє виконувати точне розміщення компонентів на платі, оптимізувати розводку провідників і формувати тривимірну візуалізацію плати для попереднього аналізу з точки зору ергономіки, доступності контактів та перевірки на можливі колізії.

Для мінімізації перешкод і паразитних зв'язків між компонентами, компонування здійснювалось з урахуванням топологічної компактності, мінімізації довжин провідників, а також дотримання електромагнітної сумісності. Всі елементи, що входять до складу ключа, розміщені в обмеженій області, заданій у координатній сітці, а трасування здійснено як у автоматичному, так і у напіваавтоматичному режимах з подальшим ручним доопрацюванням критичних ділянок.

3D-модель друкованої плати пасивного імітансного електронного ключа, отримана в середовищі ARES, дозволила візуально оцінити відповідність

розташування компонентів вимогам конструкції, забезпечити точне позиціонування роз'ємів, перемикачів та елементів керування, а також перевірити зручність для подальшого монтажу та експлуатації.

Остаточний вигляд плати у тривимірному форматі представлено на рисунку 3.13, що ілюструє реалістичне розміщення SMD-компонентів, наскрізних елементів, роз'ємів та контактних майданчиків.

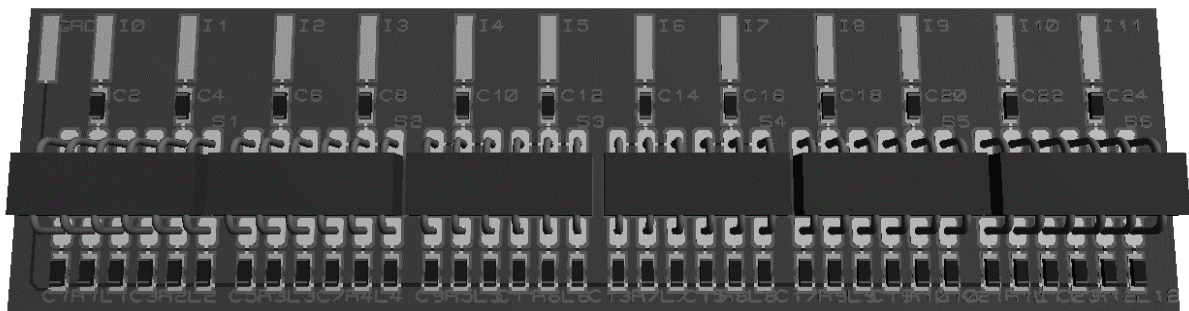


Рисунок 3.13 – 3D-модель пасивного імітансного електронного ключа

Отже, у цьому розділі проведено дослідження RLC-EBO, які використовуються в конструкції електронних імітансних ключів. Зокрема, було вивчено частотну залежність таких характеристик, як від'ємна індуктивність та від'ємний активний опір, реалізовані в L-EBO.

Результати дослідження показали, що реактивний опір поводить себе як від'ємна індуктивність, абсолютне значення якої зростає з підвищенням частоти, досягаючи максимуму $-15,8$ кОм при $2,95$ МГц. У частотному діапазоні від 1 кГц до 1 МГц, значення від'ємної індуктивності становить -292 мкГн, що відповідає похибці перетворення $2,7\%$ відносно теоретичного значення (-300 мкГн).

Ця похибка зумовлена частотною залежністю коефіцієнта підсилення операційного підсилювача (ОП). Дослідження показали, що при підвищенні граничної частоти f_1 в 5 разів до 100 МГц похибка може бути зменшена до $0,5\%$. Після частоти 1 МГц значення індуктивності продовжує зростати за модулем, досягаючи -851 мкГн при частоті $2,95$ МГц.

Крім того, у рамках цього розділу було виконано розробку топології та компонування друкованих плат для активного та пасивного імітансних електронних ключів з використанням сучасного САПР, що дозволило забезпечити компактність, зручність монтажу та відповідність технічним вимогам.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Охорона праці є фундаментальним аспектом сучасного суспільства, її значення неможливо переоцінити. Це не просто набір правил чи формальних вимог, а комплексна система, спрямована на збереження найціннішого ресурсу – людського життя, здоров'я та працездатності в процесі виконання трудових обов'язків. Першочерговим завданням охорони праці є забезпечення безпеки виробничих процесів на всіх їхніх етапах. Це означає не лише виявлення та усунення потенційних загроз на робочих місцях, але й розробку превентивних заходів, що мінімізують ризики. Кожен інструмент, кожна машина, кожен виробничий етап має бути спроектований та функціонувати з урахуванням максимальної безпеки для людини. Це є базисом для уникнення нещасних випадків та надзвичайних ситуацій, які можуть мати фатальні наслідки.

Розроблення імітансного електронного ключа відбувалося в приміщені, яке обладнане комп'ютеризованими робочими місцями. На розробника, згідно Гігієнічною класифікацією праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу, мали вплив такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

1. Фізичні: підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони; підвищений рівень шуму на робочому місці; підвищена чи понижена вологість повітря; підвищений рівень статичної електрики; підвищений рівень електромагнітного випромінювання; пряма і відбита блискість; підвищена яскравість; понижена контрастність; недостатня освітленість робочої зони.

2. Психофізіологічні: розумове перевантаження; перенапруга аналізаторів; статичне перевантаження.

На основі зазначених факторів розробляємо заходи з гігієни праці та виробничої санітарії, які допоможуть забезпечити безпечні та комфортні умови праці.

4.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи

4.1.1. Обладнання приміщення та робочого місця

Розроблення імітансного електронного ключа було здійснене із застосуванням персонального комп'ютера (ПК) як основного інструментального засобу. Ефективність та надійність цього процесу вимагають дотримання специфічних умов до організації робочого місця.

1) Забезпечення безпеки праці. Робоче місце має бути розташоване так, щоб уникнути попадання в очі прямого сонячного світла; штучне освітлення має бути достатнім, рівномірним і без різких контрастів; на робочому місці не повинно бути сторонніх предметів, які можуть перешкодити роботі або призвести до травми; освітлювальні прилади повинні бути встановлені так, щоб не створювати відблисків на екрані монітора; провідні кабелі повинні бути надійно закріплені, щоб уникнути їх пошкодження;

2) Дотримання гігієни праці. Площа робочого місця має бути не менше 6 м², а об'єм - не менше 20 м³; висота робочого столу має бути відрегульована таким чином, щоб відстань від очей до верхнього краю екрана монітора становила 50-60 см; висота стільця має бути відрегульована таким чином, щоб ноги спиралися на підлогу, а лікті були зігнуті під прямим кутом; монітор має бути розташований на рівні очей працівника; клавіатура і миша повинні знаходитися на відстані не більше 60 см від працівника; на робочому місці має бути достатньо свіжого повітря;

3) Забезпечення комфорту під час виконання роботи. Робоче місце має бути добре освітленим і провітреним; температура повітря в приміщенні має відповідати встановленим нормам; робочий стіл і стілець мають бути зручними і відповідати антропометричним даним працівника; на робочому місці має бути достатньо місця для зберігання документів і особистих речей.

Відповідальність за дотримання вимог до робочого місця за ПК покладається на роботодавця. Роботодавець повинен забезпечити відповідні умови праці для своїх працівників, а також провести навчання працівників з питань охорони праці.

Вимоги безпеки під час роботи на ПК регулюються низкою нормативних документів, зокрема ДСТУ ISO 45001:2019, ДСТУ 8604:2015, ДСан ПіН 3.3.2.007-98, НПАОП 0.00-7.15-18 тощо.

Для підтримання високої працездатності та профілактики професійних захворювань необхідно дотримуватись режимів праці та відпочинку. Регламентовані 5-хвилинні перерви (крім основної на обід) потрібно влаштовувати після кожної години роботи. Під час цих перерв доцільно виконувати спеціальні вправи для зняття втоми очей та підтримання загального м'язового тону. Для зняття нервово-психологічної напруги варто обладнати кімнату психофізіологічного розвантаження.

4.1.2 Електробезпека приміщення

На робочому місці функціонують два персональні комп'ютери, кожен з яких живиться від стандартної мережі зі номінальною напругою 220 В. Відповідно до чинних Правил улаштування електроустановок (ПУЕ), приміщення, де розташовані зазначені робочі місця, класифікується як приміщення без підвищеної небезпеки ураження електричним струмом. Ця класифікація ґрунтується на відсутності умов, що сприяють підвищенню ризику електротравматизму, таких як: наявність струмопровідної підлоги (відсутність металевих, залізобетонних або інших струмопровідних покриттів, що можуть становити додатковий ризик), висока вологість або струмопровідний пил (приміщенню не притаманна постійна або тривала вологість понад 75%, а також відсутні значні накопичення струмопровідного пилу), можливість одночасного дотику до заземлених металевих конструкцій та електрообладнання (конфігурація робочих місць та розташування обладнання виключає таку можливість) та висока температура (відсутні екстремально високі температури, що можуть впливати на ізоляційні властивості проводки).

Незважаючи на дану класифікацію, дотримання базових принципів електробезпеки залишається обов'язковим. Це включає:

- ☐ використання справного, сертифікованого електрообладнання;

- ☐ регулярний візуальний огляд проводки та розеток на предмет пошкоджень;

- ☐ заборону самостійного ремонту електроустаткування;
- ☐ наявність засобів захисного відключення (УЗО) у мережі живлення;
- ☐ забезпечення належного заземлення комп'ютерів та іншого електричного обладнання.

Для запобігання електротравмам у приміщенні здійснюються:

- ☐ ізолювання нормально струмоведучих елементів електроустаткування, щоб людина не могла до них доторкнутися;

- ☐ заземлення електрообладнання, щоб у разі пробоя ізоляції струм не проходив через людину;

- ☐ систематичне проведення інструктажів з електробезпеки, щоб працівники знали, як поводитися з електрообладнанням;

- ☐ суворе дотримання правил електробезпеки на робочому місці.

4.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

4.2.1 Мікроклімат

Людський організм постійно генерує тепло внаслідок метаболічних процесів. Для підтримання гомеостазу та забезпечення оптимального самопочуття, це вироблене тепло має ефективно відводитися в навколишнє середовище. Найкращі мікрокліматичні умови характеризуються такими параметрами, що сприяють ефективному розсіюванню надлишкового тепла, запобігаючи перегріву або переохолодженню організму. У ситуаціях, коли мікрокліматичні умови є незадовільними (наприклад, занадто висока або низька температура повітря, підвищена вологість), організм активує внутрішні механізми терморегуляції. Ці механізми спрямовані на балансування теплоутворення та тепловіддачі, щоб підтримувати сталу внутрішню температуру тіла, що є критично важливим для функціонування фізіологічних систем.

За енерговитратами розроблення імітансного електронного ключа згідно Гігієнічною класифікацією праці відноситься до категорії I б. Нормовані значення параметрів мікроклімату для цієї категорії наведені в табл. 4.1 (відповідно до ДСН 3.3.6.042-99)

Таблиця 4.1 – Параметри мікроклімату

Період року	Допустимі		
	t, °C	W, %	V, м/с
Теплий	22-28	40-60	0,1-0,3
Холодний	20-24	75	0,2

Для того, щоб в приміщенні були комфортні умови праці, передбачено два заходи:

- ☐ централізована парова система опалення забезпечує приміщення теплом в холодну пору року;
- ☐ система припливно-витяжної вентиляції забезпечує приплив свіжого повітря і відведення забрудненого повітря, щоб підтримувати в приміщенні оптимальну температуру, вологість і швидкість руху повітря;
- ☐ чистота повітря підтримується за допомогою регулярного прибирання і дезінфекції.

4.2.2 Склад повітря робочої зони

Концентрація шкідливих речовин у повітрі робочої зони не повинна перевищувати гранично-допустимих концентрацій (ГДК). ГДК – це максимальна концентрація шкідливої речовини в повітрі, яка не викликає негативного впливу на здоров'я людини при щоденній 8-годинній роботі протягом 40 років.

Основними джерелами забруднення повітря робочої зони є:

- ☐ комп'ютерні пристрої, які виділяють пил, оксиди вуглецю та інші шкідливі речовини;
- ☐ системи автоматики, які можуть виділяти оксиди азоту, оксиди сірки та інші шкідливі речовини;

□ оператори, що працюють з обладнанням, які можуть виділяти пил, хімічні речовини та інші шкідливі речовини.

Гранично допустимі концентрації (ГДК) шкідливих речовин для повітря робочої зони наведені у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин в повітрі робочої зони

Назва речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньодобова	
Озон	0,16	0,03	1
Оксид сірки	1,5	0,5	2
Оксид азоту	5	2	3
Вуглекислий газ	3	1	4
Пил нетоксичний	25	10	4

Повітря, що містить негативні аероіони, є своєрідним екраном, що відображає випромінювання позитивних іонів від дисплеїв, телевізорів та іншої оргтехніки. Нормативні рівні іонізації повітря у виробничих та громадських приміщеннях наведені в санітарних правилах і нормативах СанПіН 2.2.4.1294-03 [27]. Згідно з цим документом регламентують: мінімально допустимий рівень, максимально допустимий рівень, коефіцієнт уніполярності (табл. 4.3).

Таблиця 4.3 – Рівні іонізації повітря приміщень при роботі на ПК

Рівні	Кількість іонів в 1 см ³	
	n+	n-
Мінімально необхідні	400	600
Оптимальні	1500-3000	3000-5000
Максимально необхідні	50000	50000

Повітря робочої зони очищається від шкідливих речовин за допомогою механічної вентиляції. Для зменшення кількості пилу в приміщенні проводиться

систематичне вологе прибирання, яке дозволяє видалити пил з поверхонь, обладнання та інших предметів.

4.2.3 Виробниче освітлення

У виробничих умовах забезпечення безпечних і здорових умов праці є пріоритетом, де раціональне освітлення відіграє ключову роль. Правильно спроектоване та реалізоване освітлення робочих зон та місць дозволяє працівникам чітко розрізняти об'єкти та інструменти протягом тривалого часу без надмірної втоми. Це безпосередньо сприяє зниженню ризиків травматизму та розвитку професійних захворювань органів зору. Однак, блики та віддзеркалення від джерел світла (як-от світильники та вікна) можуть суттєво погіршити видимість і спричинити значне фізіологічне навантаження на очі. Це, своєю чергою, призводить до швидкої та значної зорової втоми, особливо при виконанні тривалих робіт. Тому мінімізація віддзеркалень є таким же важливим аспектом, як і достатня освітленість, для підтримки комфортних та безпечних умов праці.

Норми освітленості при штучному освітленні та КПО (для III пояса світлового клімату відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 та умов виконання дослідження) при природному та сумісному освітленні зазначені у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 - Норми освітленості в приміщенні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнення	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фона	Освітленість, лк		КПО, %			
						Штучне освітлення		Природне освітлення		Сумісне освітлення	
						Комбіноване	Загальне	Верхнє або верхнє	Бокове	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове
Дуже високої точності	Від 0,15 до 0,3	II	г	великий	світлий	1000	300	7	2,5	4,2	1,5

Для забезпечення достатнього освітлення в приміщенні необхідно регулярно проводити профілактичне обслуговування освітлювальної системи. Це включає в себе чищення вікон, очищення ламп від пилу та заміну перегорілих світильників.

4.2.4 Виробничий шум

Виробничий шум визначається як акустичне забруднення, що генерується під час експлуатації обладнання, машин, транспортних засобів та інших механізмів. Він може мати різний характер – від постійного до періодичного, з варіаціями інтенсивності та частоти. Основна небезпека виробничого шуму полягає у його потенційно негативному впливі на здоров'я людини. Тривалий вплив шуму може призвести до низки несприятливих наслідків, зокрема: шумової травми (гостре порушення слуху, що виникає внаслідок одноразової дії інтенсивного шуму), зниження слуху, порушення сну, психічних розладів (вплив на емоційний та когнітивний стан, що може проявлятися у підвищеній дратівливості, стресі та зниженні концентрації уваги), зниження працездатності та підвищеній втомлюваності (прямий наслідок перевантаження нервової системи, що веде до зниження продуктивності праці та загального виснаження).

Джерелами шуму під час розроблення імітансного електронного ключа є працююча техніка та транспорт, який рухається ззовні приміщення. Допустимі рівні звукового тиску та рівні звуку L_A в приміщенні наведені у таблиці 4.5. (згідно ДСН 3.3.6.037-99 [28]).

Таблиця 4.5 – Допустимі рівні звукового тиску і рівні звуку для постійного шуму

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах зі середньгеометричними частинами (Гц)									Допустимий рівень звуку, дБА
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Виробничі приміщення	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Для забезпечення допустимих параметрів шуму в приміщенні передбачено використання звукопоглинаючих матеріалів, а також раціонального розташування виробничого обладнання.

4.2.5 Виробничі випромінювання

Оскільки робота дослідника проводилася за допомогою ПК, то на робочому місці розробника можливий підвищений рівень електромагнітного випромінювання. Вплив електромагнітних випромінювань від ПК на організм працівника залежить від багатьох факторів, зокрема: діапазону частот (частота випромінювання впливає на глибину його проникнення в тканини), тривалості опромінення (тривале опромінення може призвести до більш серйозних наслідків), характеру опромінення (постійне опромінення є більш шкідливим, ніж імпульсне), режиму опромінення (опромінення з високою інтенсивністю небезпечніше, ніж опромінення з низькою інтенсивністю), розмірів поверхні тіла, яке опромінюється (більша площа опромінення збільшує ризик негативних наслідків), а також індивідуальних особливостей організму.

Електромагнітні випромінювання, випромінювані відеодисплейним терміналом, мають широкий діапазон частот. Стандарти вимагають, щоб електромагнітне випромінювання від ПК вимірювалося в діапазоні частот від 5 Гц до 400 кГц.

Гранично допустимі значення напруженості електричного і магнітного полів промислової частоти в залежності від часу їх впливу встановлюються СанПіН 2.2.4.1191-03 «Електромагнітні поля у виробничих умовах» [30]. Згідно з цим нормативним документом перебування в ЕП промислової частоти напруженістю до 5 кВ/м допускається протягом усього робочого дня. Гранично допустимі рівні електромагнітного поля радіочастотного діапазону для працівника становлять $E_{гдр} = 25 \text{ В/м}$ та $B_{гдр} = 250 \text{ нТл}$.

Для зменшення впливу електромагнітного випромінювання на дослідника слід дотримуватися раціонального режиму роботи та відпочинку.

4.3 Пожежна безпека

В приміщенні, де здійснювалося розроблення імітансного електронного ключа використовуються тільки негорючі речовини та матеріали у холодному стані, тому за ступенем вибухопожежної та пожежної небезпеки приміщення відноситься до категорії «Д». Пожежну небезпеку несуть у собі лише кабельні електропроводки до обладнання, що є припустимим для даної категорії приміщень.

За вогнестійкістю приміщення відноситься до другої категорії згідно з ДСТУ Б В.1.1-36:2016. Робоча зона відноситься до класу вибухонебезпечності В-Па та пожежонебезпечності П-Па, оскільки вибухонебезпечна концентрація пилю і волокон може утворюватися лише внаслідок аварії або несправності. Межі вогнестійкості конструкцій будівлі наведені в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – Межі вогнестійкості конструкцій будівлі

Ступінь вогнестійкості будинків	Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвилинах) та максимальні межі поширення вогню по них (см)								
	стіни				колони	сходові площадки, косоури, сходи, балки, марші сходових кліток	перекриття міжповерхові (у т. ч. горизонтні та над підвалами)	елементи суміщених покриттів	
	несучі та сходових кліток	самонесучі	зовнішні ненесучі	внутрішні ненесучі (перегородки)				плити, настили, прогоны	балки, ферми, арки, рами
II	REI 120 M0	REI 60 M0	E15, M0 E30, M1	EI 15 M1	R 120 M0	R 60 M0	REI 45 M1	RE 15 M0	R 30 M0

Позначення в таблиці: R – втрати несучої здатності; E – втрати цілісності; I – втрати теплоізолювальної спроможності

4.3.1 Технічні рішення системи запобігання пожежі

Можливі причини виникнення пожежі у приміщенні, де відбувається розроблення імітансного електронного ключа такі:

- несправна електропроводка (іскріння, перегрів провідників, пересихання електроізоляційних матеріалів);
- використання електропобутових пристроїв (електрочайники, обігрівачі); попадання вологи на працююче електрообладнання;
- залишення без нагляду увімкннутих комп'ютерів, обчислювальної техніки та інших електроприладів.

Для запобігання виникнення пожежі доцільні такі заходи:

- призначення осіб, що відповідальні за пожежну безпеку приміщення;
- щорічне проведення повторних протипожежних інструктажів та занять за програмою пожежно-технічного мінімуму з особами, що відповідальні за пожежну безпеку;
- утримання в справному стані засобів протипожежного захисту;
- своєчасне інформування про несправність пожежної техніки, систем протипожежного захисту, водопостачання тощо.

4.3.2 Технічні рішення системи протипожежного захисту

Забезпечення пожежної безпеки є складовою частиною виробничої або іншої діяльності посадових осіб, працівників підприємств та підприємців. Відповідні обов'язки та повноваження щодо пожежної безпеки повинні бути чітко відображені у трудових договорах (контрактах) кожного працівника, а також закріплені у статутах та внутрішніх положеннях підприємств. Це забезпечує юридичну визначеність та індивідуальну відповідальність кожного суб'єкта за дотримання встановлених норм. Таке інтегрування вимог пожежної безпеки на всіх рівнях організації є запорукою ефективного функціонування системи попередження пожеж та мінімізації їхніх наслідків.

У приміщенні на випадок виникнення пожежі для обмеження її розповсюдження знаходиться переносний вуглекислотний вогнегасник типу

ВВК-5, що відповідає нормам. Підходи до засобів первинного пожежогасіння та відключення електросхем устаткування вільні. Важливим аспектом забезпечення пожежної безпеки є також вільний доступ до засобів первинного пожежогасіння та до засобів відключення електросхем устаткування. Відсутність перешкод на цих шляхах гарантує оперативне реагування на надзвичайну ситуацію, що є критично важливим для мінімізації ризиків та потенційних збитків. Регулярні перевірки та підтримання доступності цих елементів є обов'язковою умовою для підтримання високого рівня пожежної безпеки об'єкта.

У коридорі приміщення розміщено схему евакуації людей у разі пожежі, що забезпечує чітке візуальне інформування про безпечні маршрути. Шляхи евакуації з відділу повністю відповідають чинним правилам пожежної безпеки, гарантуючи їхню доступність та ефективність. У будинку передбачено два евакуаційні виходи. Ширина коридору, що веде до цих виходів, становить 2-3 метри, що є достатнім для забезпечення безперешкодного руху великої кількості людей. Двері на шляхах евакуації мають ширину 0,8 м і, що критично важливо, відчиняються у напрямку руху людей під час евакуації. Це мінімізує час, необхідний для виходу, та запобігає створенню заторів, підвищуючи загальну безпеку евакуації.

Загалом, приміщення відповідає встановленим нормам за категорією вибухо- і пожежонебезпечності та ступенем вогнестійкості. Це свідчить про базову відповідність вимогам безпеки. Однак, для підтримки високого рівня пожежної безпеки, особливу увагу слід приділити таким аспектам:

Утримання в справному стані засобів протипожежного захисту. Необхідно забезпечити регулярне технічне обслуговування, перевірку та, за потреби, ремонт усіх систем та засобів пожежогасіння (вогнегасників, пожежних гідрантів, автоматичних систем пожежогасіння тощо). Це запобігатиме їхній відмові у критичний момент.

Своєчасне інформування пожежної охорони про несправності пожежної техніки. Будь-які виявлені несправності або пошкодження протипожежного обладнання повинні негайно передаватися до відповідних служб пожежної

охорони для їхнього усунення. Це гарантує оперативне реагування та підтримку готовності систем.

Впровадження сучасних систем протипожежного захисту. Розгляд можливості модернізації та впровадження новітніх систем пожежної сигналізації, оповіщення про пожежу, автоматичного пожежогасіння та димовидалення. Сучасні технології дозволяють значно підвищити ефективність виявлення та локалізації пожеж, мінімізуючи ризики для людей та майна.

ВИСНОВКИ

Логічні елементи є основними будівельними блоками при створенні логічних схем для обчислювальних машин, а також дискретних систем автоматичного контролю та управління. Однак більшість таких елементів функціонує в нелінійному режимі, що негативно впливає на їх швидкодію та стійкість до завад під час обробки і передавання інформації.

Запровадження концепції «нечіткого імітансу» у проектуванні логічних елементів дозволяє частково усунути ці обмеження. Реалізація багатозначної логіки на базі цього підходу забезпечує вищу ефективність і продуктивність, що в результаті дозволяє знизити апаратні витрати порівняно з традиційними двійковими логічними системами.

В роботі були розроблені пасивний інвертор багатозначної логіки, а також активний і пасивний імітансні електронні ключі.

Пасивний інвертор багатозначної логіки використовує імітанс як інформаційний базис для формування логічних рівнів і може бути застосований для реалізації функції інверсії в багатозначних логічних пристроях. Окрім цього, були визначені умови побудови логічного R-елемента «НІ», а також проаналізовано вплив дестабілізуючих факторів на його характеристики. Подано логічні рівні для тризначної та п'ятизначної імітансної R-логіки, які відповідають таблицям істинності відповідних інверторів. Використана методика задання логічних рівнів є універсальною та може застосовуватись до інших логічних розрядів пасивної імітансної логіки.

Активні та пасивні імітансні електронні ключі призначені для реалізації процедур ідентифікації, автентифікації та персоналізації користувачів у різних системах доступу. В основі їхньої дії лежить використання нечіткого імітансу як інформаційного параметра для кодування логічних рівнів. Наведені відповідні імітансні рівні для шестизначної (активний ключ) та тризначної (пасивний ключ) системи числення.

Таким чином, розробка багатозначних логічних схем на основі нового інформаційного базису дозволяє збільшити завадозахищеність, підвищити швидкодію обробки й передачі даних, а також зменшити апаратні витрати.

Окрім того, реалізація перетворювачів імітансу на пасивних компонентах забезпечує простоту схемотехнічних рішень, зниження рівня шумів та менше енергоспоживання завдяки відсутності активних елементів.

В роботі проведено дослідження RLC-елементів з від'ємним опором, які використовуються в конструкції електронних імітансних ключів. Зокрема, було вивчено частотну залежність таких характеристик, як від'ємна індуктивність та від'ємний активний опір, реалізовані в L-елементі з від'ємним опором.

Результати дослідження показали, що реактивний опір поводить себе як від'ємна індуктивність, абсолютне значення якої зростає з підвищенням частоти, досягаючи максимуму $-15,8$ кОм при $2,95$ МГц. У частотному діапазоні від 1 кГц до 1 МГц, значення від'ємної індуктивності становить -292 мкГн, що відповідає похибці перетворення $2,7$ % відносно теоретичного значення (-300 мкГн).

Ця похибка зумовлена частотною залежністю коефіцієнта підсилення операційного підсилювача (ОП). Дослідження показали, що при підвищенні граничної частоти f_1 в 5 разів до 100 МГц похибка може бути зменшена до $0,5\%$. Після частоти 1 МГц значення індуктивності продовжує зростати за модулем, досягаючи -851 мкГн при частоті $2,95$ МГц.

Крім того, у рамках цього розділу було виконано розробку топології та компонування друкованих плат для активного та пасивного імітансних електронних ключів з використанням сучасного САПР, що дозволило забезпечити компактність, зручність монтажу та відповідність технічним вимогам.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Використання принципів нечіткої логіки для синтезу елементів багатозначної логіки / В. М. Кичак, О. О. Семенова, О. О. Войцеховська. *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*. 2009. № 2. С. 114 – 118.
2. Теоретичні основи цифрової електроніки : конспект лекцій / Ю. І. Под'ячий, Г. Ю. Під'ячий ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". Харків, 2023. 26 с.
3. Розен, В. П., Закладний, О. О., Прядко, С. Л., Смоляр, В. Г. Основи цифрової та аналогової схемотехніки. Комп'ютерний практикум. Київ : КПІ ім. І. Сікорського, 2022. 50 с.
4. Спінул, Л. Ю., Святненко, В. А. Основи цифрової електроніки. Курс лекцій. Київ : КПІ ім. І. Сікорського, 2022. 118 с.
5. Возняк, О. М., Штуць, А. А. Методи та засоби вимірювання параметрів потенційно нестійких НВЧ багатополіусників. Вінниця : Твори, 2022. 144 с.
6. Гонець, І. Ю. Система автоматичного регулювання оптично керованих активних індуктивностей на комбінованих транзисторних елементах : кваліфікаційна бакалаврська робота : 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / наук. кер. М. С. Мірошніченко ; Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. – Кропивницький : ЦНТУ, 2024. 51 с.
7. Ліщинська Л. Б. Оцінка основних параметрів імітансних логічних елементів. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. 2011. № 3. С. 45–52.
8. Метод синтезу моноімітансних логічних елементів та спеціалізовані пристрої на їх основі : монографія / М. А. Філінюк, Й. Й. Білинський, В. П. Стахов. Вінниця : ВНТУ, 2019. 139 с.
9. Туз, Ю. М., Шумков, Ю. С., Козир, О. В. Теорія електричних сигналів і кіл. Курс лекцій. Київ : КПІ ім. І. Сікорського, 2022. 454 с.
10. Саввова, О. В., Фесенко, О. І., Тимошук, М. І., Білоус, В. Б., Скрипинець, А. В. (2025). Нові типи склокерамічних матеріалів для електронних

систем. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія*. 2025. № 1 (13). С. 80-86.

11. Кулаксіз, Ю. Ю. Технологія реалізації елементів багатозначної логіки : кваліфікаційна робота бакалавра. Одеса, 2023. 96 с.

12. Верьовкін Л. Л. Цифрові логічні автомати. Запоріжжя : ЗНУ, 2021. 32 с.

13. Антонов, М. Л., Васильєва, Є. В. (2023). Конспект лекцій з дисципліни «Електроніка та основи схемотехніки» для студентів спеціальності 173 «Авіоніка» усіх форм навчання Частина 1. Запоріжжя: НУЗП, 2023 93 с

14. Патент України на корисну модель UA 71687 U, H03K 19/20. Імітансний логічний елемент «НІ» / М. А. Філінюк, О. В. Войцеховська, Л. І. Покотилук. – № u201115340; заявл. 26.12.2011; опубл. 25.07.2012. – Бюл. № 14/2011.

15. Патент України на корисну модель UA 99776 U, H03K 19/20. Моноімітансний логічний елемент «НІ» / О. В. Войцеховська, М. А. Філінюк, Л. Б. Ліщинська, В. Л. Ковальський. – № u201413750; заявл. 22.12.2014; опубл. 25.06.2015. – Бюл. № 12/2015.

16. Авдєєнко Г.Л., Бичок А.В., Наритник Т.М. та ін. Твердотільні потужні напівпровідникові джерела міліметрових хвиль на напівпровідникових діодних елементах. Міжнародна науково-технічна конференція «Інформаційно-комунікаційні технології та кібербезпека (ІКТК-2024)». С. 36-49.

17. Філінюк М. А., Лазарєв О. О., Войцеховська О. В. RLC-негатрони та їх застосування. Вінниця : ВНТУ, 2012. 307 с.

18. Теорія електромагнітного поля і основи техніки НВЧ : навч. посіб. / С.В. Соколов, Л.Д. Писаренко, В.О. Журба; за заг. ред. Г.С. Воробйова. Суми : Сумський державний університет, 2011. 393 с.

19. Сєдов С. О. Оброблення сигналів на базі операційних підсилювачів. Схемотехніка. Розрахунки : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 132 с.

20. Мілих В. І., Шавьолкін О. О. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка : підручник / за ред. В. І. Мілих. 2-е вид. К. : Каравела, 2015. 688 с.

21. LF357 Datasheet (PDF) / STMicroelectronics. – URL: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/22740/STMICROELECTRONICS/LF357.html>

22. Marconnet, B., Gaha, R., Le Duigou, J., Eynard, B. PROTHEUS Framework: Improving Sustainable Design of Product with a Cognitive Bot. *International Joint Conference on Mechanics, Design Engineering & Advanced Manufacturing*. Cham : Springer Nature Switzerland, 2024. P. 147-159.

23. Мешко Р. О. Базові принципи проектування та розробки технічної документації сучасними засобами САПР. 2023. – URL: <https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/bitstream/lib/69140/1/09111403.pdf>

24. Державні санітарні норми та правила «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу», затверджених наказом Міністерства охорони здоров'я України від 08 квітня 2014 року № 248.

25. ДСТУ ISO 45001:2019 Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці. Вимоги та настанови щодо застосування (ISO 45001:2018, IDT). URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=88004.

26. ДСТУ 8604:2015 Дизайн і ергономіка. Робоче місце для виконання робіт у положенні сидячи. Загальні ергономічні вимоги. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=71028.

27. ДСан ПіН 3.3.2.007-98 Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин ЕОМ. Режим доступу: <http://document.ua/derz-nor4881.html>

28. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. Режим доступу: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>

29. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. Режим доступу до сторінки: http://hrliga.com/index.php?module=norm_base&op=view&id=819

30. СанПіН 2.2.4.1294-03 «Фізичні фактори виробничого середовища. Гігієнічні вимоги до аероіонного складу повітря виробничих і громадських приміщень». Режим доступу: <http://www.ionization.ru/issue/iss5.htm>

31. ПУЕ Правила улаштування електроустановок (перше переглянуте, перероблене, доповнене та адаптоване до умов України видання). Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=72758.

32. НПАОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=77160

33. ДСНіПЗ.3.6.096-2002. Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів. Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0203-03>.

34. ДБН В.2.5-28-2018 «Природне і штучне освітлення». https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3074958732556240833?doc_type=2

35. НАПБ А.01.001-14 Правила пожежної безпеки в Україні [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://zakon.nau.ua/doc/?code=z1410-04>

36. ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпек. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_1_1_36/5-1-0-1759

37. ДБН В.1.1.7-2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва - [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://www.poliplast.ua/doc/dbn_v.1.1-7-2002.pdf

Додаток А
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

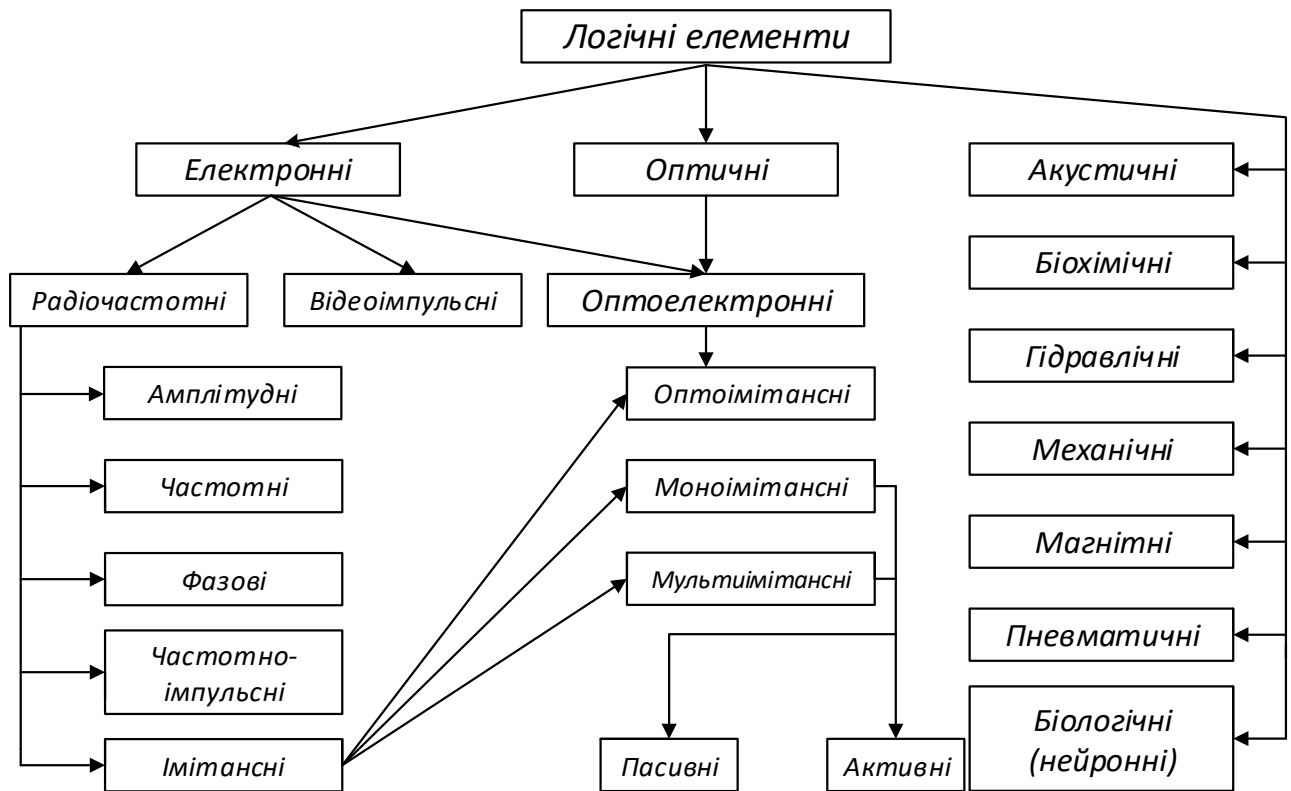


Рисунок А.1 – Класифікація логічних елементів

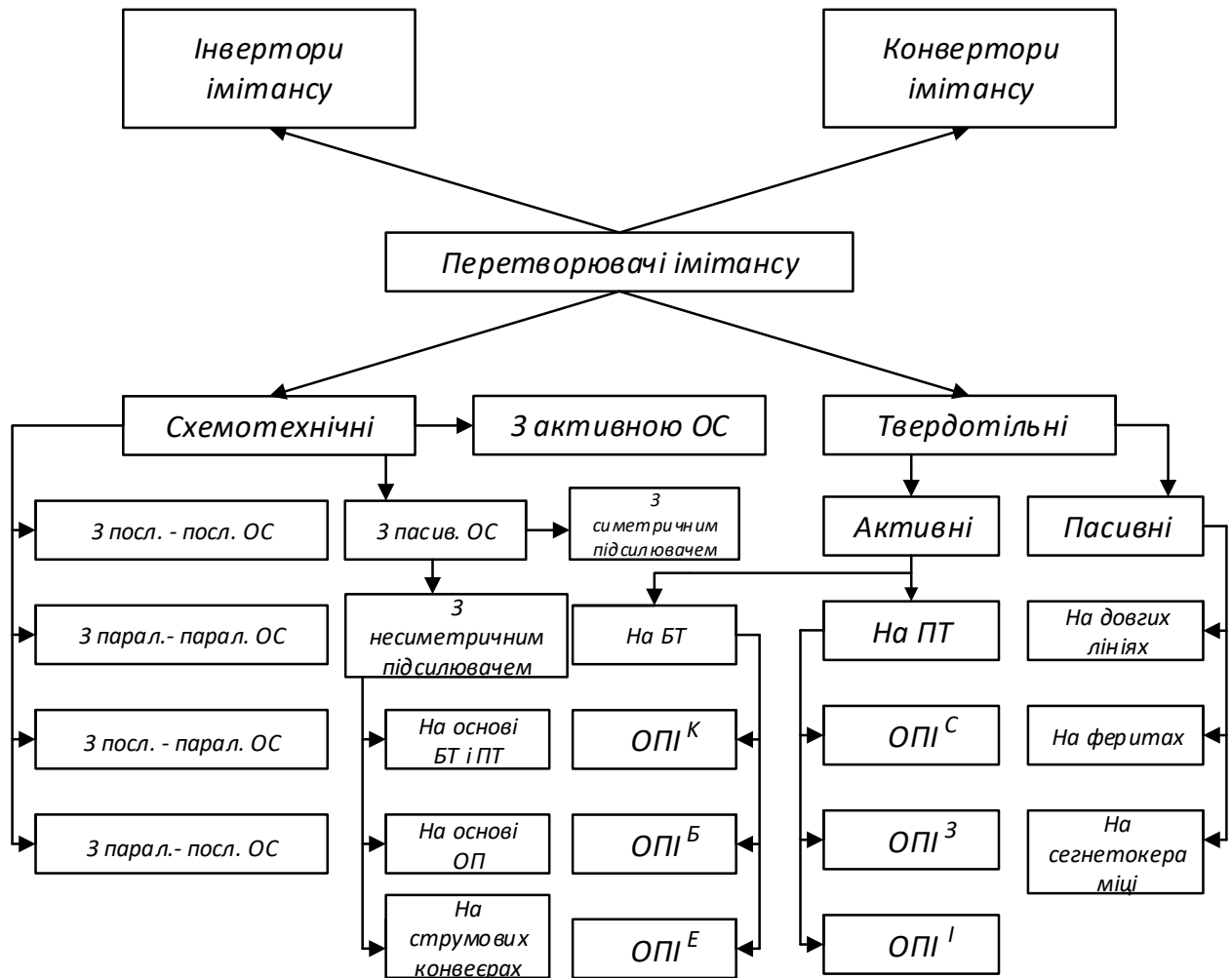


Рисунок А.2 – Класифікація перетворювачів імітансу
за видом реалізації

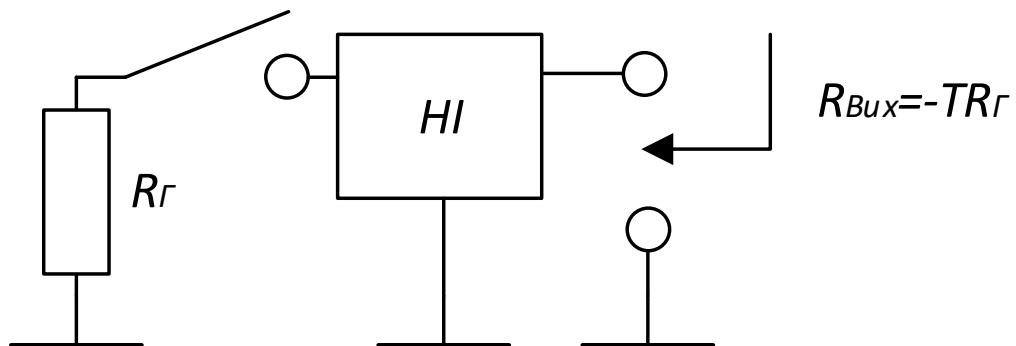


Рисунок А.3 – Структурна схема логічного R-елемента «HI»

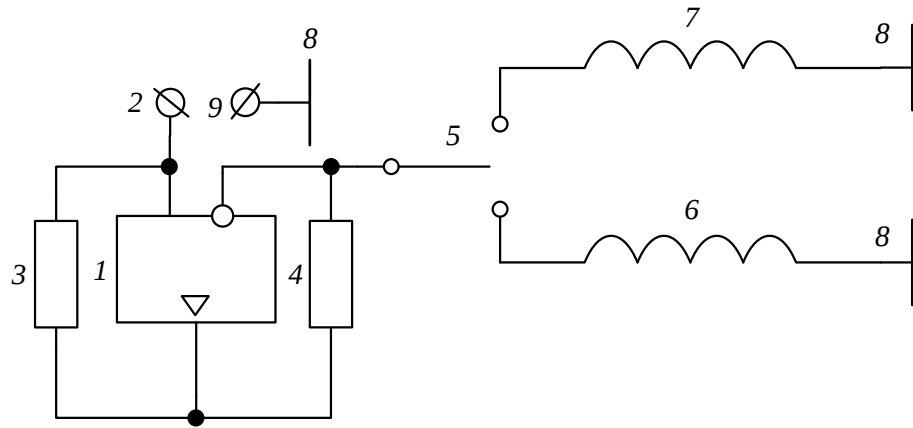


Рисунок А.4 – Електрична схема імпедансного логічного елемента «НІ»

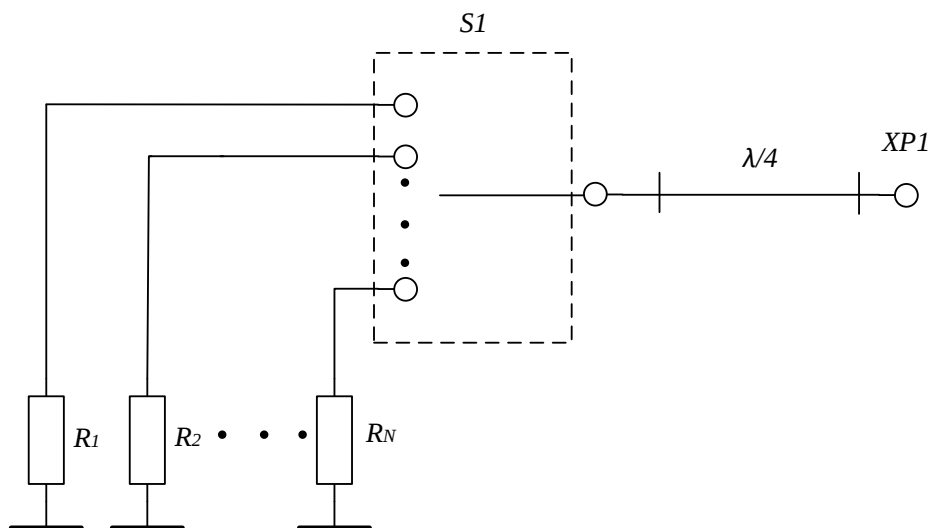


Рисунок А.5 – Електрична схема пасивного інвертора на основі багатозначної імпедансної R-логіки

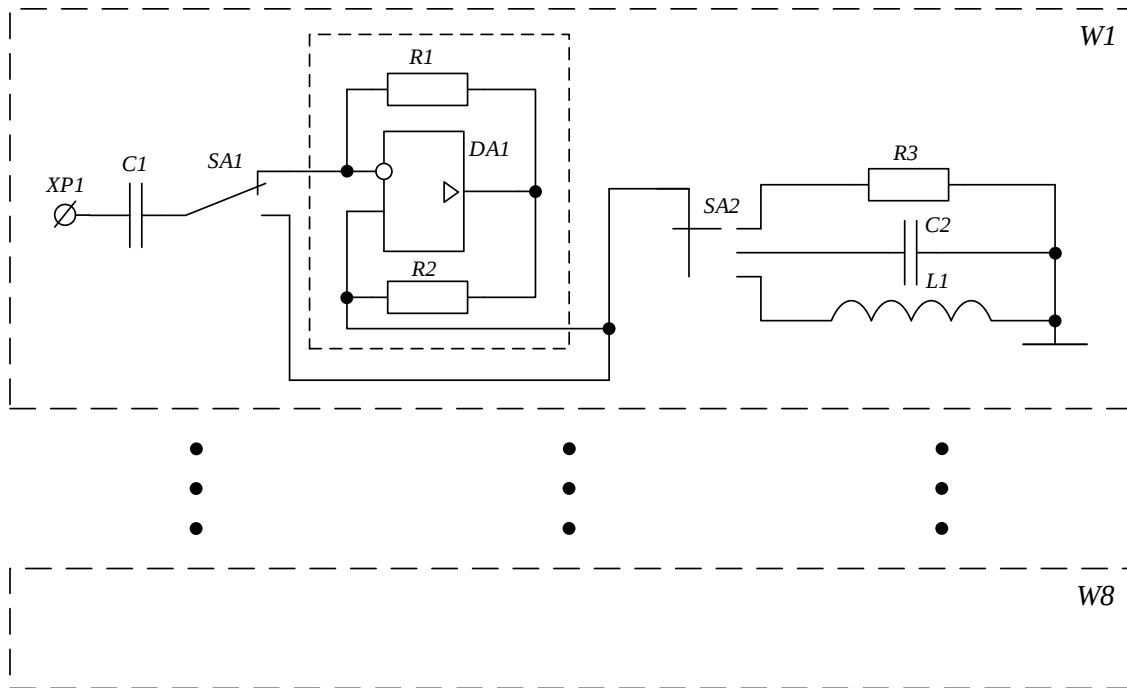


Рисунок А.6 – Схема електрична принципова активного імітансного електронного ключа

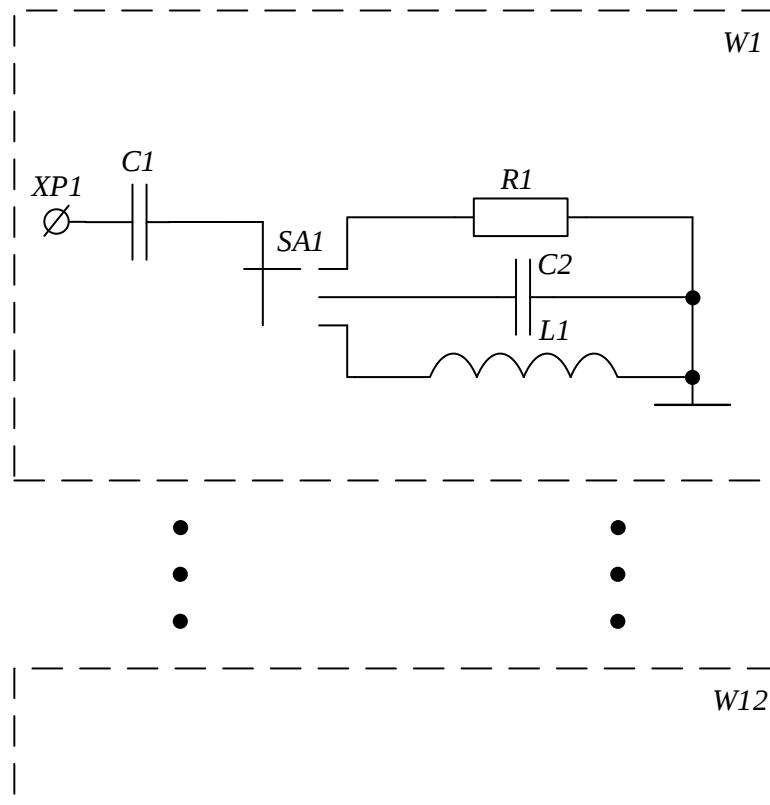


Рисунок А.7 – Схема електрична принципова пасивного імітансного електронного ключа

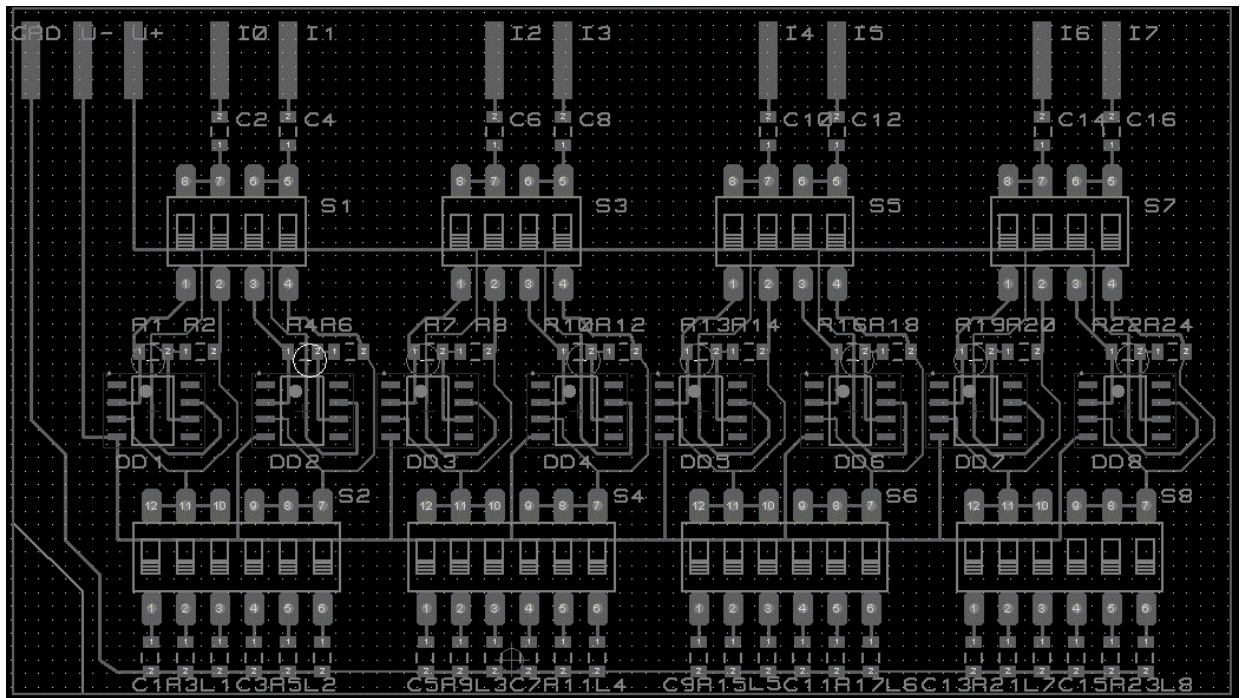


Рисунок А.8 – Плата друкована активного імітансного електронного ключа

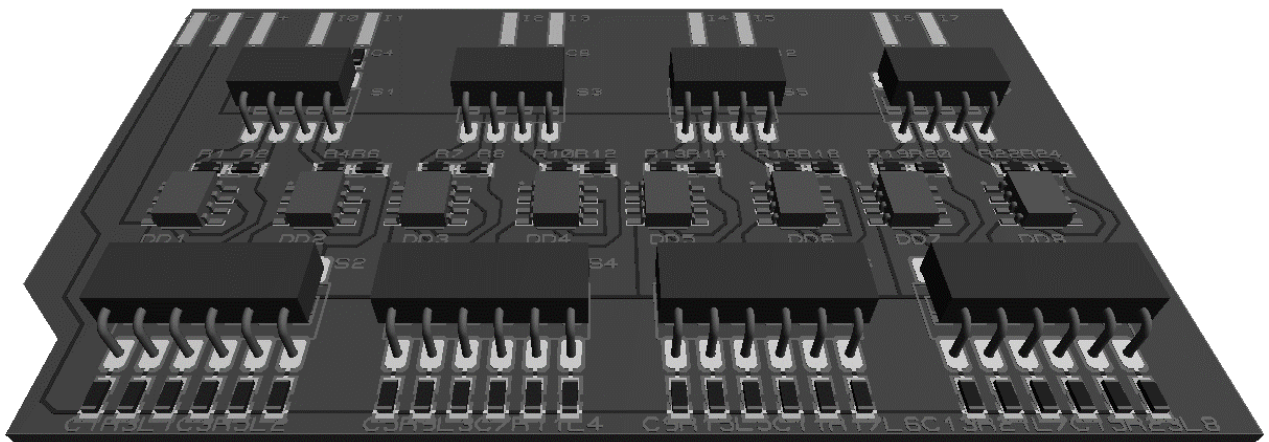


Рисунок А.9 – 3D-модель плати друкованої активного імітансного електронного ключа

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Розроблення імітансного електронного ключа

Тип роботи: бакалаврська кваліфікаційна робота

(бакалаврська кваліфікаційна робота / магістерська кваліфікаційна робота)

Підрозділ Кафедра біомедичної інженерії та оптико-електронних систем

(кафедра, факультет, навчальна група)

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі
системою StrikePlagiarism 10,54 %

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

- ☒ Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту
- ☐ У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.
- ☐ У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

Коваль Л. Г., завідувач кафедри БМІОЕС

(прізвище, ініціали, посада)

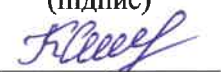
Карась О. В., гарант ОПП «Електроніка»

(прізвище, ініціали, посада)

Особа, відповідальна за перевірку

(підпис)


(підпис)


(підпис)

Штофель Д. Х.
(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлені:

Керівник

(підпис)

Штофель Д. Х., доц. каф. БМІОЕС

(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач

(підпис)

Повар Д. В.

(прізвище, ініціали)