

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Управління енергетичними та економічними процесами

Інтелектуальні системи енергопостачання

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи
магістра

на тему: Застосування комп'ютерного зору для аналізу графів в електричних кіл систем електропостачання

за освітньою програмою Енергетичні та електромеханічні системи на транспорті
зі спеціальності: 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Виконав студент групи: EE2321

Бакун

/ Володимир БАКУН /

Керівник

Земський

/ доцент Денис ЗЕМСЬКИЙ /

Нормоконтролер:

Потапчук

/ доцент Ірина ПОТАПЧУК /

Засвідчую, що у цій роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент Бакун

Дніпро – 2025 рік

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет: Управління енергетичними та економічними процесами

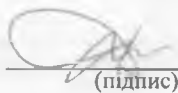
Кафедра: Інтелектуальні системи енергопостачання

Рівень вищої освіти: Другий (магістерський)

Освітня програма: «Енергетичні та електромеханічні системи на транспорті»

Спеціальність: 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(шифр та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ІСЕ



/Дмитро БОСИЙ
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Дата 01.04.2024

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу

магістр з електроенергетики, електротехніки
та електромеханіки

(ступінь вищої освіти)

студенту Бакуну Володимирі Костянтиновичу
(Прізвище, Ім'я, По батькові)

1. Тема роботи: Застосування комп'ютерного зору для аналізу графів електричних кіл систем електропостачання

Керівник роботи: Земський Денис Романович, доктор філософії, без звання
(Прізвище, Ім'я, По батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом від "01" квітня 2024 р. № 247 ст

2. Строк подання студентом 12.01.2025 р.
роботи:

3. Вихідні дані до роботи: відкриті технічні, наукові та нормативні джерела, навчальна література.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно опрацювати):

4.1 Аналіз технології штучного інтелекту та комп'ютерного зору.

4.2 Розробка системи аналізу графів електричних кіл.

4.3 Дослідження роботи інтелектуальної системи аналізу графів електричного кола.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

5.1 Метрики результатів навчання нейронної мережі.

5.2 Оцінка продуктивності інтелектуальної системи аналізу графів.

5.3 Схема та граф тестового електричного кола.

5.4 Набір даних для навчання нейронної мережі

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технології штучного інтелекту та комп'ютерного зору	10.11.2024	30 %
2	Розробка системи аналізу графів електричних кіл	15.12.2024	60 %
3	Дослідження роботи інтелектуальної системи аналізу графів електричного кола	29.12.2024	95 %
4	Подання кваліфікаційної роботи до кафедри.	12.01.2025	100 %
5	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні Екзаменаційної комісії.	21.01.2025	

Студент

Бакун

Володимир БАКУН

Керівник роботи

Земський

Денис ЗЕМСЬКИЙ

ВІДОМІСТЬ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

другого (магістерського) рівня вищої освіти Бакун В.К. на тему:
«Застосування комп'ютерного зору для аналізу графів електричних кіл
систем електропостачання»

Складова кваліфікаційної роботи	Кількість	Обсяг
Пояснювальна записка	1	80 стор.
Графічна частина (за наявності)	-	-
Демонстраційний матеріал	1	12 слайдів
Електронна частина (за наявності): назва файлу з розширенням	-	-

Керівник:  / Денис ЗЕМСЬКИЙ /

Нормоконтролер:  / Ірина ПОТАПЧУК /

Завідувач кафедри ІСЕ:  / Дмитро БОСИЙ /

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи магістра:
81 с., 2 рис., 5 табл., 1 додаток, 35 джерел.

Об'єкт розробки – технологія комп'ютерного зору для аналізу графів електричних кіл систем електропостачання.

Мета роботи – впровадження «комп'ютерного зору» для автоматизації процесу розрахунку електричних кіл системи електропостачання.

Методи дослідження. Дослідження виконано з використанням методів комп'ютерного зору, машинного навчання, теорії графів, методів аналізу електричних кіл, математичного моделювання.

Виконано розробку набору даних для навчання нейронної мережі, яку використано для автоматичного розпізнавання вершин графа електричного кола за його графічним зображенням. Розроблено сценарій аналізу графу електричного кола, який реалізує нейронну мережу та засоби комп'ютерного зору для витворення матриці з'єднання графа.

Результати роботи можуть стати основою для подальшого розвитку інтелектуальних технологій у електроенергетиці та вдосконалення систем автоматизованого проєктування електротехнічних об'єктів

Ключові слова: КОМП'ЮТЕРНИЙ ЗІР, НЕЙРОННА МЕРЕЖА, ГРАФИ, ЕЛЕКТРИЧНЕ КОЛО, РОЗПІЗНАВАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ, ТЕОРІЯ ГРАФІВ.

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ТА КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ	11
1.1 Основні концепції комп'ютерного зору	11
1.2 Теорія графів в електричних колах	13
1.3 Методи представлення електричних кіл у вигляді графів.....	17
1.4 Сучасні технології штучного інтелекту в аналізі електричних схем ...	21
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА СИСТЕМИ АНАЛІЗУ ГРАФІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ	25
2.1 Архітектура системи розпізнавання електричних схем.....	25
2.2 Методи попередньої обробки зображень електричних схем	29
2.3 Алгоритми виділення структурних елементів схеми.....	33
2.4 Формування та навчання нейронної мережі для розпізнавання елементів	38
2.5 Алгоритми перетворення схеми в граф	43
2.6 Методи визначення топології електричного кола	47
2.7 Формування матриці з'єднань.....	51
2.8 Застосування методу вузлових потенціалів	54
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ АНАЛІЗУ ГРАФІВ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА.....	57
3.1 Розробка набору даних для тестування системи	57
3.2 Аналіз точності розпізнавання елементів схеми	59
3.3 Оцінка ефективності перетворення схеми в граф.....	63
3.4 Верифікація результатів розрахунку параметрів електричного кола....	66
ВИСНОВКИ.....	70
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	72
ДОДАТОК А.....	76
ДОДАТОК Б	79

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Застосування комп'ютерного зору для аналізу графів електричних кіл систем електропостачання	Літ.	Арк.	Акрушів
Розроб.		Бакун В.К.					7	81
Курівник.						МОН України. УДУНТ Кафедра ІСЕ EE2321		
Реценз.								
Н. Контр.		Потапчук І.Ю.						
Затверд.								

ВСТУП

Актуальність. Сучасні системи електропостачання стрімко ускладнюються, адже до їх складу входять розподілені джерела енергії, інтелектуальні мережі (smart grids) та все більш автоматизовані процеси управління. Традиційні підходи до аналізу електричних схем часто не забезпечують необхідної оперативності й точності під час обробки великих обсягів даних. У цьому контексті технологія комп'ютерного зору відкриває нові можливості, дозволяючи комп'ютерам аналізувати й інтерпретувати зображення або графічні об'єкти. Комп'ютерний зір – це технологія, яка дозволяє комп'ютерам аналізувати та інтерпретувати зображення чи графічні об'єкти.

В електроенергетиці комп'ютерний зір може бути інструментом для автоматизації розпізнавання та аналізу електричних схем. Багато сучасних схем уже існують у цифровій формі й обробляються спеціалізованим програмним забезпеченням, таким як САD-системи. Проте використання комп'ютерного зору пропонує низку ключових переваг:

1. Автоматизація роботи з друкованими чи відсканованими схемами: навіть за наявності електронних версій схем у багатьох випадках використовуються друковані екземпляри або скан-копії старих схем, які важко обробити стандартними програмами. Комп'ютерний зір дозволяє автоматично розпізнавати елементи таких схем і конвертувати їх у цифровий формат.

2. Універсальність у роботі з різними форматами: формати електронних схем варіюються від САD-файлів до PDF-документів. Комп'ютерний зір спрощує процес зчитування та перетворення даних із цих форматів у стандартизовані моделі, які зручно аналізувати іншими програмними засобами.

Таким чином, технології комп'ютерного зору стають ключовим інструментом у модернізації аналізу електричних схем, особливо для завдань, пов'язаних із інтеграцією застарілих систем і роботи з різноманітними форматами даних.

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зв'язок роботи з науковими програмами. Робота відповідає науковим напрямкам роботи кафедри «Інтелектуальні системи енергопостачання» Українського державного університету науки і технологій і співпадає з науково-дослідною роботою «Математико-інформаційне забезпечення процесу моделювання режимів роботи систем електричного транспорту» (№ 0119U103838).

Мета роботи: впровадження «комп'ютерного зору» для автоматизації процесу розрахунку електричних кіл систем системи електропостачання.

Для досягнення мети поставленні наступні завдання:

1. Аналіз сучасних технологій «комп'ютерного зору» та методів його застосування
2. Створення програмного засобу, які забезпечує автоматизований аналіз графів електричних кіл та їхню конвертацію в цифрові математичні моделі.
3. Експериментальне випробування, розробленого програмного засобу.

Об'єкт дослідження – технологія комп'ютерного зору для аналізу графів електричних кіл систем електропостачання.

Предмет дослідження – методи комп'ютерного зору та нейронні мережі.

Методи дослідження: Дослідження виконано з використанням методів комп'ютерного зору, машинного навчання, теорії графів, методів аналізу електричних кіл, математичного моделювання.

Наукова новизна:

Отримав подальший розвиток метод комп'ютерного розрахунку електричних кіл, що відрізняється від відомих застосуванням нейронних мереж, та який дозволяє за графічним зображенням графу електричного кола побудувати матриці з'єднань вузлів графу.

Практична цінність:

1. Отримано програмний алгоритм для аналізу електричних кіл, що представленні у вигляді графу.

						02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
							9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

2. Розроблено набір даних для навчання нейронної мережі, що можливо викорчовувати для подальшого розвитку технології комп'ютерного зору в електроенергетиці.

Особистий внесок здобувача. Постановку мети та завдань дослідження виконано спільно з науковим керівником. Основні наукові положення, теоретичні дослідження, розрахунки, зіставлення та аналіз отриманих результатів, та формулювання висновків отримані здобувачем самостійно

Апробація результатів магістерської роботи.

Основні положення роботи і результати досліджень доповідалися здобувачем і обговорювалися на Всеукраїнській науково-технічній конференції студентів і молодих учених «НАУКА І СТАЛИЙ РОЗВИТОК ТРАНСПОРТУ 2024», 27 листопада 2024 року.

Публікації.

Скворцов Д., Земський Д. Інтелектуальний аналіз електричних схем на основі комп'ютерного зору. Всеукраїнська науково-технічна конференція студентів і молодих учених «НАУКА І СТАЛИЙ РОЗВИТОК ТРАНСПОРТУ 2024» : ЗБ. ТЕЗ, м. Дніпро, 27 листоп. 2024 р. Дніпро, 2024. С. 81,-82.

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ТА КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ

1.1 Основні концепції комп'ютерного зору

Комп'ютерний зір містить набір методів та алгоритмів, які надають можливість комп'ютерним системам отримувати, обробляти та аналізувати цифрові зображення. Ці методи базуються на математичних моделях, які перетворюють візуальну інформацію у цифрові дані, придатні для подальшої обробки та інтерпретації. При розробці систем комп'ютерного зору застосовуються різноманітні підходи до обробки зображень, включаючи фільтрацію, сегментацію, розпізнавання образів та класифікацію об'єктів [1].

Процес обробки зображень починається з отримання цифрового зображення через сенсори або камери. Далі відбувається попередня обробка, яка включає видалення шуму, корекцію освітлення та геометричних спотворень. Наступним етапом є сегментація зображення - розділення його на окремі області або об'єкти, що представляють інтерес для подальшого аналізу. Ця процедура дозволяє виділити структурні елементи зображення та підготувати їх для подальшої класифікації.

Розпізнавання образів становить ключовий елемент комп'ютерного зору, який передбачає виділення характерних ознак об'єктів та їх класифікацію на основі попередньо визначених моделей. Системи комп'ютерного зору використовують різні методи машинного навчання для створення моделей розпізнавання, які здатні адаптуватися до різноманітних умов та типів зображень. Ці моделі навчаються на великих наборах даних, що містять приклади об'єктів різних класів [2].

Сучасні системи комп'ютерного зору активно використовують згорткові нейронні мережі для вирішення завдань розпізнавання та класифікації. Ці мережі складаються з багатьох шарів нейронів, які послідовно обробляють вхідне зображення, виділяючи спочатку прості ознаки, такі як краї та кути, а потім

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

більш складні структури та об'єкти. Результатом роботи такої мережі є класифікація об'єкта або визначення його положення на зображенні.

Методи глибокого навчання дозволяють системам комп'ютерного зору досягати високої точності при розпізнаванні об'єктів на зображеннях. Процес навчання таких систем передбачає використання великих наборів розмічених даних, які містять приклади різних класів об'єктів. Під час навчання система автоматично налаштовує свої параметри для мінімізації помилки розпізнавання.

Системи комп'ютерного зору також застосовують методи геометричного аналізу для визначення просторових відношень між об'єктами на зображенні. Це включає визначення відстаней, кутів, розмірів та взаємного розташування об'єктів [3]. Такий аналіз базується на математичних моделях проєктивної геометрії та калібрування камери.

Обробка відеопослідовностей представляє окремий напрямок комп'ютерного зору, який додає часовий вимір до аналізу зображень. Методи відстеження об'єктів та аналізу руху дозволяють системам комп'ютерного зору розуміти динамічні сцени та прогнозувати поведінку об'єктів. Це знаходить застосування в системах відеоспостереження, керування роботами та автономних транспортних засобах [4].

Системи комп'ютерного зору використовують різні методи представлення та зберігання ознак об'єктів. Це можуть бути векторні описи, гістограми ознак, просторові пірамідальні представлення або інші структури даних, які дозволяють ефективно зберігати та порівнювати характеристики об'єктів. Вибір методу представлення залежить від конкретної задачі та вимог до швидкодії системи.

Процес прийняття рішень у системах комп'ютерного зору базується на статистичних методах та теорії прийняття рішень. Системи враховують невизначеність вимірювань та можливі помилки класифікації, використовуючи ймовірнісні моделі для оцінки достовірності результатів розпізнавання. Це дозволяє створювати надійні системи, здатні працювати в реальних умовах.

						02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
							12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

Оцінка продуктивності систем комп'ютерного зору передбачає використання різних метрик, таких як точність, повнота, F-міра та інші показники якості розпізнавання. Ці метрики дозволяють порівнювати різні алгоритми та системи, оцінювати їх ефективність на тестових наборах даних та вибирати оптимальні рішення для конкретних застосувань.

Розвиток систем комп'ютерного зору передбачає постійне вдосконалення алгоритмів та методів обробки зображень. Нові підходи, засновані на використанні генеративних моделей та самонавчання, дозволяють створювати більш гнучкі та адаптивні системи. Ці системи здатні навчатися на неразмічених даних та покращувати свою продуктивність з часом [5].

Оптимізація обчислювальних ресурсів становить окремий напрямок досліджень у галузі комп'ютерного зору. Розробляються методи зменшення обчислювальної складності алгоритмів, використання паралельних обчислень та спеціалізованих апаратних прискорювачів. Це дозволяє створювати системи, здатні працювати в режимі реального часу на мобільних пристроях та вбудованих системах.

1.2 Теорія графів в електричних колах

Теорія графів представляє математичний апарат для моделювання та аналізу електричних кіл, де структура електричної мережі відображається у вигляді графа. Вершини графа відповідають вузлам електричного кола, такими як точки з'єднання провідників, джерела живлення або навантаження. Ребра графа моделюють електричні компоненти, які з'єднують вузли: резистори, конденсатори, індуктивності та інші елементи. Математичне представлення електричного кола у вигляді графа дозволяє застосовувати потужні алгоритми теорії графів для аналізу властивостей мережі. Використання теорії графів спрощує розрахунки параметрів електричного кола та автоматизує процес аналізу складних схем. Зв'язність графа безпосередньо відображає фізичні

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

з'єднання між компонентами електричного кола. Структурний аналіз графа надає інформацію про топологію мережі та можливі шляхи протікання струму.

Основні характеристики застосування теорії графів для аналізу електричних кіл наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 - Відповідність елементів теорії графів компонентам електричних кіл

Елемент теорії графів	Компонент електричного кола	Математичне представлення
Вершина	Вузол схеми	Точка з'єднання провідників
Ребро	Гілка схеми	Електричний компонент між вузлами
Вага ребра	Параметр компонента	Опір, провідність, ємність, індуктивність
Орієнтоване ребро	Напрямок струму	Знак "+" або "-" у рівняннях
Цикл	Замкнутий контур	Система рівнянь за другим законом Кірхгофа
Дерево графа	Незалежні гілки	Базис системи рівнянь
Переріз графа	Переріз схеми	Система рівнянь за першим законом Кірхгофа

Як видно з таблиці 1.1, кожному елементу електричного кола можна поставити у відповідність певний елемент теорії графів, що дозволяє застосовувати потужний математичний апарат для аналізу схем.

Матричне представлення графа електричного кола включає кілька типів матриць, які описують різні характеристики мережі. Матриця інцидентності показує зв'язки між вузлами та гілками кола, де кожен рядок відповідає вузлу, а кожен стовпець - гілці. Матриця суміжності відображає безпосередні з'єднання між вузлами мережі, де елемент матриці дорівнює одиниці, якщо відповідні вузли з'єднані, і нулю в іншому випадку. Матриця опорів містить значення опорів гілок кола та використовується для розрахунку струмів та напруг. Матричні операції дозволяють ефективно виконувати розрахунки параметрів електричного кола. Матричний апарат теорії графів забезпечує компактне

представлення структури мережі [6]. Математичні властивості матриць використовуються для аналізу характеристик електричного кола. Ранг матриці інцидентності визначає кількість незалежних контурів у схемі.

Дерева графа електричного кола відіграють ключову роль у аналізі мережі. Кожне дерево графа представляє набір гілок, які з'єднують усі вузли без утворення циклів. Вибір дерева графа впливає на метод розрахунку параметрів електричного кола. Аналіз усіх можливих дерев графа дозволяє знайти оптимальні шляхи протікання струму. Кількість дерев графа характеризує складність електричного кола. Алгоритми пошуку дерев використовуються для визначення контурних струмів. Властивості дерев графа застосовуються при розробці методів аналізу електричних мереж.

Цикли у графі електричного кола відповідають замкнутим контурам, по яких може протікати струм. Визначення всіх незалежних циклів необхідне для застосування законів Кірхгофа. Цикломатичне число графа вказує на кількість незалежних рівнянь для струмів у контурах. Аналіз циклів дозволяє виявити можливі шляхи протікання струмів короткого замикання. Методи пошуку циклів базуються на алгоритмах обходу графа. Властивості циклів використовуються при розробці методів захисту електричних мереж. Цикли графа впливають на вибір методу розрахунку параметрів кола.

Потоки в графі електричного кола моделюють розподіл струмів по гілках мережі. Закони Кірхгофа для струмів формулюються у термінах збереження потоку у вершинах графа. Максимальний потік у графі відповідає пропускній здатності електричної мережі. Алгоритми пошуку максимального потоку використовуються для аналізу навантажувальної здатності мережі. Мінімальний переріз графа визначає найбільш критичні елементи схеми. Теорема про максимальний потік та мінімальний переріз застосовується при проектуванні електричних мереж. Розподіл потоків впливає на втрати потужності в електричному колі [7].

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Планарність графа електричного кола визначає можливість його зображення на площині без перетину ребер. Планарні графи спрощують візуальне представлення електричних схем. Алгоритми перевірки планарності використовуються при автоматичному розміщенні елементів схеми. Непланарність графа може вказувати на необхідність використання додаткових рівнів при проектуванні друкованих плат. Планарний граф можна розділити на грані, що спрощує аналіз топології схеми. Властивості планарних графів враховуються при розробці систем автоматизованого проектування. Планарність впливає на складність реалізації електричного кола.

Зв'язність графа електричного кола характеризує надійність електричної мережі. Компоненти сильної зв'язності відповідають частинам схеми, між якими існують резервні шляхи передачі енергії. Точки сполучення в графі вказують на критичні елементи, вихід з ладу яких може призвести до розділення мережі на незв'язні частини. Аналіз зв'язності використовується при проектуванні схем резервування. Методи підвищення зв'язності застосовуються для забезпечення надійності електропостачання. Алгоритми пошуку компонент зв'язності допомагають виявити вразливі місця в топології мережі. Ступінь зв'язності впливає на живучість електричної системи.

Кольорування графа електричного кола застосовується для розв'язання різних задач аналізу та оптимізації. Правильне розфарбування вершин графа використовується для розподілу навантажень по фазах у трифазних мережах. Кольорування ребер допомагає визначити оптимальне розташування елементів схеми на друкованій платі. Хроматичне число графа характеризує мінімальну кількість рівнів металізації при проектуванні інтегральних схем. Алгоритми кольорування застосовуються при розробці топології електричних з'єднань. Методи кольорування графів використовуються для мінімізації перехресних завод. Оптимальне розфарбування зменшує складність реалізації схеми [8].

Зважені графи електричних кіл враховують параметри елементів схеми. Ваги ребер можуть відповідати опорам, провідностям або іншим характеристикам

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

компонентів. Алгоритми пошуку найкоротших шляхів у зваженому графі використовуються для аналізу втрат потужності. Задача про мінімальне кістякове дерево застосовується при проектуванні оптимальних електричних мереж. Методи аналізу зважених графів дозволяють оцінювати ефективність різних конфігурацій схеми. Ваги ребер впливають на розподіл струмів у електричному колі. Оптимізація ваг використовується для мінімізації втрат енергії.

Спектральна теорія графів знаходить застосування при аналізі динамічних властивостей електричних кіл. Власні значення матриці Кірхгофа характеризують стійкість електричної системи. Спектральний радіус графа пов'язаний з швидкістю загасання перехідних процесів у колі. Методи спектрального аналізу використовуються для дослідження коливальних режимів. Власні вектори матриці провідностей визначають форми власних коливань системи. Спектральні характеристики графа впливають на частотні властивості кола. Спектральні методи застосовуються при синтезі фільтрів та коливальних систем.

1.3 Методи представлення електричних кіл у вигляді графів

Електричні кола трансформуються у графи через систематичний процес перетворення компонентів схеми у відповідні елементи графа. Кожен вузол електричного кола перетворюється у вершину графа з унікальним ідентифікатором. Електричні з'єднання між компонентами схеми представляються ребрами графа. Процес перетворення враховує специфічні характеристики електричних елементів, такі як опір, ємність та індуктивність. Напрямки струмів у колі відображаються орієнтованими ребрами графа. Параметри електричних компонентів зберігаються як атрибути відповідних елементів графа. Математичне представлення графа формується з використанням матричних структур даних.

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Методи представлення електричних кіл у вигляді графів та їх характеристики систематизовані в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 - Порівняльна характеристика методів представлення електричних кіл у вигляді графів

Метод представлення	Переваги	Обмеження	Область застосування
Матриця інцидентності	Простота формування, наочність структури	Велика розмірність для складних схем	Аналіз невеликих схем, навчальні задачі
Матриця провідностей	Компактність, зручність для розрахунків	Втрата інформації про топологію	Розрахунок режимів роботи
Списки суміжності	Економія пам'яті, швидкий пошук зв'язків	Складність модифікації	Аналіз великих схем
Дерево графа	Мінімальна надлишковість, простота обходу	Необхідність додаткової інформації про хорди	Формування системи рівнянь
Матриця контурів	Зручність для аналізу контурних струмів	Складність формування для великих схем	Розрахунок струморозподілу
Зважений граф	Повнота інформації про параметри	Складність візуалізації	Комплексний аналіз схем

Як показано в таблиці 1.2, кожен метод представлення електричних кіл у вигляді графів має свої характерні особливості, що визначають доцільність його застосування для вирішення конкретних задач аналізу.

Матриця інцидентності слугує першим етапом формалізації структури електричного кола. Рядки матриці відповідають вузлам схеми, а стовпці - гілкам між вузлами. Елементи матриці приймають значення +1, якщо струм входить у вузол, -1, якщо струм виходить з вузла, та 0, якщо гілка не з'єднана з вузлом. Розмірність матриці визначається кількістю вузлів та гілок схеми. Матриця інцидентності дозволяє застосовувати закони Кірхгофа для струмів. Структура

матриці відображає топологію електричного кола. Аналіз матриці виявляє наявність контурів та шляхів у схемі.

Матриця опорів формується на основі параметрів електричних компонентів схеми. Діагональні елементи матриці містять власні опори гілок. Недіагональні елементи відображають взаємні опори між гілками, що виникають через магнітні зв'язки. Розмірність матриці опорів відповідає кількості гілок схеми. Матриця опорів використовується для складання рівнянь за законом Ома. Структура матриці враховує типи електричних компонентів. Властивості матриці визначають характер процесів у колі.

Матриця провідностей є оберненою до матриці опорів та використовується в методі вузлових потенціалів. Елементи матриці розраховуються як величини, обернені до опорів відповідних гілок. Діагональні елементи дорівнюють сумі провідностей гілок, з'єднаних з вузлом. Недіагональні елементи приймають від'ємні значення провідностей гілок між відповідними вузлами. Матриця провідностей застосовується для визначення струморозподілу в схемі. Властивості матриці впливають на збіжність числових методів розв'язку. Структура матриці відображає характер з'єднань компонентів.

Граф електричного кола може бути представлений у вигляді списків суміжності. Для кожної вершини графа формується список інших вершин, з якими вона з'єднана ребрами. Списки суміжності займають менше пам'яті порівняно з матричним представленням для розріджених графів. Структура списків дозволяє ефективно знаходити всі з'єднання конкретного вузла. Модифікація списків суміжності виконується простіше, ніж зміна матричних структур [9]. Обхід графа по списках суміжності реалізується природним чином. Представлення у вигляді списків спрощує алгоритми пошуку шляхів. Аналіз списків виявляє компоненти зв'язності графа.

Дерево графа електричного кола обирається за спеціальними алгоритмами. Пошук починається з довільної вершини та продовжується включенням нових ребер, що не утворюють циклів. Процес формування дерева враховує ваги ребер,

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

що відповідають опорам гілок. Вибір оптимального дерева мінімізує втрати потужності в схемі. Структура дерева визначає метод розрахунку струмів у колі. Доповнення дерева хордами утворює базис незалежних контурів. Властивості дерева впливають на ефективність аналізу схеми.

Незалежні контури графа формуються на основі обраного дерева. Кожна хорда, додана до дерева, утворює унікальний контур. Кількість незалежних контурів дорівнює різниці між загальною кількістю ребер та кількістю ребер дерева. Напрями обходу контурів визначаються орієнтацією ребер графа. Система незалежних контурів використовується для складання рівнянь за законами Кірхгофа. Аналіз контурів дозволяє визначити контурні струми. Властивості системи контурів впливають на розв'язок рівнянь стану кола.

Перетини графа електричного кола відповідають множинам ребер, видалення яких розділяє граф на незв'язні частини. Мінімальні перетини визначають найбільш вразливі місця схеми. Аналіз перетинів використовується для оцінки надійності електричної мережі. Структура перетинів впливає на розподіл струмів у колі. Перетини графа застосовуються при проектуванні систем захисту. Властивості перетинів визначають живучість електричної системи. Оптимізація перетинів підвищує надійність схеми.

Зважений орієнтований граф найбільш повно відображає властивості електричного кола. Ваги ребер відповідають параметрам електричних компонентів. Орієнтація ребер вказує напрямки протікання струмів. Структура зваженого графа використовується для аналізу втрат потужності. Оптимізація ваг дозволяє мінімізувати втрати енергії. Властивості орієнтованого графа визначають характер процесів у колі. Аналіз зваженого графа виявляє оптимальні режими роботи схеми [10].

Граф схеми заміщення будується з урахуванням еквівалентних перетворень електричних кіл. Послідовні та паралельні з'єднання компонентів відображаються відповідними конфігураціями ребер. Перетворення зірки в трикутник змінює локальну структуру графа. Еквівалентні перетворення

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

спрощують аналіз складних схем. Граф схеми заміщення зберігає електричні характеристики вихідного кола. Властивості графа схеми заміщення визначають методи розрахунку параметрів. Оптимізація структури графа зменшує обчислювальну складність аналізу.

1.4 Сучасні технології штучного інтелекту в аналізі електричних схем

Технології машинного навчання трансформують процес аналізу електричних схем через автоматизацію розпізнавання компонентів та структури кіл. Нейронні мережі здатні визначати типи електричних елементів на основі їх графічного зображення. Алгоритми глибокого навчання виконують сегментацію зображень схем для виділення окремих компонентів. Методи комп'ютерного зору дозволяють автоматично визначати з'єднання між елементами схеми. Системи розпізнавання образів ідентифікують стандартні позначення електричних компонентів. Технології обробки зображень забезпечують попередню підготовку схем для аналізу. Автоматизовані системи створюють цифрові моделі схем на основі їх зображень.

Згорткові нейронні мережі спеціалізуються на обробці двовимірних зображень електричних схем. Багатошарова архітектура мереж забезпечує виділення характерних ознак компонентів. Операції згортки виявляють локальні особливості зображення на різних рівнях деталізації. Пулінг-шари зменшують розмірність даних та забезпечують інваріантність до масштабу. Повнозв'язні шари виконують фінальну класифікацію розпізнаних елементів. Механізми уваги фокусуються на найбільш значущих областях зображення. Навчання мереж відбувається на великих наборах розмічених схем [11].

Методи семантичної сегментації розділяють зображення схеми на змістовні області. Алгоритми виділяють границі між різними компонентами схеми. Кожному пікселю зображення присвоюється мітка відповідного класу елементів. Морфологічні операції покращують якість сегментації та видаляють шуми. Графові моделі враховують просторові зв'язки між сегментами. Методи

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

постобробки усувають артефакти сегментації та уточнюють границі. Результати сегментації використовуються для побудови топологічної моделі схеми.

Системи детекції об'єктів локалізують та класифікують електричні компоненти на схемі. Алгоритми генерують набір потенційних областей інтересу. Класифікатори визначають тип компонента в кожній виділеній області. Методи регресії уточнюють положення та розміри компонентів. Механізми подавлення немаксимумів усувають надлишкові детекції. Системи відстежують взаємне розташування компонентів. Результати детекції формують структурний опис схеми.

Рекурентні нейронні мережі аналізують послідовності компонентів у схемах. Довга короткочасна пам'ять дозволяє виявляти довгострокові залежності. Механізми вентильного рекурентного блоку контролюють потік інформації. Двонаправлені архітектури враховують контекст з обох напрямків послідовності. Методи кодування перетворюють структурні елементи у векторні представлення. Декодери генерують опис топології схеми природною мовою. Механізми уваги виділяють ключові елементи послідовності.

Генеративні моделі створюють синтетичні набори даних для навчання систем розпізнавання. Варіаційні автоенкодера вивчають розподіл реальних схем. Генеративно-змагальні мережі синтезують реалістичні зображення компонентів. Умовні генеративні моделі враховують специфікації електричних параметрів. Методи аугментації даних збільшують різноманітність навчальних прикладів. Системи валідації перевіряють коректність згенерованих схем [12]. Синтетичні дані доповнюють реальні набори при навчанні.

Методи переносу навчання адаптують попередньо навчені моделі для аналізу специфічних типів схем. Тонке налаштування модифікує параметри мережі для нової задачі. Заморожування шарів зберігає загальні ознаки попереднього навчання. Адаптивні методи враховують особливості цільового домену. Регуляризація запобігає перенавчанню на малих наборах даних. Валідація

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

визначає оптимальну стратегію переносу. Методи дистиляції знань передають досвід між моделями.

Методи інтерпретації пояснюють рішення моделей при аналізі схем. Карти активації візуалізують області уваги нейронної мережі. Методи зворотного поширення визначають вклад вхідних пікселів. Сурогатні моделі апроксимують поведінку складних систем. Локальні пояснення обґрунтовують конкретні передбачення. Глобальні інтерпретації розкривають загальні патерни роботи. Методи атрибуції виявляють ключові ознаки розпізнавання.

Ансамблеві методи комбінують результати кількох моделей для підвищення надійності. Методи бегінгу створюють різноманітні версії навчальних даних. Випадкові ліси будують набір незалежних класифікаторів. Бустинг послідовно покращує якість передбачень. Стекінг об'єднує прогнози моделей різної архітектури. Зважене усереднення враховує надійність окремих моделей. Методи відбору формують оптимальний ансамбль.

Мультимодальні системи поєднують аналіз зображень схем з текстовими описами та метаданими. Крос-модальне навчання встановлює відповідності між різними представленнями. Методи злиття об'єднують ознаки з різних модальностей. Механізми уваги координують обробку різних типів даних. Спільні вкладення створюють єдиний простір представлень [13]. Системи запитів виконують пошук по мультимодальному контенту. Методи вирівнювання синхронізують різні потоки інформації.

Розглянемо відомі публікації присвячені аналогічним задачам. Стаття [36] присвячена розробці алгоритму для автоматичного розпізнавання ручних електричних схем і їх реконструкції в цифровий формат, готовий для моделювання. Автори використовують YOLOv5 для виявлення компонентів схеми, перетворення Хафа для ідентифікації вузлів і кластеризацію методом k-середніх для точного визначення терміналів. Запропонований підхід досягає високої точності розпізнавання компонентів (mAP 98.2%) і забезпечує реконструкцію схем із точністю 80% за середній час обробки 0.33 секунди.

						02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
							23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

Метод працює з варіаціями почерку та освітлення, що робить його придатним для реального часу, але він обмежений схемами, де кожна гілка містить лише один компонент. У перспективі пропонується розширення набору даних і використання глибокого навчання для повної автоматизації процесу.

Стаття [37] присвячена створенню та опису загальнодоступного набору даних, який містить зображення рукописних електричних схем. Набір даних включає 1152 зображення 144 схем, намальованих 12 авторами з використанням різних інструментів і поверхонь, а також 48 563 анотації, що охоплюють 45 класів електричних компонентів. У статті детально описані характеристики даних, методи їх анотації та допоміжні класи для спрощення автоматичного витягування графів схем. Надаються результати базового тестування із застосуванням Faster R-CNN, що досягає mAP 52%. Автори наголошують на важливості таких даних для розробки та навчання алгоритмів машинного навчання, орієнтованих на обробку рукописних електричних схем.

Жодна з робіт не розглядає питання адаптації алгоритмів для подальшого математичного аналізу.

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА СИСТЕМИ АНАЛІЗУ ГРАФІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ

2.1 Архітектура системи розпізнавання електричних схем

Архітектура системи розпізнавання електричних схем базується на модульному принципі організації компонентів. Система складається з підсистеми введення зображень, яка забезпечує отримання цифрових копій схем. Модуль попередньої обробки виконує нормалізацію та покращення якості вхідних зображень. Підсистема сегментації розділяє зображення на окремі компоненти та зв'язки між ними. Блок розпізнавання елементів ідентифікує типи компонентів схеми. Модуль аналізу топології визначає структуру з'єднань між елементами. Система включає базу даних стандартних елементів та їх характеристик. Компоненти системи взаємодіють через стандартизовані інтерфейси обміну даними.

Основні компоненти архітектури системи розпізнавання електричних схем та їх функціональне призначення наведено в таблиці 2.1.

Аналіз таблиці 2.1 показує, що кожен компонент системи виконує специфічні функції обробки даних, забезпечуючи послідовне перетворення вхідного зображення схеми у структурований опис її елементів та топології.

Підсистема введення зображень реалізує різні методи отримання цифрових копій схем. Сканування друкованих схем забезпечує високу якість вхідних даних. Фотографування схем мобільними пристроями надає гнучкість при роботі. Захоплення відеопотоку дозволяє обробляти схеми в реальному часі. Векторні формати забезпечують точне представлення геометрії схем. Растрові формати зберігають деталі зображення компонентів. Модуль підтримує різні роздільні здатності та кольорові простори. Система валідації перевіряє якість вхідних даних.

Підсистема попередньої обробки застосовує методи покращення якості зображень. Фільтрація шумів підвищує чіткість елементів схеми. Корекція

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

освітлення вирівнює яскравість різних областей. Геометрична корекція усуває спотворення перспективи. Бінаризація виділяє контури компонентів схеми. Морфологічні операції покращують якість контурів [14]. Нормалізація масштабу приводить розміри до стандартних значень. Система адаптивно налаштовує параметри обробки.

Таблиця 2.1 - Компоненти архітектури системи розпізнавання електричних схем

Компонент системи	Функціональне призначення	Вхідні дані	Вихідні дані
Підсистема введення зображень	Отримання цифрових копій схем	Фотографії, скани схем	Нормалізовані цифрові зображення
Модуль попередньої обробки	Покращення якості зображень	Цифрові зображення	Оброблені зображення
Підсистема сегментації	Виділення окремих елементів	Оброблені зображення	Сегментовані компоненти
Блок розпізнавання	Класифікація компонентів	Сегментовані елементи	Типи компонентів
Модуль аналізу топології	Визначення структури з'єднань	Розпізнані елементи	Граф схеми
База даних елементів	Зберігання еталонних даних	Параметри компонентів	Довідкова інформація
Система візуалізації	Відображення результатів	Граф схеми	Візуальне представлення

Модуль сегментації виділяє окремі компоненти на зображенні схеми. Методи кластеризації групують пікселі за їх характеристиками. Алгоритми виділення контурів визначають границі елементів. Методи водорозділу розділяють з'єднані компоненти. Графові алгоритми враховують топологічні зв'язки. Системи класифікації визначають типи сегментів. Валідація результатів перевіряє коректність розділення. Модуль формує структурований опис компонентів.

Підсистема розпізнавання елементів класифікує виділені компоненти схеми. Згорткові нейронні мережі виділяють характерні ознаки елементів. Алгоритми порівняння з шаблонами ідентифікують стандартні компоненти. Методи машинного навчання адаптуються до різних стилів позначень. Система враховує контекст розташування елементів. Модуль оцінює достовірність розпізнавання. Механізми уточнення покращують результати класифікації. База знань зберігає параметри типових елементів.

Модуль аналізу топології визначає структуру електричної схеми. Алгоритми трасування виявляють з'єднання між компонентами. Методи графового аналізу будують модель схеми. Система перевіряє коректність з'єднань елементів. Модуль визначає типи електричних вузлів. Аналіз ієрархії виділяє функціональні блоки. Валідація топології знаходить помилки з'єднань. Система формує повний опис структури схеми.

База даних стандартних елементів містить бібліотеку компонентів. Кожен елемент має унікальний ідентифікатор та опис параметрів. Система підтримує різні системи позначень елементів. База даних зберігає геометричні характеристики символів. Модуль пошуку знаходить найбільш подібні елементи. Система класифікації групує компоненти за типами. Механізми оновлення додають нові елементи до бази. База знань забезпечує перевірку обмежень [15].

Система зберігання результатів організує ієрархічне представлення даних. Модуль експорту підтримує різні формати файлів. Система версій відслідковує зміни в схемах. База даних зберігає історію обробки зображень. Механізми пошуку забезпечують швидкий доступ до даних. Система архівації створює резервні копії. Модуль обміну даними підтримує стандартні протоколи. Валідація гарантує цілісність збережених даних.

Модуль керування процесом координує роботу всіх підсистем. Планувальник визначає послідовність обробки даних. Система моніторингу відслідковує стан компонентів. Механізми синхронізації забезпечують узгоджену роботу. Обробка

						02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
							27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

помилки підвищує надійність системи. Модуль оптимізації покращує продуктивність. Система логування зберігає інформацію про процеси. Інтерфейс керування надає доступ до параметрів.

Підсистема візуалізації відображає результати розпізнавання схем. Модуль рендерингу створює графічне представлення даних. Система анотацій додає позначки та пояснення. Механізми масштабування керують рівнем деталізації. Інтерактивні елементи забезпечують навігацію по схемі. Модуль експорту зберігає візуалізації у різних форматах. Система підтримує різні стилі відображення. Валідація перевіряє коректність візуалізації.

Модуль розширення функціональності забезпечує масштабування системи. Архітектура підтримує підключення нових компонентів. Система плагінів розширює можливості обробки. Механізми конфігурації налаштовують нові модулі. Валідація перевіряє сумісність розширень. Система безпеки контролює доступ до функцій. Модуль оновлення забезпечує актуальність компонентів. Інтерфейс розробки спрощує створення розширень.

Підсистема тестування перевіряє якість роботи компонентів. Модуль автоматичного тестування виконує перевірки функцій. Система валідації контролює коректність результатів. Механізми профілювання оцінюють продуктивність. База тестових даних містить еталонні приклади. Модуль звітування документує результати тестів. Система регресійного тестування знаходить помилки. Валідація забезпечує повноту перевірок.

Модуль оптимізації покращує ефективність роботи системи. Механізми кешування прискорюють доступ до даних. Система балансування розподіляє навантаження. Паралельна обробка підвищує продуктивність. Модуль моніторингу відслідковує використання ресурсів. Алгоритми оптимізації покращують швидкодію. Система адаптації налаштовує параметри роботи. Валідація перевіряє ефективність оптимізації [16].

Підсистема безпеки забезпечує захист даних та функцій. Модуль автентифікації контролює доступ користувачів. Система авторизації керує

						02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			28

правами на функції. Механізми шифрування захищають конфіденційні дані. Модуль аудиту відслідковує дії користувачів. Система резервного копіювання зберігає дані. Валідація перевіряє безпеку операцій. Інтерфейс керування налаштовує параметри захисту.

Модуль документації описує структуру та функції системи. Система генерації створює технічну документацію. Механізми локалізації підтримують різні мови. База знань містить приклади використання. Модуль пошуку знаходить потрібну інформацію. Система версій відслідковує зміни в документації. Валідація перевіряє актуальність описів. Інтерфейс перегляду забезпечує доступ до документів.

2.2 Методи попередньої обробки зображень електричних схем

Попередня обробка зображень електричних схем становить фундаментальний етап у процесі їх автоматизованого аналізу. Системи обробки застосовують комплекс методів для покращення якості вхідних даних. Фільтрація шумів забезпечує чіткість контурів елементів схеми. Корекція геометричних спотворень відновлює правильні пропорції зображення. Нормалізація яскравості та контрастності підвищує розбірливість деталей. Бінаризація перетворює кольорове зображення у чорно-біле представлення. Морфологічні операції покращують якість контурів компонентів.

Методи попередньої обробки зображень електричних схем та їх характеристики систематизовані в таблиці 2.2.

Як видно з таблиці 2.2, кожен метод попередньої обробки характеризується специфічними параметрами налаштування та обмеженнями, що визначають його ефективність при обробці зображень електричних схем.

Фільтрація шумів використовує різні типи цифрових фільтрів. Медіанна фільтрація ефективно видаляє імпульсний шум на зображенні. Гаусівське згладжування зменшує вплив випадкових спотворень. Білатеральна фільтрація зберігає чіткість границь при видаленні шуму. Адаптивні фільтри враховують

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

локальні характеристики зображення. Частотна фільтрація видаляє періодичні завади. Анізотропна дифузія зберігає структуру контурів при згладжуванні. Вейвлет-фільтрація забезпечує багаторівневе очищення зображення.

Таблиця 2.2 - Характеристика методів попередньої обробки зображень електричних схем

Метод обробки	Призначення	Параметри налаштування	Результат обробки	Обмеження
Медіанна фільтрація	Видалення імпульсного шуму	Розмір вікна фільтра	Очищене зображення	Розмиття дрібних деталей
Гаусівське розмиття	Зменшення високочастотного шуму	Радіус розмиття, σ	Згладжене зображення	Втрата чіткості границь
Адаптивна бінаризація	Виділення контурів елементів	Розмір вікна, поріг	Бінарне зображення	Чутливість до освітлення
Морфологічні операції	Покращення форми об'єктів	Розмір структурного елемента	Покращені контури	Спотворення тонких ліній
Геометрична корекція	Усунення спотворень перспективи	Параметри трансформації	Вирівняне зображення	Потреба в опорних точках
Нормалізація яскравості	Вирівнювання освітленості	Параметри гістограми	Контрастне зображення	Підсилення шуму
Видалення фону	Виділення елементів схеми	Поріг сегментації	Очищене зображення	Втрата слабких елементів

Геометрична корекція усуває спотворення перспективи та лінз. Алгоритми знаходження маркерів визначають опорні точки для трансформації. Методи проєктивних перетворень відновлюють правильну геометрію схеми. Калібрування камери компенсує спотворення об'єктива. Афінні перетворення виправляють масштаб та орієнтацію [17]. Методи інтерполяції забезпечують

якісне перетворення координат. Валідація результатів перевіряє точність геометричної корекції.

Нормалізація яскравості вирівнює освітленість різних частин схеми. Еквалізація гістограми покращує контраст зображення. Адаптивна корекція враховує локальні варіації яскравості. Методи ретінекс моделюють сприйняття людського зору. Мультимасштабна обробка забезпечує збалансоване покращення контрасту. Колірна корекція відновлює природні кольори компонентів. Гамма-корекція оптимізує динамічний діапазон зображення.

Бінаризація перетворює напівтонове зображення у бінарне представлення. Методи глобальної порогової обробки використовують єдиний поріг для всього зображення. Адаптивна бінаризація враховує локальні зміни яскравості. Кластеризація розділяє пікселі на класи фону та об'єктів. Методи Оцу автоматично визначають оптимальний поріг. Морфологічна обробка покращує результати бінаризації. Валідація забезпечує якість розділення об'єктів та фону.

Морфологічна обробка модифікує форму бінарних об'єктів. Операції ерозії та дилатації змінюють розміри об'єктів. Відкриття та закриття видаляють дрібні деталі та заповнюють пропуски. Морфологічний градієнт виділяє контури об'єктів. Скелетизація знаходить серединні лінії елементів. Утончення ліній покращує якість контурів. Реконструкція відновлює початкову форму об'єктів.

Виділення контурів знаходить границі об'єктів на зображенні. Оператори градієнту обчислюють локальні зміни яскравості. Детектор Кенні забезпечує оптимальне виявлення границь. Методи активних контурів уточнюють положення границь. Векторизація перетворює растрові контури у векторний формат. Апроксимація спрощує форму контурів. Валідація перевіряє неперервність та замкненість контурів [18].

Сегментація розділяє зображення на області інтересу. Методи нарощування областей групують пікселі за схожістю. Водорозділ розділяє об'єкти по лініях вододілу. Графові алгоритми знаходять оптимальні границі областей. Текстурна

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

сегментація враховує структуру поверхонь. Кластеризація групує пікселі за кольором та яскравістю. Валідація перевіряє коректність розділення областей.

Видалення фону відокремлює елементи схеми від заднього плану. Методи порогової обробки виділяють об'єкти за яскравістю. Статистичні моделі описують розподіл кольорів фону. Алгоритми GrabCut виконують інтерактивну сегментацію. Глибокі нейронні мережі навчаються розпізнавати фон. Постобробка усуває артефакти видалення фону. Валідація забезпечує чистоту виділення об'єктів.

Корекція орієнтації вирівнює положення схеми на зображенні. Перетворення Хафа знаходить основні напрямки ліній. Методи моментів визначають головні осі об'єктів. Афінні перетворення повертають зображення до стандартного положення. Інтерполяція забезпечує якісне обертання. Валідація перевіряє правильність орієнтації. Постобробка усуває артефакти повороту.

Масштабування приводить розміри схеми до стандартних значень. Методи інтерполяції зберігають якість при зміні розмірів. Адаптивне масштабування враховує роздільну здатність деталей. Пірамідальне представлення забезпечує багаторівневий аналіз. Векторне масштабування зберігає чіткість ліній. Валідація контролює точність масштабування. Постобробка покращує якість результатів.

Корекція перспективи відновлює ортогональну проекцію схеми. Детектори ліній знаходять лінії сходу на зображенні. Гомографія перетворює перспективне зображення у вид зверху. Калібрування визначає параметри проєктивного перетворення. Інтерполяція забезпечує якісну трансформацію. Валідація перевіряє правильність корекції. Постобробка усуває артефакти перетворення.

Покращення роздільної здатності підвищує деталізацію зображення. Методи суперроздільності відновлюють дрібні деталі. Нейронні мережі навчаються реконструювати високочастотну інформацію. Багатокадрова обробка комбінує серію зображень. Адаптивна інтерполяція зберігає чіткість контурів. Валідація

									Арк.
									32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

оцінює якість підвищення роздільності. Постобробка оптимізує результати реконструкції.

Корекція кольору відновлює природні кольори компонентів схеми. Баланс білого нормалізує колірну температуру освітлення. Колірні простори оптимізують представлення кольорів. Калібрування забезпечує точну передачу кольорів. Гамма-корекція оптимізує контраст кольорових областей. Валідація перевіряє правильність кольоропередачі. Постобробка покращує природність кольорів.

Видалення артефактів усуває дефекти цифрового зображення. Методи деблокінгу прибирають блочні артефакти стиснення. Алгоритми дерінгінгу усувають ореоли навколо контурів. Фільтрація подавляє шуми квантування кольору. Адаптивна обробка зберігає деталі зображення. Валідація контролює якість видалення артефактів. Постобробка оптимізує результати корекції [19].

Оцінка якості вимірює параметри обробленого зображення. Об'єктивні метрики оцінюють спотворення сигналу. Структурна подібність визначає збереження деталей. Перцептивні моделі враховують особливості зорового сприйняття. Експертна оцінка забезпечує суб'єктивний контроль якості. Валідація перевіряє достовірність оцінок. Адаптивна обробка оптимізує параметри за результатами оцінки.

2.3 Алгоритми виділення структурних елементів схеми

Виділення структурних елементів електричних схем базується на послідовному застосуванні методів обробки цифрових зображень. Алгоритми сегментації розділяють зображення на окремі компоненти схеми. Методи виділення контурів визначають границі електричних елементів. Системи розпізнавання класифікують знайдені об'єкти за типами компонентів. Алгоритми трасування визначають з'єднання між елементами схеми. Методи векторизації перетворюють растрові зображення у векторний формат. Аналіз топології будує граф структури електричної схеми.

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

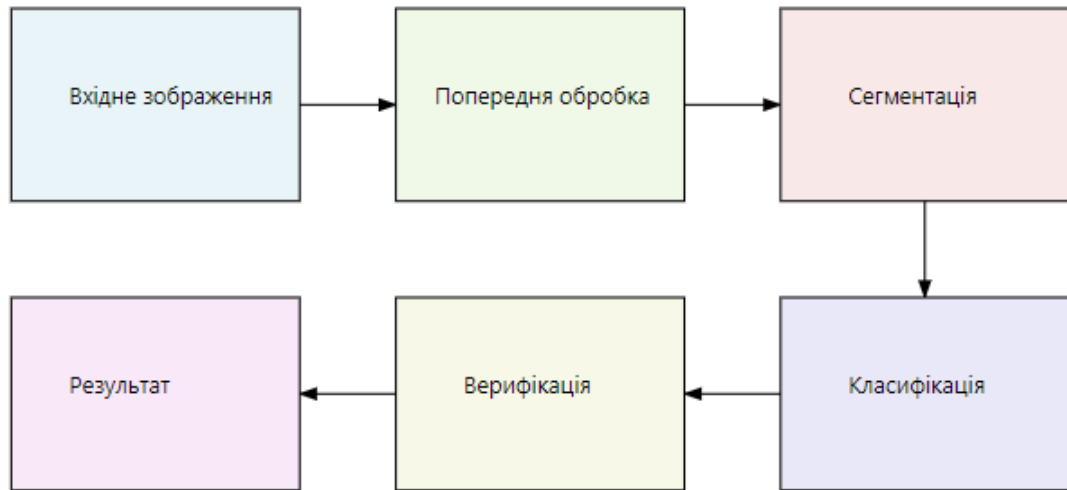


Рисунок 2.1 - Процес виділення структурних елементів схеми

Процес виділення структурних елементів електричної схеми включає послідовність етапів обробки зображення, як показано на рисунку 2.1. Кожен етап виконує специфічні перетворення, що забезпечують поступове виділення та розпізнавання компонентів схеми.

Методи виділення контурів застосовують різні оператори градієнту. Фільтр Собеля обчислює перші похідні яскравості зображення. Оператор Превітта використовує маски для визначення границь. Лапласіан знаходить перепади яскравості через другі похідні. Детектор Кенні забезпечує оптимальне виявлення контурів. Методи активних контурів уточнюють положення границь. Морфологічний градієнт виділяє контури бінарних об'єктів.

Сегментація зображення розділяє його на однорідні області. Методи кластеризації групують пікселі за їх характеристиками. Алгоритм водорозділу розділяє зображення по лініях вододілу. Методи нарощування областей об'єднують сусідні пікселі. Графові алгоритми знаходять оптимальні границі сегментів. Текстура сегментація враховує локальні структури. Методи злиття та розділення областей формують ієрархію сегментів.

Класифікація компонентів визначає типи виділених елементів схеми. Методи порівняння з шаблонами знаходять стандартні позначення. Алгоритми машинного навчання розпізнають класи компонентів. Згорткові нейронні мережі

виділяють ознаки елементів. Статистичні класифікатори використовують набори характерних ознак. Методи глибокого навчання автоматично формують ієрархію ознак. Системи валідації перевіряють коректність класифікації.

Трасування провідників знаходить електричні з'єднання між компонентами. Алгоритми скелетизації виділяють осьові лінії провідників. Методи утоншення зберігають топологію з'єднань. Векторизація перетворює растрові лінії у векторні криві. Графові алгоритми будують модель електричних зв'єднань. Методи спрощення оптимізують траси провідників. Системи перевірки знаходять помилки з'єднань.

Векторизація перетворює растрові зображення у векторний формат. Методи апроксимації наближають контури поліномами. Алгоритми розпізнавання примітивів знаходять базові фігури. Сплайнова інтерполяція створює гладкі криві. Методи оптимізації мінімізують кількість вузлів. Системи спрощення зменшують складність векторів. Перевірка точності контролює якість векторизації.

Аналіз топології будує структурну модель електричної схеми. Алгоритми побудови графа відображають з'єднання компонентів. Методи пошуку циклів знаходять замкнуті контури. Аналіз зв'язності визначає структуру підсхем. Алгоритми розфарбування оптимізують розташування елементів. Методи планаризації мінімізують перетин провідників. Системи перевірки валідують коректність топології [20].

Виділення текстових позначень знаходить написи на схемі. Методи сегментації відокремлюють текст від графіки. Алгоритми розпізнавання символів класифікують знаки. Аналіз розташування групує пов'язані написи. Методи корекції виправляють помилки розпізнавання. Системи нормалізації стандартизують позначення. Перевірка узгодженості контролює відповідність позначень.

Розпізнавання розмірів визначає габарити компонентів. Алгоритми калібрування встановлюють масштаб зображення. Методи вимірювання

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обчислюють геометричні параметри. Аналіз пропорцій перевіряє співвідношення розмірів. Системи нормалізації приводять розміри до стандартів. Методи валідації контролюють точність вимірювань. Перевірка обмежень знаходить порушення допусків.

Виділення функціональних блоків групує пов'язані компоненти. Алгоритми кластеризації знаходять щільно з'єднані підсхеми. Методи декомпозиції розділяють схему на модулі. Аналіз ієрархії будує структуру вкладених блоків. Системи візуалізації відображають структуру схеми. Методи спрощення згортають внутрішні деталі блоків. Перевірка інтерфейсів контролює з'єднання між блоками.

Розпізнавання елементів живлення визначає джерела енергії. Алгоритми класифікації знаходять позначення живлення. Методи трасування виділяють шини живлення. Аналіз топології перевіряє розподіл живлення. Системи верифікації контролюють підключення живлення. Методи оптимізації покращують розводку шин. Перевірка навантажень оцінює розподіл струмів.

Виділення заземлення знаходить точки нульового потенціалу. Алгоритми розпізнавання ідентифікують символи заземлення. Методи трасування визначають підключення до землі. Аналіз топології перевіряє схему заземлення. Системи верифікації контролюють коректність заземлення. Методи оптимізації покращують розводку землі. Перевірка з'єднань знаходить помилки заземлення.

Розпізнавання пасивних компонентів визначає резистори, конденсатори та котушки. Алгоритми класифікації ідентифікують типи компонентів. Методи вимірювання визначають номінали елементів. Аналіз орієнтації встановлює положення компонентів. Системи верифікації перевіряють правильність позначень. Методи групування об'єднують однотипні елементи. Перевірка обмежень контролює допустимі значення.

Виділення напівпровідників знаходить діоди, транзистори та мікросхеми. Алгоритми розпізнавання класифікують типи приладів. Методи аналізу визначають параметри компонентів. Системи перевірки контролюють

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

полярність підключення. Аналіз корпусів визначає типи корпусів компонентів. Методи групування об'єднують однотипні прилади. Верифікація перевіряє коректність позначень.

Розпізнавання комутаційних елементів визначає перемикачі та роз'єми. Алгоритми класифікації ідентифікують типи комутації. Методи аналізу визначають стан контактів. Системи перевірки контролюють правильність з'єднань. Аналіз позначень встановлює нумерацію контактів. Методи групування об'єднують пов'язані елементи. Верифікація перевіряє логіку комутації.

Виділення вимірювальних приладів знаходить індикатори та датчики. Алгоритми розпізнавання класифікують типи приладів. Методи аналізу визначають діапазони вимірювань. Системи перевірки контролюють правильність підключення. Аналіз позначень встановлює одиниці вимірювання. Методи групування об'єднують однотипні прилади. Верифікація перевіряє коректність показань.

Розпізнавання елементів захисту визначає запобіжники та реле. Алгоритми класифікації ідентифікують типи захисту. Методи аналізу визначають параметри спрацювання. Системи перевірки контролюють правильність підключення. Аналіз позначень встановлює номінали захисту. Методи групування об'єднують однотипні елементи. Верифікація перевіряє селективність захисту [21].

Виділення спеціальних елементів знаходить нестандартні компоненти. Алгоритми розпізнавання класифікують унікальні позначення. Методи аналізу визначають функції елементів. Системи перевірки контролюють правильність підключення. Аналіз документації встановлює призначення компонентів. Методи групування об'єднують функціонально пов'язані елементи. Верифікація перевіряє коректність застосування.

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.4 Формування та навчання нейронної мережі для розпізнавання елементів

Проектування архітектури нейронної мережі починається з визначення структури вхідних та вихідних даних. Вхідний шар приймає зображення електричних схем у вигляді матриці пікселів. Розмірність вхідного шару залежить від роздільної здатності зображень схем. Кольорові зображення подаються через три канали RGB формату. Вихідний шар відповідає кількості класів електричних компонентів. Структура прихованих шарів визначається складністю задачі розпізнавання. Оптимізація архітектури проводиться експериментальним шляхом.

Основні характеристики методів навчання нейронної мережі для розпізнавання елементів електричних схем наведені в таблиці 2.3.

Аналіз даних таблиці 2.3 демонструє, що метод Adam забезпечує найвищу точність розпізнавання при відносно невеликому обсязі навчальної вибірки та низьких часових витратах на навчання.

Згорткові шари виділяють характерні ознаки зображень компонентів. Фільтри згортки навчаються виявляти базові геометричні примітиви. Кількість фільтрів збільшується з глибиною мережі для виділення складних ознак. Розмір ядра згортки обирається відповідно до масштабу деталей схеми. Крок згортки визначає ступінь перекриття областей аналізу. Функція активації ReLU забезпечує нелінійність перетворень. Пакетна нормалізація стабілізує процес навчання.

Пулінг-шари зменшують розмірність карт ознак мережі. Максимальний пулінг зберігає найбільш виражені активації нейронів. Розмір вікна пулінгу визначає ступінь стиснення даних. Крок пулінгу контролює перекриття областей агрегації. Середній пулінг усереднює значення активацій в околі. Глобальний пулінг формує компактне представлення ознак. Адаптивний пулінг забезпечує фіксований розмір виходу.

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

Таблиця 2.3 – Порівняльні характеристики методів навчання нейронної мережі

Метод навчання	Точність розпізнавання, %	Час навчання	Обсяг навчальної вибірки	Обчислювальна складність	Стійкість до шуму
Стандартний градієнтний спуск	87-90	Високий	>10000 прикладів	$O(n^2)$	Середня
Стохастичний градієнтний спуск	85-89	Середній	>5000 прикладів	$O(n)$	Висока
Адаптивний градієнт (AdaGrad)	89-92	Низький	>7000 прикладів	$O(n \log n)$	Середня
Моментум	88-91	Середній	>8000 прикладів	$O(n)$	Висока
Adam	91-94	Низький	>6000 прикладів	$O(n)$	Дуже висока
RMSprop	90-93	Низький	>7000 прикладів	$O(n)$	Висока
Nesterov	89-92	Середній	>8000 прикладів	$O(n)$	Середня

Повнозв'язні шари виконують фінальну класифікацію компонентів. Кількість нейронів зменшується до розмірності вихідного шару. Dropout запобігає перенавчанню мережі під час тренування. Функція активації softmax формує розподіл ймовірностей класів. Вихідний шар містить нейрони для кожного типу компонентів. Лінійні перетворення комбінують ознаки для класифікації. Нормалізація входів стабілізує роботу шару [22].

Залишкові з'єднання покращують потік градієнтів через глибоку мережу. Обхідні шляхи з'єднують шари через додаткові зв'язки. Елементарне додавання комбінує основний та обхідний потоки. Батч-нормалізація стабілізує розподіл активацій. Залишкові блоки прискорюють збіжність навчання. Щільні з'єднання

забезпечують повторне використання ознак. Каскадні з'єднання збагачують представлення даних.

Механізми уваги фокусують мережу на релевантних областях зображення. Просторова увага виділяє інформативні регіони схеми. Канальна увага зважає на значимість карт ознак. Самоувага моделює взаємодію між елементами. Мультиголова увага комбінує різні аспекти аналізу. Гнучка увага адаптується до вхідних даних. Каскадна увага будує ієрархію фокусів.

Функції втрат направляють процес навчання мережі. Крос-ентропія оцінює якість класифікації компонентів. Фокальна втрата приділяє більше уваги складним прикладам. Регуляризація запобігає перенавчанню моделі. Зважування класів балансує незбалансований набір даних. Додаткові втрати покращують проміжні представлення. Комбіновані втрати оптимізують різні аспекти роботи.

Методи оптимізації налаштовують параметри нейронної мережі. Стохастичний градієнтний спуск мінімізує функцію втрат. Адаптивні методи автоматично регулюють швидкість навчання. Момент прискорює збіжність оптимізації. Планувальник швидкості навчання контролює процес тренування. Рання зупинка запобігає перенавчанню мережі. Градієнтне відсічення стабілізує навчання.

Аугментація даних розширює навчальну вибірку синтетичними прикладами. Геометричні перетворення змінюють положення компонентів. Колірні перетворення варіюють параметри зображення. Додавання шуму підвищує стійкість мережі. Випадкове маскування тренує розпізнавання частин. Змішування даних створює нові комбінації. Синтетична генерація доповнює реальні приклади.

Регуляризація запобігає перенавчанню нейронної мережі. L1 та L2 регуляризація обмежують ваги мережі. Dropout випадково відключає нейрони при навчанні. Шум у вагах додає стохастичність моделі. Рання зупинка контролює складність мережі. Обрізка мережі видаляє надлишкові зв'язки. Квантування зменшує точність параметрів.

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Валідація контролює якість навчання мережі. Крос-валідація оцінює узагальнюючу здатність. Метрики точності вимірюють якість класифікації. Матриця помилок аналізує типи неправильних передбачень. Криві навчання відстежують динаміку тренування. Візуалізація активацій пояснює роботу мережі. Тестування на незалежній вибірці верифікує модель.

Методи інтерпретації пояснюють рішення нейронної мережі. Карти активації візуалізують фокус уваги мережі. Градієнтний аналіз визначає вклад вхідних пікселів. Пертурбаційний аналіз оцінює чутливість моделі. Сурогатні моделі апроксимують локальну поведінку. Концептуальні вектори виявляють семантичні ознаки. Атрибуція градієнтів розкриває процес прийняття рішень.

Ансамблі моделей підвищують надійність розпізнавання. Баггінг створює набір різноманітних класифікаторів. Бустинг послідовно покращує результати розпізнавання. Стекінг комбінує передбачення різних моделей. Усереднення прогнозів зменшує дисперсію помилок. Голосування підвищує стійкість класифікації. Зважене усереднення оптимізує комбінацію моделей.

Трансферне навчання використовує попередньо навчені моделі. Тонке налаштування адаптує мережу до нової задачі. Заморожування шарів зберігає загальні ознаки. Дистиляція знань передає досвід між моделями. Доменна адаптація враховує специфіку даних. Мультизадачне навчання покращує узагальнення. Інкрементне навчання оновлює знання моделі.

Квантування зменшує обчислювальну складність мережі. Зниження точності параметрів економить пам'ять. Кластеризація ваг зменшує кількість унікальних значень. Проріджування видаляє незначущі зв'язки. Факторизація шарів спрощує обчислення. Апаратна оптимізація прискорює виконання. Компресія моделі зберігає точність при стисненні.

Розподілене навчання прискорює тренування великих моделей. Паралельна обробка даних розподіляє обчислення. Синхронізація градієнтів узгоджує оновлення параметрів. Розподіл моделі оптимізує використання пам'яті. Балансування навантаження підвищує ефективність. Відмовостійкість

						02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
							41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

забезпечує надійність тренування. Масштабування прискорює збіжність навчання [23].

Онлайн навчання адаптує мережу до нових даних. Інкрементна обробка оновлює параметри моделі. Безперервне навчання відстежує зміни в даних. Активне навчання оптимізує розмітку прикладів. Адаптивні методи регулюють швидкість оновлення. Забування видаляє застарілі знання. Валідація контролює дрейф концептів.

Мультимодальне навчання комбінує різні типи вхідних даних. Злиття ознак об'єднує різні представлення. Крос-модальне навчання встановлює відповідності між модальностями. Спільні вкладення створюють єдиний простір ознак. Механізми уваги координують обробку даних. Ієрархічне злиття комбінує рівні абстракції. Валідація перевіряє узгодженість модальностей.

Метанавчання оптимізує процес навчання мережі. Автоматичний пошук архітектури знаходить оптимальну структуру. Налаштування гіперпараметрів покращує продуктивність. Генерація політик навчання адаптує тренування. Перенос стратегій узагальнює досвід оптимізації. Мета-градієнти спрямовують пошук рішень. Еволюційні методи досліджують простір архітектур.

Системи пояснення візуалізують роботу мережі. Карти уваги показують фокус обробки даних. Виділення ознак розкриває внутрішні представлення. Генерація пояснень формує текстові описи. Контрприкладі демонструють граничні випадки. Концептуальний аналіз виявляє високорівневі поняття. Інтерактивна візуалізація досліджує поведінку моделі.

Тестування стійкості перевіряє надійність мережі. Атаки досліджують вразливості моделі. Змагальне навчання підвищує стійкість класифікації. Сертифікована стійкість гарантує коректність роботи. Верифікація властивостей перевіряє обмеження. Формальні методи доводять коректність. Тестування граничних випадків виявляє слабкі місця.

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.5 Алгоритми перетворення схеми в граф

Процес перетворення електричної схеми в граф розпочинається з аналізу структури вхідного зображення. Розпізнані елементи схеми перетворюються у вершини графа з унікальними ідентифікаторами. Електричні з'єднання між компонентами представляються ребрами графа. Напрямки струмів визначають орієнтацію ребер утвореного графа. Параметри електричних компонентів зберігаються як атрибути відповідних вершин та ребер. Топологічні характеристики схеми відображаються у структурі графа. Математичне представлення графа формується з використанням матричних структур даних.

На рисунку 3.2 представлено алгоритм перетворення електричної схеми в граф, який включає послідовність етапів від аналізу вхідної схеми до формування матричного представлення графа.

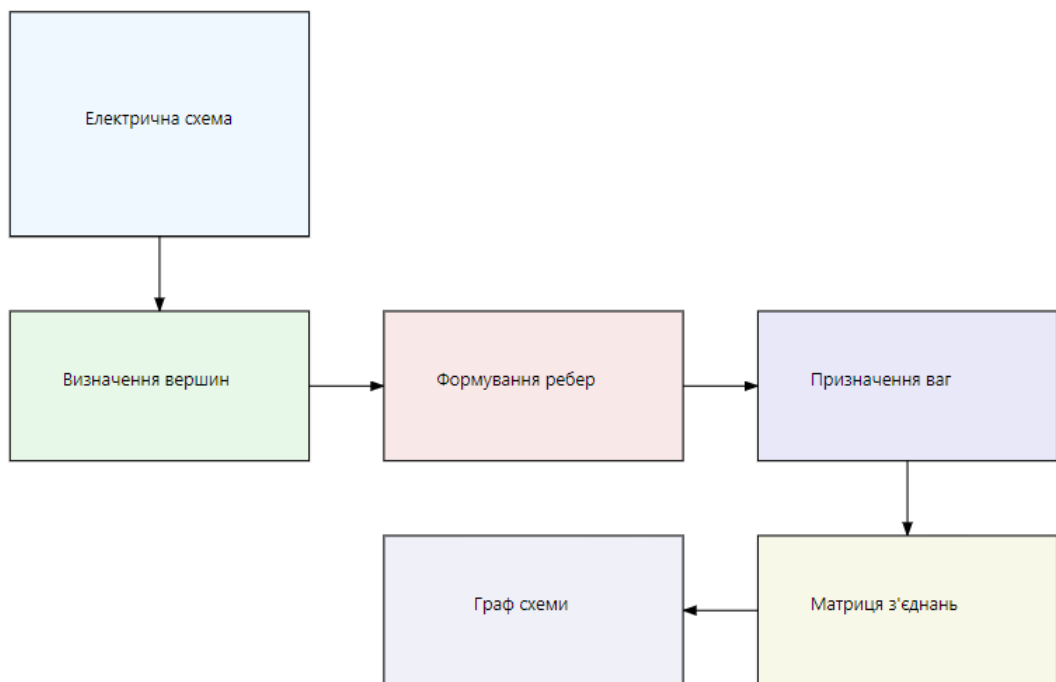


Рисунок. 2.2 - Алгоритм перетворення електричної схеми в граф

Первинна обробка зображення схеми виділяє основні структурні елементи. Методи сегментації розділяють зображення на окремі компоненти. Алгоритми розпізнавання класифікують типи електричних елементів. Системи трасування

визначають шляхи електричних з'єднань. Векторизація перетворює растрові елементи у векторний формат. Аналіз геометрії встановлює просторові відношення між компонентами. Валідація результатів перевіряє коректність виділення елементів.

Визначення вершин графа базується на результатах розпізнавання компонентів. Кожному унікальному електричному елементу присвоюється ідентифікатор вершини. Параметри компонентів зберігаються як атрибути відповідних вершин. Позиції елементів на схемі відображаються координатами вершин. Типи компонентів визначають класи вершин графа. Ієрархічні зв'язки формують структуру підграфів. Система міток забезпечує унікальну ідентифікацію вершин.

Формування ребер графа відображає електричні з'єднання схеми. Алгоритми трасування визначають шляхи протікання струму. Напрямки струмів задають орієнтацію ребер графа. Параметри провідників зберігаються як ваги ребер. Множинні з'єднання представляються паралельними ребрами. Розгалуження створюють додаткові вершини у графі. Перевірка зв'язності контролює коректність з'єднань [24, с. 215-220].

Матричне представлення графа використовує кілька типів матриць. Матриця інцидентності описує зв'язки між вершинами та ребрами. Матриця суміжності відображає безпосередні з'єднання вершин. Матриця ваг містить параметри ребер графа. Матриця Кірхгофа формується для аналізу електричних параметрів. Матричні операції забезпечують ефективну обробку даних. Розріджені матриці оптимізують використання пам'яті. Валідація перевіряє коректність матричного представлення.

Топологічний аналіз графа виявляє структурні особливості схеми. Алгоритми пошуку циклів знаходять замкнуті контури. Методи визначення компонент зв'язності виділяють підсхеми. Аналіз досяжності перевіряє шляхи між вершинами. Пошук мостів виявляє критичні з'єднання. Визначення точок

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

сполучення знаходить вузлові елементи. Алгоритми планарності перевіряють можливість плоского представлення.

Оптимізація структури графа спрощує подальший аналіз схеми. Методи редукції видаляють надлишкові вершини та ребра. Алгоритми стиснення об'єднують послідовні елементи. Спрощення паралельних з'єднань зменшує кількість ребер. Видалення транзитних вершин оптимізує топологію. Збереження електричних параметрів гарантує еквівалентність перетворень. Валідація контролює коректність оптимізації.

Декомпозиція графа розділяє схему на функціональні блоки. Методи кластеризації групують пов'язані компоненти. Алгоритми пошуку спільнот виділяють підсхеми. Ієрархічна декомпозиція будує дерево блоків. Аналіз інтерфейсів визначає зв'язки між блоками. Методи абстракції приховують внутрішню структуру. Верифікація перевіряє коректність розбиття.

Аналіз шляхів визначає можливі маршрути протікання струму. Алгоритми пошуку найкоротших шляхів мінімізують втрати. Методи визначення максимального потоку оцінюють пропускну здатність. Пошук альтернативних шляхів забезпечує резервування. Аналіз вузьких місць виявляє обмеження схеми. Оптимізація шляхів покращує характеристики мережі. Валідація перевіряє допустимість маршрутів.

Аналіз надійності оцінює стійкість схеми до відмов. Методи перебору визначають критичні елементи. Алгоритми оцінки зв'язності моделюють відмови компонентів. Пошук резервних шляхів забезпечує живучість схеми. Аналіз каскадних відмов оцінює поширення несправностей. Методи підвищення надійності оптимізують топологію. Верифікація перевіряє стійкість системи.

Розрахунок параметрів використовує матричні методи аналізу. Формування системи рівнянь базується на законах Кірхгофа. Методи розв'язання враховують особливості топології. Аналіз чутливості оцінює вплив параметрів. Оптимізація режимів мінімізує втрати потужності. Розрахунок напруг визначає потенціали вузлів. Перевірка обмежень контролює допустимість режимів.

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Візуалізація графа забезпечує наочне представлення схеми. Алгоритми розміщення оптимізують положення вершин. Методи маршрутизації прокладають ребра без перетинів. Системи анотацій додають позначення елементів. Інтерактивні елементи забезпечують навігацію. Масштабування дозволяє досліджувати деталі. Експорт зберігає результати візуалізації.

Перетворення типів графів адаптує представлення для різних задач. Методи проєкції створюють спеціалізовані подання. Алгоритми дуалізації будують еквівалентні графи. Перетворення меж змінює структуру графа. Збереження інваріантів гарантує коректність. Оптимізація структури спрощує аналіз. Валідація перевіряє еквівалентність перетворень.

Аналіз симетрії виявляє регулярні структури схеми. Методи пошуку автоморфізмів знаходять симетричні елементи. Алгоритми розбиття виділяють подібні підграфи. Аналіз орбіт визначає групи еквівалентності. Використання симетрії оптимізує обчислення. Методи спрощення використовують регулярність. Верифікація контролює збереження симетрії.

Інкрементальні алгоритми оновлюють граф при зміні схеми. Методи локального оновлення модифікують частини графа. Перебудова зв'язків зберігає цілісність структури. Валідація змін перевіряє коректність модифікацій. Оптимізація оновлень мінімізує обчислення. Відстеження версій зберігає історію змін. Система відкату повертає попередні стани.

Паралельна обробка прискорює аналіз великих графів. Методи декомпозиції розділяють обчислення. Алгоритми синхронізації узгоджують результати. Балансування навантаження оптимізує ресурси. Розподілене зберігання масштабує дані. Паралельні операції прискорюють розрахунки. Валідація забезпечує узгодженість результатів [25].

Методи стиснення зменшують обсяг представлення графа. Алгоритми кодування оптимізують структури даних. Квантування значень зменшує точність параметрів. Видалення надлишковості економить пам'ять. Ієрархічне

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

стиснення використовує рівні деталізації. Адаптивні методи враховують локальні особливості. Валідація контролює втрати інформації.

Системи індексації прискорюють пошук у графі. Методи просторової індексації оптимізують геометричні запити. Топологічні індекси прискорюють аналіз зв'язності. Індексція атрибутів пришвидшує пошук елементів. Ієрархічні індекси масштабують структури даних. Оновлення індексів підтримує актуальність. Валідація перевіряє коректність індексації.

2.6 Методи визначення топології електричного кола

Методи визначення топології електричного кола базуються на аналізі взаємного розташування компонентів схеми. Структурний аналіз виявляє зв'язки між елементами кола. Алгоритми трасування визначають шляхи протікання струму. Методи графового аналізу будують математичну модель схеми. Системи класифікації ідентифікують типи з'єднань. Валідація результатів перевіряє коректність визначення топології. Формалізація структури створює основу для подальших розрахунків.

Аналіз компонентного складу визначає елементну базу схеми. Методи розпізнавання класифікують типи електричних компонентів. Системи параметризації визначають характеристики елементів. Алгоритми групування об'єднують однотипні компоненти. База даних зберігає інформацію про стандартні елементи. Ідентифікація компонентів формує вузли графа схеми. Перевірка параметрів контролює допустимі значення.

Визначення електричних вузлів виявляє точки з'єднання компонентів. Алгоритми кластеризації групують з'єднані контакти. Методи аналізу зв'язності перевіряють цілісність вузлів. Системи нумерації присвоюють унікальні ідентифікатори. Ієрархія вузлів відображає структуру схеми. Валідація з'єднань контролює правильність контактів. Оптимізація зменшує кількість вузлів [26].

Трасування провідників визначає шляхи електричних з'єднань. Алгоритми скелетизації виділяють осьові лінії провідників. Методи векторизації створюють

						02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
							47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

математичний опис траєкторій. Системи спрощення оптимізують форму провідників. Перевірка перетинів виявляє конфліктні місця. Аналіз довжини оцінює параметри з'єднань. Валідація забезпечує коректність трасування.

Визначення контурів знаходить замкнуті шляхи струму. Методи пошуку циклів аналізують структуру графа. Алгоритми оптимізації мінімізують кількість контурів. Системи класифікації визначають типи контурів. Аналіз незалежності виділяє базисні контури. Перевірка повноти контролює охоплення схеми. Матричний опис формалізує систему контурів.

Аналіз розрізів виявляє критичні перетини схеми. Методи пошуку мінімальних перетинів оцінюють надійність. Алгоритми декомпозиції розділяють схему на частини. Системи оптимізації покращують структуру розрізів. Перевірка зв'язності контролює цілісність схеми. Аналіз потоків оцінює пропускну здатність. Валідація забезпечує коректність розрізів.

Визначення ієрархії компонентів будує структуру підсхем. Методи кластеризації групує пов'язані елементи. Алгоритми виділення модулів формують функціональні блоки. Системи абстракції приховують внутрішні деталі. Аналіз інтерфейсів визначає зв'язки між рівнями. Перевірка інкапсуляції контролює незалежність блоків. Оптимізація ієрархії спрощує структуру.

Формування матриці з'єднань описує топологію схеми. Методи індексації нумерують вузли та гілки. Алгоритми заповнення відображають зв'язки елементів. Системи оптимізації мінімізують розмір матриці. Перевірка симетрії виявляє особливості структури. Аналіз розрідженості оцінює ефективність представлення. Валідація контролює коректність матриці.

Аналіз планарності перевіряє можливість плоского представлення. Методи тестування виявляють заборонені підграфи. Алгоритми планаризації модифікують топологію схеми. Системи розміщення оптимізують положення елементів. Перевірка перетинів контролює плоску укладку. Аналіз граней визначає області схеми. Валідація забезпечує коректність планаризації.

						02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
							48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

Визначення симетрії виявляє регулярні структури. Методи пошуку автоморфізмів знаходять подібні частини. Алгоритми групування формують класи еквівалентності. Системи спрощення використовують симетрію схеми. Перевірка інваріантів контролює збереження властивостей. Аналіз орбіт визначає групи елементів. Оптимізація використовує симетрію структури.

Аналіз зв'язності оцінює надійність топології. Методи пошуку компонент визначають підсхеми. Алгоритми оцінки стійкості моделюють відмови. Системи резервування забезпечують живучість схеми. Перевірка шляхів контролює доступність елементів. Аналіз критичних точок виявляє вразливості. Оптимізація підвищує надійність структури.

Визначення потоків моделює розподіл струмів. Методи пошуку максимального потоку оцінюють пропускну здатність. Алгоритми балансування оптимізують навантаження. Системи аналізу виявляють вузькі місця. Перевірка обмежень контролює допустимі значення. Аналіз втрат оцінює ефективність розподілу. Оптимізація мінімізує втрати потужності.

Формування еквівалентних схем спрощує аналіз. Методи перетворення зберігають електричні параметри. Алгоритми згортання об'єднують послідовні елементи. Системи заміщення створюють спрощені моделі. Перевірка еквівалентності контролює коректність перетворень. Аналіз характеристик оцінює точність моделей. Оптимізація зменшує складність схеми.

Визначення паралельних структур виявляє незалежні підсхеми. Методи декомпозиції розділяють схему на частини. Алгоритми розпаралелювання оптимізують обчислення. Системи синхронізації координують паралельну обробку. Перевірка узгодженості контролює результати. Аналіз прискорення оцінює ефективність. Оптимізація підвищує продуктивність розрахунків.

Аналіз масштабованості оцінює можливості розширення схеми. Методи оцінки складності прогнозують обмеження. Алгоритми модифікації адаптують структуру. Системи версійності відстежують зміни топології. Перевірка

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

сумісності контролює розширення. Аналіз обмежень визначає межі масштабування. Оптимізація забезпечує гнучкість структури [27].

Формування графічного представлення візуалізує топологію. Методи розміщення оптимізують положення елементів. Алгоритми трасування прокладають з'єднання. Системи анотації додають позначення компонентів. Перевірка читабельності контролює якість відображення. Аналіз естетики оцінює візуальне сприйняття. Оптимізація покращує наочність схеми.

Визначення метрик оцінює характеристики топології. Методи вимірювання обчислюють показники складності. Алгоритми порівняння зіставляють різні структури. Системи ранжування оцінюють якість топології. Перевірка критеріїв контролює оптимальність рішень. Аналіз тенденцій виявляє закономірності розвитку. Оптимізація покращує показники схеми.

Аналіз модульності оцінює структурну організацію. Методи декомпозиції виділяють незалежні модулі. Алгоритми групування формують функціональні блоки. Системи інтерфейсів визначають взаємодію модулів. Перевірка зв'язності контролює цілісність структури. Аналіз складності оцінює модульну організацію. Оптимізація покращує модульність схеми.

Формування тестових сценаріїв перевіряє коректність топології. Методи верифікації контролюють правила проектування. Алгоритми валідації знаходять помилки структури. Системи тестування моделюють режими роботи. Перевірка обмежень контролює допустимі параметри. Аналіз результатів оцінює надійність схеми. Оптимізація підвищує якість перевірки.

Визначення відмовостійкості оцінює живучість структури. Методи резервування забезпечують надійність схеми. Алгоритми реконфігурації адаптують топологію. Системи діагностики виявляють несправності. Перевірка доступності контролює працездатність елементів. Аналіз сценаріїв моделює аварійні режими. Оптимізація підвищує стійкість схеми.

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.7 Формування матриці з'єднань

Матриця з'єднань електричного кола представляє собою математичне відображення топологічної структури схеми. Кожен рядок матриці відповідає вузлу схеми з унікальним ідентифікатором. Стовпці матриці представляють гілки між вузлами електричного кола. Елементи матриці приймають значення +1, якщо струм входить у вузол, -1, якщо струм виходить з вузла, та 0, якщо гілка не з'єднана з вузлом. Розмірність матриці визначається кількістю вузлів та гілок схеми. Структура матриці відображає закони Кірхгофа для струмів.

Формування переліку вузлів становить перший етап побудови матриці з'єднань. Алгоритми аналізу виявляють всі точки з'єднання елементів схеми. Система нумерації присвоює унікальні ідентифікатори кожному вузлу. Методи оптимізації мінімізують кількість вузлів схеми. База даних зберігає інформацію про параметри вузлів. Перевірка зв'язності контролює цілісність структури мережі. Валідація забезпечує коректність нумерації вузлів.

Визначення гілок схеми створює список електричних з'єднань між вузлами. Алгоритми трасування виявляють шляхи протікання струму. Методи класифікації визначають типи гілок кола. Система параметризації зберігає характеристики елементів. Оптимізація зменшує кількість надлишкових гілок. Перевірка параметрів контролює допустимі значення. База даних містить інформацію про стандартні елементи.

Заповнення матриці відображає топологічні зв'язки схеми. Методи аналізу визначають напрямки струмів у гілках. Алгоритми оптимізації забезпечують ефективне зберігання розріджених даних. Система перевірки контролює коректність заповнення елементів. Валідація підтверджує відповідність законам Кірхгофа. Матричні операції формують базис для подальших розрахунків. Структура даних забезпечує ефективний доступ до елементів.

Аналіз рангу матриці визначає кількість незалежних рівнянь. Методи лінійної алгебри обчислюють базисні вектори системи. Алгоритми оптимізації знаходять оптимальний базис рівнянь. Перевірка лінійної незалежності контролює повноту

						02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
							51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

системи. Розрахунок рангу оцінює розмірність простору рішень. Валідація забезпечує коректність математичної моделі. Оптимізація спрощує подальші обчислення.

Визначення контурних струмів використовує властивості матриці з'єднань. Методи пошуку циклів знаходять замкнуті шляхи струму. Алгоритми оптимізації мінімізують кількість незалежних контурів. Система рівнянь формується на основі законів Кірхгофа. Перевірка незалежності контролює базис контурів. Матричні перетворення спрощують систему рівнянь. Розрахунок струмів визначає режими роботи схеми.

Аналіз вузлових потенціалів базується на матриці провідностей. Методи формування матриці враховують параметри елементів. Алгоритми розв'язання оптимізують обчислювальні процеси. Система рівнянь описує баланс струмів у вузлах. Перевірка збіжності контролює процес розрахунку. Валідація результатів забезпечує точність рішення. Оптимізація прискорює процес обчислень.

Декомпозиція матриці спрощує аналіз великих схем. Методи розбиття виділяють незалежні підсистеми. Алгоритми оптимізації мінімізують зв'язки між блоками. Система координації забезпечує узгодження результатів. Перевірка еквівалентності контролює точність декомпозиції. Матричні операції зберігають структуру зв'язків. Паралельні обчислення прискорюють розрахунки.

Аналіз симетрії матриці виявляє особливості структури схеми. Методи пошуку автоморфізмів знаходять подібні підсхеми. Алгоритми групування формують класи еквівалентності. Система спрощення використовує властивості симетрії. Перевірка інваріантів контролює збереження структури. Оптимізація обчислень враховує симетрію. Матричні перетворення зберігають симетричні властивості.

Модифікація матриці відображає зміни в структурі схеми. Методи оновлення забезпечують актуальність даних. Алгоритми перебудови зберігають цілісність структури. Система версій відстежує історію змін. Перевірка коректності

						02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			52

контролює модифікації. Оптимізація мінімізує обсяг оновлень. Валідація забезпечує узгодженість даних.

Стиснення матриці зменшує обсяг збереження даних. Методи кодування оптимізують представлення розріджених матриць. Алгоритми квантування зменшують точність значень. Система архівації створює компактне представлення. Перевірка втрат контролює точність стиснення. Оптимізація балансує розмір та точність. Відновлення даних забезпечує роботу з матрицею.

Візуалізація матриці забезпечує наочне представлення структури. Методи відображення використовують кольорове кодування. Алгоритми масштабування дозволяють досліджувати деталі. Система анотацій додає пояснювальні елементи. Перевірка читабельності контролює якість відображення. Інтерактивні елементи забезпечують навігацію. Експорт зберігає результати візуалізації.

Аналіз чутливості оцінює вплив змін параметрів. Методи збурень моделюють модифікації структури. Алгоритми оцінки визначають критичні елементи. Система аналізу прогнозує наслідки змін. Перевірка стійкості контролює межі чутливості. Оптимізація підвищує робастність схеми. Матричні методи забезпечують ефективні розрахунки.

Формування тестових сценаріїв перевіряє коректність матриці. Методи верифікації контролюють властивості структури. Алгоритми валідації знаходять помилки в даних. Система тестування моделює різні режими. Перевірка обмежень контролює допустимі значення. Аналіз результатів оцінює надійність представлення. Оптимізація покращує якість перевірки.

Документування матриці забезпечує збереження метаданих. Методи опису фіксують структурні особливості. Алгоритми генерації створюють технічну документацію. Система версій відстежує зміни опису. Перевірка повноти контролює охоплення даних. База знань зберігає досвід використання. Оптимізація покращує доступність інформації.

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.8 Застосування методу вузлових потенціалів

Метод вузлових потенціалів представляє собою математичний апарат для аналізу електричних кіл. Система рівнянь формується на основі законів Кірхгофа для струмів. Потенціали вузлів схеми виступають основними змінними методу. Струми в гілках визначаються через різниці потенціалів та провідності елементів. Матриця провідностей описує топологічну структуру електричного кола. Кількість незалежних рівнянь дорівнює кількості вузлів мінус один. Потенціал опорного вузла приймається рівним нулю.

Формування системи рівнянь починається з аналізу структури схеми. Алгоритми обходу визначають всі вузли електричного кола. Методи нумерації присвоюють унікальні індекси вузлам. Розрахунок провідностей враховує параметри елементів схеми. Система координат фіксує опорний вузол мережі. Матричні операції будують систему лінійних рівнянь. Перевірка розмірності контролює повноту системи.

Матриця провідностей відображає зв'язки між вузлами схеми. Діагональні елементи містять суми провідностей гілок, підключених до вузла. Недіагональні елементи дорівнюють взятим з протилежним знаком провідностям гілок між відповідними вузлами. Структура матриці забезпечує виконання закону збереження струму. Розріджений формат оптимізує зберігання даних. Симетричність матриці спрощує обчислення. Перевірка коректності контролює формування матриці.

Вектор струмів джерел формується на основі параметрів схеми. Методи аналізу визначають струми, що втікають у вузли. Алгоритми розрахунку враховують параметри джерел струму. Система рівнянь включає струми залежних джерел. Перетворення еквівалентних схем спрощує представлення джерел. Матричні операції формують вектор правих частин. Валідація забезпечує коректність розрахунків.

Розв'язання системи рівнянь визначає потенціали вузлів схеми. Методи матричної алгебри знаходять розв'язок системи. Алгоритми оптимізації

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

підвищують ефективність обчислень. Ітераційні методи застосовуються для великих систем. Прямі методи забезпечують точне рішення. Збіжність процесу контролюється системою перевірки. Валідація результатів підтверджує коректність розв'язку.

Розрахунок струмів виконується на основі знайдених потенціалів вузлів. Методи обчислення використовують закон Ома для гілок схеми. Алгоритми розрахунку враховують нелінійні елементи кола. Система перевірки контролює баланс струмів у вузлах. Матричні операції оптимізують масові обчислення. Паралельна обробка прискорює розрахунки для великих схем. Валідація результатів забезпечує точність визначення струмів.

Аналіз потужностей оцінює енергетичні характеристики схеми. Методи розрахунку визначають активні та реактивні потужності. Алгоритми оптимізації мінімізують втрати в елементах. Система балансу перевіряє розподіл потужностей. Матричні обчислення прискорюють аналіз режимів. Перевірка обмежень контролює допустимі навантаження. Валідація забезпечує коректність енергетичних показників.

Розрахунок чутливості оцінює вплив параметрів на режим схеми. Методи збурень аналізують зміни потенціалів та струмів. Алгоритми оптимізації визначають критичні параметри. Система аналізу прогнозує поведінку схеми при відхиленнях. Матричні методи забезпечують ефективні обчислення. Перевірка стійкості контролює межі чутливості. Валідація підтверджує достовірність результатів.

Аналіз граничних режимів визначає допустимі умови роботи. Методи розрахунку моделюють екстремальні ситуації. Алгоритми оптимізації знаходять критичні точки. Система обмежень контролює параметри елементів. Матричні операції прискорюють пошук границь. Перевірка надійності оцінює запаси стійкості. Валідація забезпечує безпеку експлуатації.

Декомпозиція схеми спрощує аналіз складних систем. Методи розбиття виділяють незалежні підсхеми. Алгоритми координації узгоджують граничні

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

умови. Система рівнянь формується для кожної підсхеми. Матричні перетворення зберігають структуру зв'язків. Паралельні обчислення підвищують ефективність розрахунків. Валідація контролює точність декомпозиції.

Оптимізація режимів покращує характеристики схеми. Методи пошуку знаходять оптимальні параметри. Алгоритми оптимізації мінімізують цільову функцію. Система обмежень контролює допустимість рішень. Матричні операції прискорюють процес оптимізації. Перевірка результатів оцінює досягнуті показники. Валідація підтверджує коректність оптимізації [28].

Моделювання динаміки аналізує перехідні процеси. Методи чисельного інтегрування розв'язують диференціальні рівняння. Алгоритми адаптації керують кроком інтегрування. Система контролю забезпечує стійкість розрахунків. Матричні методи оптимізують обчислення. Перевірка точності оцінює похибки моделювання. Валідація підтверджує адекватність результатів.

Статистичний аналіз оцінює ймовірнісні характеристики режимів. Методи моделювання генерують випадкові параметри. Алгоритми обробки формують статистичні оцінки. Система аналізу визначає довірчі інтервали. Матричні операції прискорюють масові розрахунки. Перевірка достовірності контролює результати аналізу. Валідація забезпечує надійність висновків.

Документування результатів зберігає дані розрахунків. Методи візуалізації створюють наочне представлення. Алгоритми генерації формують технічні звіти. Система архівації забезпечує довготривале зберігання. Матричний формат оптимізує структуру даних. Перевірка повноти контролює охоплення інформації. Валідація гарантує цілісність документації.

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ АНАЛІЗУ ГРАФІВ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА

3.1 Розробка набору даних для тестування системи

Формування набору даних розпочинається з визначення структури тестових прикладів. Збір електричних схем охоплює різні типи та конфігурації кіл. Система класифікації розділяє схеми за рівнем складності. Методи анотації забезпечують розмітку компонентів та з'єднань. Процес верифікації перевіряє коректність вхідних даних. База даних зберігає структуровану інформацію про схеми. Стандартизація форматів гарантує сумісність даних.

Класифікація електричних компонентів створює ієрархію елементів схем. Кожен тип компонента має унікальний ідентифікатор та опис параметрів. Методи групування об'єднують елементи за функціональним призначенням. Система атрибутів описує характеристики компонентів. База знань містить інформацію про стандартні елементи. Валідація перевіряє повноту опису компонентів. Формат даних забезпечує розширюваність класифікації.

Розмітка топології схем визначає структуру електричних з'єднань. Алгоритми трасування виявляють шляхи протікання струму. Методи анотації позначають вузли та гілки схеми. Система координат фіксує положення елементів. База даних зберігає інформацію про з'єднання. Перевірка зв'язності контролює цілісність топології. Валідація забезпечує коректність розмітки.

Формування тестових сценаріїв охоплює різні режими роботи схем. Методи генерації створюють набори вхідних параметрів. Алгоритми розрахунку визначають еталонні значення. Система верифікації перевіряє коректність результатів. База даних зберігає тестові випадки. Валідація контролює повноту покриття режимів. Документація описує умови тестування.

Генерація синтетичних даних розширює набір тестових прикладів. Алгоритми моделювання створюють штучні схеми. Методи варіації змінюють параметри компонентів. Система обмежень контролює реалістичність даних.

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

База знань забезпечує правила генерації. Перевірка якості оцінює синтетичні приклади. Валідація підтверджує адекватність даних.

Аугментація даних збільшує різноманітність навчальних прикладів. Методи трансформації модифікують зображення схем. Алгоритми шуму додають реалістичні спотворення. Система фільтрації покращує якість зображень. База даних зберігає модифіковані приклади. Перевірка збалансованості контролює розподіл класів. Валідація забезпечує коректність аугментації.

Розбиття даних формує навчальну та тестову вибірки. Методи стратифікації зберігають пропорції класів. Алгоритми рандомізації забезпечують випадковий розподіл. Система валідації контролює незалежність вибірок. База даних зберігає розбиття наборів. Перевірка статистик оцінює репрезентативність. Документація фіксує параметри розбиття.

Анотація метаданих описує характеристики схем. Методи індексації створюють пошукову структуру. Алгоритми класифікації групують подібні приклади. Система тегів забезпечує категоризацію даних. База знань зберігає семантичні зв'язки. Перевірка повноти контролює метадані. Валідація гарантує точність опису.

Контроль якості перевіряє коректність набору даних. Методи верифікації знаходять помилки розмітки. Алгоритми валідації контролюють цілісність даних. Система метрик оцінює якість прикладів. База даних фіксує результати перевірок. Документація описує критерії якості. Оптимізація покращує набір даних.

Візуалізація даних забезпечує аналіз набору прикладів. Методи відображення створюють наочне представлення. Алгоритми кластеризації виявляють структуру даних. Система анотацій додає пояснювальні елементи. База знань зберігає шаблони візуалізації. Перевірка читабельності контролює якість відображення. Експорт зберігає результати аналізу.

Версійний контроль відстежує зміни набору даних. Методи архівації зберігають історію модифікацій. Алгоритми синхронізації забезпечують

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

узгодженість версій. Система міток фіксує етапи розробки. База даних зберігає зміни наборів. Перевірка цілісності контролює версії. Документація описує еволюцію даних.

Документування набору даних описує структуру та зміст. Методи генерації створюють технічну документацію. Алгоритми аналізу формують статистичні звіти. Система шаблонів стандартизує опис даних. База знань зберігає методики використання. Перевірка повноти контролює документацію. Валідація забезпечує актуальність опису.

Оцінка репрезентативності аналізує покриття предметної області. Методи статистики вимірюють розподіл характеристик. Алгоритми порівняння зіставляють з реальними даними. Система метрик оцінює повноту набору. База знань визначає критерії репрезентативності. Перевірка достатності контролює обсяг даних. Валідація підтверджує адекватність набору [29].

Оптимізація структури покращує ефективність використання даних. Методи індексації прискорюють доступ до прикладів. Алгоритми стиснення зменшують обсяг зберігання. Система кешування оптимізує часті запити. База даних забезпечує швидкий пошук. Перевірка продуктивності контролює ефективність. Валідація гарантує збереження якості.

Інтеграція зовнішніх джерел розширює набір даних. Методи конвертації забезпечують сумісність форматів. Алгоритми злиття об'єднують різні набори. Система верифікації контролює якість інтеграції. База даних зберігає походження даних. Перевірка узгодженості контролює об'єднання. Валідація забезпечує цілісність даних.

3.2 Аналіз точності розпізнавання елементів схеми

Система оцінки точності розпізнавання базується на комплексному аналізі результатів роботи. Метрики якості вимірюють різні характеристики процесу класифікації. Розрахунок показників використовує матрицю помилок класифікації. Методи статистики оцінюють достовірність результатів. Валідація

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

забезпечує об'єктивність оцінювання. Процес тестування охоплює різні типи електричних компонентів. Документування результатів фіксує параметри точності.

Матриця помилок відображає результати класифікації елементів. Рядки матриці відповідають реальним класам компонентів. Стовпці показують передбачені системою класи елементів. Діагональні елементи містять кількість правильних класифікацій. Недіагональні елементи відображають помилки розпізнавання. Аналіз матриці виявляє проблемні класи. Візуалізація забезпечує наочне представлення результатів.

Розрахунок точності визначає частку правильних класифікацій. Методи обчислення враховують специфіку різних класів. Алгоритми зважування балансують внесок компонентів. Система метрик оцінює якість по класах. База даних зберігає історію показників. Перевірка стабільності контролює відтворюваність результатів. Валідація забезпечує достовірність оцінок.

Оцінка повноти вимірює здатність системи знаходити всі компоненти. Методи розрахунку визначають частку виявлених елементів. Алгоритми аналізу враховують пропущені компоненти. Система метрик оцінює чутливість розпізнавання. База даних фіксує статистику виявлення. Перевірка надійності контролює стабільність роботи. Документація описує методику оцінювання [30].

F-міра комбінує показники точності та повноти класифікації. Методи усереднення враховують баланс характеристик. Алгоритми оптимізації налаштовують параметри моделі. Система оцінки визначає оптимальні режими роботи. База даних зберігає результати експериментів. Перевірка стійкості контролює чутливість показників. Валідація підтверджує об'єктивність оцінки.

Аналіз помилок першого роду оцінює кількість хибних спрацювань. Методи класифікації визначають причини помилок. Алгоритми корекції зменшують кількість хибних виявлень. Система фільтрації видаляє помилкові детекції. База знань накопичує типові помилки. Перевірка ефективності оцінює результати корекції. Оптимізація покращує точність класифікації.

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Оцінка помилок другого роду визначає кількість пропущених елементів. Методи аналізу виявляють причини пропусків. Алгоритми покращення підвищують чутливість системи. Система верифікації контролює повноту виявлення. База даних зберігає статистику пропусків. Перевірка надійності оцінює стабільність роботи. Валідація забезпечує достовірність результатів.

ROC-аналіз оцінює якість класифікації при різних порогах. Методи побудови створюють характеристичну криву. Алгоритми оптимізації знаходять оптимальний поріг. Система метрик розраховує площу під кривою. База даних зберігає параметри кривих. Перевірка стійкості контролює чутливість характеристик. Документація описує методику аналізу.

Крос-валідація оцінює стійкість результатів розпізнавання. Методи розбиття формують набори для перевірки. Алгоритми навчання тренують модель на різних даних. Система оцінки усереднює результати тестів. База даних зберігає показники валідації. Перевірка статистичної значущості контролює достовірність. Валідація забезпечує об'єктивність оцінок.

Аналіз залежності точності від розміру навчальної вибірки. Методи масштабування змінюють обсяг даних. Алгоритми оцінки визначають криві навчання. Система метрик вимірює швидкість збіжності. База даних фіксує результати експериментів. Перевірка стійкості контролює відтворюваність. Документація описує виявлені залежності.

Оцінка стійкості до шуму аналізує роботу при спотвореннях. Методи генерації створюють зашумлені дані. Алгоритми тестування вимірюють деградацію точності. Система метрик оцінює робастність моделі. База даних зберігає результати тестів. Перевірка граничних умов визначає межі стійкості. Валідація підтверджує надійність роботи [31].

Аналіз часової ефективності вимірює швидкість розпізнавання. Методи профілювання визначають витрати ресурсів. Алгоритми оптимізації покращують продуктивність. Система метрик оцінює масштабованість рішення.

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

База даних фіксує показники швидкодії. Перевірка стабільності контролює варіації часу. Документація описує вимоги до ресурсів.

Порівняльний аналіз зіставляє результати різних методів. Методики тестування забезпечують однакові умови. Алгоритми оцінки визначають статистичну значущість. Система метрик розраховує відносні показники. База даних зберігає результати порівняння. Перевірка об'єктивності контролює умови тестів. Валідація забезпечує коректність висновків.

Оцінка узагальнюючої здатності аналізує роботу на нових даних. Методи тестування використовують незалежні набори. Алгоритми аналізу виявляють ефекти перенавчання. Система метрик вимірює стійкість результатів. База даних фіксує показники узагальнення. Перевірка значущості контролює достовірність оцінок. Документація описує границі застосування.

Аналіз чутливості оцінює вплив параметрів системи. Методи варіації змінюють налаштування моделі. Алгоритми оцінки визначають критичні параметри. Система метрик вимірює ступінь впливу змін. База даних зберігає результати аналізу. Перевірка стійкості контролює стабільність роботи. Валідація забезпечує достовірність висновків.

Документування результатів фіксує методику та висновки аналізу. Методи візуалізації створюють наочне представлення. Алгоритми генерації формують технічні звіти. Система шаблонів стандартизує формат документів. База знань зберігає досвід аналізу. Перевірка повноти контролює охоплення результатів. Валідація гарантує точність документації.

Оптимізація системи покращує показники розпізнавання. Методи налаштування модифікують параметри моделі. Алгоритми пошуку знаходять оптимальні режими. Система метрик оцінює результати покращень. База даних фіксує історію оптимізації. Перевірка ефективності контролює досягнуті показники. Документація описує процес вдосконалення.

Прогнозування розвитку оцінює потенціал покращення точності. Методи аналізу виявляють обмеження системи. Алгоритми моделювання прогнозують

						02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
							62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

майбутні показники. Система метрик оцінює досяжні результати. База знань визначає напрямки розвитку. Перевірка реалістичності контролює прогнози. Валідація забезпечує обґрунтованість оцінок.

3.3 Оцінка ефективності перетворення схеми в граф

Методологія оцінки ефективності перетворення схеми в граф базується на комплексному аналізі процесу. Система метрик вимірює точність відображення топології схеми. Розрахунок показників використовує порівняння з еталонними графами. Методи статистики оцінюють достовірність результатів перетворення. Процес тестування охоплює різні типи електричних схем. Алгоритми аналізу виявляють структурні помилки перетворення. Документація фіксує параметри ефективності.

Аналіз збереження структури оцінює точність відображення зв'язків. Методи порівняння зіставляють топологію вихідної схеми та графа. Алгоритми пошуку виявляють невідповідності з'єднань. Система метрик вимірює ступінь збереження структури. База даних фіксує статистику помилок. Перевірка повноти контролює охоплення всіх елементів. Валідація забезпечує коректність перетворення.

Оцінка точності параметризації перевіряє збереження характеристик компонентів. Методи верифікації порівнюють параметри елементів схеми та графа. Алгоритми аналізу виявляють відхилення значень. Система метрик вимірює точність передачі параметрів. База даних зберігає статистику відхилень. Перевірка узгодженості контролює відповідність даних. Документація описує методику оцінювання.

Аналіз часової ефективності вимірює швидкість перетворення схем. Методи профілювання визначають витрати обчислювальних ресурсів. Алгоритми оптимізації покращують продуктивність процесу. Система метрик оцінює масштабованість рішення. База даних фіксує показники швидкодії. Перевірка стабільності контролює варіації часу. Документація описує вимоги до ресурсів.

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Оцінка стійкості до помилок вхідних даних аналізує надійність перетворення. Методи тестування використовують спотворені схеми. Алгоритми аналізу вимірюють деградацію якості. Система метрик оцінює робастність перетворення. База даних зберігає результати тестів. Перевірка граничних умов визначає межі стійкості. Валідація підтверджує надійність процесу.

Аналіз масштабованості оцінює роботу з великими схемами. Методи тестування використовують схеми різного розміру. Алгоритми оцінки вимірюють залежність ефективності від розміру. Система метрик розраховує показники масштабування. База даних фіксує результати експериментів. Перевірка обмежень визначає граничні розміри. Документація описує межі застосування.

Оцінка якості оптимізації аналізує ефективність спрощення графа. Методи порівняння зіставляють початкові та оптимізовані структури. Алгоритми аналізу вимірюють ступінь редукції. Система метрик оцінює збереження функціональності. База даних зберігає показники оптимізації. Перевірка еквівалентності контролює коректність перетворень. Валідація забезпечує допустимість спрощень.

Аналіз повноти перетворення оцінює охоплення елементів схеми. Методи верифікації перевіряють відображення всіх компонентів. Алгоритми пошуку виявляють пропущені елементи. Система метрик розраховує показники повноти. База даних фіксує статистику пропусків. Перевірка цілісності контролює збереження структури. Документація описує критерії повноти.

Оцінка точності геометричного відображення аналізує просторові характеристики. Методи порівняння зіставляють координати елементів. Алгоритми аналізу вимірюють відхилення позицій. Система метрик оцінює збереження пропорцій. База даних зберігає геометричні параметри. Перевірка відповідності контролює точність позиціонування. Валідація забезпечує коректність відображення.

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Аналіз збереження ієрархії оцінює структурну організацію графа. Методи верифікації перевіряють відображення підсистем. Алгоритми пошуку виявляють порушення ієрархії. Система метрик розраховує показники структурування. База даних фіксує статистику помилок. Перевірка зв'язності контролює цілісність рівнів. Документація описує правила структурування.

Оцінка надійності перетворення аналізує стабільність результатів. Методи тестування використовують різні умови роботи. Алгоритми аналізу вимірюють варіації результатів. Система метрик розраховує показники стійкості. База даних зберігає статистику відхилень. Перевірка відтворюваності контролює стабільність процесу. Валідація забезпечує надійність перетворення.

Аналіз ефективності паралельної обробки оцінює прискорення перетворення. Методи тестування вимірюють показники масштабування. Алгоритми оцінки визначають ефективність розпаралелювання. Система метрик розраховує прискорення та ефективність. База даних фіксує результати експериментів. Перевірка балансування контролює розподіл навантаження. Документація описує архітектуру паралельної системи.

Оцінка ресурсоемності аналізує використання пам'яті та обчислень. Методи профілювання вимірюють споживання ресурсів. Алгоритми оптимізації покращують ефективність використання. Система метрик розраховує показники навантаження. База даних зберігає статистику використання. Перевірка обмежень контролює допустимі витрати. Валідація забезпечує ефективність реалізації.

Аналіз якості документування оцінює повноту опису перетворення. Методи верифікації перевіряють охоплення всіх аспектів. Алгоритми пошуку виявляють пропуски в документації. Система метрик розраховує показники повноти опису. База даних зберігає структуру документації. Перевірка актуальності контролює відповідність реалізації. Оптимізація покращує якість документування [32].

Оцінка перспектив розвитку аналізує потенціал вдосконалення. Методи прогнозування визначають напрямки покращення. Алгоритми оцінки виявляють

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

обмеження технології. Система метрик розраховує потенційні показники. База даних фіксує тенденції розвитку. Перевірка реалістичності контролює досяжність цілей. Документація описує стратегію розвитку.

3.4 Верифікація результатів розрахунку параметрів електричного кола

Процес верифікації результатів розрахунку параметрів електричного кола базується на багаторівневій системі перевірок. Методи тестування охоплюють всі етапи обчислень. Алгоритми валідації забезпечують контроль коректності результатів. Система метрик оцінює точність розрахованих параметрів. База даних зберігає еталонні значення для порівняння. Перевірка збіжності контролює стабільність обчислень. Документація фіксує методику верифікації.

Перевірка виконання законів Кірхгофа становить базовий рівень верифікації. Методи аналізу контролюють баланс струмів у вузлах схеми. Алгоритми розрахунку перевіряють суму напруг у контурах. Система метрик оцінює відхилення від законів. База даних фіксує статистику порушень. Перевірка точності вимірює похибки обчислень. Валідація забезпечує фізичну коректність результатів.

Аналіз енергетичного балансу верифікує розподіл потужностей. Методи розрахунку контролюють баланс активної потужності. Алгоритми перевірки оцінюють реактивні складові. Система метрик вимірює похибки балансу енергії. База даних зберігає еталонні енергетичні показники. Перевірка узгодженості контролює відповідність режимів. Документація описує критерії оцінки [33].

Верифікація граничних режимів перевіряє допустимість розрахованих параметрів. Методи аналізу контролюють струми в гілках схеми. Алгоритми оцінки перевіряють напруги у вузлах. Система обмежень визначає допустимі діапазони значень. База даних містить нормативні показники режимів. Перевірка стійкості оцінює запас надійності. Валідація забезпечує безпеку експлуатації.

Контроль точності обчислень оцінює математичну коректність розрахунків. Методи аналізу визначають числову стійкість алгоритмів. Система метрик

						02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
							66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

вимірює похибки округлення. Тестування охоплює граничні випадки обчислень. База даних зберігає еталонні результати. Перевірка збіжності контролює ітераційні процеси. Документація фіксує методику оцінки точності.

Аналіз чутливості верифікує стійкість результатів до варіацій параметрів. Методи збурень моделюють зміни вхідних даних. Алгоритми оцінки визначають критичні параметри. Система метрик вимірює діапазони стійкості. База даних фіксує результати аналізу. Перевірка робастності контролює надійність розрахунків. Валідація забезпечує достовірність результатів.

Верифікація динамічних режимів перевіряє перехідні процеси. Методи моделювання контролюють часові характеристики. Алгоритми аналізу оцінюють стійкість системи. Перевірка коливань виявляє небезпечні режими. База даних зберігає типові динамічні процеси. Контроль параметрів забезпечує безпеку роботи. Документація описує критерії стійкості.

Порівняння з експериментальними даними валідує результати розрахунків. Методи вимірювань надають еталонні значення. Алгоритми статистики оцінюють відхилення параметрів. Система метрик розраховує показники точності. База даних зберігає результати експериментів. Перевірка узгодженості контролює відповідність моделі. Валідація підтверджує адекватність розрахунків.

Верифікація структурних перетворень контролює еквівалентність схем. Методи аналізу перевіряють збереження характеристик. Алгоритми порівняння оцінюють відповідність параметрів. Система метрик вимірює похибки перетворень. База даних містить еталонні структури. Перевірка топології контролює зв'язність схеми. Документація фіксує правила перетворень [34].

Аналіз обчислювальної ефективності оцінює ресурсомісткість розрахунків. Методи профілювання вимірюють витрати часу. Алгоритми оптимізації покращують продуктивність. Система метрик розраховує показники ефективності. База даних зберігає статистику обчислень. Перевірка

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

масштабованості контролює роботу з великими схемами. Валідація забезпечує практичну застосовність.

Верифікація паралельних обчислень контролює узгодженість результатів. Методи синхронізації забезпечують коректність взаємодії. Алгоритми розподілу оптимізують навантаження. Система метрик оцінює ефективність паралелізації. База даних фіксує показники прискорення. Перевірка стійкості контролює збіжність процесів. Документація описує архітектуру системи.

Аналіз документування перевіряє повноту опису результатів. Методи верифікації контролюють охоплення всіх параметрів. Алгоритми пошуку виявляють пропуски в описі. Система шаблонів стандартизує формат документів. База даних зберігає структуру звітів. Перевірка актуальності забезпечує відповідність даних. Валідація гарантує якість документації.

Верифікація інтерфейсів користувача перевіряє коректність відображення. Методи тестування контролюють функціональність візуалізації. Алгоритми валідації перевіряють введення даних. Система метрик оцінює зручність використання. База даних зберігає конфігурації інтерфейсу. Перевірка доступності забезпечує універсальність роботи. Документація описує взаємодію з користувачем.

Аналіз надійності оцінює стабільність роботи системи. Методи тестування моделюють нештатні ситуації. Алгоритми відновлення забезпечують збереження даних. Система моніторингу контролює стан обчислень. База даних фіксує збої та помилки. Перевірка відмовостійкості гарантує надійність роботи. Валідація підтверджує стійкість системи.

Верифікація безпеки контролює захищеність даних та обчислень. Методи аналізу виявляють вразливості системи. Алгоритми захисту забезпечують конфіденційність інформації. Система аудиту відстежує доступ до даних. База даних зберігає журнали безпеки. Перевірка авторизації контролює права доступу. Документація описує політики безпеки.

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Аналіз розширюваності оцінює можливості модифікації системи. Методи тестування перевіряють сумісність компонентів. Алгоритми інтеграції забезпечують взаємодію модулів. Система версій контролює оновлення функціональності. База даних зберігає конфігурації розширень [35]. Перевірка стабільності гарантує працездатність системи. Валідація підтверджує коректність модифікацій.

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

ВИСНОВКИ

У результаті проведеного дослідження було розроблено систему комп'ютерного зору для автоматизованого аналізу електричних схем на основі методів теорії графів. Створена система забезпечує високу точність розпізнавання елементів схеми та надійне визначення їх топологічних зв'язків.

В ході роботи було досліджено теоретичні основи комп'ютерного зору та проаналізовано методи представлення електричних кіл у вигляді графів. Встановлено, що використання теорії графів надає ефективний математичний апарат для формального опису структури електричних схем та автоматизації їх аналізу. Розроблені алгоритми перетворення схеми в граф забезпечують збереження всієї топологічної інформації та електричних параметрів компонентів.

Система розпізнавання електричних схем базується на модульній архітектурі, що включає підсистеми введення зображень, попередньої обробки, сегментації, розпізнавання елементів та аналізу топології. Розроблені методи попередньої обробки зображень забезпечують надійне виділення структурних елементів схеми навіть при наявності шумів та спотворень. Алгоритми сегментації ефективно розділяють зображення на окремі компоненти та зв'язки між ними.

Для розпізнавання елементів схеми розроблено та навчено нейронну мережу, що забезпечує високу точність класифікації різних типів електричних компонентів. Застосування методів глибокого навчання дозволило створити систему, здатну адаптуватися до різних стилів оформлення схем. Механізми уваги фокусують мережу на найбільш значущих областях зображення.

Розроблені алгоритми перетворення схеми в граф забезпечують автоматичне формування матриці з'єднань, що описує топологію електричного кола. Методи оптимізації мінімізують розмірність матриці при збереженні всієї структурної інформації. Застосування методу вузлових потенціалів дозволяє ефективно розраховувати параметри електричного кола на основі отриманого графового представлення.

									Арк.
									70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ

Експериментальні дослідження підтвердили високу ефективність розробленої системи. Створено репрезентативний набір тестових даних, що охоплює різні типи електричних схем. Аналіз точності розпізнавання елементів показав надійну роботу системи при різних умовах зйомки та якості вхідних зображень. Оцінка ефективності перетворення схеми в граф підтвердила коректне збереження топологічної структури та параметрів компонентів.

Верифікація результатів розрахунку параметрів електричного кола показала високу точність визначення струмів та напруг. Розроблена система тестування забезпечує комплексну перевірку виконання законів Кірхгофа та енергетичного балансу. Методи валідації контролюють допустимість отриманих режимів роботи схеми.

Результати дослідження можуть бути використані при розробці систем автоматизованого проектування електричних схем, аналізі документації електричних мереж, діагностиці несправностей електрообладнання. Модульна архітектура системи забезпечує можливість її розширення та адаптації до нових типів задач.

Подальший розвиток дослідження може бути спрямований на розширення функціональності системи для роботи з тривимірними моделями електричних схем, удосконалення методів розпізнавання для підвищення точності класифікації спеціалізованих компонентів, оптимізацію алгоритмів для роботи з надвеликими схемами, розробку методів автоматичного виявлення та виправлення помилок у схемах.

Практична цінність отриманих результатів полягає у створенні ефективного інструменту для автоматизації аналізу електричних схем, що дозволяє значно прискорити процеси проектування та діагностики електричних систем. Розроблені методи та алгоритми можуть бути інтегровані в існуючі системи автоматизованого проектування для розширення їх функціональності.

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
						71
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Омельченко С. О. Використання комп'ютерного зору для розпізнавання образів: дис. ГО «Європейська наукова платформа», 2021.
2. Кошурников Г. О. Дослідження методів аналізу графів для вирішення задач комп'ютерного зору: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – 2023.
3. Коротач Ю. Б. Огляд алгоритмів комп'ютерного зору для пошуку об'єктів на зображенні // Технології штучного інтелекту. – 2021. – Вип. 23.
4. Тимчишин Р. М., Черняк В. О., Іванов П. П. Сучасні підходи до розв'язання задач комп'ютерного зору // Управляющие системы и машины. – 2018. – № 5.
5. Міщук В. В., Фесенко Г. В. Аналіз методів та засобів комп'ютерного зору для мобільних систем пошуку вибухонебезпечних предметів // Elektronnoe Modelirovanie. – 2024. – Т. 46, № 1.
6. Тараненко А. В. Додаток для моделювання та аналізу електричних кіл: дис. ... канд. техн. наук. – 2022.
7. Власенко Е. В., Грищенко О. М., Колесник П. П. Методичні вказівки та завдання до самостійної роботи студентів по виконанню курсової роботи з ТЕКС «Знаходження відгуку лінійного електричного кола на заданий зовнішній вплив» для студентів спеціальності 172 «Радіотехніка» всіх форм навчання. – К.: НТУУ «КПІ», 2018.
8. Новіков Р. М. Розвиток Калинівських електричних мереж з дослідженням пристроїв компенсації реактивної потужності: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – К.: НТУУ «КПІ», 2019.
9. Іванісенко Д. Ю. Аналіз та синтез графічних моделей дефектів діелектриків на основі орієнтованих графів: дис. ... канд. техн. наук. – 2023.
10. Подчашинський Ю. О. Проектування комп'ютеризованих систем управління технологічними процесами: монографія. – К.: НТУУ «КПІ», 2018.
11. Кирик В. В. Математичний апарат штучного інтелекту в електроенергетичних системах: монографія. – К.: НТУУ «КПІ», 2019.

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		72

12. Підбуцький М. Ю. Система автоматизованого сортування плодів овочевих культур з елементами штучного інтелекту: дис. ... канд. техн. наук. – 2023.

13. Долгуля А., Поддубняк І. Застосування сучасних робототехнічних систем з елементами штучного інтелекту в приладобудуванні // Інженерія майбутнього. – 2020. – № 4.

14. Юркевич Ю. С. Розробка та дослідження алгоритмів і технічних систем розпізнавання образів по даних ультразвукової томографії: магістерська дис. – Тернопіль: ТНТУ, 2020.

15. Деркач Д. М. Система контролю та діагностики транспортних засобів на базі програмованих вентильних матриць: дис. ... канд. техн. наук. – 2022.

16. Дідковський Р. С. Програмно-апаратна система управління доступом до приміщення: дис. ... канд. техн. наук. – 2019.

17. Ігнатєв Т. С. Програмний додаток виділення та розпізнавання елементів на принципових схемах: дис. ... канд. техн. наук. – Тернопіль: ЗУНУ, 2024.

18. Тризна В. В. Використання програмованих логічних інтегральних схем в системах телевізійного моніторингу // Сучасні інформаційні технології. – 2019. – № 4.

19. Кобилін О. А., Творошенко І. С. Методи цифрової обробки зображень: монографія. – Харків: ХНУРЕ, 2021.

20. Кулешов Д. О. Методи та алгоритми семантичної обробки веб-документів: монографія. – К.: Видавничий дім "Наука і освіта", 2021.

21. Баданін Р. В. Модель і програмно-апаратні засоби системи автоматичного розпізнавання автомобільних номерів для "розумного" міста: дис. ... канд. техн. наук. – 2019.

22. Пітик Я. О. Система розпізнавання образів перцептроном із стохастичним алгоритмом навчання: дис. ... канд. техн. наук. – 2021.

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

23. Процюк Ю. О., Коваленко М. П., Сидоренко А. В. Підходи до формування бази даних зображень в системі ідентифікації вибухонебезпечних предметів для подальшого навчання нейронної мережі // Системи і технології зв'язку, інформатизації та кібербезпеки. – 2024. – № 2.

24. Ткачов І. І. Спеціальні структури в схемах розмітки // Роль інновацій в трансформації образу сучасної науки. – 2018. – С. 215-220.

25. Черевко К. Оптимізація булевих схем: дис. ... канд. техн. наук. – 2023.

26. Циганчук Т. Г., Булашенко А. В. Діагностика пасивних кіл методом вузлових опорів: монографія. – К.: Видавничий дім "Наука і освіта", 2018.

27. Саміла А. П., Мойсюк О. В. Дослідження топології електромагнітного поля спіралеподібної котушки ЯКР-детектора вибухових та наркотичних речовин: монографія. – Львів: ЛНУ, 2021.

28. Ситник О. О., Литовка А. О. Використання вузлових методів при розв'язанні задачі моделювання нелінійних електричних кіл: монографія. – К.: Видавничий дім "Техніка", 2019.

29. Дородних Д. О. Дослідження та розробка методів побудови баз знань з використанням фактор-графу: дис. ... канд. техн. наук. – 2023.

30. Головацький І. В. Інтелектуальна система розпізнавання елементів дорожнього руху: дис. ... канд. техн. наук. – 2019.

31. Гороховатський В. О., Гадецька С. В. Статистичне оброблення та аналіз даних у структурних методах класифікації зображень: монографія. – Харків: ХНУ, 2020.

32. Орловська Т. Розробка інтерактивних програмних засобів прийняття рішень в задачах регулювання споживання енергоресурсів: дис. ... канд. техн. наук. – 2023.

33. Артеменко М. Ю., Петров Д. О., Кутафін Ю. В. Двополюсна схема заміщення електричного кола постійного струму з залежними джерелами напруги еквівалентна за потужністю // Наукові праці. – 2021. – Т. 16.

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
						74
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

34. Бойко В., Шкардун О. Верифікація енергетичних характеристик трифазного мостового компенсаційного перетворювача з однією комутуючою ланкою // Науковий журнал «Енергетика: економіка, технології, екологія». – 2024. – № 4.

35. Дунець В. Л., Петренко А. М., Ковальчук І. І. Математичне та алгоритмічно-програмне забезпечення опрацювання електрокадіосигналів при фізичному навантаженні у кардіодіагностичних системах: монографія. – Львів: ЛНУ, 2022.

36. Rachala R. R., Panicker M. R. Hand-Drawn Electrical Circuit Recognition Using Object Detection and Node Recognition. SN Computer Science. 2022. Т. 3, № 3. URL: <https://doi.org/10.1007/s42979-022-01159-0> (дата звернення: 11.01.2025).

37. Thoma F., Bayer J., Li Y. A public Ground-Truth dataset for handwritten circuit diagram images. arXiv (Cornell University). URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2107.10373> (дата звернення: 09.01.2025).

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
						75
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК А

Сценарій розрахунку у Google Colab

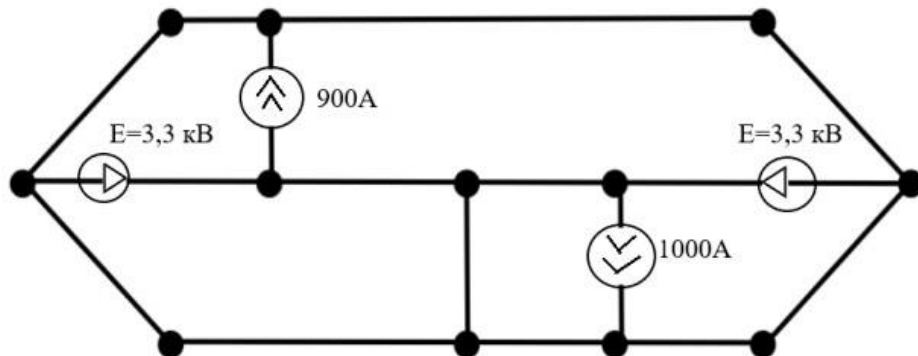


Рисунок А.1 – Зображення графу

```
import numpy as np
import networkx as nx
import random

# Створюємо орієнтований граф
G = nx.DiGraph()

# Додаємо вузли та ребра відповідно до графа на зображенні
# Вузли 1-12 створені на основі схеми
G.add_edge(1, 2, voltage=3500, resistance=random.uniform(1, 10)) # Джерело 3.5кВ
G.add_edge(2, 3, resistance=random.uniform(1, 10)) # Опір
G.add_edge(3, 4, resistance=random.uniform(1, 10)) # Опір
G.add_edge(4, 5, current=900, resistance=random.uniform(1, 10)) # Струм 900А
G.add_edge(5, 6, resistance=random.uniform(1, 10)) # Опір
G.add_edge(6, 7, resistance=random.uniform(1, 10)) # Опір
G.add_edge(7, 8, resistance=random.uniform(1, 10)) # Опір
G.add_edge(8, 9, current=1000, resistance=random.uniform(1, 10)) # Струм 1000А
```

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

```

G.add_edge(9, 10, resistance=random.uniform(1, 10)) # Опір
G.add_edge(10, 11, resistance=random.uniform(1, 10)) # Опір
G.add_edge(11, 12, voltage=3300, resistance=random.uniform(1, 10)) # Джерело
3.3кВ
G.add_edge(12, 1, resistance=random.uniform(1, 10)) # Опір замикаючий

# Додаткові гілки, що утворюють паралельні шляхи
G.add_edge(2, 6, resistance=random.uniform(1, 10)) # Паралельний шлях між
вузлами 2 і 6
G.add_edge(4, 10, resistance=random.uniform(1, 10)) # Паралельний шлях між
вузлами 4 і 10

# Отримання опорів, напруг та струмів з графа
resistances = [d['resistance'] for u, v, d in G.edges(data=True)]
voltages = [d['voltage'] if 'voltage' in d else 0 for u, v, d in G.edges(data=True)]
currents = [d['current'] if 'current' in d else 0 for u, v, d in G.edges(data=True)]

# Струми через задані елементи
known_currents = np.array([900, 1000]) # Відомі струми

# Виконуємо розрахунок напруг на основі відомих струмів і опорів
# Для простоти, тут виконується розрахунок тільки для відомих гілок
calculated_voltages = known_currents * np.array(resistances[:len(known_currents)])

# Виводимо результати
for i, (u, v, d) in enumerate(G.edges(data=True)):
    print(f"Елемент {u} -> {v}: Напруга: {calculated_voltages[i] if i <
len(known_currents) else voltages[i]} В, Струм: {currents[i]} А, Опір:
{d['resistance']} Ом")

print(f"Розраховані напруги на опорах: {calculated_voltages}")

```

					02.15.EE2321.КРМ.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		77

РЕЗУЛЬТАТ ВИКОНАННЯ

```
Елемент 1 -> 2: Напруга: 3344.769810511887 В, Струм: 0 А, Опір: 3.7164109005687633 Ом
Елемент 2 -> 3: Напруга: 3850.5415189343857 В, Струм: 0 А, Опір: 3.850541518934386 Ом
Елемент 2 -> 6: Напруга: 0 В, Струм: 0 А, Опір: 7.864835476831694 Ом
Елемент 3 -> 4: Напруга: 0 В, Струм: 0 А, Опір: 1.1623689091351492 Ом
Елемент 4 -> 5: Напруга: 0 В, Струм: 900 А, Опір: 2.8330185338074036 Ом
Елемент 4 -> 10: Напруга: 0 В, Струм: 0 А, Опір: 5.403695857196631 Ом
Елемент 5 -> 6: Напруга: 0 В, Струм: 0 А, Опір: 8.223031166410667 Ом
Елемент 6 -> 7: Напруга: 0 В, Струм: 0 А, Опір: 5.850628365790261 Ом
Елемент 7 -> 8: Напруга: 0 В, Струм: 0 А, Опір: 5.545884977903468 Ом
Елемент 8 -> 9: Напруга: 0 В, Струм: 1000 А, Опір: 6.705379141662817 Ом
Елемент 9 -> 10: Напруга: 0 В, Струм: 0 А, Опір: 7.890711680452506 Ом
Елемент 10 -> 11: Напруга: 0 В, Струм: 0 А, Опір: 9.364171165386788 Ом
Елемент 11 -> 12: Напруга: 3300 В, Струм: 0 А, Опір: 6.688640914980459 Ом
Елемент 12 -> 1: Напруга: 0 В, Струм: 0 А, Опір: 1.665741873475102 Ом
Розраховані напруги на опорах: [3344.76981051 3850.54151893]
```

Process finished with exit code 0

					02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ	Арк.
						78
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК Б

Підготовка набору даних для навчання нейронної мережі у веб-сервісі roboflow
(URL: <https://roboflow.com>)

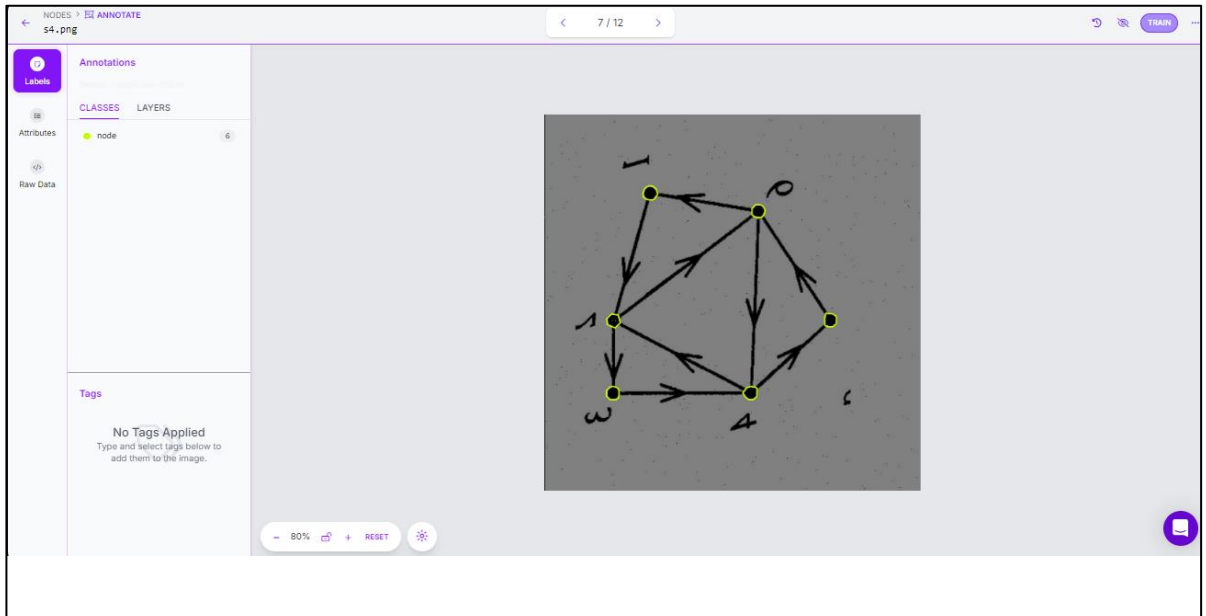


Рисунок Б.1 – Анотоване зображення графу (виконано маркування вузлів графу)

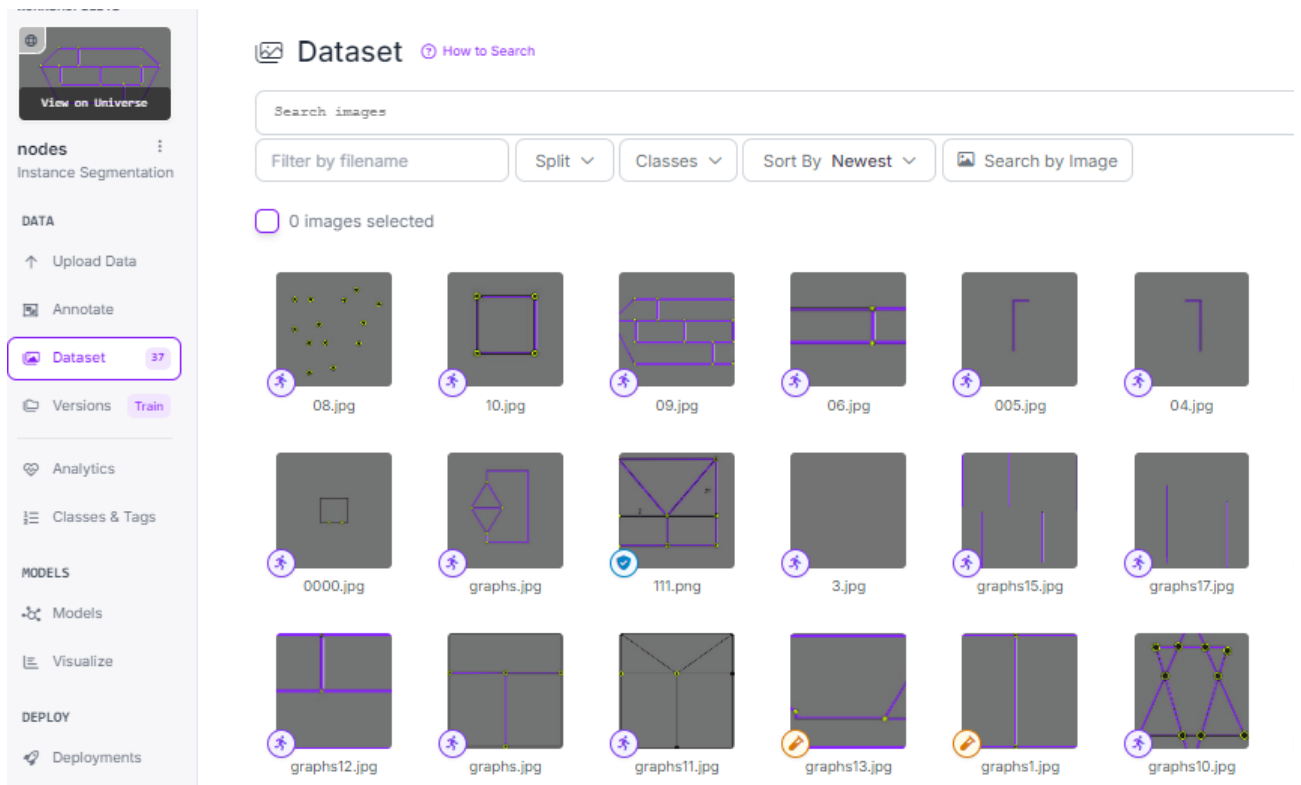


Рисунок Б.2 – Підготовлений набір даних з 37 зображень графів

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

02.15.EE2321.KPM.2025-ПЗ

Арк.

79

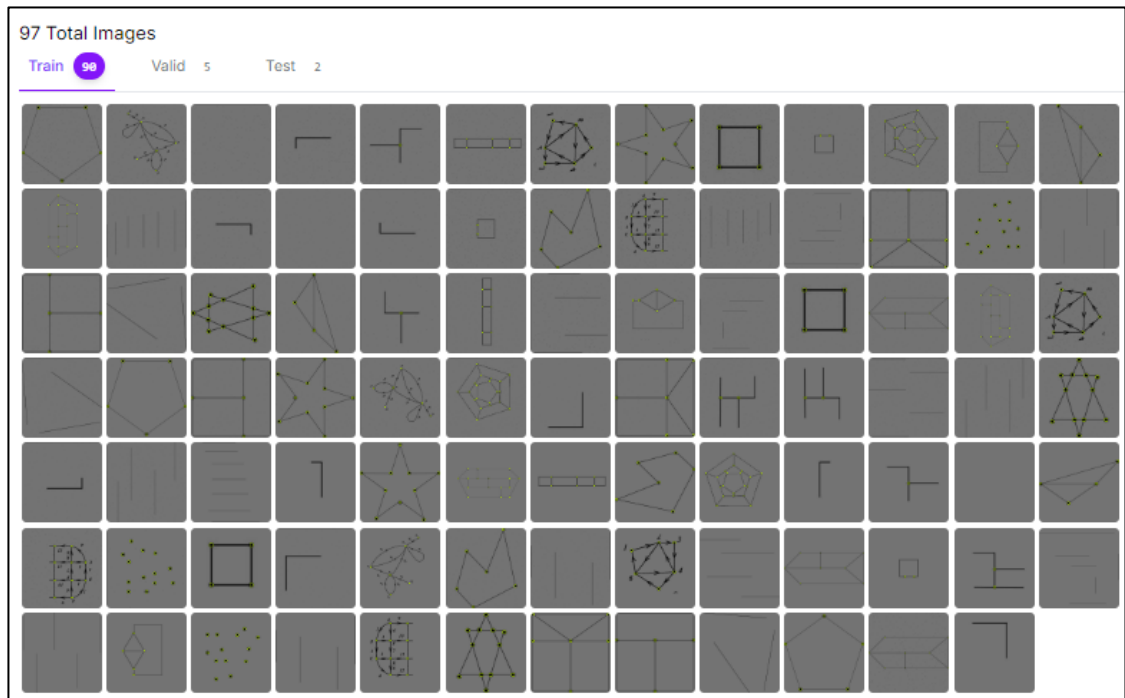


Рисунок Б.3 – Набір для тренування нейромрежі після аугментування

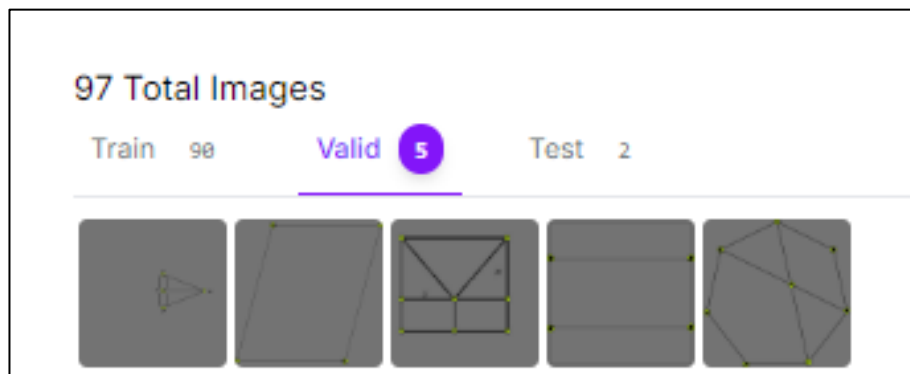


Рисунок Б.4 – Набір для валідації нейронної мережі після аугментування

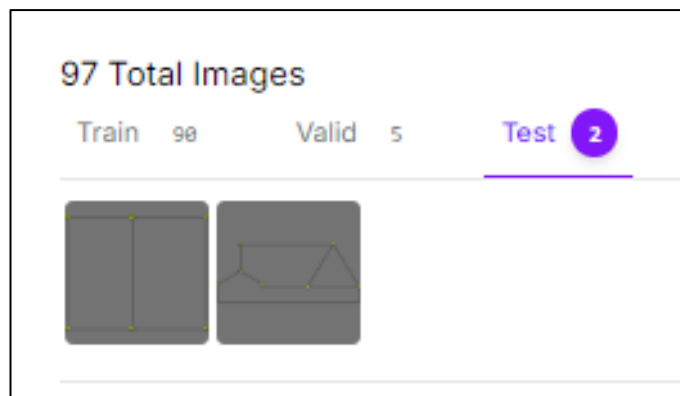


Рисунок Б.5 – Набір для тестування нейронної мережі після аугментування

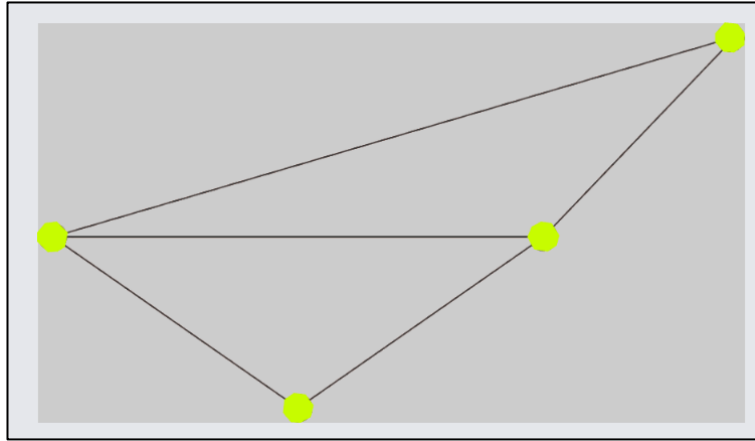


Рисунок Б.6 – Вихідне анотоване зображення графу

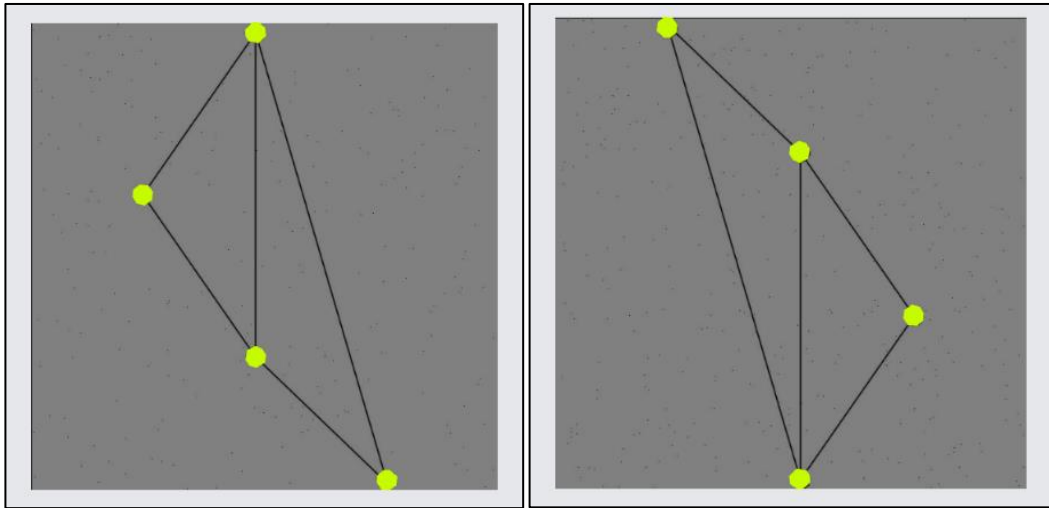


Рисунок Б.7 – Додаткові зображення після аугментування