

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА**

Факультет комп'ютерних наук та кібернетики

Кафедра теоретичної кібернетики

Кваліфікаційна робота


На здобуття ступеня бакалавра

за спеціальністю 122 Комп'ютерні науки

на тему:

**ВІДОБРАЖЕННЯ ДІЛЯНКИ ЕЛЕКТРИЧНОГО
КОНТУРУ ТА ОБЧИСЛЕННЯ ОПОРУ
(DISPLAY THE ELECTRICAL CIRCUIT SECTION AND
CALCULATION OF RESISTANCE)**

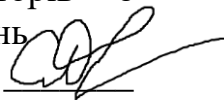
Виконав студент 4-го курсу групи ТК-41
Савчук Андрій Вікторович


(підпис)

Науковий керівник:
Доцент, кандидат фіз.-мат. наук
Ставровський Андрій Борисович



(підпис)

Засвідчую, що в цій
роботі немає запозичень з
праць інших авторів з
відповідних посилань

Студент 
(підпис)

Розглянуто й допущено до захисту
на засіданні кафедри теоретичної кібернетики
«01» червня 2022 р., протокол №_11

Завідувач кафедри
доктор фіз.-мат. наук, професор
Юрій КРАК


(підпис)

Київ – 2022

РЕФЕРАТ

Обсяг роботи складає 46 сторінок, в ній містяться 19 ілюстрацій, 79 формул, використано 11 джерел посилань.

ВІДОБРАЖЕННЯ ДІЛЯНКИ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОНТУРУ ТА ОБЧИСЛЕННЯ ОПОРУ

Об'єктом роботи є розробка програмного застосунку для моделювання електричних схем. Вирішування виконується з допомоги програми «Редактор електричних кіл». Предметом роботи є застосунок, алгоритм якого повинен розрахувати невідомі величини та відобразити їх.

Метою роботи є аналіз підходів аналізу в теорії електричних кіл та створення програмного засобу для вирішення і візуалізації задач даної галузі.

Інструменти розробки: мова програмування JavaScript, інструмент розробки та середовище Visual Studio Code.

Результати роботи: проведений теоретичний аналіз методів аналізу вирішення задачі відображення, моделювання та розрахунку напруги та опору. На основі теоретичних даних реалізовано програмний засіб під назвою «Редактор електричних кіл», що виконує розв'язання даної проблеми разом з візуалізацією результату.

Створений застосунок можна застосувати для наступних цілей: навчання, моделювання та аналіз електричних кіл.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	1
ЗМІСТ	3
ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ.....	7
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ АНАЛІЗУ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ	19
РОЗДІЛ 3. АЛГОРИТМ МОДИФІКОВАНОГО ВУЗЛОВОГО АНАЛІЗУ.....	31
РОЗДІЛ 4. РЕАЛІЗАЦІЯ ОБ'ЄКТУ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	36
ВИСНОВКИ.....	45
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	46

ВСТУП

Оцінка сучасного стану об'єкту. В нас час проблемою є не достатня інформатизація та діджиталізація уроків та навчального процесу в цілому. Проте правильно організована навчально-пізнавальна діяльність – це головне джерело розвитку пізнавальних інтересів, активності, самоорганізації та творчого мислення, забезпечення єдності інтелектуального й особистісного розвитку. Інформатизація та діджиталізація освіти й зростаючі вимоги до якості та кількості висококваліфікованих фахівців створюють необхідність розробки та впровадження інноваційних освітніх методик та технологій.

Підвищення теоретичного рівня знань курсу фізики, інтеграція знань, нові та інформаційні засоби і форми навчання спонукають до подальших пошуків можливостей застосування комп'ютера у навчальному процесі як стимулюючого чинника.

Інформаційні технології навчання передбачають широке використання комп'ютерної техніки та спеціального програмного забезпечення як потужного засобу навчання фізики. Проблемами впровадження інформаційних технологій у навчальний процес з фізики займалися: О. Бугайов, М. Головка, В. Заболотний, О. Ляшенко та ін. У працях цих вчених розглядаються питання удосконалення шкільного фізичного експерименту засобами інформаційних технологій; поєднання традиційних засобів навчання, зокрема підручника з фізики, з електронними; розробки педагогічних програмних засобів з вивчення окремих тем курсу фізики [1].

Актуальність роботи та підстави для її виконання. При вивченні фізики нерідко складається ситуація, коли учні не можуть на практиці застосувати здобуті під час навчання знання, навіть у випадку їх осмисленого засвоєння. Отже, гострою є необхідність в навчанні практичному використанню набутих знань й умінь [2].

Реалізувати інтеграцію здобутих теоретичних знань та практичних навичок можливо шляхом залучення учнів до розв'язування дослідницько-

творчих задач. Тому актуальним є створення засобів, які за допомогою експериментальних задач забезпечують оволодіння повноцінними вміннями. Завдання на розрахунок опору та напруги електричного кола часто зустрічаються серед екзаменаційних, вступних та олімпіадних задач, та у завданнях державної підсумкової атестації та зовнішнього незалежного оцінювання.

Основна мета й завдання роботи. Метою роботи є розробка застосунку для моделювання схем та розв'язування задач на розрахунок опору та напруги електричного кола. Для того, щоб досягнути дану мету було складено такі задачі:

- Дослідити наявні теоретичні матеріали.
- Проаналізувати різноманітні способи вирішення задачі і можливість їхнього застосування серед алгоритму програми.
- Реалізувати алгоритм розрахунку результатів.
- Розробити користувацький інтерфейс та дизайн застосунку, який включає в себе візуалізацію електричних схем, потоку електронів через елементи схеми та вивід розрахованих величин.

Об'єкти, засоби і методи розробки. Об'єктом розробки є розроблення програмного засобу «Редактор електричних кіл», що спрощує задачі на визначення опору та напруги електричного кола за допомогою програмного засобу.

В якості інструментарію було обрано мову програмування JavaScript, засіб та середовище Visual Studio Code. JavaScript добре підходить для досліджуваної задачі, адже ця мова за дизайном є об'єктно орієнтованою, а також до неї є багато бібліотек для реалізації користувацького інтерфейсу і реалізації аналізатору схем.

В якості інтегрованого середовища розробки (IDE) було взято Visual Studio Code, адже воно є одне з найкращих та найзручніших.

Сфери застосування. Найбільш очевидною сферою для застосування є навчальний процес в шкільному курсі фізики під час вивчення електричних кіл.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ

Мережа в електротехніці та електроніці [8, 9] — це сукупність зв'язаних між собою компонентів. Аналіз мережі – це процес пошуку напруг на всіх компонентах мережі та струмів, що проходить через них. Існує багато методик для розрахунку цих значень.

Електричний струм

Струм — це потік заряджених позитивно чи негативно частинок, що рухаються через простір чи провідник струму. Він вимірюється як чиста швидкість потоку електричного заряду через поверхню чи об'єм. Звичайно, електричне коло має бути замкненим, щоб заряд міг протікати через нього. З іншого боку, також важливо, щоб джерело енергії дає різницю потенціалів (або напругу) на двох кінцях ланцюга. Фізична кількість електричного заряду, яка є фізичною властивістю матерії, через яку деякі речовини мають позитивний (+), а інші негативні (-) заряди, позначається літерою Q . Припустимо, що Q є зарядом, що проходить через поперечний переріз дроту за час t , електричний струм, позначений буквою I , є просто співвідношенням:

$$I = \frac{Q}{T}$$

У системі S.I. Електричний струм обчислюється в амперах, часто скорочених до ампер або навіть літери А. Електричний заряд обчислюється в кулонах або в С. Отже, 1 ампер означає, що 1 кулон заряду проходить через поперечний переріз дроту кожного 1 секунда $1\text{A} = 1\text{C} / 1\text{c}$.

Умовно передбачається, що струм у ланцюзі рухається з позитивного полюса батареї в негативний полюс, що є так званим звичайним напрямком струму. Роздумуючи про сили протистояння та притягання між електричним зарядом (протилегний заряд притягується, а той самий відштовхується), ми розуміємо, що це напрямок, у якому буде рухатися позитивний заряд. Але, як ми знаємо, в електричних колах насправді рухаються електрони, тому

фактичний природний напрямок є прямо протилежним. У будь-якому випадку, це умова, яка використовується скрізь, і тому нам все одно доведеться використовувати «неправильну».

Струм через певні частини ланцюга є однією з величин, які нам доведеться обчислити в нашому симуляторі, але, звичайно, не використовуючи рівняння співвідношення, згадане раніше, оскільки ми не будемо занурюватися в «рівень зарядів».

Електрична напруга

Однією з дуже важливих величин є електрична напруга. Раніше ми згадували, що електричні заряди прикладають сили один до одного. Ці електричні сили можна обчислити за допомогою закону Кулона. Отже, електричний заряд створює навколо себе якесь поле, електричне поле, де він прикладає сили до зарядів навколо нього, залежно від його заряду та відстані до нього іншого заряду. Оскільки ця сила «діє на відстані», переміщуючи інший заряд в інше положення, сила виконує певну роботу. Точніше, переносячи заряд q з точки А в точку В, поблизу точкового заряду Q , ми виконуємо наступну роботу:

$$F = k_e \frac{qQ}{r^2} \quad (\text{закон Кулона})$$

$$E = k_e \frac{Q}{r^2} \quad (\text{електричне поле})$$

$$F = qE \quad (\text{зв'язок})$$

$$W_{AB} = \int_{r_A}^{r_B} -qE * dr = k_e qQ \left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right)$$

Зміна потенціальної енергії дорівнює виконаній роботі, яка приводить q від А до В, тому електрична потенціальна енергія визначається як:

$$U_r = k_e \frac{qQ}{r}$$

Зрештою, зміна потенціальної енергії становить:

$$U_{AB} = U_B - U_A$$

Зараз ми розрахували зміну електричної потенціальної енергії або різницю електричної потенціальної енергії. Щоб спростити наші розрахунки, ми визначаємо те, що називається електричним потенціалом, і так звану різницю електричних потенціалів, яку також називають напругою.

Електричний потенціал визначається як:

$$V_r = \frac{U_r}{q} = k_e \frac{Q}{r}$$

Отже, напруга або різниця електричних потенціалів:

$$V_{AB} = \frac{U_B}{q} - \frac{U_A}{q} = V_B - V_A$$

Напруга вимірюється у вольтах (В). Знаючи як струм, так і напругу в кожній точці електричного кола, можна обчислити що завгодно.

Електричний опір і провідність

Різні матеріали по-різному діють на електричний струм, що протікає через них. Опір потоку електричного струму і «наскільки сильно» матеріал протистоїть цьому потоку визначається як електричний опір. Таким же чином міра того, «як легко» може пройти струм через провідник, визначається як електрична провідність. Перший в основному позначається символом R і вимірюється одиницею, відомою як Ом (Ω або ohm), тоді як другий символізується G і обчислюється в Сіменсі (S). Звичайно, опір і провідність є точними оберненими і тому:

$$G = \frac{1}{R} \leftrightarrow R = \frac{1}{G}$$

Кожен матеріал має певний особливий питомий електричний опір ρ і провідність σ . Разом з питомим опором (або провідністю) на опір матеріалу також впливають загальна довжина (L) провідника, площа поперечного перерізу (A) провідника та температура провідника. Зрештою, опір дають:

$$R = \rho \frac{L}{A} = \frac{1}{\sigma} \frac{L}{A}$$

У нашому симуляторі електричних ланцюгів буде відомий опір різних резисторів, тому значення опору провідності буде використовуватися лише для того, щоб керувати нами через обчислення різних значень струму та напруги.

Рівняння закону Ома

Головне відкриття Ома полягало в тому, що кількість електричного струму, що проходить через металевий провідник у ланцюзі прямо пропорційна напрузі, що діє на нього, для будь-якої заданої температури. Ом висловив своє відкриття у формі простого рівняння, що описує взаємозв'язок напруги, струму та опору:

$$E = IR$$

У цьому алгебраїчному виразі напруга (E) дорівнює струму (I), помноженому на опір (R). Використовуючи методи алгебри, ми можемо маніпулювати цим рівнянням у двох варіантах, вирішуючи для I та R відповідно:

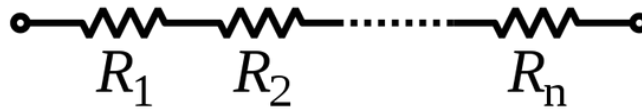
$$I = \frac{E}{R} \quad R = \frac{E}{I}$$

Комбінації резисторів

Резистори можна об'єднати разом, утворюючи мережі, відомі як комбінації резисторів. Замість того, щоб мати дюжину резисторів, підключених один до одного послідовно, паралельно або навіть змішано, ми схильні обчислювати їх так званий еквівалентний опір, який замінює багато резисторів одним! Щоб зробити це легко, ми розглядаємо схему як частини, які мають резистори, з'єднані «послідовно» або «паралельно», і вирішуємо всю проблему за певними кроками. Отже, давайте розглянемо ці два випадки і як ми їх вирішуємо, а також як ми вирішуємо змішані задачі.

Послідовно

Розглянемо резистори, через які струм проходить послідовно, що означає, що всі вони мають однаковий струм, як на наступній схемі:



Сума напруг кожного резистора в такій комбінації дорівнює загальній напрузі, що видається джерелом напруги, до якого вони підключені. Тому, використовуючи закон Ома, ми легко отримуємо наступне рівняння для *еквівалентного опору*:

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_n < - >$$

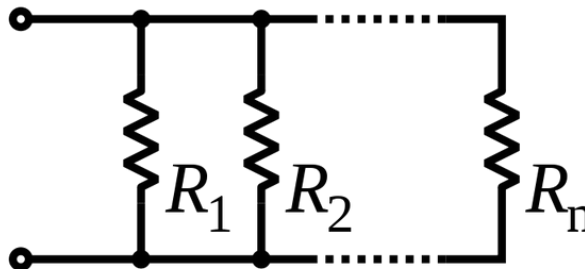
$$I * R_{eq} = I_1 * R_1 + I_2 * R_2 + \dots + I_n * R_n$$

Але $I = I_1 = I_2 = \dots = I_n$ і отже

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

Паралельно

Розглянемо резистори, які підключені безпосередньо до одного джерела напруги, тобто вони мають однакову напругу, як на наступній схемі:



У цьому випадку струм розділиться, що робить загальну суму окремого струму, що проходить через кожен резистор рівною загальному «поставленому» струму. Знову використовуючи закон Ома, ми отримуємо наступне рівняння для *еквівалентного опору*:

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n < - >$$

$$\frac{V}{R_{eq}} = \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \dots + \frac{V_n}{R_n}$$

Але $V = V_1 + V_2 + \dots + V_n$ і отже

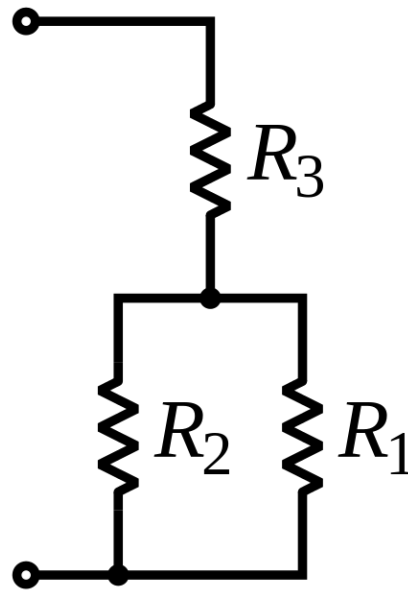
$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

Змішано

З попередніх двох випадків ми знаємо, що:

- Послідовні резистори мають однаковий струм
- Паралельні резистори мають однакову напругу

У змішаній ситуації нам просто потрібно знайти ці два типи зв'язків і замінити їх індивідуальним еквівалентним опором. Наприклад, розглянемо таку схему:



Тут R_2 і R_3 з'єднані паралельно, тоді як R_1 підключений послідовно до кожного з них. Отже, спочатку ми повинні обчислити еквівалентний опір R_2 і R_3 , скажімо, $R_{2,3}$, а потім еквівалентний опір R_1 і $R_{2,3}$, скажімо, $R_{1,2,3}$ або R_{eq} . У рівняннях це виглядає так:

Паралельно 2 і 3:

$$\frac{1}{R_{2,3}} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

$$R_{2,3} = \frac{R_2 * R_3}{R_2 + R_3}$$

Послідовно 1 і 2,3:

$$R_{eq} = R_1 + R_{2,3} = R_1 + \frac{R_2 * R_3}{R_2 + R_3}$$

Дільники струму та напруги

Дві досить корисні схеми в електроніці - це так звані дільники струму і напруги. Як випливає з їх назви, перший дає нам можливість розділити загальний струм на дробові частини (наприклад, паралельно підключені резистори), тоді як другий дає нам можливість розділити загальну напругу на дробові частини (наприклад, послідовно підключені резистори). Використовуючи конкретні формули, можливо розрахувати струм і напругу відповідно для певних частин ланцюга, де виникають такі комбінації. Отже, тепер розберемося, як кожен з них можна використовувати і яку формулу потрібно вибрати для визначення струму та напруги відповідно.

Дільник струму

Припустимо, що у нас є кілька резисторів, підключених паралельно. Струм через резистор дорівнює прикладеній до нього напрузі, яка також однакова для всіх резисторів, поділена на його опір. Розмірковуючи про еквівалентний опір R_{total} , напругу також можна записати як добуток між загальним значенням струму R_{total} . Отже, струм, який протікає через будь-який резистор n , дорівнює:

$$I_n = \frac{V}{R_n} \quad \text{і} \quad V = I_{total} * R_{total} \quad \text{дає нам:}$$

$$I_n = I_{total} * \frac{R_{total}}{R_n}$$

Формула дільника струму

Дільник напруги

Тепер припустимо, що у нас є кілька резисторів, з'єднаних послідовно. Напруга кожного резистора дорівнює добутку струму, який проходить через нього, який також однаковий для всіх резисторів, помножений на його опір. Знаючи, що струм однаковий для всіх резисторів, він також однаковий для еквівалентного опору, і тому ми можемо записати загальний струм як поділ між загальною напругою та еквівалентним опором. Отже, в підсумку отримуємо:

$$V_n = I * R_n \text{ і } I = \frac{V_{total}}{R_{total}} \text{ дає нам:}$$

$$V_n = V_{total} * \frac{R_n}{R_{total}}$$

Формула дільника напруги

Термінологія електронних схем

Щоб зрозуміти різні терміни [4], які ми будемо використовувати в нашому аналізі електронних ланцюгів, ми повинні дати невелике визначення для найважливіших з них:

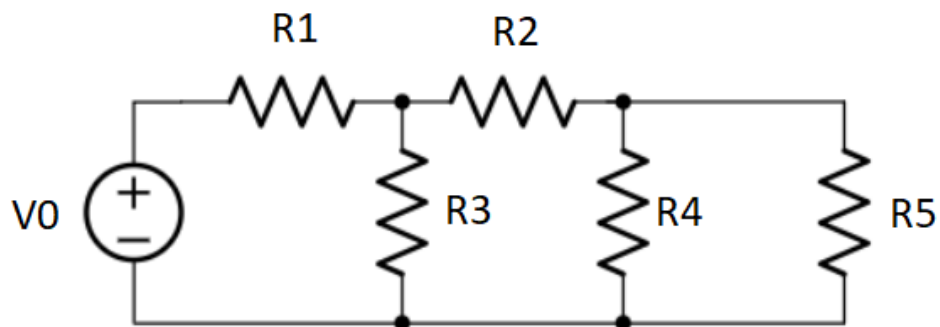
- *Компонент*. Пристрій з кількома клемми (двома і більше), до яких або з яких може протікати струм.
- *Вузол*. Точка, в якій з'єднуються термінали кількох компонентів. Для аналізу вузлом вважається провідник з практично нульовим опором.
- *З'єднання*. Точка, де різні дроти з'єднуються між собою, що означає, що вузли можуть складатися з більш ніж одного з'єднання.
- *Гілка*. Компонент або компоненти, що об'єднують два вузли.
- *Петля*: петля - це будь-який замкнений шлях у колі.
- *Сітка*. Група гілок мережі, об'єднана таким чином, щоб утворити повний цикл, у якому немає іншого циклу.
- *Порт*. Два термінали, де струм в одному ідентичний струму з іншого.

- *Струм ланцюга.* Струм від однієї клеми генератора через компоненти навантаження і назад до іншої клеми. У такому випадку схема є однопортовою мережею і є тривіальним випадком для аналізу. Якщо існує підключення до будь-яких інших ланцюгів, то формується нетривіальна мережа і має існувати щонайменше два порти.

- *Функція передачі.* Відношення струмів та/або напруг між двома портами. Найчастіше обговорюються вхідний і вихідний порти, а передатна функція описується як посилення або ослаблення. Для резистивних мереж це завжди буде просте дійсне число або вираз, який зводиться до дійсного числа. Резистивні мережі представлені системою одночасних алгебраїчних рівнянь.

- *Компонентна передавальна функція.* Для компонента з двома виводами (тобто однопортового компонента) струм і напруга беруться як вхід і вихід, а передавальна функція матиме одиниці імпедансу або адмітансу. Компонент із трьома (або більше) терміналами фактично має два (або більше) портів, і передатна функція не може бути виражена як один імпеданс. Звичайний підхід полягає в вираженні передатної функції у вигляді матриці параметрів. Ці параметри можуть бути імпедансами, але існує велика кількість інших підходів.

Наприклад, припустимо, що у нас є така схема ланцюга:



Ця схема має:

- 6 гілок, тому що є п'ять резисторів і одне джерело напруги, що дає в цілому $5 + 1 = 6$ елементів схеми
- 4 вузли, що з'єднують V_0 - R_1 , R_1 - R_2 - R_3 , R_2 - R_4 - R_5 і V_0 - R_3 - R_4 - R_5 відповідно

- 6 петель, зовнішня петля ($V_0-R_1-R_2-R_5$), три маленькі петлі ($V_0-R_1-R_3$, $R_3-R_2-R_4$, R_4-R_5) і дві більші петлі ($V_0-R_1-R_2-R_4$, $R_3-R_2-R_5$)
- 3 сітки, які є трьома меншими петлями ($V_0-R_1-R_3$, $R_3-R_2-R_4$, R_4-R_5)

Розуміння цієї термінології буде дуже важливим для аналізу сітки та вузлів.

Правила Кірхгофа

Правила Кірхгофа дозволяють нам вирішувати складні проблеми ланцюгів, визначаючи набір основних мережевих законів і теорем для напруг і струмів навколо ланцюга.

Ми вже знаємо, що єдиний еквівалентний опір R_{total} можна знайти, коли два або більше резисторів з'єднані разом послідовно, паралельно або в комбінації, і що ці схеми підкоряються закону Ома.

Однак іноді в складних ланцюгах, таких як мостові або Т-мережі, ми не можемо просто використовувати лише закон Ома, щоб знайти напруги або струми, що циркулюють у ланцюзі. Для цих типів обчислень нам потрібні певні правила, які дозволяють отримати схемні рівняння, і для цього ми можемо використовувати правила Кірхгофа.

У 1845 році німецький фізик Густав Кірхгоф розробив пару або набір правил чи законів, які стосуються збереження струму та енергії в електричних колах. Ці два правила широко відомі як: Перше правило Кірхгофа або Закон струму Кірхгофа, що стосується струму, що протікає по замкненому колу та Друге правило Кірхгофа або Закон напруги Кірхгофа, що стосується джерел напруги, присутніх у замкненому колі.

Закон струму Кірхгофа

Закон струму Кірхгофа говорить нам, що загальний струм або заряд, що входять у з'єднання або вузол, дорівнює заряду, що виходить з вузла, тому заряду немає іншого місця, куди можна піти, крім як вийти, оскільки жоден

заряд не втрачається всередині вузла (збереження заряду). Математично це можна представити у вигляді:

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0 \Leftrightarrow \sum I_{in} = \sum I_{out}$$

Закон напруги Кірхгофа

Закон напруги Кірхгофа говорить нам, що загальна напруга навколо петлі дорівнює нулю і дорівнює сумі всіх падінь напруги в одному контурі. Математично маємо:

$$\sum_{k=1}^n V_k = 0$$

Електричні компоненти

Електричні компоненти діляться на дві різні категорії:

1. **Активні:** компоненти, які виробляють енергію у вигляді напруги або струму (наприклад, незалежні джерела напруги або струму)
2. **Пасивні:** компоненти, які зберігають або перетворюють енергію у вигляді напруги та струму (наприклад, резистори, конденсатори, котушки індуктивності, які перетворюють відповідно в теплову, електричну та магнітну енергію)

Конденсатори та індуктори

Конденсатори та котушки індуктивності є двома дуже важливими елементами схеми для аналізу перехідних процесів, оскільки їх поведінка є досить унікальною.

Конденсатор

Конденсатор характеризується своєю властивістю, відомою як ємність, що позначається символом C і обчислюється в фарадах (F). Ця величина визначається рівнянням:

$$C = \frac{Q}{V}$$

Якщо говорити про струм, то струм дорівнює швидкості зміни заряду з часом, що означає, що ми можемо отримати таке співвідношення струм-напруга:

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt} = C \frac{dV(t)}{dt}$$

Напругу можна визначити наступним інтегралом:

$$V(t) = \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(\rho) d\rho + V(t_0)$$

Індуктор

Індуктор характеризується своєю властивістю, відомою як індуктивність, що позначається символом L і обчислюється в Генрі (Н). Для котушки ця кількість визначається рівнянням:

$$L = \mu \frac{N^2 * A}{l}$$

де:

- μ - магнітна проникність котушки
- N - кількість витків котушки
- A - площа котушки
- l - довжина котушки

З електромагнітної індукції ми знаємо, що індукована напруга визначається як:

$$V_L = L \frac{di(t)}{dt}$$

Використовуючи це, ми також можемо обчислити струм як інтеграл:

$$i(t) = \frac{1}{L} \int_{t_0}^t v(\rho) d\rho + i(t_0)$$

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ АНАЛІЗУ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ

Розв'язання набору рівнянь, що представляє схему, є прямолінійним, але не завжди легким. Однак розробити цей набір рівнянь не так просто. Двома поширеними методами формування набору рівнянь є метод вузлової напруги (або вузловий) [6, 7] і метод струму петлі (або сітки) [6, 7]. Коротко опишемо кожен з них і з'ясуємо їх переваги та недоліки. Для обчислювача опору в нашій реалізації симулятора електричного кола лежить третій метод, модифікованого вузлового аналізу [3, 5], який має деякі унікальні переваги. Серед його переваг є той факт, що він піддається алгоритмічному розв'язанню.

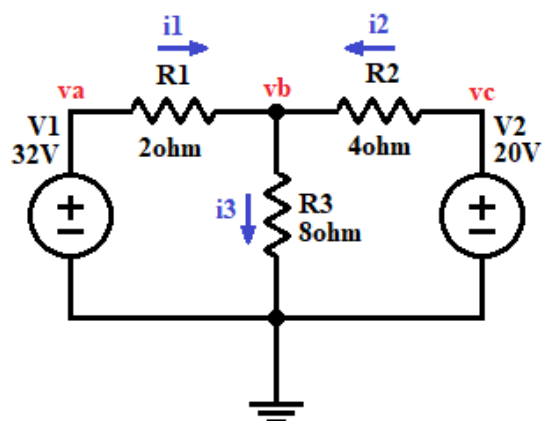
Метод вузлової напруги

Щоб застосувати метод вузлової напруги до схеми з n вузлами (з m джерелами напруги), потрібно виконати наступні дії:

1. Вибрати опорний вузол (зазвичай заземлений).
2. Назвати $n-1$ вузлів, що залишилися і позначити струм через кожен пасивний елемент і кожне джерело струму.
3. Застосувати закон струму Кірхгофа до кожного вузла, не підключеного до джерела напруги.
4. Знайти розв'язок системи з $n-1-m$ невідомих напруг.

Приклад 1.

Розглянемо схему, показану нижче:



Кроки 1 і 2 вже застосовані. Щоб застосувати крок 3:

$$i_1 + i_2 = i_3$$

$$i_1 = \frac{v_a - v_b}{R_1}, i_2 = \frac{v_c - v_b}{R_2}, i_3 = \frac{v_b}{R_3}$$

$$v_a = V_1, v_c = V_2$$

отже

$$\frac{v_a - v_b}{R_1} + \frac{v_c - v_b}{R_2} = \frac{v_b}{R_3}$$

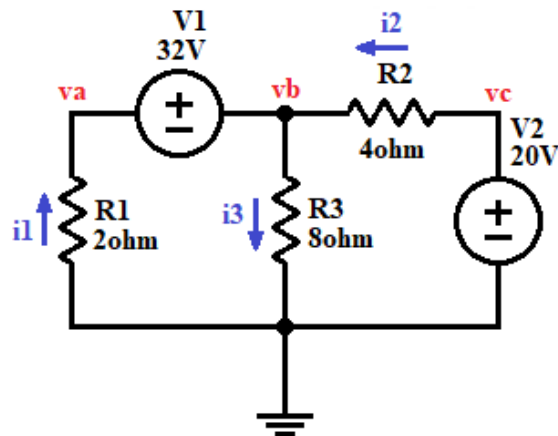
$$\frac{V_1 - v_b}{R_1} + \frac{V_2 - v_b}{R_2} = \frac{v_b}{R_3}$$

У даному випадку є лише одна невідома; вставляючи числа і розв'язуючи схему, яку ми отримуємо $v_b = 24$.

Метод вузлової напруги, як правило, простий у застосуванні, але стає дещо складнішим, якщо одне або кілька джерел напруги не заземлені.

Приклад 2.

Розглянемо схему, показану нижче:



Очевидно, що ця схема така ж, як і показана вище, але V_1 і R_1 поміняні місцями. Тепер напишемо рівняння:

$$i_1 + i_2 = i_3$$

$$i_1 = \frac{-v_a}{R_1}$$

$$i_2 = \frac{v_c - v_b}{R_2}$$

$$i_3 = \frac{v_b}{R_3}$$

Труднощі виникають через те, що джерело напруги V_1 більше не ідентичне жодному з вузлових напруг. Натомість ми маємо:

$$v_b - v_a = V_1$$

$$v_c = V_2$$

або

$$v_a = v_b - V_1$$

отже

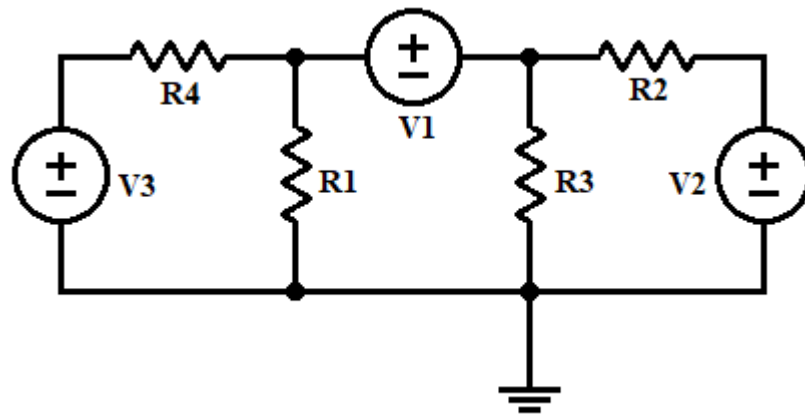
$$\frac{-v_a}{R_1} + \frac{v_c - v_b}{R_2} = \frac{v_b}{R_3}$$

$$\frac{V_1 - v_b}{R_1} + \frac{V_2 - v_b}{R_2} = \frac{v_b}{R_3}$$

Зауважимо, що останній рядок такий самий, як і в попередньому ланцюзі, але щоб розв'язати схему, нам потрібно було спочатку знайти v_a . Ця процедура не була складною, але вимагала трохи кмітливості і буде трохи відрізнятися для кожної схеми. Іншим способом вирішення цієї проблеми є використання концепції надвузла, що ускладнює правила встановлення рівнянь. Однак концепція надвузлів обробляє випадок незаземленого джерела напруги без необхідності розв'язувати проміжні рівняння, як ми робили тут.

Приклади, вибрані тут, були простими, але ілюстрували основні методи вузлового аналізу. Вони також проілюстрували одну з труднощів з технікою, створення рівнянь з плаваючим джерелом напруги (джерело напруги, жоден термінал якого не підключений до опорного вузла). Методика модифікованого вузлового аналізу, яку ми розглянемо пізніше, не викликає труднощів, коли представлена з плаваючими джерелами напруги.

У випадку, показаному вище, можна було б створити рішення, просто змінивши порядок R_1 і V_1 . Однак ми намагаємося розробити алгоритмічну техніку, тому нам не потрібно застосовувати ідеї, які може бути важко запрограмувати. Крім того, схема, яка наведена нижче (з V_1 незаземленим), не має таких очевидних спрощень.



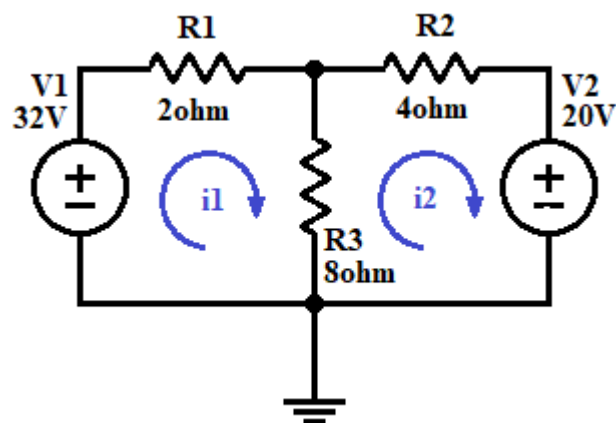
Метод струму петлі

Щоб застосувати метод струму петлі до схеми з n сіток (i з m джерелами струму), потрібно виконати наступні дії:

1. Визначити кожну сітку та відповідний їй струм. Найпростіше це зробити за допомогою послідовного методу, напр. всі невідомі струми рухаються за годинниковою стрілкою, усі відомі струми слідуєть напрямку джерела струму.
2. Застосувати закон напруги Кірхгофа до кожного контуру, що не містить джерела струму.
3. Знайти розв'язок системи з $n-m$ невідомих напруг.

Приклад 3.

Розглянемо схему з прикладу 1 з визначеними струмами сітки.



Ми можемо застосувати закон напруги Кірхгофа до обох петель:

$$V_1 - i_1 R_1 - (i_1 - i_2) R_3 = 0$$

$$(i_1 - i_2) R_3 - i_2 R_2 - V_2 = 0$$

Оскільки є два рівняння та дві невідомі, їх можна розв'язати методом підстановки або матричним методом. Для розв'язування матричним методом перепишемо рівняння:

$$(R_1 + R_3) i_1 - R_3 i_2 = V_1$$

$$-R_3 i_1 + (R_2 + R_3) i_2 = V_2$$

або

$$\begin{bmatrix} (R_1 + R_3) & -R_3 \\ -R_3 & (R_2 + R_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$$

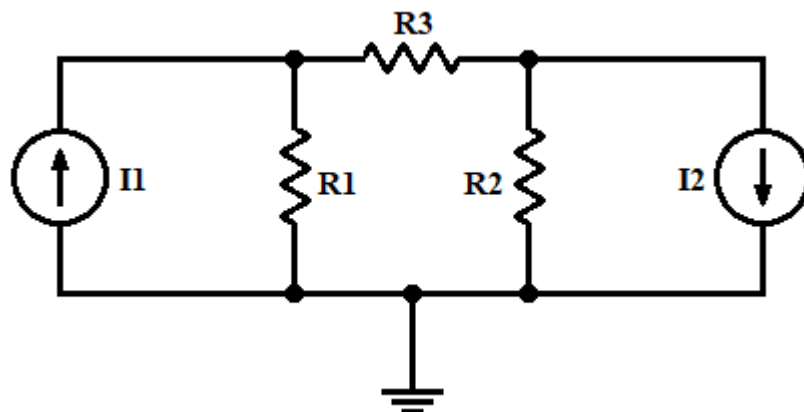
Розв'язавши, отримуємо:

$$i_1 = 4$$

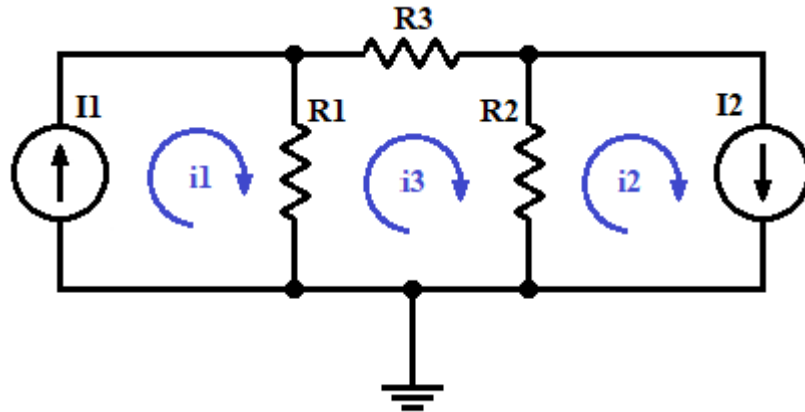
$$i_2 = 1$$

У той час як джерела з плаваючою напругою, як правило, ускладнювали формулювання ланцюгових рівнянь при використанні методу вузлової напруги, наявність джерел струму, ні джерел напруги не ускладнює метод струму петлі.

Вибір між методом вузлової напруги і методом струму петлі часто здійснюється на основі наявної схеми. Для вибраного прикладу був лише один незалежний вузол, але два незалежні цикли. Тому метод напруги вузла буде легшим. Ситуація, показана нижче, є протилежною, з двома вузлами, але тільки з одним циклом; отже, кращим є метод струму петлі.



Для цієї схеми ми намалюємо три петлі, але дві з них будуть проходити через відомі джерела струму, тому нам знадобиться лише одне рівняння. Для вузлового аналізу знадобиться два рівняння, по одному для напруги на кожній стороні R_3 .



Модифікований вузловий аналіз

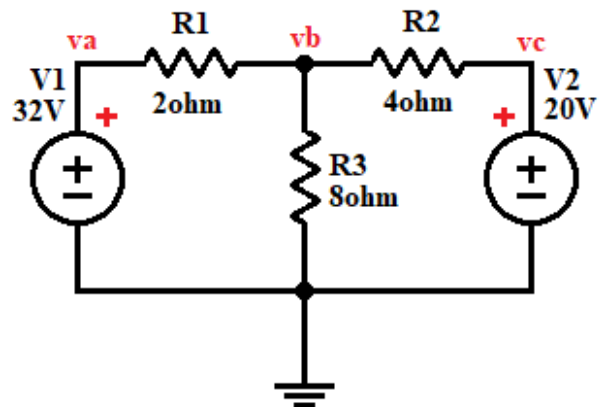
Незважаючи на те, що метод вузлової напруги та метод струму петлі є найбільш поширеними, іншим потужним методом є модифікований вузловий аналіз. Він часто призводить до більших систем рівнянь, ніж інші методи, але його легше реалізувати алгоритмічно на комп'ютері, що є істотною перевагою для автоматизованого рішення. Для використання модифікованого вузлового аналізу потрібно записати по одному рівнянню для кожного вузла, не приєднаного до джерела напруги (як у стандартному вузловому аналізі), і доповнити ці рівняння рівнянням для кожного джерела напруги.

Щоб застосувати модифікований вузловий аналіз до схеми з n вузлами (з m джерелами напруги), потрібно виконати наступні дії:

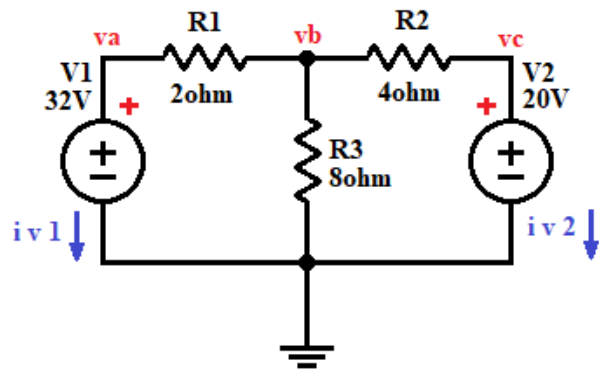
1. Вибрати опорний вузол (зазвичай заземлений) і назвати решту $n-1$ вузлів. Також позначити струми через кожне джерело струму.
2. Призначити назву струму, що проходить через кожне джерело напруги.
3. Застосувати закон струму Кірхгофа до кожного вузла.
4. Написати рівняння для напруги кожного джерела напруги.
5. Знайти розв'язок системи з $n-1$ невідомих.

Приклад 4.

Розглянемо схему, показану нижче:



Застосуємо крок 2 (струми через джерела напруги зі струмом від позитивного вузла до негативного):



Застосуємо крок 3 (з позитивними струмами вузлів):

$$\text{Вузол а: } i_{v1} + \frac{v_a - v_b}{R_1} = 0$$

$$\text{Вузол б: } \frac{v_b - v_a}{R_1} + \frac{v_b}{R_3} + \frac{v_b - v_c}{R_2} = 0$$

$$\text{Вузол с: } i_{v2} + \frac{v_c - v_b}{R_2} = 0$$

Застосуємо крок 4:

$$v_a = V_1$$

$$v_c = V_2$$

Застосуємо крок 5:

$$i_{v1} + \frac{v_a - v_b}{R_1} = 0$$

$$\frac{v_b - v_a}{R_1} + \frac{v_b}{R_3} + \frac{v_b - v_c}{R_2} = 0$$

$$i_{v2} + \frac{v_c - v_b}{R_2} = 0$$

$$v_a = V_1$$

$$v_c = V_2$$

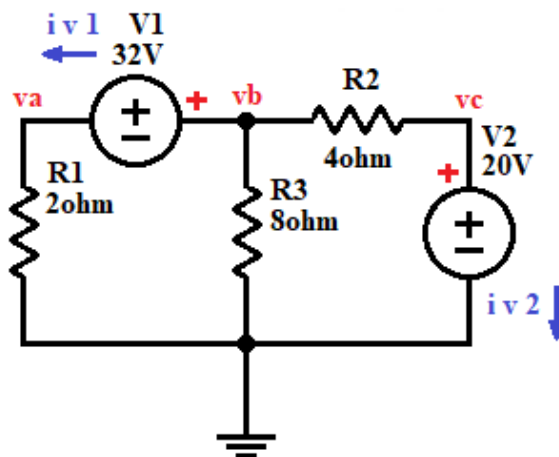
або

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{R_1} & -\frac{1}{R_1} & 0 & 1 & 0 \\ -\frac{1}{R_1} & \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} & -\frac{1}{R_2} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R_2} & \frac{1}{R_2} & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \\ i_{v1} \\ i_{v2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$$

Тепер все, що залишилося, це розв'язати набір рівнянь. Знайти розв'язок системи рівнянь 5x5 важко вручну, але легко за допомогою комп'ютера.

Приклад 5.

Як ми з'ясували раніше, метод вузлового аналізу став дещо складнішим, коли одне або кілька джерел напруги не були заземлені. Давайте повторимо приклад 2 за допомогою модифікованого вузлового аналізу. Тут схема повторюється з виконанням кроків 1 і 2:



Кроки 3 і 4:

$$\begin{aligned}\frac{v_a}{R_1} - i_{v1} &= 0 \\ i_{v1} + \frac{v_b}{R_3} + \frac{v_b - v_c}{R_2} &= 0 \\ i_{v2} + \frac{v_c - v_b}{R_2} &= 0 \\ v_b - v_a &= V_1 \\ v_c &= V_2\end{aligned}$$

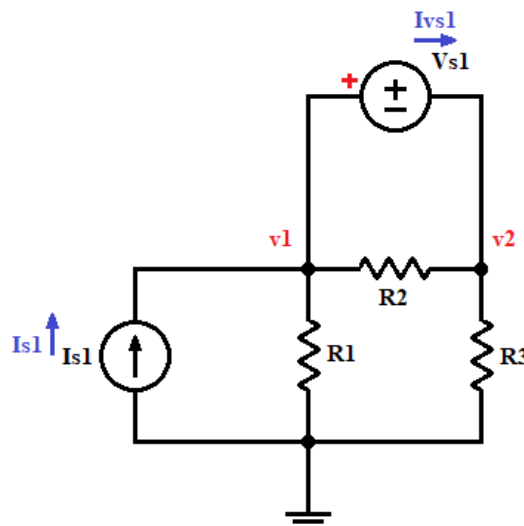
Крок 5:

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{R_1} & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} & -\frac{1}{R_2} & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R_2} & \frac{1}{R_2} & 0 & 1 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \\ i_{v1} \\ i_{v2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$$

Той факт, що V_1 не заземлений, не додає жодних труднощів.

Приклад 6.

Розглянемо ще один приклад, цього разу з джерелом струму. Кроки 1 і 2 виконано.



Тепер виконаємо кроки 3 і 4:

$$-I_{s1} + \frac{v_1}{R_1} + I_{Vs1} + \frac{v_1 - v_2}{R_2} = 0 \quad (\text{вузол 1})$$

$$-I_{Vs1} + \frac{v_2 - v_1}{R_2} + \frac{v_2}{R_3} = 0 \quad (\text{вузол 2})$$

$$v_1 - v_2 = V_{s1} \quad (V_{s1})$$

І, нарешті, перенесемо всі відомі змінні в праву сторону і виконаймо крок 5:

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} & -\frac{1}{R_2} & 1 \\ -\frac{1}{R_2} & \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} & -1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ I_{Vs1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{s1} \\ 0 \\ V_{s1} \end{bmatrix}$$

Спостереження щодо модифікованого вузлового аналізу

Якщо ми уважніше подивимось на матричні рівняння, отримані в результаті застосування методу, стане очевидним кілька закономірностей, які ми можемо використовувати для розробки алгоритму. Усі ланцюги привели до рівняння виду:

$$Ax = z$$

Розглянемо приклад 5. Ця схема мала 3 вузли та 2 джерела напруги ($n=3$, $m=2$). Отримана матриця показана нижче:

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{R_1} & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} & -\frac{1}{R_2} & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R_2} & \frac{1}{R_2} & 0 & 1 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \\ i_{v1} \\ i_{v2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$$

Зауважимо, що виділена частина матриці A має розмір 3×3 (загалом $n \times n$) і включає лише відомі величини, зокрема значення пасивних елементів (резисторів). Крім того, виділена частина матриці A є симетричною з

додатними значеннями вздовж головної діагоналі і лише від'ємними (або нульовими) значеннями для недіагональних членів. Якщо елемент заземлений, він з'являється лише по діагоналі; незаземлений (наприклад, R2) з'являється як на діагоналі, так і поза нею). Решта елементів у матриці A (непідсвічена частина) містить лише одиниці, від'ємні значення та нулі. Зауважимо також, що розмір матриці 5×5 (загалом $(m+n) \times (m+n)$).

Тепер розглянемо матрицю x , матрицю невідомих величин. Це матриця 5×1 (загалом $(n+m) \times 1$). Перші 3 (загалом n) елементів - це просто напруги вузлів. Останні 2 (загалом m) елементи - це струми, пов'язані з джерелами напруги.

Це підводить нас до матриці z , яка містить лише відомі величини. Це також матриця 5×1 (загалом $(n+m) \times 1$). Перші 3 (загалом n) елементів є або нульовими, або сумою незалежних джерел струму. Останні 2 (загалом m) елементи є незалежними джерелами напруги.

Узагальнення

Модифікований вузловий аналіз, застосований до схеми лише з пасивними елементами (резисторами) та незалежними джерелами струму та напруги, призводить до матричного рівняння вигляду:

$$Ax = z$$

Для схеми з n вузлів і m незалежними джерелами напруги:

- Матриця A:
 - має розмір $(n+m) \times (n+m)$ і складається лише з відомих величин.
 - $n \times n$ частина матриці у верхньому лівому куті:
 - має лише пасивні елементи
 - елементи, заземлені, з'являються тільки на діагоналі
 - елементи, не заземлені, є як діагональними, так і поза діагональними.

○ решта матриці A (не входить до верхньої лівої частини $n \times n$) містить лише 1, -1 та 0 (можливі інші значення, якщо є залежні джерела струму та напруги).

- Матриця x :

- є вектором $(n+m) \times 1$, який містить невідомі величини (вузлові напруги та струми незалежних джерел напруги).

- n верхніх елементів є n вузловими напругами.

- нижні m елементів представляють струми через m незалежних джерел напруги в ланцюзі.

- Матриця z :

- є вектором $(n+m) \times 1$, який містить лише відомі величини

- n верхніх елементів дорівнюють нулю або сумі та різниці незалежних джерел струму в ланцюзі.

- нижні m елементів представляють m незалежних джерел напруги в ланцюзі.

Електричне коло вирішується за допомогою простої матричної маніпуляції:

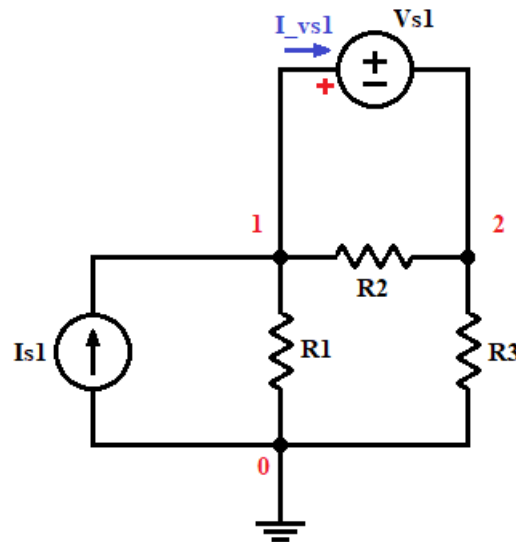
$$x = A^{-1}z$$

РОЗДІЛ 3. АЛГОРИТМ МОДИФІКОВАНОГО ВУЗЛОВОГО АНАЛІЗУ

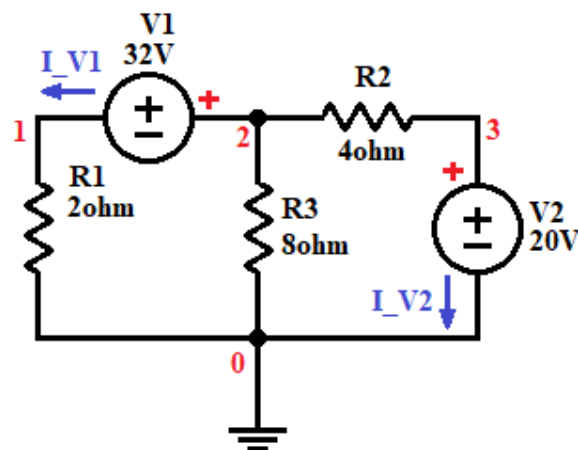
В цьому розділі ми опишемо алгоритмічний метод для генерації рівнянь модифікованого вузлового аналізу для систем лише з резисторами та незалежними джерелами.

Генерація матриць модифікованого вузлового аналізу

Нам потрібно створити три матриці: матриця A , матриця x і матриця z . Кожна з них буде створена шляхом поєднання кількох окремих підматриць. Щоб обґрунтувати правила генерування матриць, ми розглянемо два зразки схем нижче (приклад 5 і приклад 6 з минулого розділу).



Зразок 1



Зразок 2

Матриця А

Матриця А утворюється комбінацією 4 менших матриць G, B, C і D.

$$A = \begin{bmatrix} G & B \\ C & D \end{bmatrix}$$

Матриця А – це $(m+n) \times (m+n)$ (n – кількість вузлів, а m – кількість незалежних джерел напруги) і:

- матриця G має розмір $n \times n$ і визначається взаємозв'язками між пасивними елементами схеми (резисторами)
- матриця B має розмір $n \times m$ і визначається підключеннями джерел напруги.
- матриця C має розмір $m \times n$ і визначається підключенням джерел напруги.
- матриця D має розмір $m \times m$ і дорівнює нулю, якщо розглядати лише незалежні джерела.

Правила утворення матриці G

Матриця G — це матриця $n \times n$, сформована в два етапи

- Кожен елемент діагональної матриці дорівнює сумі провідності кожного елемента, підключеного до відповідного вузла. Отже, перший діагональний елемент — це сума провідностей, підключених до вузла 1, другий діагональний елемент — це сума провідностей, підключених до вузла 2, і так далі.
- Недіагональні елементи – це негативна провідність елемента, підключеного до пари відповідних вузлів. Тому резистор між вузлами 1 і 2 входить в матрицю G в місці (1, 2) і місцях (2, 1).

Якщо елемент заземлений, він матиме лише один запис у матриці G — у відповідному місці на діагоналі. Якщо він не заземлений, це сприятиме утворенню чотирьох записів у матриці - двох діагональних записів (відповідних двом вузлам) і двох недіагональних записів.

Правила утворення матриці В

Матриця В є матрицею $n \times m$ лише з елементами 0, 1 та -1. Кожне значення в матриці відповідає певному джерелу напруги (перший вимір) або вузлу (другий вимір). Якщо плюсовий полюс i -го джерела напруги підключений до вузла k , то елемент (i, k) в матриці В дорівнює 1. Якщо мінусовий полюс i -го джерела напруги підключений до вузла k , то елемент (i, k) у матриці В є -1. В іншому випадку елементи матриці В дорівнюють нулю.

Якщо джерело напруги незаземлене, воно матиме два елементи в матриці В (1 і -1 в одному стовпці). Якщо воно заземлене, воно матиме лише один елемент у матриці.

Правила утворення матриці С

Матриця С є матрицею $m \times n$ лише з елементами 0, 1 та -1. Кожне місце в матриці відповідає певному вузлу (перший вимір) або джерелу напруги (другий вимір). Якщо позитивний полюс i -го джерела напруги підключений до вузла k , то елемент (k, i) в матриці С дорівнює 1. Якщо мінусовий полюс i -го джерела напруги підключений до вузла k , то елемент (k, i) у матриці С є -1. В іншому випадку елементи матриці С дорівнюють нулю.

Іншими словами, матриця С є транспонованою матрицею В.

Правила утворення матриці D

Матриця D — це матриця $m \times m$, яка повністю складається з нулів.

Матриця x

Матриця x містить наші невідомі величини і утворюється комбінацією 2 менших матриць v і j . Її значно легше утворити, ніж матрицю А.

$$x = \begin{bmatrix} v \\ j \end{bmatrix}$$

Матриця x має розмір $(m+n) \times 1$ (n - кількість вузлів, а m - кількість незалежних джерел напруги) і:

- матриця v має розмір $n \times 1$ і містить невідомі напруги

- матриця j має розмір $m \times 1$ і містить невідомі струми через джерела напруги

Правила утворення матриці v

Матриця v являє собою матрицю $n \times 1$, утворену з вузлових напруг. Кожен елемент у v відповідає напрузі в еквівалентному вузлі ланцюга.

Правила утворення матриці j

Матриця j являє собою матрицю $m \times 1$ з одним записом для струму, що проходить через кожне джерело напруги.

Матриця z

Матриця z містить наші незалежні джерела напруги та струму і буде розроблена як комбінація 2 менших матриць i та e . Її досить легко утворити.

$$z = \begin{bmatrix} i \\ e \end{bmatrix}$$

Матриця z має розмір $(m+n) \times 1$ (n - кількість вузлів, а m - кількість незалежних джерел напруги) і:

- матриця i має розмір $n \times 1$ і містить суму струмів, що проходять через пасивні елементи у відповідний вузол.
- матриця e має розмір $m \times 1$ і містить значення незалежних джерел напруги.

Правила утворення матриці i

Матриця i — це матриця $n \times 1$, кожен елемент якої відповідає певному вузлу. Значення кожного елемента i визначається сумою джерел струму у відповідному вузлі. Якщо джерела струму не підключені до вузла, значення дорівнює нулю.

Правила утворення матриці e

Матриця e являє собою матрицю $m \times 1$, при цьому кожен елемент матриці дорівнює за значенням відповідному незалежному джерелу напруги.

РОЗДІЛ 4. РЕАЛІЗАЦІЯ ОБ'ЄКТУ ДОСЛІДЖЕННЯ

Реалізація об'єкту дослідження була зроблена за допомогою мови програмування JavaScript [10] та використання практик об'єктно-орієнтованого програмування.

Огляд програми

Програма складається з таких класів:

- CircuitEditor
- CircuitSolver
- Component
- ComponentSingleEnded
- ComponentDoubleEnded
- ComponentBattery
- ComponentCapacitor
- ComponentCurrentSource
- ComponentGround
- ComponentInductor
- ComponentResistor
- ComponentVoltageSource
- ComponentWire
- Matrix
- UIToolbar

Розглянемо кожен з цих класів та їх основні методи.

Клас Matrix

Клас Matrix використовується для представлення матриць $A(G, B, C, D)$, $x(v, j)$ та $z(i, e)$.

Властивості:

- `n` та `m`. Розмір матриці.
- `cells`. Двовимірний масив $n \times m$.

Основні методи:

- `Decompose`. Цей метод використовується для декомпозиції матриці `A`.

В його основі лежить алгоритм Краута [11].

- `Solve`. Цей метод використовується для розв'язання рівнянь модифікованого вузлового аналізу.

Клас `Component`

Клас `Component` являється базовим класом для класів: `ComponentSingleEnded`, `ComponentDoubleEnded`.

Властивості:

- `points`. Одновимірний масив точок.
- `nodes`. Одновимірний масив вузлів.
- `selected`. Прапорець, який вказує чи був даний компонент вибраний.
- `dragOrigin`. Прапорець, який вказує чи є даний компонент початком потоку електронів.
- `isVoltageSource`. Прапорець, який вказує чи є даний компонент джерелом напруги.
- `voltageSourceIndex`. Індекс джерела струму.

Основні методи:

- `dragStart`. Цей метод починає рух електронів.
- `dragMove`. Цей метод рухає електрони.
- `draw` методи. Ці методи використовуються для малювання компонента, напруги, струму та електронів.
- `render` методи. Ці методи використовуються для рендера компонента, напруги та електронів.

Клас ComponentSingleEnded

Клас Component являється базовим класом для класу ComponentGround.

Клас ComponentGround

Клас ComponentDoubleEnded використовується для представлення «землі».

Клас ComponentDoubleEnded

Клас Component являється базовим класом для класів: ComponentBattery, ComponentCapacitor, ComponentCurrentSource, ComponentInductor, ComponentResistor, ComponentVoltageSource, ComponentWire.

Клас ComponentBattery

Клас ComponentBattery використовується для представлення батареї.

Властивості:

- voltage. Змінна, що містить значення напруги.

Клас ComponentCapacitor

Клас ComponentCapacitor використовується для представлення конденсатора.

Властивості:

- capacitance. Змінна, що містить значення ємності.
- useTrapezoidalIntegration. Прапорець, який вказує чи використовує компонент трапецієподібну інтеграцію.
- companionModelResistance. Змінна, що містить значення опору.
- companionModelCurrent. Змінна, що містить значення сили струму.

Клас ComponentCurrentSource

Клас ComponentCurrentSource використовується для представлення джерела струму.

Властивості:

- `currentSetting`. Змінна, що містить значення сили струму.

Клас `ComponentInductor`

Клас `ComponentInductor` використовується для представлення індуктора.

Властивості:

- `inductance`. Змінна, що містить значення індуктивності.
- `useTrapezoidalIntegration`. Прапорець, який вказує чи використовує компонент трапецієподібну інтеграцію.
- `companionModelResistance`. Змінна, що містить значення опору.
- `companionModelCurrent`. Змінна, що містить значення сили струму.

Клас `ComponentResistor`

Клас `ComponentResistor` використовується для представлення резистора.

Властивості:

- `resistance`. Змінна, що містить значення опору.

Клас `ComponentVoltageSource`

Клас `ComponentVoltageSource` використовується для представлення джерела напруги.

Властивості:

- `voltage`. Змінна, що містить значення напруги.
- `dcBias`. Змінна, що містить значення середньої напруги.
- `frequency`. Змінна, що містить значення частоти зміни напруги.
- `amplitude`. Змінна, що містить значення амплітуди зміни напруги.

Клас `ComponentWire`

Клас `ComponentWire` використовується для представлення дрота.

Клас UIToolbar

Клас UIToolbar використовується для представлення панелі кнопок в інтерфейсі.

Клас CircuitSolver

Клас CircuitSolver використовується для представлення аналізатора електричної схеми.

Властивості:

- readyToStamp. Прапорець, який вказує чи можливий процес називання (штамбування) вузлів схеми.
- readyToRun. Прапорець, який вказує чи можливий початок аналізу схеми.
- matrix... Змінні, типу Matrix, які використовуються для аналізу схеми.
- solution. Змінна, що містить результат роботи аналізатора.

Основні методи:

- stampBegin. Цей метод починає називання (штамбування) елементів схеми.
- stampResistance. Цей метод починає називання (штамбування) опорів вузлів схеми.
- stampCurrentSource. Цей метод починає називання (штамбування) всіх джерел струму схеми.
- stampEnd. Цей метод закінчує називання (штамбування) елементів схеми.
- solve. Цей метод аналізує схему.

Клас CircuitEditor

Клас CircuitEditor використовується для представлення редактора електричних схем, користувацького інтерфейсу і делегування аналізу електричних схем аналізатору.

Властивості:

- `width`. Змінна, що містить значення ширини площини на якій можна конструювати схему.
- `height`. Змінна, що містить значення висоти площини на якій можна конструювати схему.
- `components`. Одновимірний масив компонентів.
- `solver`. Змінна, типу `CircuitSolver`, аналізатор схеми.
- `nodes`. Одновимірний масив вузлів.
- `voltageSources`. Змінна, що містить значення кількості джерел напруги.
- `cameraPos`. Змінна, що містить координати камери.
- `cameraZoomLevel`. Змінна, що містить значення приближення камери.
- `mouse...` Змінні, які використовуються для представлення стану та позиції курсора.

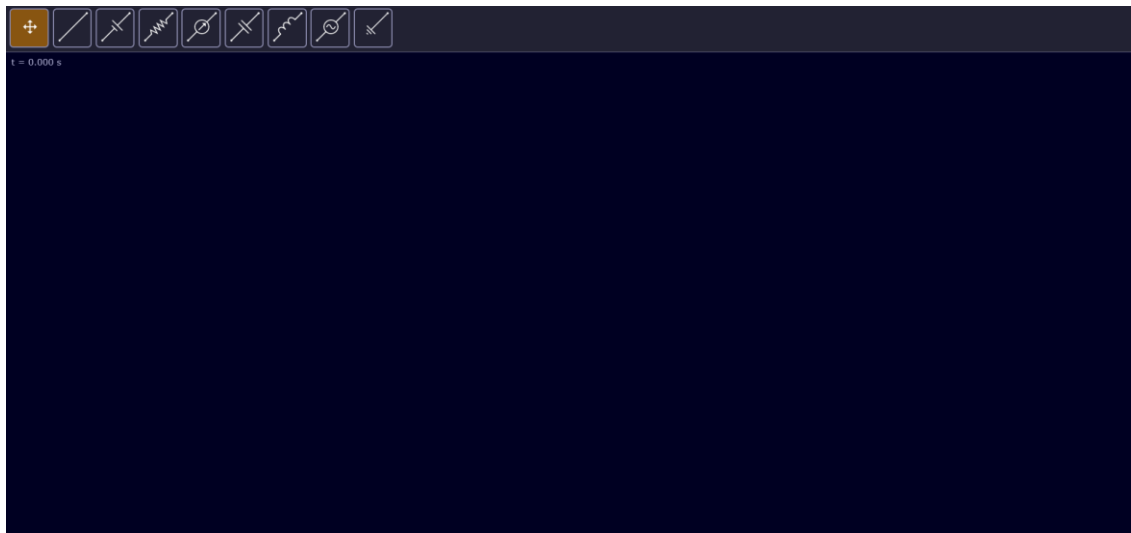
Основні методи:

- `run`. Цей метод запускає редактор електричних схем.
- `resize`. Цей метод здійснює зміну розміру площини редактора.
- `refreshNodes`. Цей метод оновлює вузли схеми.
- `refreshSolver`. Цей метод оновлює аналізатор схеми.
- `render`. Цей метод відповідає за рендер редактора схем.

Огляд результату

Розглянемо кінцеву модель редактора електричних схем.

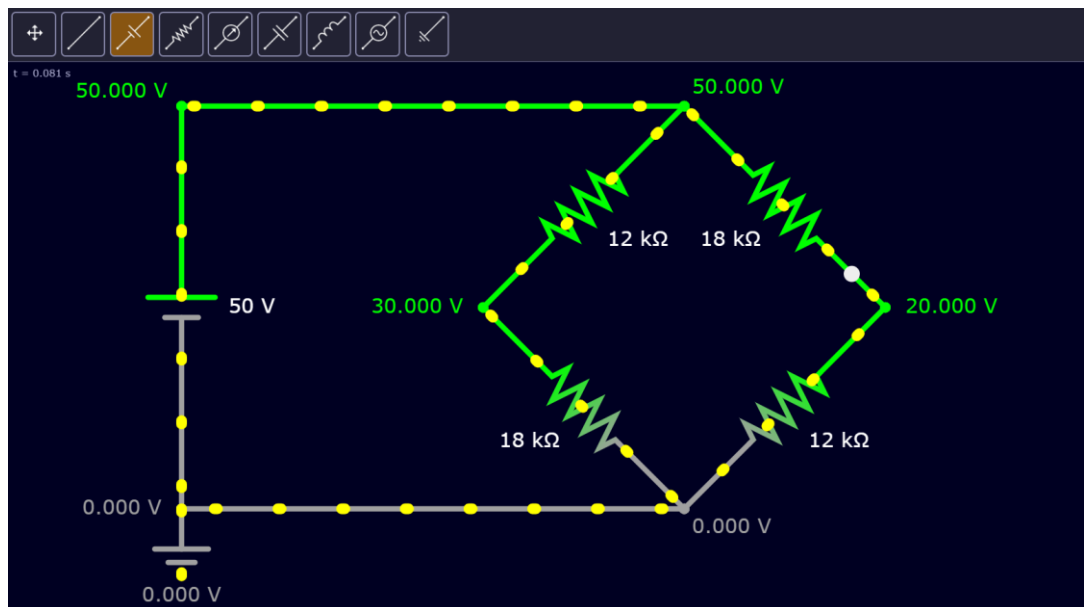
Після запуску програми у браузері відкриється нова вкладка з інтерфейсом редактора схем. На ній присутні кнопки для переміщення вже існуючих компонентів та створення нових: дротів, батарей, резисторів, джерел струму, конденсаторів, індукторів, джерел напруги та землі.



Приклад 1.

Розглянемо електричну схему з батареєю, 4 резисторами та землею.

Як видно на рисунку, аналізатор розрахував напруги на усіх вузлах і вони були виведені на екран. На цій схемі ліва та права пара резисторів мають еквівалентний сумарний опір. Через це електрони по ним рухаються з однаковою швидкістю.

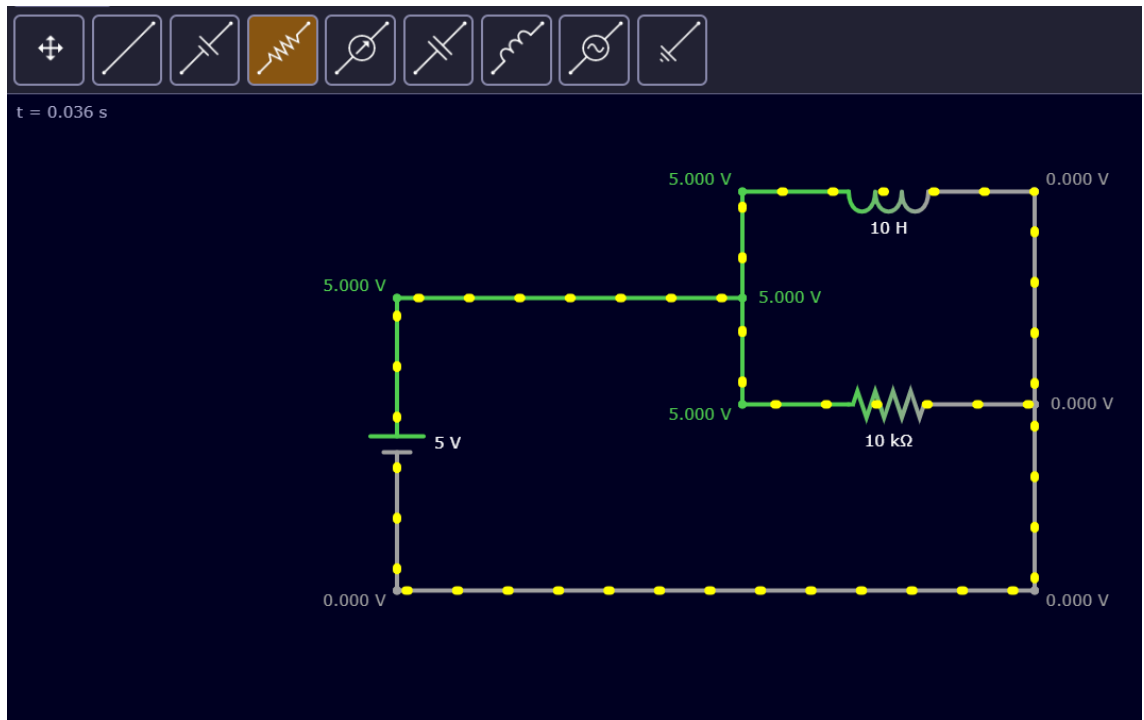


Приклад 2.

Розглянемо електричну схему з батареєю, резистором та індуктором.

Як видно на рисунку, аналізатор розрахував напруги на усіх вузлах і вони були виведені на екран. На цій схемі спочатку більшість електронів будуть

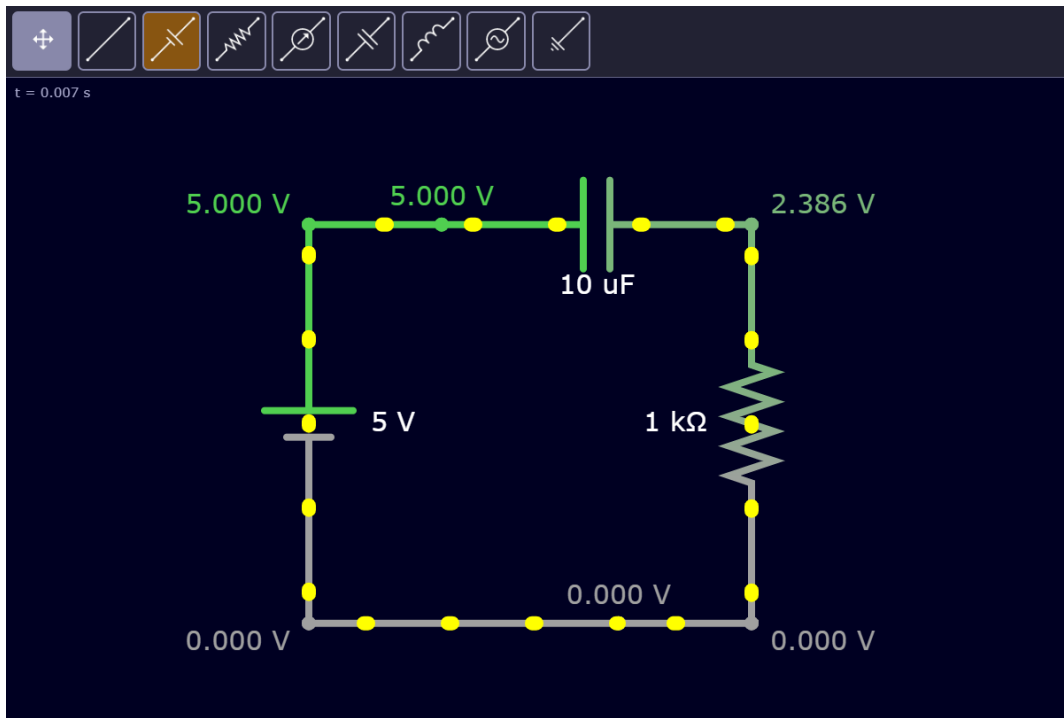
проходити через резистор, але з часом, коли через індуктор пройде все більше електронів і він накопичить енергію магнітного кола, через нього буде проходити більшість електронів.



Приклад 3.

Розглянемо електричну схему з батареєю, резистором та конденсатором.

Як видно на рисунку, аналізатор розрахував напруги на усіх вузлах і вони були виведені на екран. На цій схемі спочатку напруга на вузлі між конденсатором і резистором була рівна напрузі батареї. Проте по мірі того, як конденсатор накопичує електроенергію, напруга на цьому вузлі падає та досягне 0.



ВИСНОВКИ

Метою кваліфікаційної роботи була розробка застосунку для моделювання схем та розв'язування задач на розрахунок опору та напруги електричного кола та дослідження існуючих методів та алгоритмів для аналізу електричних кіл.

У процесі виконання кваліфікаційної роботи були виконані наступні завдання:

- Були досліджені наявні теоретичні матеріали.
- Були проаналізовані різноманітні способи вирішення задачі і можливість їхнього застосування серед алгоритму програми.
- Був реалізований алгоритм розрахунку результатів.
- Був розроблений користувачський інтерфейс та дизайн застосунку, який включає в себе візуалізацію електричних схем, потому електронів через елементи схеми та вивід розрахованих величин.

У програмному застосунку було реалізовано розв'язання та аналіз електронних схем за допомогою модифікованого вузлового аналізу.

Розроблений програмний застосунок у майбутньому може бути використано під час навчального процесу в шкільному курсі фізики під час вивчення електричних кіл.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Фізика, Підручник для 8 класу закладів загальної середньої освіти - М. В. Головка, Л. В. Непорожня, 2021.
2. Загальна електротехніка, Навчальний посібник – В. Ф. Заболотний, 2017
3. Rizzoni, G, Principles and Applications of Electrical Engineering, McGraw Hill, 2003.
4. Electrical Circuit Theory and Technology, 5th ed, John Bird, 2013.
5. Linear Circuit Analysis: Time Domain, Phasor and Laplace Transform Approach-es, Oxford University Press, 2001.
6. Markus Kunze (2000). Non-Smooth Dynamical Systems. Springer Science & Business Media.
7. Vincent Acary; Olivier Bonnefon; Bernard Brogliato (2010). Nonsmooth Modeling and Simulation for Switched Circuits. Springer Science & Business Media.
8. Nilsson, J W, Riedel, S A (2007). Electric Circuits (8th ed.). Pearson Prentice Hall.
9. Ljiljana Trajković, "Nonlinear circuits", The Electrical Engineering Handbook (Ed: Wai-Kai Chen).
10. Fullstack React: The Complete Guide to ReactJS and Friends Paperback – September 12, 2017 by Anthony Accomazzo, Nate Murray, Ari Lerner.
11. Modified Kraut method for solving systems of linear algebraic complex-valued equations of high order A. S. Tsybenko, A. M. Anisin & Yu. A. Tkalich