

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Навчально-науковий інститут прикладного системного аналізу
Кафедра системного проектування**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Вадим МУХІН

«__» _____ 2022 р.

**Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра
за освітньо-професійною програмою
“Інтелектуальні сервіс-орієнтовані розподілені обчислення”
зі спеціальності 122 "Комп'ютерні науки"
на тему: "Додаток для моделювання та аналізу електричних
кіл"**

Виконав:

студент II курсу, групи ДА-11мп

Тараненко Андрій Володимирович _____

Науковий керівник:

к.т.н., доц.

Харченко Костянтин Васильович _____

Рецензент:

к.т.н., доц.

Барановська Л.В. _____

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

Студент _____

Київ – 2022

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально-науковий інститут прикладного системного аналізу
Кафедра системного проектування

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 122 "Комп'ютерні науки"

Освітньо-професійна програма – "Інтелектуальні сервіс-орієнтовані розподілені обчислення"

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Вадим МУХІН

02 листопада 2022 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Тараненко Андрію Володимировичу

1. Тема дисертації «Додаток для моделювання та аналізу електричних кіл», науковий керівник дисертації Харченко Костянтин Васильович, к.т.н., доцент, затверджені наказом по університету від 02 листопада 2022 р. № 3651с.
2. Термін подання студентом дисертації – 20 грудня 2022 р.
3. Об'єкт дослідження: додаток для моделювання та аналізу електричних кіл
5. Вихідні дані: додаток для моделювання та аналізу електричних кіл
6. Перелік завдань, які потрібно розробити:
 - дослідження методів побудови математичної моделі електричного кола
 - дослідження методів представлення лінійних та нелінійних елементів електричного кола
 - розробка програми для моделювання електричного кола
6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу
Ілюструючі зображення
7. Орієнтовний перелік публікацій

8. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

9. Дата видачі завдання – 02 листопада 2022 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Огляд літературних джерел	27 жовтня 2022	
2	Аналіз застосовності методів машинного навчання для задач регресивного тестування	31 жовтня 2022	
3	Опис сценаріїв використання обраних методів машинного навчання у регресивному тестуванні	7 листопада 2022	
4	Сценарії використання обраних методів	14 листопада 2022	
5	Реалізація алгоритму автоматичного підбору тестів	21 листопада 2022	
6	Тестування та порівняння програмних реалізацій	1 грудня 2022	
7	Формування результатів	7 грудня 2022	

Студент Тараненко Андрій Володимирович

Науковий керівник Харченко Костянтин Васильович

Зміст

Вступ	6
1. Дослідження методів побудови математичної моделі електричного кола	9
1.1. Попередній огляд задач моделювання	9
1.2. Базовий набір елементів та складні компоненти	9
1.3. Фізичні закони для формування рівнянь рівноваги	11
1.4 Формування математичної моделі	13
1.5 Формування структурної матриці	14
1.6 Формування матриці перетинів	16
1.7 Формування матриці контурів	16
1.8 Отримання топологічних матриць	17
1.9 Висновки до розділу 1	17
2. Дослідження методів представлення лінійних та нелінійних елементів електричного кола	18
2.1. Алгебраїзація реактивних компонентів	18
2.2. Лінеаризація нелінійностей	20
2.3. Метод Ейлера	21
2.4. Метод Ньютона-Рафсона	21
2.5. Висновки до розділу 2	23
3. Розробка програми для моделювання електричного кола	23
3.1. Формування Загально-Табличної моделі (ЗТМ)	23
3.2. Формування Таблично-Вузлової моделі в потенціалах (ГМ10)	24
3.3. Опис архітектури	26
3.4. Реалізація базових елементів	28
3.4.1 Резистор	28
3.4.2 Джерело струму	29
3.4.3 Джерело напруги	30

3.4.4 Індуктивність	31
3.4.5 Ємність	32
3.4.6 Кероване джерело напруги	33
3.4.7 Кероване джерело струму	34
3.5 Тестування додатку для моделювання та аналізу електричних кіл	35
3.5.1 Приклад 1. Моделювання схеми з джерелом струму та резистором	35
3.5.2 Приклад 2. Моделювання схеми з змінним джерелом струму, резистором та елементом ємності	37
3.5.3 Приклад 3. Моделювання схеми з змінним джерелом струму, резистором та елементом індуктивності	39
3.5.4 Приклад 4. Моделювання схеми з незалежним джерелом напруги, джерелом напруги керованого напругою та резисторами	42
3.6. Висновки до розділу 3	44
4. Розробка стартап-проекту «Додаток для моделювання та аналізу електричних кіл»	44
4.1 Опис ідеї проекту	44
4.2 Технологічний аудит ідеї	46
4.3 Аналіз ринкових можливостей	47
4.4 Розробка ринкової стратегії проекту	54
4.5 Розробка маркетингової програми	56
4.6 Висновки до розділу 4	59
Висновки до роботи	60
Література	61

Вступ

В області математичного моделювання динамічних систем існує два основних напрямки. Один з них направлено на застосування потужних професійних програмних засобів з автоматизованого моделювання. При цьому користувач взаємодіє з програмою за допомогою вхідних і вихідних файлів. “Складання математичної моделі здійснюється самою ЕОМ на основі вхідних даних, а необхідні результати містяться в вихідних файлах”[11]. Застосовані методи моделювання, аналізу та чисельні методи для розв’язання утворених моделей залишаються невідомими користувачу, не дивлячись на те, що програма може мати доступні для користувача опції управління виконанням завдання. “Практика показала, що застосування подібних програм дає ефект на завершальній стадії навчання, коли студент добре уявляє собі фізику роботи системи і орієнтовно знає очікувані результати, що дозволяє йому правильно інтерпретувати результати аналізу”[11].

“Інший напрямок пов’язано з так званим «ручним» моделюванням, освоювати яке необхідно на стадії навчання студентів основам спеціальності і воно ефективне, так як математичне моделювання саме по собі передбачає більш глибоке вивчення фізичних процесів, що лежать в основі функціонування фізичних систем і математичного апарату для їх опису, що в сукупності сприяє більш ефективному навчанню в технічному університеті”[11].

Електронні схеми є чудовим об’єктом для вивчення методів моделювання. “Можливість точного математичного опису еквівалентних схем і добре знання роботи електронного пристрою дозволяє добре прогнозувати результат моделювання на ЕОМ і відчувати задоволення при досягненні бажаного”[11]. Вміння та навички є найбільш важливою складовою частиною культури математичного моделювання, набагато важливішою, ніж просто знання самих

методів[11]. Певна сторона рішення задачі може бути використана як повчальна. Виділена особливість може перетворити рішення, отримане над простою схемою, у типову, в повчальний метод, наслідуючи якому студенти зможуть вирішити багато інших завдань, не обов'язково пов'язаних з електронікою. Залишається слід, яким можна знову скористатися, коли в цьому виникне необхідність, в тому числі, наприклад, при моделюванні технічних систем неелектричної природи[11].

Як об'єкт моделювання для навчання розглядаються електронні ланцюги, що працюють в лінійному режимі. “Відбувається саме так, тому що вивчати самі методи моделювання ефективніше на простих об'єктах, коли результати чисельного аналізу математичної моделі на ЕОМ практично відомі заздалегідь і легко може бути отримано аналітичне рішення, чого не скажеш в більшості своїй випадках про математичну модель нелінійної ланцюга”[11]. З іншого боку, суто спеціальних методів математичного моделювання нелінійних ланцюгів не існує. В основі математичного опису електронних ланцюгів лежать рівняння електричної рівноваги закони Кірхгофа і в силу їх універсальності вони можуть бути застосовані як до лінійних, так і до нелінійних ланцюгів. І, нарешті, в результаті будь-який нелінійний ланцюг можна представити еквівалентною лінійною «дискретною» схемною моделлю, параметри компонентів якої уточнюються на кожному кроці обчислень, і для неї вже може бути отримана відповідна лінійним ланцюгах математична модель[11].

“Метою моделювання електронної схеми є отримання її математичної моделі і подальшого аналізу працездатності електронного пристрою на ЕОМ. Електронні ланцюги включають в себе складні компоненти, строгий математичний опис яких представляє відомі труднощі. Вони як правило, мають нелінійні вольт-амперні характеристики. Методи математичного моделювання ланцюгів припускають складання моделі у вигляді системи алгебраїчних або

диференціальних рівнянь. Тому складні нелінійні функції апроксимуються простішими функціями. Вибір методу апроксимації визначає способи побудови схемної моделі електронного приладу, для якої можна знайти точний аналітичний опис”[11].

Таким чином, необхідним етапом в процесі отримання математичної моделі електронного пристрою є розробка схемних моделей окремих компонентів і складання на їх базі еквівалентної схеми для всього пристрою в цілому[11].

1. Дослідження методів побудови математичної моделі електричного кола

1.1. Попередній огляд задач моделювання

Задача моделювання електричних схем розв'язуються в 2 крок. Перший крок полягає у складанні рівнянь рівноваги для електричної схеми, використовуючи закони фізики та характеристики елементів. Другий етап - рішення зіставлених систем рівнянь використовуючи чисельні методи[11].

Результатом моделювання електронної схеми є її математична модель для подальшого аналізу працездатності електронного пристрою. Методи математичного моделювання схем припускають визначення моделі у вигляді системи алгебраїчних або диференціальних рівнянь. Тому складні нелінійні функції необхідно апроксимувати більш простими функціями. Вибір методу апроксимації визначає способи побудови схемної моделі електронного приладу, для якої можна знайти точний аналітичний опис[11].

Необхідним кроком в процесі отримання математичної моделі електронного пристрою є розробка моделей окремих компонентів і складання на їх основі еквівалентної схеми для всього пристрою в цілому[11].

1.2. Базовий набір елементів та складні компоненти

Електричне коло характеризується набором елементів і послідовністю їх сумісного сполучення. За числом полюсів компоненти поділяють на двополюсні і багатополюсні компоненти. “Властивості елементів описуються співвідношеннями між струмами і напругами на їх полюсах”[11].

Мінімальний базовий набір елементів складається з найпростіших елементів електричного кола: лінійні і нелінійні резистори, конденсатори,

катушки індуктивності, керовані джерела, а також незалежні джерела енергії і сигналів[11].

“Складні компоненти, що входять до складу електронних пристроїв, трансформатори, транзистори, інтегральні схеми, замінюються моделлю, складеною з елементів базового набору. При цьому схемна модель «майже еквівалентна» змодельованому компоненту, якщо вони невіразні при вимірах з боку зовнішніх висновків з встановленої ступенем похибки вимірювань”[11].

“Моделювання схем є складовою областю аналізу електричних кіл, при цьому, її метою є синтез схеми з такою ж кількістю полюсів, що і модельований прилад, який може бути представлений моделлю у вигляді «чорної скрині»”[11].

Вид та зміст моделі визначаються завданнями аналізу електронного приладу. Інженер з числа можливих моделей «чорного ящика» вибирає найкращу для вирішення конкретного завдання. Вибір відповідної моделі сильно залежить від правильного розуміння ієрархії і типів моделей. Класифікація моделей відбувається за класом сигналу . Двома найбільш важливими характеристиками сигналу є його діапазон амплітуд і смуга частот. Діапазон амплітуд відповідає максимальним і мінімальним відхиленням миттєвих значень напруги і струму, з якими має справу прилад. Смуга частот визначається інтервалом між нижньою і вищою частотними складовими сигналів[11].

Класифікація моделей за *діапазоном амплітуд сигналів* - в залежності від величини діапазону модель може бути класифікована як глобальна, локальна і модель лінійних приростів[11]:

- “Глобальна модель призначена для імітації певного приладу при всіх можливих значеннях струму і напруги на його полюсах,

зазначеними даними для приладу. Вона завжди нелінійна і має хоча б один нелінійний елемент”[11].

- “Локальна модель призначена для імітації в межах окремих ділянок робочого діапазону приладу і може бути лінійною і нелінійною”[11].

- “Модель лінійних приростів - модель, побудована тільки з лінійних елементів базового набору. Ця модель імітує роботу моделі в околі робочої точки приладу. Елементи схемної моделі в такому разі описуються диференційними параметрами приладу, розрахованими в околі робочою точки”[11].

1.3. **Фізичні закони для формування рівнянь рівноваги**

Для формування рівнянь рівноваги використовуються фізичні закони для струму та напруги, зокрема закони Ома та Кірхгофа[11].

Правила Кірхгофа - правила про співвідношення струму і напруги на будь-яких ділянках будь-якого електричного кола[11].

Рішення систем лінійних рівнянь, складених на основі правил Кірхгофа, дозволяють знайти всі струми і напруги в електричних колах постійного та змінного струму[11].

“Ці правила мають велике значення в електротехніці через свою універсальність, так як придатні для вирішення багатьох завдань в теорії електричних кіл і практичних розрахунків складних електричних схем”[11].

Застосування правил Кірхгофа до лінійного електричного кола дозволяє отримати систему лінійних рівнянь щодо струмів або напруги, і при вирішенні цієї системи знайти значення струмів на всіх гілках кола і всі напруги між вузлами кола[11].

“Для формулювання правил Кірхгофа вводяться поняття *вузол*, *гілка* і *контур* електричного кола. *Гілка* - це ділянка електричного кола по якій “проходить” один і той же струм. *Вузол* - це точка з'єднання трьох і більше гілок. *Контур* - це замкнутий шлях, що проходить через кілька гілок і вузлів електричного кола. Термін замкнутий шлях означає, що, почавши з деякого вузла кола і одноразово пройшовши по декільком гілкам і вузлів, можна повернутися в вузол з якого починали. Гілки і вузли, прохідні при такому обході, прийнято називати елементами, що належать заданому контуру. При цьому потрібно мати на увазі, що гілка і вузол можуть належати одночасно кільком контурам”[11].

У термінах даних визначень правила Кірхгофа формуються наступним чином[11]:

- “Перше правило Кірхгофа або правило струму Кірхгофа говорить, що алгебраїчна сума струмів, що проходять через гілки, що сходяться в кожному вузлі будь-якого ланцюга, дорівнює нулю. При цьому спрямований до вузла струм прийнято вважати позитивним, а спрямований від вузла - негативним. Алгебраїчна сума струмів, спрямованих до вузла дорівнює сумі спрямованих від вузла”[11].

$$\sum_{j=1}^n I_j = 0$$

де n - кількість струмів, що сходяться в одному вузлі.

“Іншими словами, скільки струму втікає в вузол, стільки ж з нього і витікає. Це правило випливає з фундаментального закону збереження заряду”[11].

Однак при розрахунках слід враховувати, що це правило може бути застосовано тільки в разі дуже малої ємності вузла. В іншому випадку перше

правило може порушуватися, що особливо помітно при високочастотних струмах[11].

- “Друге правило Кірхгофа або правило напруги Кірхгофа говорить, що алгебраїчна сума напруги на резистивних елементах замкнутого контуру дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС, що входять в цей контур. Якщо в контурі немає джерел ЕРС (ідеалізованих генераторів напруги), то сумарне падіння напруги дорівнює нулю”[11]:

$$\sum_{k=1}^n E_k = \sum_{k=1}^n U_k \sum_{k=1}^m R_k I_k$$

де n - число джерел ЕРС, m - число гілок в замкнутому контурі (для постійної напруги).

$$\sum_{k=1}^n e_k = \sum_{k=1}^n u_k = \sum_{k=1}^m R_k I_k + \sum_{k=1}^m u_{Lk} + \sum_{k=1}^m u_{Ck}$$

де n - число джерел ЕРС, m - число гілок в замкнутому контурі (для змінної напруги).

“Закон Ома - емпіричний фізичний закон, що визначає відношення електрорушійної сили джерела з силою струму, що протікає в провіднику, і опором провідника”[11].

При використанні сучасних термінів висловлює закон Ома для повного кола[11]:

$$I = \frac{\varepsilon}{R+r}$$

де I - сила струму, ε - електрорушійна сила, R - опір навантаження, r - внутрішній опір джерела струму.

Електрорушійна сила в замкнутому ланцюзі, по якій тече струм дорівнює[11]:

$$\varepsilon = Ir + IR = U(r) + U(R)$$

Тобто сума падінь напруги на внутрішньому опорі джерела струму і на зовнішньому ланцюгу дорівнює ЕРС джерела[11].

1.4 Формування математичної моделі

Математична модель реальної схеми - це сукупність співвідношень (формул, рівнянь, логічних виразів), що визначають характеристики стану системи залежно від її параметрів, початкових умов, вхідних сигналів (включаючи випадкові фактори) і часу[11].

“Математичні моделі визначаються предметною галуззю проектування”[11]:

- фізичним та математичним описом законів і умов функціонування об’єкта;
- середовищем функціонування і засобами взаємодії об’єкта із цим середовищем;
- складом об’єкта, елементною базою, засобами організації структури об’єкта;
- параметрами, що змінюються чи настраюються.

У моделях розрізняють дані трьох типів:

- дані про елементи об’єкта моделювання;
- дані про властивості об’єкта й елементів;
- дані про співвідношення між елементами й об’єктом.

“*Абстрагування об’єкта* проводять за глибиною структурування (ієрархічна система, система елементів, нероздільний об’єкт) і за ступенем абстрагування елементів і властивостями об’єкта (структурний, логічний та кількісний рівні)”[11].

1.5 Формування структурної матриці

Структурною матрицею (також матриця інцидентності) – це матриця розмірністю $(n-1) \times m$, де n – кількість вершин орієнтованого графу, m – кількість ребер орієнтованого графу, яка відображає поєднання (тобто інцидентність) вершин та ребер орієнтованого графу. Рядки структурної матриці відповідають вершинам графа, окрім базисної (нульової), а стовпці – ребрам[11].

“Для побудови структурної матриці необхідно визначити напрямки ребер для кожної відповідної гілки схеми, яку будемо вважати додатним напрямком струму. Для всіх елементів, окрім джерел струму та напруги, напрямки обирають довільно”[11].

Елементи матриці інцидентності A визначаються наступним чином:

- $a_{ij} = 1$, якщо v_i початкова вершина ребра e_j ;
- $a_{ij} = -1$, якщо v_i кінцева вершина ребра e_j ;
- $a_{ij} = 0$, якщо v_i, v_j не інцидентні ребру e_j

“В кожному стовпці структурної матриці може бути або 1 або 2 ненульовий елемент. Один ненульовий елемент в стовпці матриці виникає тоді, коли одна з вершин, через які проходить ребро, відповідає базисному вузлу”[11].

Розглянемо внесення в структурну матрицю даних довільного двополюсного елемента $X_k(a,b)$ за умов[11]:

- напрям k -ї гілки визначено від вузла до вузла (рис.);
- як базисний обраний вузол 0;
- вузли a, b не співпадають з базисним.



Рис. 1.5.1 – Елемент схеми та гілка орграфу

Відповідні елементи структурної матриці A , що відповідають елементу X_k , вносяться до стовпця k (X_k) (табл. 1.5)[11].

Таблиця 1.5 – Приклад врахування елемента X_k

			X_k	
$A =$	...	1	...	a
	...	...	...	...
	...	-1	...	b

1.6 Формування матриці перетинів

“Перерізом називається підмножина гілок схеми (дуг її орієнтованого графа), видалення яких ділить граф на два або більше ізольованих підграфів. Зокрема, якщо одним з під графів є ізольована вершина, такий переріз називають центральним перерізом. Якщо до перерізу входить рівно одна гілка дерева графа, а всі інші – хорди, то такий переріз називають головним перерізом, або перетином графа. Перетини та дуги графа, що їх утворюють, пов’язані відношенням інцидентності. Це відношення може бути представлено у вигляді матриці перетинів Π . Оскільки кожному перетину належить лише одна гілка дерева, то напрямок перетину можливо визначити як напрямок цієї гілки (назовні або всередину перетину). Таким чином, напрямок гілки дерева по відношенню до «свого» перетину буде завжди додатним, а напрямки хорд можуть співпадати або не співпадати з напрямом перетину. В матриці перетинів Π кожному перетину відповідає рядок, кожній дузі – стовець. В клітинку

матриці на перетині i -го рядка та j -го стовпця вписується елемент P_{ij} за наступним правилом”[11]:

- $P_{ij} = 1$, якщо дуга j входить до перетину j та їх напрямки співпадають ;
- $P_{ij} = -1$, якщо дуга j входить до перетину j та їх напрямки протилежні;
- $P_{ij} = 0$, якщо дуга j не входить до перетину j ;

1.7 Формування матриці контурів

“Циклом називається замкнений маршрут обходження певної підмножини вершин графа по його ребрах. Якщо цикл утворено гілками дерева графа і єдиною хордою, то такий цикл називається головним циклом або контуром”[11].

“Дуги графа та контури пов’язані відношенням інцидентності: кожному контуру належить визначена сукупність дуг і, навпаки, кожна дуга входить або не входить до певного контуру. Ця відповідність може бути представлена матрицею контурів P , що є прямокутною таблицею, кожен рядок якої відповідає певному контуру, а стовпці відповідають дугам. При запису матриці контурів напрямки ребер ототожнюються з додатними напрямками струмів, що протікають у них. Додатній напрямок контуру співпадає з напрямком єдиної хорди, що входить до контуру. В клітинку матриці на перетині рядка та стовпця вписується елемент P_{ij} за наступним правилом”[11]:

- $P_{ij} = 1$, якщо контур проходить через гілку та їх напрямки співпадають
- $P_{ij} = -1$, якщо контур проходить через гілку та їх напрямки протилежні
- $P_{ij} = 0$, якщо контур не проходить через гілку

1.8 Отримання топологічних матриць

“Раніше було показано, що матриці інциденцій, перетинів та контурів можуть бути відтворені шляхом аналізу графу відповідного електричного кола. Але зараз буде показано, що це також можна зробити за допомогою ЕОМ”[11].

“Матриця A отримується дуже просто. Рядкам матриці ставиться у відповідність номер вузла електричного кола (окрім нульового вузла), а стовпцям — номер елемента у списку елементів схеми (подібно до номеру гілки у графі). Якщо гілка k з’єднує вузли i та j з стрілкою напрямленою до вузла j , то елемент матриці $A_{ij} = 1$, а елемент $A_{ji} = -1$, і навпаки, якщо гілка напрямлена до вузла i ”[11].

1.9 Висновки до розділу 1

В даному розділі було детально оглянута задача моделювання систем, була встановлена мета та цілі, розглянута структура задачі. Детально описані елементи, що складають базовий набір елементів та принцип будови складних елементів.

2. Дослідження методів представлення лінійних та нелінійних елементів електричного кола

2.1. Алгебраїзація реактивних компонентів

“Реактивними називають компоненти, до рівнянь яких входять похідні за часом від схемних змінних. Реактивними, зокрема, є звичайні лінійні ємності та індуктивності”[11]:

$$i_c = C \frac{du_c}{dt}$$

$$u_L = C \frac{di_L}{dt}$$

“Враховуючи специфіку чисельних методів, що застосовуються для аналізу кола, для похідної за часом можна застосувати апроксимацію”[11]:

$$\frac{dy_n}{dt} = \frac{\alpha_0}{h} y_n - \frac{1}{h} \sum_{i=1}^K \alpha_i y_{n-1}$$

де K - порядок методу інтегрування; $\alpha_0, \dots, \alpha_{K-1}$ - коефіцієнти апроксимаційного полінома; h - крок інтегрування, n - індекс кроків за часом.

“Використовуючи наведене співвідношення, компонентне рівняння для ємності можна записати у вигляді”[11]:

$$i_{Cn} = \frac{\alpha_0}{h} C u_{Cn} - \frac{C}{h} \sum_{i=1}^{K-1} \alpha_i u_{C(n-i)}$$

або

$$i_{Cn} = G_{Cn} u_{Cn} + J_{Cn}$$

де

$$G_{Cn} = \frac{\alpha_0 C}{h}; \quad J_{Cn} = -\frac{C}{h} \sum_{i=1}^{K-1} \alpha_i u_{C(n-i)}$$

“Таким чином, в межах даного кроку за часом можна формально представити ємність як паралельне з’єднання лінійної провідності G_{Cn} і джерела струму J_{Cn} , величина якого залежить від стану елемента в попередні моменти часу (рис. 2.11)”[11].

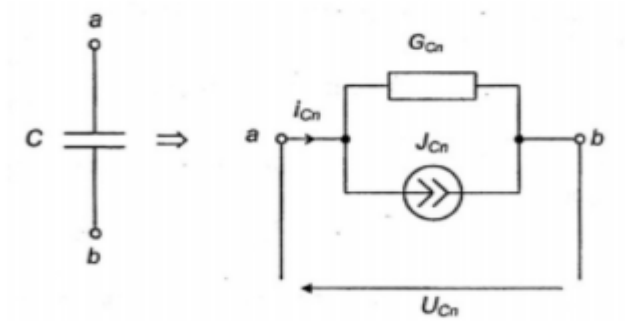


Рис. 2.1.1 Алгебраїзація ємності

Аналогічно, компонентне рівняння індуктивності можна представити у вигляді:

$$u_{Ln} = \frac{\alpha_0}{h} L i_{Ln} - \frac{L}{h} \sum_{i=1}^{K-1} \alpha_i i_{L(n-i)}$$

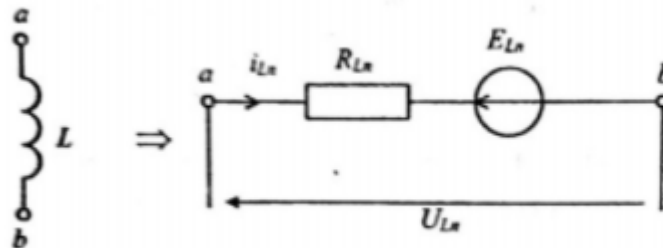
або

$$u_{Ln} = R_{Ln} i_{Ln} + E_{Ln}$$

де

$$R_{Ln} = \frac{\alpha_0 L}{h}; \quad E_{Ln} = - \frac{L}{h} \sum_{i=1}^{K-1} \alpha_i i_{L(n-i)}$$

“Таким чином, в межах даного кроку за часом можна формально представити індуктивність як послідовне з’єднання лінійного опору RL_n і джерела напруги E_{Ln} , величина якого залежить від стану елемента в попередні моменти часу (рис. 2.1.2)”[11].



2.2. Лінеаризація нелінійностей

“В практиці моделювання досить часто доводиться розглядати компоненти, властивості яких описуються нелінійними рівняннями виду $y = f(x)$, де y — струм або напруга на компоненті, x — вектор схемних змінних, $f(x)$ — деяка нелінійна залежність, що з огляду на застосовувані чисельні методи аналізу вважається неперервною та диференційованою по всіх змінних. Враховуючи, що на кожній ітерації чисельного аналізу схемні змінні зазнають малих прирощень, нелінійну залежність $f(x)$ можна лінеаризувати в околі поточних”[11].

значень вектора невідомих:

$$y^{m+1} = f(x^m) + \sum_{i=1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} (x_i^{m+1} - x_i^m)$$

де m — індекс ітерацій.

“В загальному випадку ми вважаємо, що величина y залежить від усіх схемних змінних, однак на практиці зазвичай вона явно залежить лише від невеликої підмножини їх. Похідна $\partial f / \partial x_i$ визначається в точці x та є константою в межах однієї ітерації. На наступній ітерації її значення переобчислюється відповідно до поточних значень схемних змінних”[11].

Останнє співвідношення можна переписати у вигляді:

$$y^{m+1} = \sum_{i=1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} (x_i^{m+1}) + (f(x^m) - \sum_{i=1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} (x_i^m))$$

“Отже, нелінійний компонент в межах даної ітерації можна представити як комбінацію лінійного компонента типу провідності або опору і джерела струму або напруги, величина змінної якого на даній ітерації є відомою”[11].

“В результаті застосування операцій алгебраїзації та лінеарізації вдається формально звести початкову схему до резистивного кола із залежними та незалежними джерелами”[11].

2.3. Метод Ейлера

Однокрокові методи інтегрування базуються на розкладі точного значення $x(t)$ в околі $t = t_n$ в ряд Тейлора

$$x_{n+1} = x_n + h * T_p(x_n, t_n, h)$$

де $h = t_{n+1} - t_n$ — крок чисельного інтегрування.

$$T_p = \varphi(x_n, t_n) + \frac{h}{2!} \varphi'(x_n, t_n) + \dots + \frac{h^{p-1}}{p!} \varphi^{(p-1)}(x_n, t_n)$$

При $p = 1$ отримуємо *явний метод Ейлера*.

“Поняття неявного методу введене для формул наближення, які містять шукані значення x_{n+1} в лівій і правій частинах. Отже, *неявний метод Ейлера* має вигляд”[11]:

$$x_{n+1} = x_n + h * f(x_{n+1}, t_{n+1})$$

2.4. Метод Ньютона-Рафсона

Розглянемо рівняння

$$f(x) = 0$$

і приймемо $x = x^{(j)}$ у якості j -го наближення. Припустимо, що $x^{(j)}$ не є рішенням. Отже, $f(x^{(j)})$ не дорівнює нулю. Також припустимо, що ми отримали ряд Тейлора для $f(x)$ відносно точки $x = x^{(j)}$

$$f(x) = f(x^{(j)}) + \frac{df(x)}{dx} \Big|_{x=x^{(j)}} (x - x^{(j)}) + \frac{1}{2!} \frac{d^2 f(x)}{dx^2} \Big|_{x=x^{(j)}} (x - x^{(j)})^2 + \dots \quad (1)$$

Якщо прийняти в якості наступного члена $x = x^{(j+1)}$, то рівняння буде мати вигляд[11]:

$$f(x^{(j+1)}) = f(x^{(j)}) + \left. \frac{df(x)}{dx} \right|_{x=x^{(j)}} (x^{(j+1)} - x^{(j)}) + \frac{1}{2!} \left. \frac{d^2 f(x)}{dx^2} \right|_{x=x^{(j)}} (x^{(j+1)} - x^{(j)})^2 + \dots (2)$$

“Тепер припустимо, що справедливо необов’язкове допущення того, що попереднє наближення $x^{(j)}$ задовольняло, так що $x^{(j+1)} - x^{(j)}$ мале. Якщо це припущення вірне, ми можемо знехтувати членами більш високого порядку в рівнянні (1), так як n -а степінь малої величини значно менша, ніж мала величина для $n \geq 2$. В такому разі рівняння (1) може бути апроксимоване наступним чином”[11]:

$$f(x^{(j+1)}) \approx f(x^{(j)}) + \left. \frac{df(x)}{dx} \right|_{x=x^{(j)}} (x^{(j+1)} - x^{(j)}) (3)$$

“Наша ціль – вибір такого значення $x^{(j+1)}$, щоб воно стало рішенням рівняння $f(x) = 0$. Отже, якщо наше попереднє припущення справедливе, $x^{(j+1)}$ повинно бути вибране таким чином, щоб $f(x^{(j+1)}) = 0$. Прирівняв рівняння (3) до нуля і розв’язав відносно $x^{(j+1)}$, отримаємо”[11]:

$$x^{(j+1)} = x^{(j)} - \left| J(x^{(j)}) \right|^{-1} f(x^{(j)}) (4)$$

де

$$\left| J(x^{(j)}) \right|^{-1} \triangleq \left| \left. \frac{df(x)}{dx} \right|_{x=x^{(j)}} \right|^{-1} (5)$$

Рівняння (4) може бути визначене як рівняння Ньютона-Рафсона.

2.5. Висновки до розділу 2

У даному розділі була оглянута базова теорія для рішення задачі машинного моделювання: базові закони фізики, теорія графів, математичні та чисельні методи для формування та рішення рівнянь рівноваги.

3. Розробка програми для моделювання електричного кола

На сьогоднішній день існують потужні спеціалізовані програми для моделювання динамічних систем, такі як ALLTED та PSPICE. Даний додаток не має на меті конкурувати з ними, але може стати корисним інструментом для навчання математичного моделювання та більш детальному вивченню фізичних процесів пов'язаних з ним, з можливістю переглядати кожен крок від побудови систем рівнянь за обраною моделлю до аналізу побудованої схеми[11].

Для розробки додатку було обрано мову програмування Python, тому що це скриптова об'єктно-орієнтована мова, що має велику кількість бібліотек, що упростить процес написання коду даної програми[11].

Так як мовою програмування обрано Python, то працювати створений модуль буде на будь-якій операційній системі, що має встановлений інтерпретатор для мови Python, версії 3 або вище[11].

3.1. Формування Загально-Табличної моделі (ЗТМ)

“Вектор V потенціалів, вектор i струмів всіх гілок схеми в поєднанні із вектором u напруг цих гілок формують повний набір схемних змінних, або повний координатний базис. Топологічні рівняння схеми, записані за законами Кірхгофа та законом Ома, можна представити в матричній формі із використанням структурної матриці”[11].

“Топологічні рівняння доповнюються компонентними рівняннями – співвідношеннями, що виражають характеристики відповідних компонентів. При побудові математичних моделей для чисельного аналізу компонентні рівняння піддають процедурам алгебраїзації та лінеаризації, після чого кожне таке рівняння може бути представлене в одній з двох форм”[11]:

Y-Компонент (джерело струму):

$$i_v = \sum_i y_{vi} u_i + I_v$$

Z-компонент (джерело напруги):

$$u_\mu = \sum_j z_{\mu j} i_j + U_\mu$$

Гілки	A^t		$-I$
Вузли		A	
Z		$-R^{(j)}$	I
Y		I	$-G(j)$

*

V
i
U

=

E_j
I_j

Розмірність:

$$(2n + m - 1) \times (2n + m - 1),$$

де m – кількість вузлів; n – кількість гілок графа.

Тут:

$$i = \varphi(U) \Rightarrow i^{(j)} = G^{(j)} U^{(j)} + I_j;$$

$$U = \Psi(i) \Rightarrow U^{(j)} = R^{(j)} i^{(j)} + E_j.$$

3.2. Формування Таблично-Вузлової моделі в потенціалах (ГМ10)

“Гібридна модель ГМ10 є найбільш поширеною формою представлення математичних моделей електричних схем. Саме на основі ГМ10 (інша назва – розширений однорідний координатний базис або РОКБ) побудовані всі найбільш відомі пакети схемотехнічного проектування: родина пакетів SPICE (PSpice, HSpice, T-Spice тощо), вітчизняна САПР Allted (NetAllted, WebAllted, GridAllted). На відміну від ГМ1, де в якості базисних змінних використовуються напруги ребер графа, в ГМ10 використовуються потенціали вузлів. Оскільки, за визначенням, дерево графа повинно містити всі вузли, то кількість потенціалів

вузлів, що входять до складу гібридної моделі схеми з вузлами, дорівнює $n-1$. Із моделі виключається базисний (найчастіше – нульовий) вузол. Таким чином, розширений однорідний координатний базис ГМ10 включає вектор V потенціалів вузлів і вектор i_z струмів Z -компонентів. Система рівнянь складається з рівнянь перетинів із підставленими рівняннями Y -компонентів, а також компонентні рівняння Z -компонентів. Розмірність математичної моделі становить $(n-1+m_z)$, де n — кількість вузлів в схемі, m_z — кількість Z -компонентів”[11].

“Оскільки структурна матриця A відображає поєднання вузлів схеми (також за винятком базисного вузла), то кількість потенціалів вузлів, що входять до складу гібридної моделі, дорівнює кількості рядків матриці A . Напруги всіх гілок схеми легко виражаються через потенціали вузлів за елементами структурної матриці”[11]:

$$u_v = V_i - V_j$$

де i, j – індекси додатного та від’ємного ненульових елементів стовпця структурної матриці, що відповідає гілці v . Якщо у стовпці лише один ненульовий елемент, то це означає, що другий вузол відповідної гілки – базисний, і в формулі, що наведена вище, також залишається лише одна складова[11].

3.3. Опис архітектури

Результатом моделювання електронної схеми є її математична модель з можливістю подальшого його аналізу[11].

Отже реалізуємо клас, що буде відповідати математичній моделі електричного кола та зберігати в собі всі необхідні дані, такі як: номери та індекси вузлів, список компонентів (нетліст), сформовані рівняння рівноваги[11].

Представимо діаграму класу Circuit:

Circuit
+ nodes: array
+ components: array
+ matrix_A: array
+ vector_b: array
+ form_matrix(): None
+ solve_DC(): dict
+ solve_AC(): dict
+ print_results(): string
+ draw_plot(): None

Рис. 3.3.1 Діаграма класу Circuit

Під час ініціалізації об'єкту класу Circuit з списком елементів формується список вузлів схеми та матриця з значеннями відповідно до обраного метода шляхом почергового аналізу елементів кола та додаванням їх характеристик до матриці.

Також для ініціалізації об'єкту можна вказати тип моделі, що буде створюватися. За замовчуванням додаток використовує загальний табличний метод (ЗТМ), який можна замінити на гібридний ГМ10[11].

Розберемо на прикладі базового елементу резистора алгоритм формування матриці, що представляє модель електричного кола:

```
def_add_OTM(self, circuit, start=None, step=None, iter=None):

    # print ("R(", self.nodes[0], ",", self.nodes[1], ")=", self.args)

    components_len = len(circuit.components)

    nodes_len = len(circuit.nodes)

    ind = circuit.components.index(self)

    i = self.nodes[0]

    j = self.nodes[1]
```

```

    if (i > 0):

        circuit.A[ind, i-1] = 1

        circuit.A[components_len+i-1, nodes_len+ind-1] = 1

    if (j > 0):

        circuit.A[ind, j-1] = -1

        circuit.A[components_len+j-1, nodes_len+ind-1] = -1

    # -I

    circuit.A[ind, components_len+nodes_len-1+ind] = -1

    # I

    circuit.A[components_len+nodes_len-1+ind, components_len+nodes_len-1+ind] = 1

    # R(j)

    circuit.A[components_len+nodes_len-1+ind, nodes_len-1+ind] = -self._args

```

Лістинг методу для додавання елемента до матриці, використовуючи ЗТМ

Ми можемо побачити, що до відповідних клітинок матриці додається інформація про вузли до яких підключений елемент та його внутрішні характеристики.

Для моделі ГМ10 бачимо аналогічний принцип додавання інформації про характеристики елемента у відповідні клітинки матриці.

```

def add_HM10(self, circuit):

    i = self.nodes[0]

    j = self.nodes[1]

    if i > 0 and j > 0:

        circuit.A[i - 1, i - 1] += 1 / self._args

```

```

circuit.A[i - 1, j - 1] += -1 / self._args

circuit.A[j - 1, i - 1] += -1 / self._args

circuit.A[j - 1, j - 1] += 1 / self._args

elif i > 0 and j == 0:

    circuit.A[i - 1, i - 1] += 1 / self._args

elif i == 0 and j > 0:

    circuit.A[j - 1, j - 1] += -1 / self._args

```

Лістинг методу для додавання елементу до матриці, використовуючи ГМ10

Також на даній діаграмі видно деякі з можливих аналізів: DC-аналіз та АС-аналіз.

Методи DC та АС аналізів повертають словник, що має таку структуру:

- Назва аналізу;
- Початок відліку часу;
- Кінець відліку часу;
- Крок часу;
- Список векторів напруг та струмів (для кожного моменту часу

та для кожного елементу схеми).

Зроблено це задля зручності формування результатів, як у текстовій так і графічній формах[11].



Рис. 3.3.2 Діаграма послідовності роботи програми

“На діаграмі, представленій вище, зображений детальний опис сценаріїв використання даної програми. Користувач створює компоненти необхідні йому для моделювання схеми. Потім необхідно створити об’єкт схеми Circuit та передати йому у нетліст створенні раніше елементи для формування математичної моделі. При виклику методу для аналізу схеми користувачу буде надано рішення рівнянь рівноваги для даної моделі у вигляді текстової та графічної відповіді”[11].

3.4. Реалізація базових елементів

“Для реалізації компонентів було створено клас `Component` з загальними полями та методами. Всі компоненти з базового набору наслідують клас `Component`. Тобто для створення нового компоненту необхідно просто перевизначити або додати необхідні поля та/або методи. Це полегшує масштабування програми у майбутньому, створення нових, необхідних користувачу елементів схеми, що не входять у базовий набір”[11].

Component
+ id: int
+ nodes: array
+ args: float
+ name: string
+ add(circuit): None
+ print(): string

Рис. 3.4.1 Діаграма класу `Component`

Кожен компонент має властивості, що характеризують його, такі як: назва елемента, вузли до яких він під’єднаний, внутрішні параметри елемента та одиниці вимірювання фізичної величини.

```
def __init__(self, name: str, nodes: list, resistance: float):  
  
    self.name = name  
  
    self.nodes = nodes  
  
    self._args = resistance  
  
    self.index = "Ohm"
```

Лістинг методу для ініціалізації компонента резистора.

3.4.1 Резистор

Створимо клас `Resistor`, що наслідує клас `Component` і має такі властивості[11]:

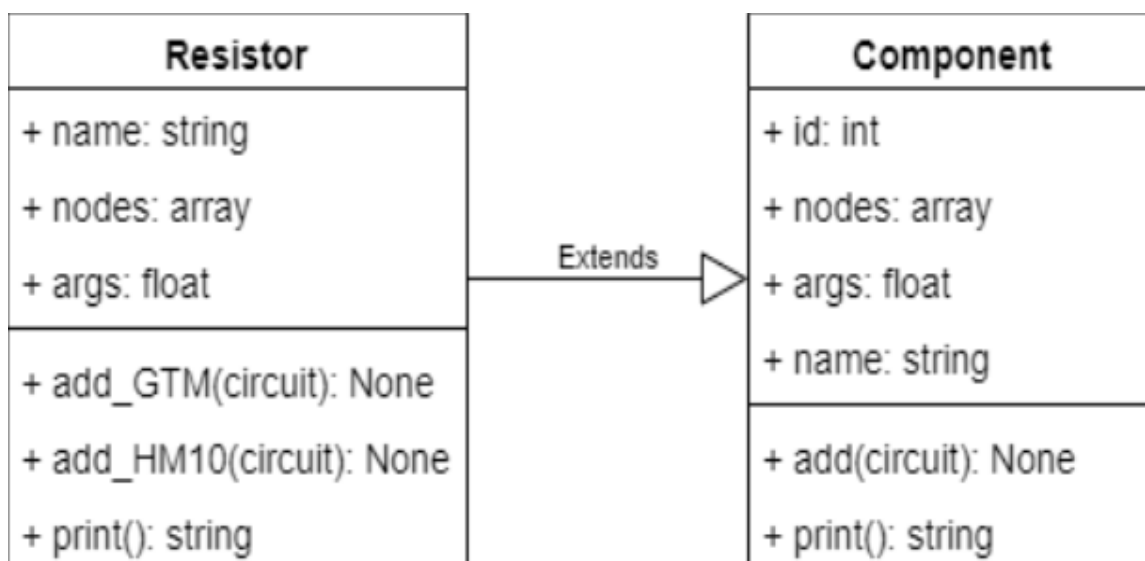


Рис. 3.4.1.1 Діаграма класу Resistor

Компонент резистор має обов'язкові параметри для його ініціалізації: `name` - назва елемента, `nodes` - пара вузлів, до яких підключений елемент, `args` - внутрішні параметри елемента.

3.4.2 Джерело струму

Створимо клас **CurrentSource**, що наслідує клас **Component** і має такі властивості[11]:

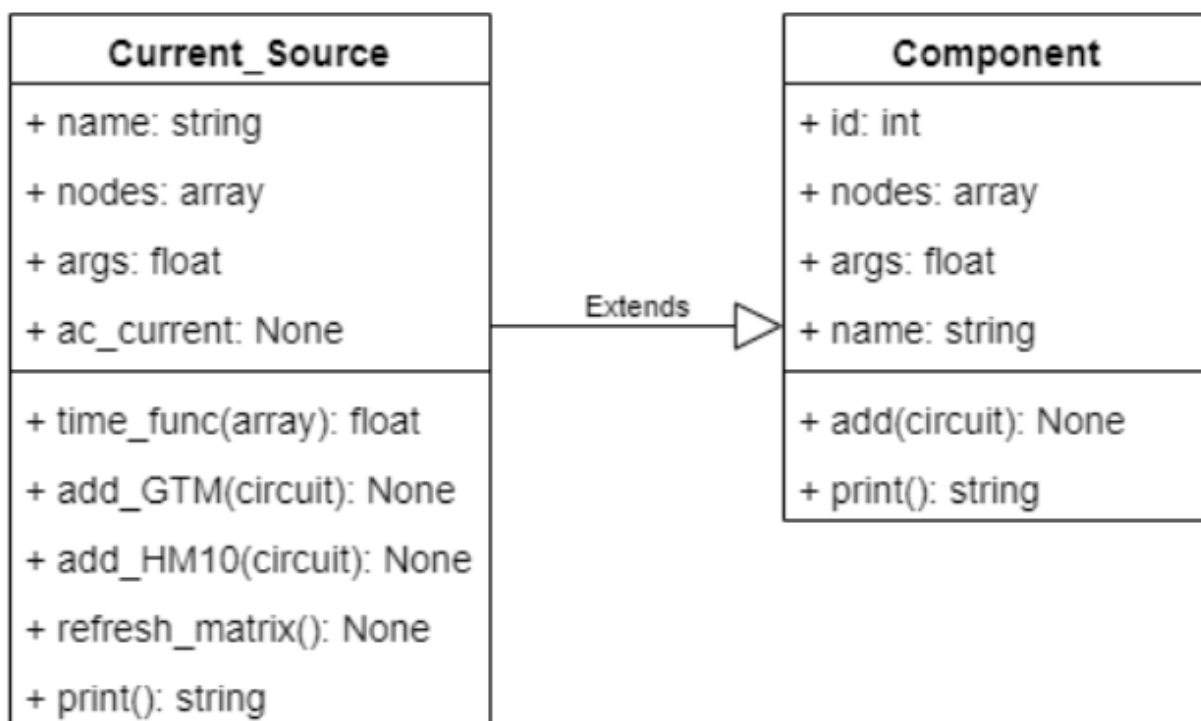


Рис. 3.4.2.1 Діаграма класу CurrentSource

Компонент джерела струму має обов'язкові параметри для його ініціалізації: name - назва елемента, nodes - пара вузлів, до яких підключений елемент, current - внутрішні параметри елемента, ac_current - приймає функцію, що залежить від часу (t), можливі функції:

- $I = I_0 * \sin(w * t + \varphi)$
- $I = \{I_0, \text{ при } t > t_0 \ 0, \text{ при } t \leq t_0\}$

3.4.3 Джерело напруги

Створимо клас VoltageSource, що наслідує клас Component і має такі властивості[11]:

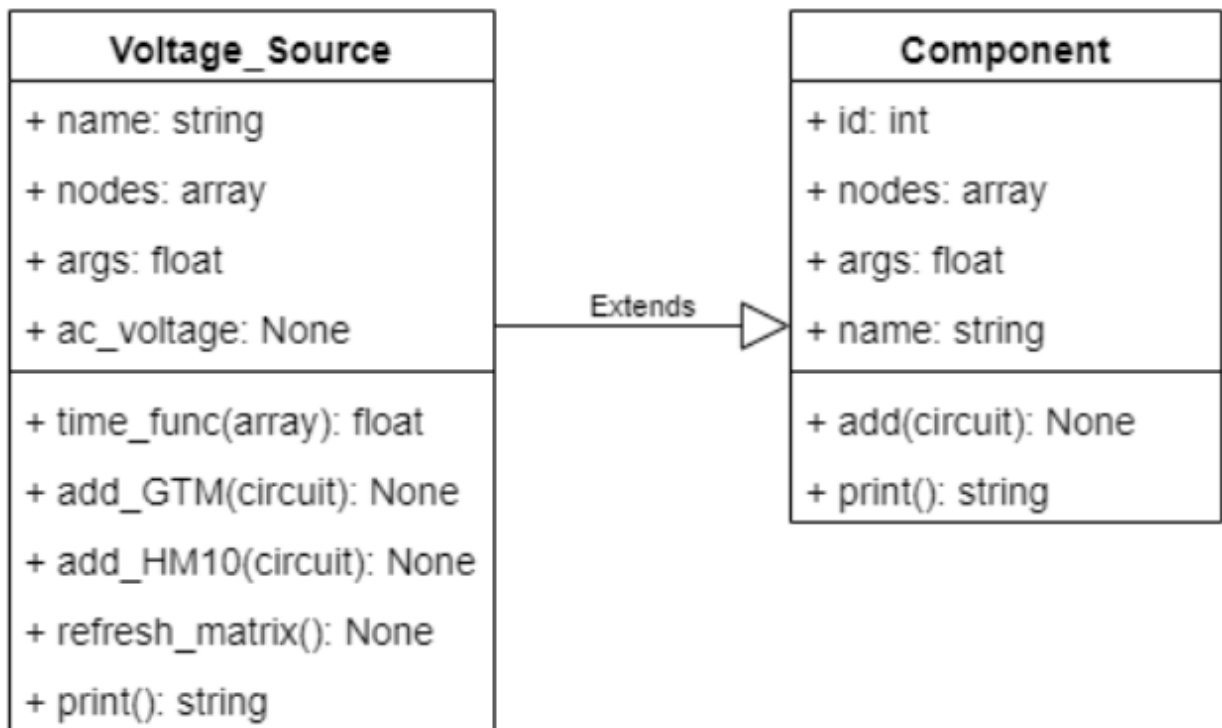


Рис. 3.4.3.1 Діаграма класу VoltageSource

Компонент джерела напруги має обов'язкові параметри для його ініціалізації: name - назва елемента, nodes - пара вузлів, до яких підключений елемент, voltage - внутрішні параметри елемента, ac_voltage - приймає функцію, що залежить від часу (t), можливі функції:

- $V = V_0 * \sin(w * t + \varphi)$
- $V = \{V_0, \text{ при } t > t_0 \ 0, \text{ при } t \leq t_0\}$

3.4.4 Індуктивність

Рівняння для лінійної індуктивності має вигляд:

$$V(t) = L i'(t)$$

Отже,

$$U = L \frac{\partial i}{\partial t}$$

Для проведення часового аналізу за зміним струмом необхідно замінити значення похідної відповідної апроксимацією. Використовуючи явний метод Ейлера[11]:

$$x_{n+1} = x_n + h * f(x, t)$$

Можна переписати так:

$$U = \frac{L}{\Delta t} i_{n+1} - \frac{L}{\Delta t} i_n$$

Опираючись на попередню інформацію оглянемо клас Inductor. Він наслідує клас Component і має такий вигляд[11]:

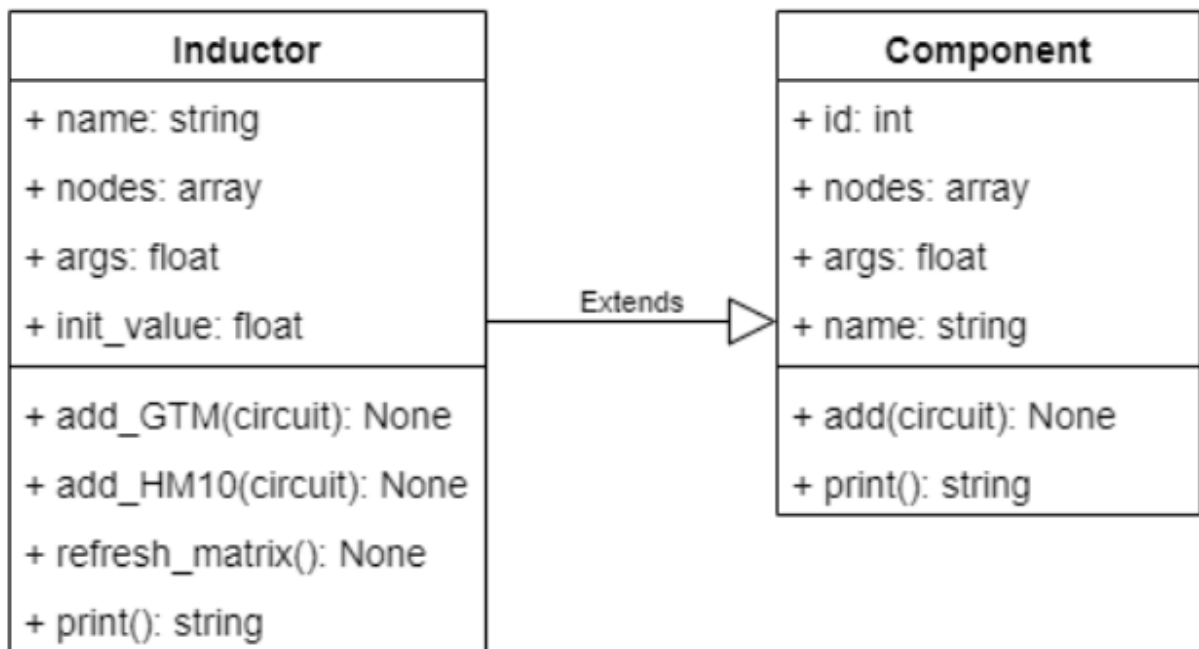


Рис. 3.4.4.1 Діаграма класу Inductor

Компонент джерела напруги має обов'язкові параметри для його ініціалізації: `name` - назва елемента, `nodes` - пара вузлів, до яких підключений

елемент, inductance - внутрішні параметри елемента, init_value - початкове значення сили струму на елементі.

3.4.5 Ємність

Рівняння для лінійної ємності має вигляд:

$$I(t) = C u'(t)$$

Отже,

$$I = C \frac{\partial u}{\partial t}$$

Подібно до випадку індуктивності для проведення часового аналізу за зміним струмом необхідно замінити значення похідної відповідної апроксимацією. Використовуючи явний метод Ейлера[11]:

$$x_{n+1} = x_n + h * f(x, t)$$

Можна переписати так:

$$I = \frac{C}{\Delta t} u_{n+1} - \frac{C}{\Delta t} u_n$$

Опираючись на попередню інформацію оглянемо клас Inductor. Він наслідує клас Component і має такий вигляд[11]:

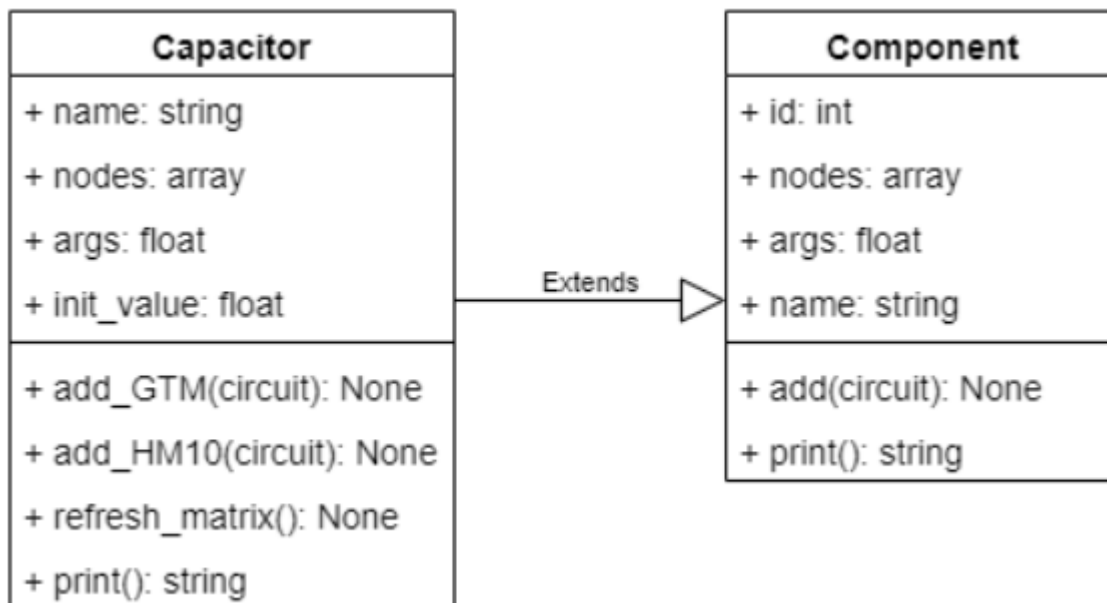


Рис. 3.4.5.1 Діаграма класу Capacitor

Компонент джерела напруги має обов'язкові параметри для його ініціалізації: name - назва елемента, nodes - пара вузлів, до яких підключений елемент, saracity - внутрішні параметри елемента, init_value - початкове значення напруги на елементі.

3.4.6 Кероване джерело напруги

Створимо клас Voltage_Driven_Source, що наслідує клас Component і має такі властивості:

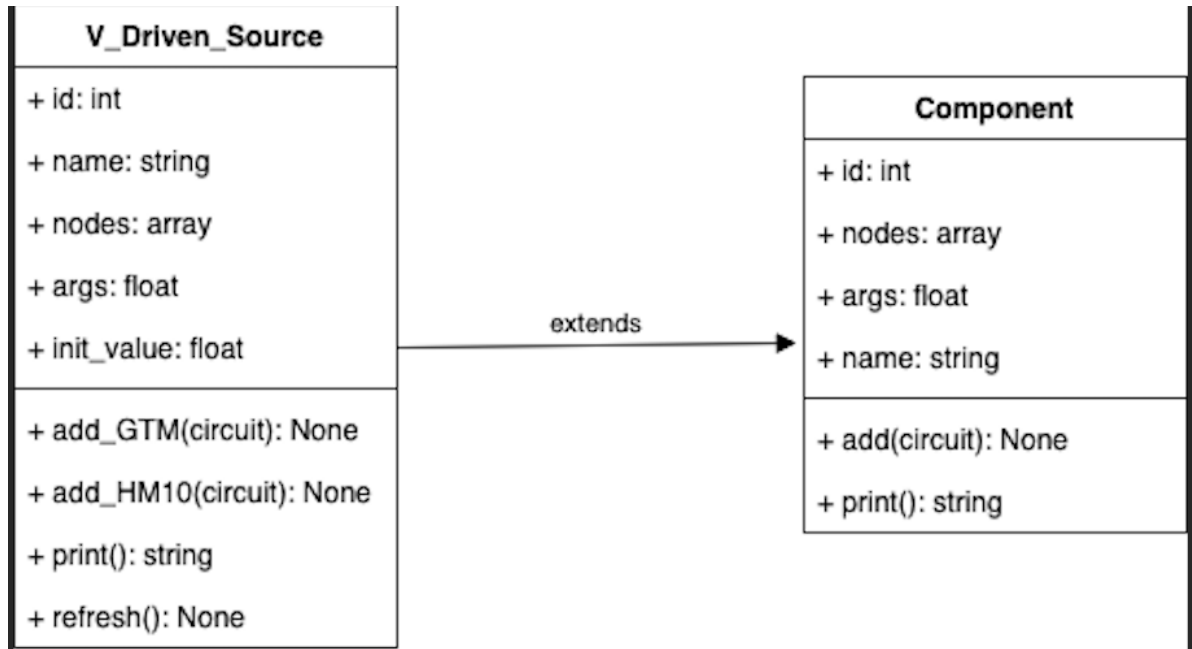


Рис. 3.4.6.1 Діаграма класу Voltage_Driven_Source

Оглянемо параметри, що необхідні для ініціалізації об'єкту класу:

- name – назва для компонента в схемі;
- nodes – список з вузлів, до яких під'єднаний резистор (даному випадку 2 вузли)
- voltage – числове значення з плаваючою точкою для визначення напруги
- as_voltage – функція залежна від часу (для аналізу за змінним струмом), приймає функцію, або кортеж значень для функцій за замовченням. Наявні функції:
 - $V = V0 * \sin(w * t + \varphi)$
 - $V = \{V0, \text{при } t > t0 \ 0, \text{при } t \leq t0\}$

3.4.7 Кероване джерело струму

Створимо клас `Current_Driven_Source`, що наслідує клас `Component` і має такі властивості:

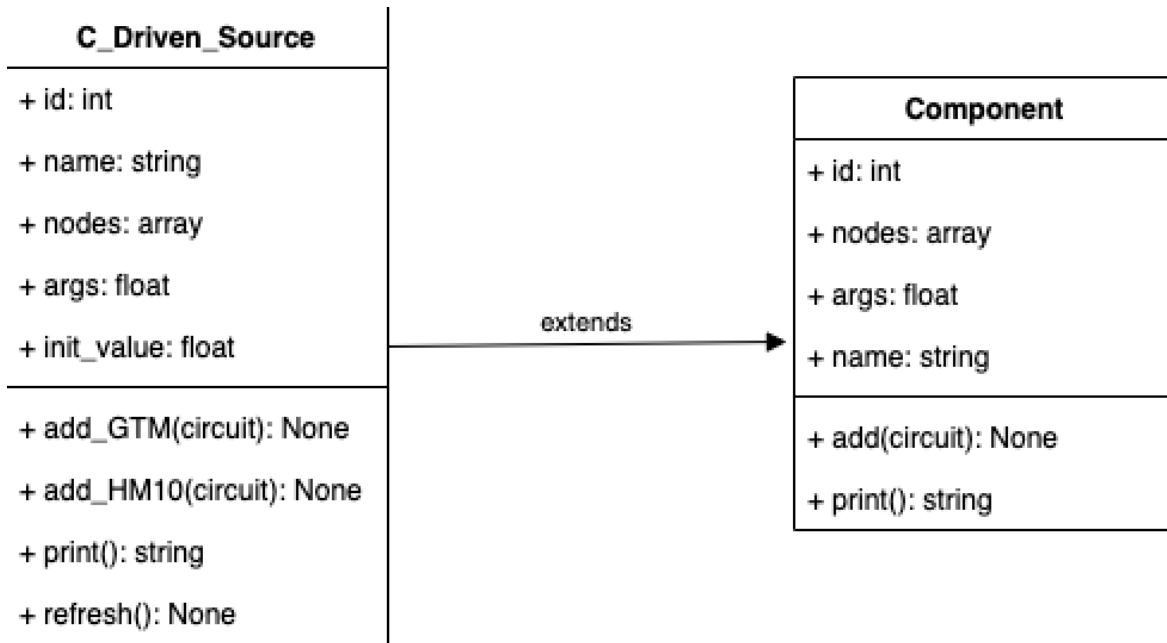


Рис. 3.4.7.1 Діаграма класу `Current_Driven_Source`

Оглянемо параметри, що необхідні для ініціалізації об'єкту класу:

- `name` – назва для компонента в схемі;
- `nodes` – список з вузлів, до яких під'єднаний резистор (даному випадку 2 вузли)
- `voltage` – числове значення з плаваючою точкою для визначення напруги
- `ac_voltage` – функція залежна від часу (для аналізу за змінним струмом), приймає функцію, або кортеж значень для функцій за замовченням. Наявні функції:
 - $V = V0 * \sin(w * t + \varphi)$
 - $V = \{V0, \text{при } t > t0, 0, \text{при } t \leq t0\}$

3.5 Тестування додатку для моделювання та аналізу електричних кіл

3.5.1 Приклад 1. Моделювання схеми з джерелом струму та резистором

Розглянемо електричне коло, що складається з двох елементів: джерела струму та резистора, та двох вузлів (один з яких ненульовий)[11].

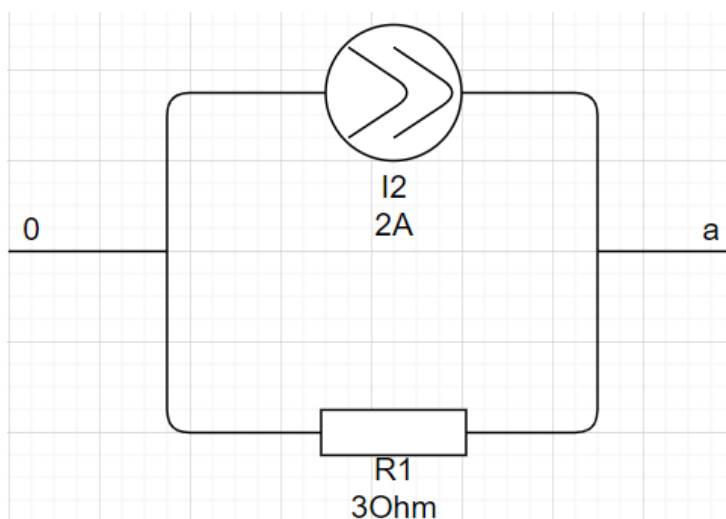


Рис. 3.5.1.1 Схема до прикладу 1

Вкажемо силу струму джерела як 2 Ампера, а опір резистора – 3 Ом.

Проведемо TR аналіз для даних значень.

Отримаємо такі результати:

```
[[-1.  0.  0. -1.  0.]  x1  [0.]  
[-1.  0.  0.  0. -1.]  x2  [0.]  
[ 0. -1. -1.  0.  0.] * x3 = [0.]  
[ 0. -3.  0.  1.  0.]  x4  [0.]  
[ 0.  0.  1.  0.  0.]] x5  [2.]
```

Рис. 3.5.1.2 Сформована система для прикладу 1

```
φ1 = 6.0 Volt.  
R1 = 3 Ohm.  
I1 = -2.0 Ampere | V1 = -6.0 Volt.  
I2 = 2 Ampere.  
I2 = 2.0 Ampere | V2 = -6.0 Volt.
```

Рис. 3.5.1.3 Результати прикладу 1

3.5.2 Приклад 2. Моделювання схеми з змінним джерелом струму, резистором та елементом ємності

Тепер перевіримо аналіз за змінним струмом. Розглянемо електричне коло, що складається з трьох елементів: джерела струму, резистора та одного елементу ємності, та двох вузлів (один з яких ненульовий)[11].

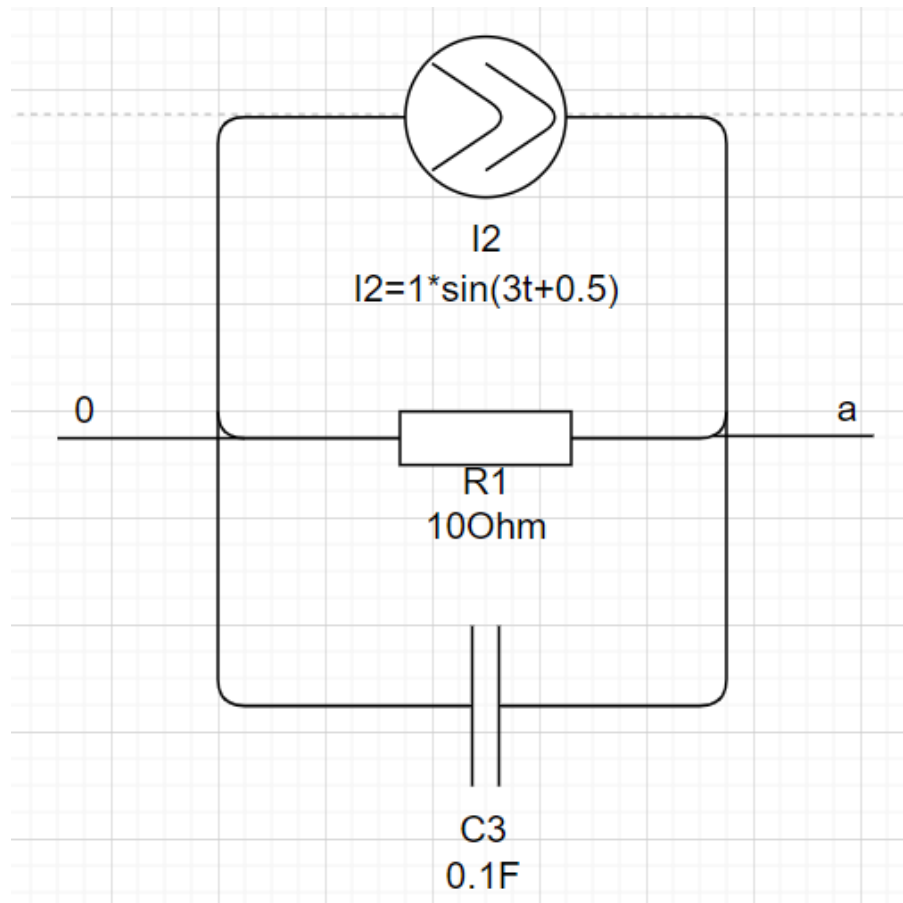


Рис. 3.5.2.1 Схема до прикладу 2

Нехай сила струму джерела задається формулою:

$$I = I_0 * \sin(w * t + \varphi)$$

де $I_0 = 1$, $w = 3$, $\varphi = 0.5$.

Опір резистора – 10 Ом, а заряд ємності – 0.1 Фарад.

Проведемо АС аналіз для даних значень.

Задамо час для аналізу: початок відліку 0с, кінець відліку 2с, крок часу 0.1с.

Отримаємо такі результати:

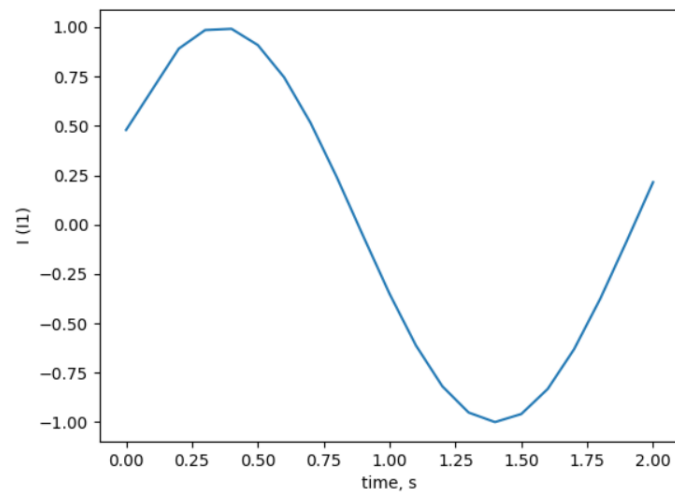


Рис. 3.5.2.2 Графік струму на джерелі струму

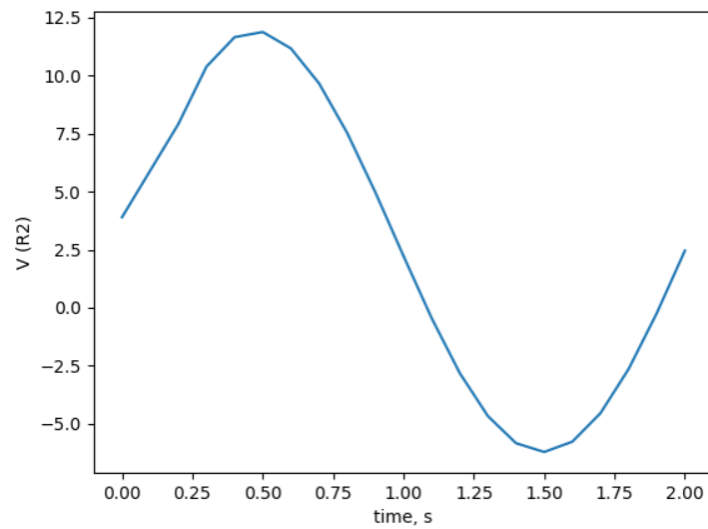


Рис. 3.5.2.3 Графік напруги на резисторі

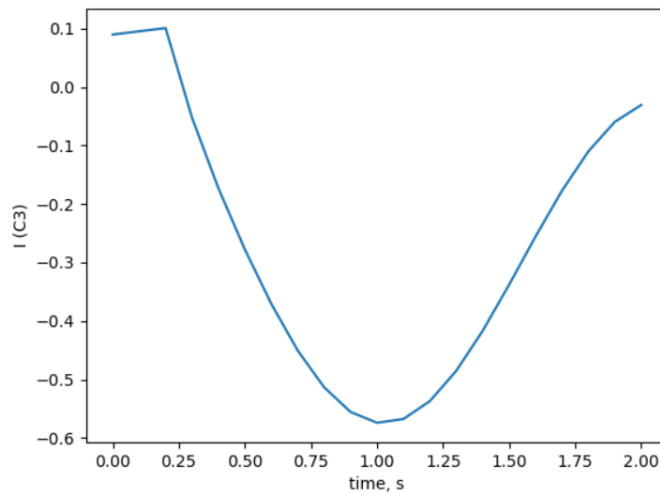


Рис. 3.5.2.4 Графік струму на елементі ємності

3.5.3 Приклад 3. Моделювання схеми з змінним джерелом струму, резистором та елементом індуктивності

Розглянемо схему, що складається з трьох елементів: джерела струму, резистора, одного елементу індуктивності та елементу ємності, та трьох вузлів (два з яких ненульові)[11].

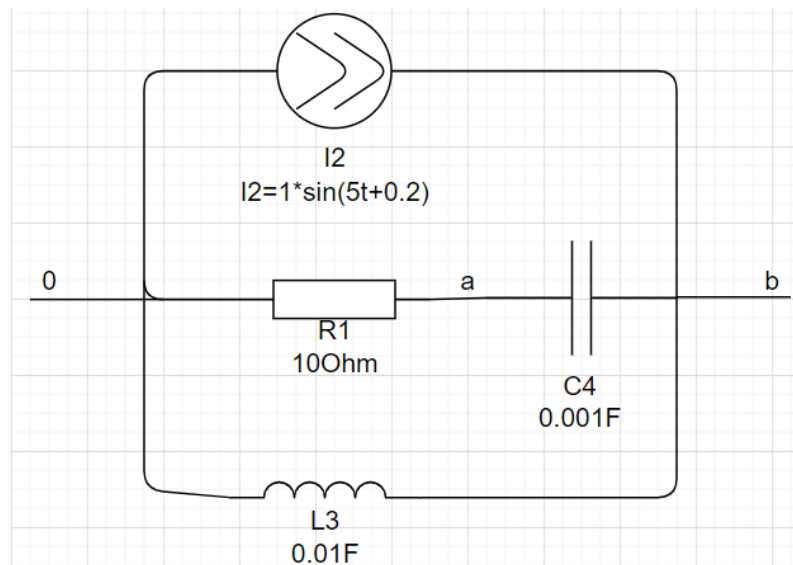


Рис. 3.5.3.1 Схема до прикладу 3

Нехай сила струму джерела задається формулою:

$$I = I_0 * \sin(w * t + \varphi)$$

де $I_0 = 1$, $w = 5$, $\varphi = 0.2$.

Опір резистора – 1 Ом, індуктивність – 0.01 Генрі, а заряд ємності – 0.001 Фарад.

Проведемо АС аналіз для даних значень:

Задамо час для аналізу: початок відліку 0с, кінець відліку 2с, крок часу 0.1с.

Отримаємо такі результати:

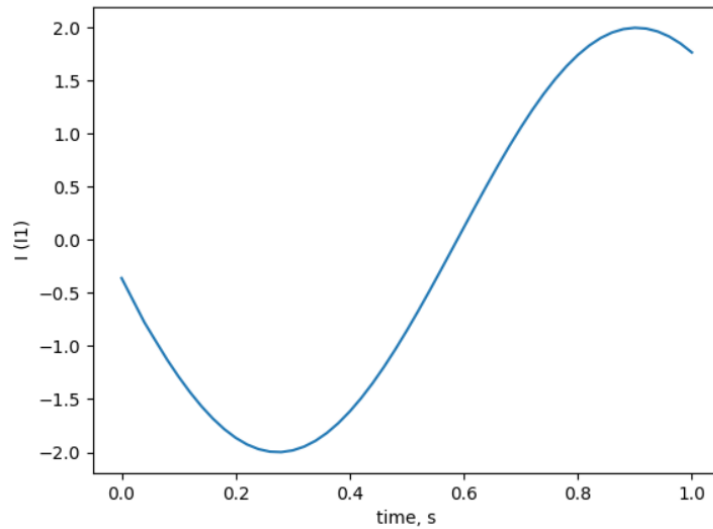


Рис. 3.5.3.2 Графік струму на джерелі струму

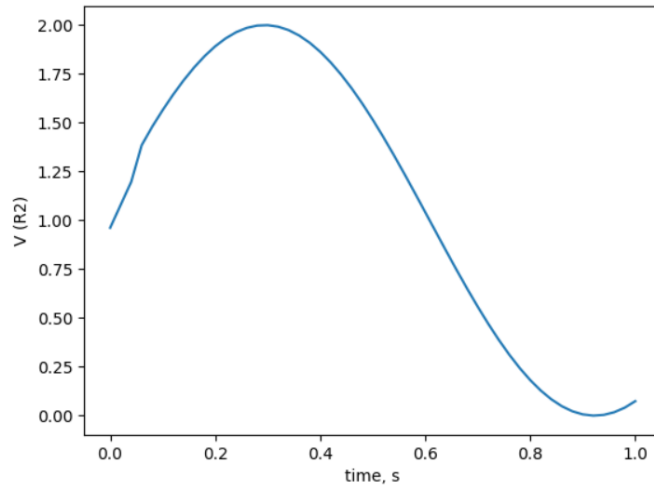


Рис. 3.5.3.3 Графік напруги на резисторі

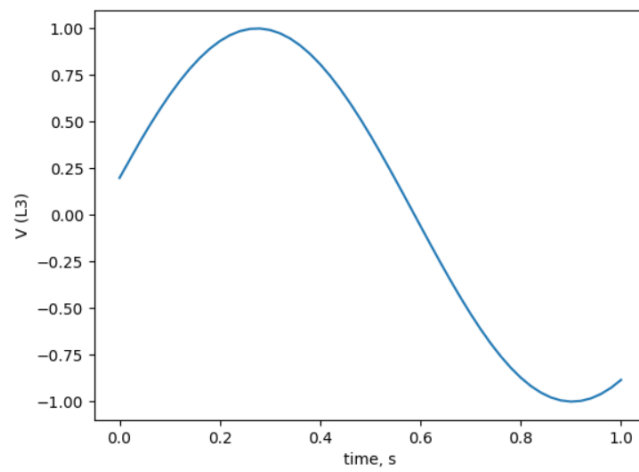


Рис. 3.5.3.4 Графік напруги на елементі індуктивності

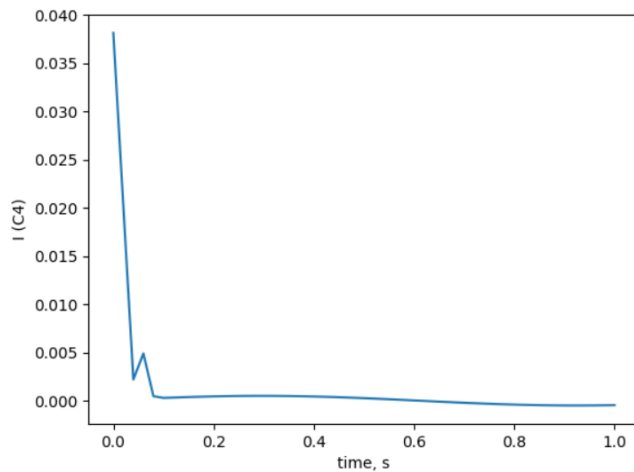


Рис. 3.5.3.5 Графік напруги на елементі ємності

3.5.4 Приклад 4. Моделювання схеми з незалежним джерелом напруги, джерелом напруги керованого напругою та резисторами

Розглянемо схему, що складається з двох елементів: незалежного джерела напруги(2В), джерела напруги керованого напругою($v_d_source(a,b)$), трьох резисторів (кожен по 1Ом) та трьох вузлів (a, b, $grnd$).

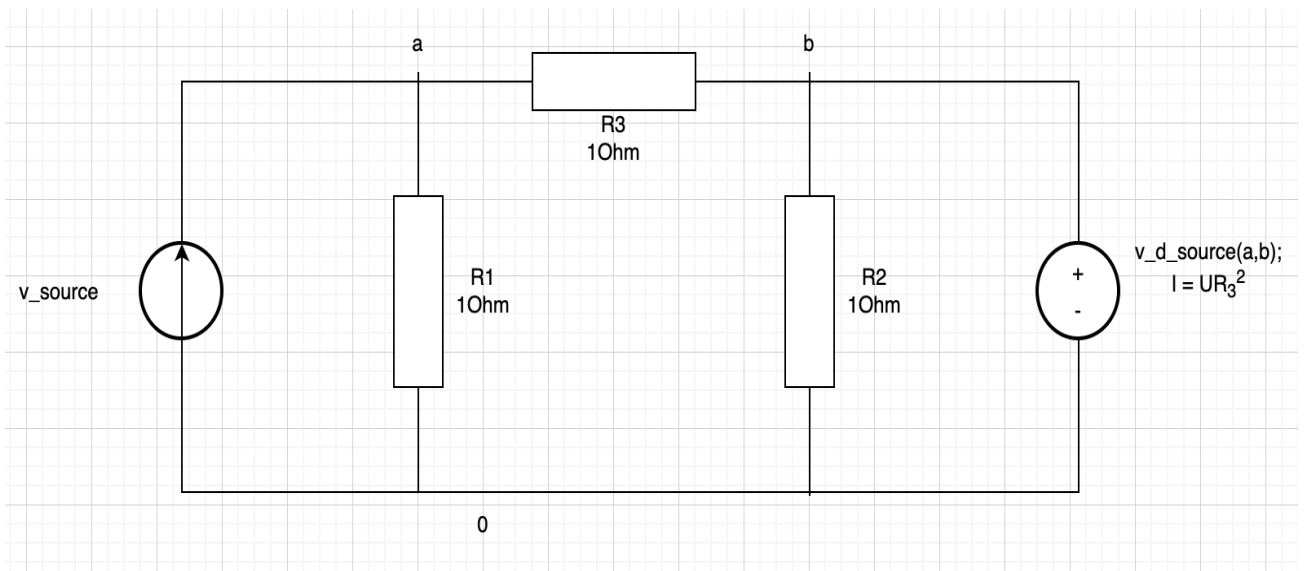


Рис. 3.5.4.1 Схема до прикладу 4

Отримаємо систему нелінійних рівнянь:

$$V2/R3 - V1/R3 - IE - V1/R1 = 0$$

$$(V2 - V1)^2 + V2/R2 + (V2 - V1)/R3 = 0$$

$$V1 - E = 0$$

Розв'язавши дану систему рівнянь отримаємо вектор рішень:

```
v1 = 1.998
v2 = 0.5525879
ie = -2.54260578
```

Рис. 3.5.4.2 Вектор рішень

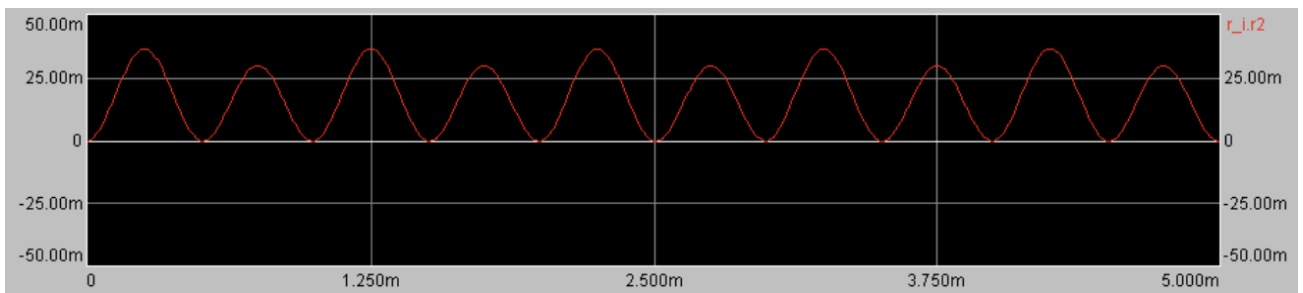


Рис. 3.5.4.3 Графік струму на резисторі R2

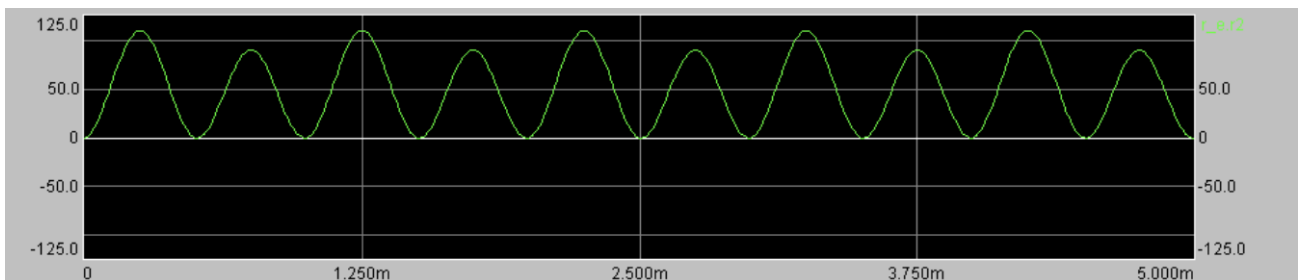


Рис. 3.5.4.4 Графік напруги на резисторі R2

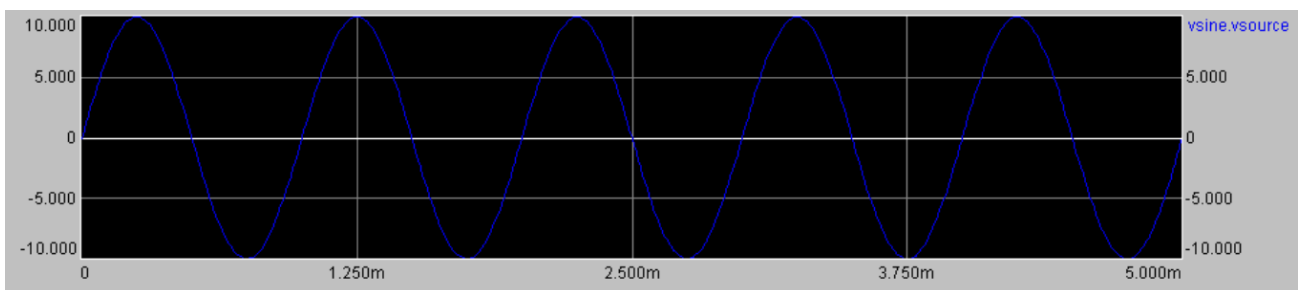


Рис. 3.5.4.5 Графік напруги на джерелі струму

3.6. Висновки до розділу 3

В даному розділі були оглянуті методи для формування моделей електричного кола (загально табличний метод та гібридний метод ГМ10) у вигляді матриць. Була описана архітектура та структура програми та детально описані елементи базового набору, що реалізовані у додатку. Також було розглянуто чотири тести для демонстрації роботи розробленої програми. Код програми знаходиться у відкритому доступі, завантажено на github.

4. Розробка стартап-проекту «Додаток для моделювання та аналізу електричних кіл»

4.1 Опис ідеї проекту

Розглянуті методи можуть бути використані для створення додатку у вигляді користувацької програми для моделювання електричних кіл. У цьому розділі ставиться мета розробити програмний продукт для пропозиції моделювання схем, проведення маркетингового аналізу та виявлення ринкових можливостей для реалізації продукту. Процес включає:

- розробку програмного продукту з використанням описаних методів;
- розробку стратегій виходу на ринок з подальшим розвитком стартапу.

Побудуємо таблиць з описом ідей:

Таблиця 4.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямок застосування	Вигоди для користувача
Створення додатку моделювання та аналізу електричних схем	Поглиблене навчання методів моделювання та чисельних методів	Користувач матиме змогу повністю прослідкувати процес моделювання систем

Ідеєю проекту є створення додатку що покращить навчання студентів основ моделювання та чисельних методів.

Для визначення конкурентоспроможності додатку на ринку побудуємо таблицю сильних, слабких, нейтральних характеристик ідеї проекту

Таблиця 4.2 - Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Конкурент 1	Конкурент 2	Конкурент 3			
1	Форма виконання	додаток	додаток	модуль python	додаток		+	
2	собівартість	Низька	Низька	Низька	Низька		+	
3	можливості	обмежені	широкі	широкі	широкі	-		
4	Крос-платформенність	так	так	так	ні			+

5	Потреба в інтернеті	ні	так	так	ні			+

Перевагами проекту є крос-платформенність та відсутність потреби у інтернеті, що збільшує кількість потенційних клієнтів та зручність у використанні.

4.2 Технологічний аудит ідеї

У межах даного підрозділу проведено аудит технологій для реалізації проекту

Таблиця 4.3 - Технологічна здійсненність ідеї проекту

п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Створення додатку моделювання електричних кіл	Python	Наявна	Безкоштовна, доступна
		scipy	Наявна	Безкоштовна, доступна
		numpy	Наявна	Безкоштовна, доступна
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: для створення системи для автоматичного вибору тестів обрано мову програмування python та бібліотеки scipy і numpy, які є безкоштовними та зручними у роботі.				

Отже проект буде реалізовано за допомогою мови програмування python та бібліотеки scipy та numpy, оскільки вони є зручними у використанні, мають хорошу документацію та доступні безкоштовно.

4.3 Аналіз ринкових можливостей

За допомогою аналізу ринкових можливостей та загроз можемо планувати напрям розвитку проекту. Першим проаналізуємо наявність попиту:

Таблиця 4.4 - Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	100
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	1000
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу	Початкові умови для використання ПП
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	-
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	$R = (3000000 * 100) / (1000000 * 12) = 25\%$

Як бачимо середня норма рентабельності менша за банківські відсотки тому є сенс вкладати в цей проект.

Наступним кроком є визначення потенційних клієнтів для ПП.

Таблиця 4.5 - Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Відсутність простих для освоєння програм для вивчення методів моделювання	Навчальні установи, у яких вивчається моделювання	-	Висока точність та швидка робота ПП

Визначено такі характеристики стартапу: основною потребою, яка формується на ринку є – продукт для вивчення методів моделювання, проект розрахований на конкретну групу клієнтів тому відмінностей у їх поведінці не виявлено.

Тепер проаналізуємо фактори загроз та можливостей.

Таблиця 4.6 - Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії

1	Зростаюча вимогливість покупців	підвищення вимог до ефективності ПП	Оптимізація методів використаних у ПП
2	Конкуренція	Постійна поява на ринку нових продуктів схожої тематики	покинути ринок
3	Зменшення кількості замовників	Зменшення кількості клієнтів зацікавлених у продукті	Реклама, пошук нових клієнтів, оновлення додатку.

Після аналізу загроз було виявлено, що найбільша небезпека для проекту - не витримати конкуренцію з більш відомими компаніями. Для зменшення цієї загрози пропонується проаналізувати переваги конкурентів та створити необхідну рекламну кампанію для демонстрації переваг свого продукту.

Таблиця 4.7 – Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Зростання потреби	Зростання попиту у займаній галузі	Максимальне захоплення ринку
2	Зростання можливостей потенційних покупців	Зростання фінансування досліджень у галузі моделювання систем	Пропозиція своїх послуг зацікавленим клієнтам

--	--	--	--

Основними факторами можливостей на ринку обрано зростання галузі моделювання динамічних систем, а отже і зростання попиту на продукт. Реакцією на дану подію обрано спробу максимального захоплення ринку.

Наступним пунктом буде визначення загальних рис конкуренції на ринку.

Таблиця 4.8 - Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Вказати тип конкуренції - олігополія	Існує мала кількість фірм-конкурентів на ринку	Створення більш ефективних рішень
2. За рівнем конкурентної - інтернаціональна	Майже всі конкуренти - закордонні	Можна знайти більш дешевих дослідників
3. За галузевою ознакою - внутрішньогалузева	Конкуренти мають сервіси, які використовуються лише всередині даної галузі	Добре відомі рамки галузі
5. Конкуренція за видами товарів: - товарно-видова	Види товарів є однаковими, а саме - програмне забезпечення, та методи реалізації	Конкуренція між різним ПЗ та методами реалізації
6. За характером конкурентних переваг - нецінова	Удосконалення технології створення додатку, для зниження собівартості та	Покращення якості продукції

	підвищення ефективності	
7. За інтенсивністю - не марочна	Бренди відсутні	Спрощення виходу на ринок для нової компанії

Було проведено аналіз конкурентних рис, визначено тип конкуренції, рівні конкурентної боротьби та ін. Та наведено можливі реакції компанії для підвищення конкурентоспроможності.

Наступним кроком буде аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Таблиця 4.9 - Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	NetAllTed	Досвід на ринку у конкуренті в	NetAllTed	Різні розробники великих додатків	-
Висновки :	Інтенсивна конкуренція	Є можливості виходу на ринок, наявність потенційних конкурентів	Не диктують	Уніфіковані вимоги до ефективності роботи продукту	-

Можна зробити висновок, що проект має можливість вийти на ринок.

На основі проаналізованих даних сформулюємо фактори конкурентоспроможності ПП.

Таблиця 4.10 - Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Науково-технічний потенціал	Кращі дослідження прозводять до кращої якості послуг
2	Зростання потреб	Розвиток галузі призводить до збільшення попиту

Далі проведемо аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту

Таблиця 4.11 - Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «Автоматизація вибору тестів у регресивному тестуванні за допомогою машинного навчання»

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з «Додаток для моделювання електричних схем»						
			-3	-2	-1	0	1	2	3
1	Науково-технічний потенціал	20				+			
2	Зростання потреб	19			+				

Наступним кроком проведемо SWOT-аналіз

Таблиця 4.12 - SWOT-аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: унікальний алгоритм	Слабкі сторони: відсутність репутації
Можливості: стрімкий розвиток та висока зацікавленість у галузі	Загрози: більш відомі і досвідчені конкуренти

За допомогою SWOT-аналізу було визначено, що сильною стороною проекту є унікальність алгоритму, слабкістю – відсутність репутації на цільовому ринку, можливості що відкриваються є наслідком стрімкого розвитку галузі, а загрозу можуть представляти уже відомі компанії з якими доведеться конкурувати.

Наступним кроком є розгляд альтернатив ринкового впровадження проекту.

Таблиця 4.13 - Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Покращення алгоритму	80%	1 рік
2	Збільшення реклами	40%	1 місяці

Було вирішено обрати покращення алгоритму оскільки ймовірність отримання ресурсів там вища.

4.4 Розробка ринкової стратегії проекту

Першим кроком у розробленні ринкової стратегії є вибір цільових груп потенційних споживачів.

Таблиця 4.14 - Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних Клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Компанії що потребують додаток для моделювання систем	Готові	середній	середня	середня
Обрано цільову групу: компанії, що потребують додаток для моделювання систем.					

Таким чином було обрано основну цільову групу.

Наступною визначається базова стратегія розвитку.

Таблиця 4.15 - Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
1	Створення ПЗ для	Створення нового	Новизна та ефективність	Стратегія диференціації

	моделювання динамічних систем	продукту та його реклама		
--	-------------------------------------	--------------------------------	--	--

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки.

Таблиця 4.16 - Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1	Моделювання систем – ні, але підхід до використання - так	Шукати нових і забирати існуючих	Стабільність, надійність	оборонна

Було вирішено обрати оборонну стратегію поведінки.

Наступним кроком є визначення стратегії позиціонування проекту.

Таблиця 4.17 - Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну
-------	--	---------------------------------	---	--

				позицію власного проекту (три ключових)
1	Коректна робота, надійність, ефективність	Стратегія диференціації	Новизна, актуальність	Швидкодія, зручність, ефективність

Таким чином визначено основні вимоги до проекту а саме: швидкодія, надійність, ефективність, коректна робота.

4.5 Розробка маркетингової програми

На першому кроці підсумуємо результати попереднього аналізу.

Таблиця 4.18 - Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Моделювання динамічних систем	Вивчення методів моделювання та чисельних методів	Детальний покроковий процес моделювання

Розробимо трирівневу маркетингову модель товару

Таблиця 4.19 - Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	ПП для моделювання динамічних систем		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. надійність	М	Тл
	2. ефективність	М	Тл
	3. швидкість роботи	М	Тл
	Покроковий процес моделювання		
	Зручний додаток без потреби доступу в інтернет		
III. Товар із підкріпленням	Акції та знижки		
	Підтримка та оновлення		

Було описано три рівня моделі товару: це буде додаток для моделювання та аналізу динамічних систем. Його основними характеристиками є: надійність, швидкодія, ефективність.

Далі визначимо цінові межі.

Таблиця 4.20 - Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
-------	--------------------------------	------------------------------	--	---

1	1000 грн.	1500 грн.	>100000 грн. / місяць	1000 грн. – 2000 грн.
---	-----------	-----------	--------------------------	-----------------------

Визначено межі встановлення ціни на додаток.

Наступним кроком є визначення оптимальної системи збуту

Таблиця 4.21 - Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Оцінка товару за допомогою безкоштовної пробної версії з подальшою покупкою товару	Фінансування витрат на функціонування каналу збуту, фінансування збутових операцій. Обслуговування проданих товарів.	Канал нульового рівня	Проводити збут власними силами

Було вирішено запропонувати систему збуту у вигляді разової покупки додатку. Збут ефективніше проводити власними силами.

Наступним кроком є розробка концепції маркетингових комунікацій

Таблиця 4.22 - Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Це компанії які розробляють великі проекти що потребують регресивного тестування	Е-mail, письмові звернення до компаній, конференції	Новизна та ефективність методів машинного навчання у автоматизації тестування	Привернути максимум уваги до продукту, змусити компанію спробувати продукт	Ми допоможемо оптимізувати регресивне тестування

Отже основними позиціями для маркетингових комунікацій є: покроковий перегляд процесу моделювання, рекламні заходи направлені на привернення уваги компаній до продукту та пояснення його особливостей.

4.6 Висновки до розділу 4

У розділі було розглянуто доцільність виходу на ринок програмного продукту «Додаток для моделювання та аналізу електричних кіл». Було обрано технології для реалізації продукту – мова програмування python та безкоштовні бібліотеки для роботи з матрицями та рішення рівнянь рівноваги scipy та numpy. Розглянуто цільові групи, сильні та слабкі сторони проекту та обрано кінцевий вигляд товару – додаток, що дозволяє покроково переглянути процес

моделювання. На основі проведених досліджень можна вважати що подальша імплементація проекту є доцільною.

Висновки до роботи

В ході виконання дипломної роботи була оглянута та проаналізована задача моделювання та аналізу електричних кіл. Були описані цілі та структура задачі, приведена теорія для формування фізичних законів для струму та напруги в електричних колах. Також були описані теорія графів необхідна для побудови графів та матриць, що відповідають моделі схеми і чисельні методи, що використовуються для розв'язування рівнянь рівноваги. Були проаналізовані існуючі професійні засоби для моделювання систем.

Також був створений власний додаток для моделювання та аналізу електричних кіл. Він включає в себе набір базових компонентів: резистор, джерело струму, джерело напруги, елемент ємності та елемент індуктивності, а також керовані джерела струму (керовані струмом та напругою джерела). Додаток бере за основу бібліотеку для моделювання систем, розроблену раніше для бакалаврської роботи та розширює її функціонал, додаючи більш складні елементи та можливості роботи з ними (такі як нелінійні компоненти та можливість складати та розв'язувати системи нелінійних рівнянь). Були приведені приклади моделювання електричних кіл, що включають в себе елементи перераховані вище. Дана реалізація також має можливість виконання на графічному процесорі, що буде корисним для моделювання великих систем.

Також було проведено аналіз доцільності виходу програмного продукту на ринок моделювання систем.

Код програми знаходиться у відкритому доступі, завантажено на github.

Література

1. Л.О. Чуа, Пен-Мин Лин Машинный анализ электронных схем (алгоритмы и вычислительные методы) // Москва «Энергия» 1980 - ст. 15-16, ст. 35-37, ст. 136-137, ст. 191.
2. Kirchhoff's circuit laws [Электронный ресурс] / John doe// Wikipedia - 2021 - режим доступа до ресурсу:
https://en.wikipedia.org/wiki/Kirchhoff%27s_circuit_laws
3. Петренко Анатолій Іванович. Конспект лекцій до курсу „МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ” // Київ-2020. Ст.3-5, ст.27-28.
4. Ngspice [Электронный ресурс] / John doe// Ngspice - 2018 - режим доступа до ресурсу: <http://ngspice.sourceforge.net/>
5. Pyspice [Электронный ресурс] / John doe// Pyspice - 2018 - режим доступа до ресурсу: <https://pyspice.fabrice-salvaire.fr/>
6. Python [Электронный ресурс] / John doe// Python - 2020 - режим доступа до ресурсу: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Python>
7. Numpy [Электронный ресурс] / John doe// Numpy - 2019 - режим доступа до ресурсу: <https://ru.wikipedia.org/wiki/NumPy>
8. Matplotlib [Электронный ресурс] / John doe// Matplotlib - 2021 - режим доступа до ресурсу: <https://matplotlib.org/>
9. Петренко, Чкалов, Кірюша. «МОДЕЛЮВАННЯ СКЛАДНИХ СИСТЕМ» // Київ-2015. ст. 6-18.
10. Tensorflow [Электронный ресурс] / John doe// Tensorflow - 2018 - режим доступа до ресурсу:
<https://www.tensorflow.org/https://neurohive.io/ru/osnovy-data-science/obuchenie-s-uchitelem-bez-uchitelja-s-podkrepleniem/>

11. Тараненко, А.В. (2021). Дипломна робота на тему: “Бібліотека моделювання динамічних систем за допомогою Python”. Київ, Україна: КПІ ім. І. Сікорського.