Міністерство освіти і науки України
Національний університет Запорізька політехніка

Методичні вказівки
до виконання лабораторної роботи з дисципліни

ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ ТА СИГНАЛІВ

для студентів спеціальностей
G5 «Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка»
172 «Електронні комунікації та радіотехніка»
всіх форм навчання

Вивчення лінійних кіл постійного струму із застосуванням прикладних пакетів MathCAD та Electronics Workbench

Запоріжжя – 2026

Методичні вказівки «Вивчення лінійних кіл постійного струму із застосуванням прикладних пакетів *MathCAD* та *Electronics Workbench»* призначені для студентів спеціальностей G5 «Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка» та 172 «Електронні комунікації та радіотехніка» всіх форм навчання / Укладачі В.О. Костенко, Л.М. Карпуков – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2026 – 31 с.

Укладачі:
канд. техн. наук, доцент В.О. Костенко
д-р тех. наук, професор Л.М. Карпуков

Відповідальний за випуск:
канд. техн. наук, доцент В.О. Костенко

Затверджено
на засіданні кафедри РТТ
Протокол № 6 від 03.02.2026 р.

Затверджено
на засіданні НМК факультету ФІБЕК
Протокол №6 від 04.03.2026 р.

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА 4
1 ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ 5
1.1 Теорія графів 5
1.2 Математичний пакет MathCAD.....6
1.3 Прикладний пакет Electronics Workbench 6
1.4 Методи розрахунку електричних кіл постійного струму 8
1.5 Способи перевірки правильності розв'язку рівнянь 17
2 АНАЛІЗ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОННИХ СХЕМ ЗА ДОПОМОГОЮ ELECTRONICS WORKBENCH 19
3 ЛАБОРАТОРНЕ ЗАВДАННЯ.....21
4 ЗМІСТ ЗВІТУ 22
5 КОНТОРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ.....23
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ 24
Додаток А Правила виконання лабораторної роботи 25
Додаток Б Схеми.....26
Додаток В Додаткові вхідні параметри.....31

ПЕРЕДМОВА

Методичні вказівки містять у собі короткі теоретичні поняття, перелік основних методів розрахунку а також завдання до лабораторної роботи з дисципліни теорії електричних кіл та основ теорії кіл [1]. Вони призначені для кращої підготовки студентів з ТЕК та ОТК, раціонального використовування часу, що відведено для лабораторних робіт, застосування новітніх інформаційних технологій при виконанні робіт та оформленні звітів. Для цього призначені математичний пакет *MathCAD* та пакет прикладного моделювання лінійних та нелінійних кіл *Electronics Workbench* (далі *EWB*). Але перед застосуванням пакетів програм часто має сенс уважно подивитись на запропоновану електричну схему, ділянки з послідовними або паралельними включеними опорами згорнути [2].

Поширене практичне застосування цих двох пакетів комп'ютерних програм пов'язано з тим, що мова *MathCAD* дуже нагадує загальноприйняту мову математичних та науково–технічних розрахунків, а прикладний пакет *EWB* є фактично віртуальною електронною лабораторією, де можна моделювати роботу будь-яких електричних кіл на персональному комп'ютері.

Завдання до лабораторної роботи обирають відповідно до номера варіанту, що є номером студента в списку журналу академічної групи, складеному на початок семестру. Номер схеми відповідає номеру варіанта, вхідні параметри надані у Додатку В. Додаткові коефіцієнти у вхідних даних, що позначені числами *d, h* (від 0 до 99). Для кожної академічної групи їх задає викладач.

Лабораторну роботу необхідно оформити на білих аркушах стандарту А4 згідно вимогам ДСТУ 3008:2015. На титульному листі обов'язково повинні бути: тема лабораторної роботи, прізвище виконавця, номер академічної групи, номер варіанту.

Після виконання й оформлення робота проходить рецензію у викладача та підлягає захисту перед викладачем у термін, що встановлено учбовим планом.

1 ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

1.1 Теорія графів

1.1.1 При вивченні методів розрахунку електричних кіл доцільно застосовувати деякі топологічні поняття, до числа яких відносяться спрямовані і не спрямовані графи. *Графом* називають геометричний образ схеми електричного кола у вигляді сукупностей точок (вершин графа), сполучених лініями (дугами графа). *Дуга* графа - це відрізок спрямованої неперервної лінії, що в загальному випадку виходить з однієї вершини і входить в іншу. Напрямок дуги вказується стрілкою. Такий граф називають *орієнтованим* (спрямованим). Геометричні образи, що відбивають тільки структуру кола, називають *топологічними графами*. У теорії графів мають значення поняття під графи, контур, вузол, дерево, зв'язки (хорди), перетини.

1.1.2 *Контуром* називають замкнутий шлях обходу кола, у якому один із вузлів є початковим і кінцевим вузлом шляху.

1.1.3 *Деревом* графа називають під граф, що проходить через усі вузли кола і не має жодного замкнутого контуру.

1.1.4 Гілки, що доповнюють дерево графа до повного графа, називають *зв'язками* або *хордами*. На рисунку 1.1.а представлена електрична схема, а на рисунку 1.1.б – граф цієї схеми. Гілки дерева зображені жирними лініями, гілки зв'язку (хорди) - тонкими.

1.1.5 *Незалежним* (*головним*) називають контур, що складається з гілок дерева і тільки однієї гілки зв'язку (хорди). Незалежні контури не містять джерел струму. Незалежних контурів стільки, скільки хорд має граф схеми.

1.1.6 *Найпростішим* контуром називають контур, внутрішня область якого не перетинається жодною віткою графа.

1.1.7 *Перетином* графа (схеми) називають безліч гілок, видалення яких поділяє граф на два ізольовані підграфи, один із яких в окремому випадку може бути ізольованим вузлом. Перетин можна зобразити у вигляді сліду деякої замкнутої поверхні, що розсікає відповідні гілки. Головними називають перетини, кожний з яких розсікає кілька гілок зв'язку і тільки одну вітку обраного дерева.

1.2 Математичний пакет *MathCAD*

Пакет *MathCAD* має дружній інтерфейс; три поля записів (робоче, графічне та текстове); арифметичний і символьний процесори; зручну та розгалужену довідкову систему.

Алфавіт *MathCAD* містить у собі:

- великі та маленькі літери латині та грецької абетки;
- великі та маленькі літери української та російської абетки;
- арабські цифри;
- системні змінні;
- вбудовані функції;
- оператори та оператори-функції.

Записи у робочому та графічному полях *MathCAD* повинні бути вичерпно повними та абсолютно точними. Текстове поле призначено для запису коментарів. Системні змінні призначені для організації математичного процесу:

- $\pi = 3.1415926536$ - число π [Ctrl-P];
- $e = 2.71828182$ - основа натурального логарифму;
- ∞ - нескінченність [Ctrl-Z];
- % - відсотки;
- i ; j - уявна одиниця;
- $TOL = 10^{-3}$ - припустима похибка;
- $CTOL = 10^{-3}$ – встановлює точність обмежень у розрахунках;
- ORIGIN = 0 - визначає індекс першого елемента векторів та матриць;
- FRAME = 0 - лічильник для побудови анімацій;
- PRN PRECISION = 4 - кількість значущих цифр;
- PRN COLWIDTH = 8 - кількість позицій для числа.

Символьний процесор *MathCAD* призначено для розв’язку дуже широкого кола математичних, науково–технічних та інженерних задач.

1.3 Прикладний пакет *Electronics Workbench*

Комп’ютерна система моделювання та аналізу електронних схем *Electronics Workbench* (далі просто - пакет *EWB*) дозволяє моделювати аналогові, цифрові та цифро-аналогові електронні схеми, аналізувати їх роботу при зміні будь-яких параметрів. Пакет має простий та зручний інтерфейс, велику бібліотеку поширено відомих електронних

компонентів та приладів, зручну та розгалужену довідкову систему.

1.3.1 *Інтерфейс* пакета *EWB* складається з таких частин:

- головне меню;
- панель інструментів;
- панель компонентів;
- поле компонентів;
- вмикач, який підключає у роботу складену схему (розташовано у правому верхньому куті панелі компонентів.);
- клавіша *F9* – на клавіатурі (пауза/ кінець паузи у роботі).

1.3.2 *Бібліотеки елементів* мають у своєму складі широкий вибір пасивних *R,L,C* – елементів, транзисторів, тригерів, джерел енергії, логічні, цифрові, гібридні елементи, спеціальні комбіновані схеми та інше.

1.3.3 *Бібліотека індикаторів* для вимірювань має у своєму складі амперметр, вольтметр, мультіметр, осцилограф, графічний плоттер, функціональний генератор слів, логічний аналізатор та логічний перетворювач.

1.3.4 Аналіз роботи електронних схем в пакеті *EWB* складається із таких *операцій*:

- вибір елементів та приладів із відповідних бібліотек;
- переміщення маніпулятором «миша» обраних елементів у належне місце на робочому полі (вставка, видалення, поворот на кут 90^o для зручного їх розташування);
- з'єднання усіх елементів у робочу схему;
- виділення контурів різними кольорами для кращого сприйняття схеми;
- зміна параметрів кожного елементу (приладу) у широкому діапазоні;
- отримання результатів аналізу та їх інтерпретація.

1.3.5 Прилади для проведення вимірів розташовано у *полі індикаторів* (***Indicators***), яке відображене відповідним значком.

У кожній схемі можна застосувати кілька приладів одночасно. Це дозволяє знаходити струми та напруги (потенціали) на всіх ділянках схеми. Сторона прямокутника амперметра або вольтметра, яку зображено жирною лінією відповідає клемі «мінус» вимірювального приладу.

1.3.6 Джерела енергії усіх різновидів розташовано у бібліотеці джерел (***Sources***), перші три з яких (**Ground, Battery, DC Current**

Sources) застосовують при аналізі кіл постійного струму. Усі джерела в пакеті *EWB* - це ідеальні джерела.

Компонент заземлення (**Ground**) має нульовий потенціал і таким чином забезпечує вихідну точку для відліку потенціалів. Заземлення обов'язково необхідно застосувати для моделювання схем із операційними підсилювачами, мультіметром, трансформаторами, керованими джерелами енергії, осцилографом.

Внутрішній опір ідеального джерела е.р.с. (**Battery**) дорівнює нулеві, тому напруга на його виході не залежить від струму, що тече через нього. Короткою жирною рискою на батареї позначається зажим, який має від'ємний потенціал відносно іншого зажиму.

Ідеальне джерело струму (**DC Current Sources**) має нескінченно великий внутрішній опір, тому струм, який воно виробляє не залежить від опору навантаження. Стрілка вказує напрям протікання виробленого струму.

1.3.7 Споживачі електричної енергії розташовано на панелі компонентів (***Basic***). Для простих схем достатньо застосувати чотири зі запропонованих компонентів (**Connector, Resistor, Potentiometer, Resistor Pack**).Вузол (**Connector**) застосовують для з'єднання між проводами та створення контрольних точок, куди можна підключати вимірювальні прилади. До кожного вузла можна підключити не більше ніж 4 провідника.

1.3.8 Мультіметр – універсальний прилад для вимірювань струму, напруги, опору – розташовано на панелі ***Instruments*** першим з ліва. На його застосування є деякі обмеження. У схемі можна використати тільки один такий інструмент. До того ж один з вузлів схеми треба обов'язково підключити до «землі» (**Ground** із бібліотеки ***Sources***).

1.4 Методи розрахунку електричних кіл постійного струму

1.4.1 Метод рівнянь Кірхгофа.

1.4.1.1 Режим роботи електричного кола довільної конфігурації цілком визначається першим і другим законами Кірхгофа [1, 3, 4].

Закон балансу струмів у вузлах кола (перший закон Кірхгофа): алгебраїчна сума струмів у вузлі дорівнює нулеві, або $\sum_{K=3}^{n} I_K = 0$.

Перший закон Кірхгофа застосовують до вузлів електричного кола, до замкнутих поверхонь перетинів електричних схем, до вершин

спрямованих графів цих схем. При складанні рівнянь за першим законом Кірхгофа спочатку обирають довільні напрямки струмів в усіх вітках електричного кола, складають його граф. У рівняннях струми, що виходять із вузла, записують зі знаком «+». Якщо до наданого вузла приєднане джерело струму, струм цього джерела також потрібно врахувати. *Кількість* вузлових рівнянь повинна бути на одиницю менше, ніж кількість вузлів, що входять до складу дерева графа досліджуваного електричного кола.

1.4.1.2 Закон балансу напруги у контурах (другий закон Кірхгофа) формулюється таким чином: у будь-якому контурі алгебраїчна сума Е.Р.С. дорівнює алгебраїчній сумі спадань напруги на елементах контуру, або $\sum_{K=1}^{n} E_K = \sum_{K=1}^{n} R_K I_K$.

Другий закон Кірхгофа застосовують до незалежних контурів електричних кіл. При складанні рівнянь за другим законом Кірхгофа варто спочатку задати напрямок обходу кожного незалежного контуру досліджуваного електричного кола. У контурному рівнянні напругу на опорах гілок контуру (і також Е.Р.С.) записують зі знаком «+», якщо *напрямок обходу* контуру *збігається* із *напрямком струму* в гілках (із *напрямком Е.Р.С.*). При розбіжності *напрямку обходу* контуру із *напрямком струму* у гілці (або із *напрямком Е.Р.С.*) ці величини записують зі знаком «-».

Кількість незалежних контурів (контурних рівнянь) дорівнює кількості *гілок зв'язку*, що доповнюють дерево графа до повної схеми.

1.4.1.3 Приклад розв’язку

Надано електричне коло, що зображене на рисунку 1.1, має такі параметри: величини Е.Р.С. $\mathbf{E}_1$ =24 *В*, $\mathbf{E}_4$ =36 *В*, $\mathbf{E}_5$ =6 *В*;

величина джерела струму $\mathbf{J}_8$ = 0,3 А; опір резисторів (в *Омах*) :

$\mathbf{R}_1$ = 10, $\mathbf{R}_2$ = 15, $\mathbf{R}_3$ = 20, $\mathbf{R}_4$ = 4, $\mathbf{R}_5$ = 5, $\mathbf{R}_6$ = 6, $\mathbf{R}_7$ = 7.

Потрібно: визначити струми у вітках за допомогою законів Кірхгофа.

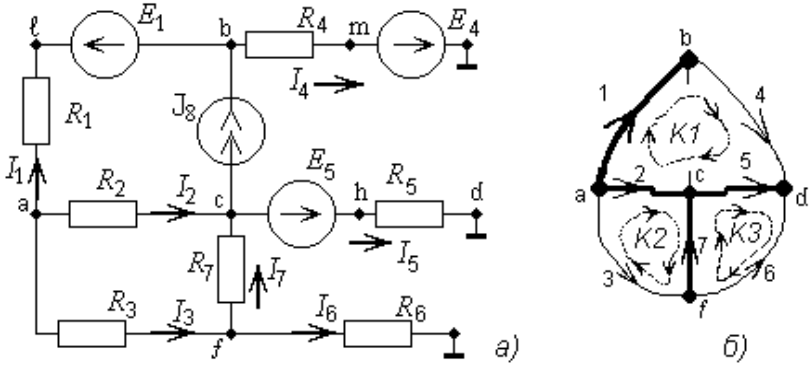

Рисунок 1.1 – Схема електричного кола (а) та його граф (б)

Розв'язок проводимо у такій послідовності:

а) Зображуємо спрямований граф кола (рис.1.1.б). Граф має п'ять вершин - «*a, b, c, d, f*»; сім гілок. Дерево графа (жирні дуги 7–5–2–1) має 4 гілки; три хорди (дуги 3; 4 та 6). Отже за першим законом Кірхгофа треба скласти 4 рівняння, за другим – 3 рівняння.

б) Складаємо для вузлів (*a; b; c; f*) та для контурів (*K1*; *K2*; *K3*) відповідні рівняння за законами Кірхгофа:

$$\begin{cases} I_1 + I_2 + I_3 = 0 \\ -I_1 + I_4 - J_8 = 0 \\ -I_2 + I_5 - I_7 + J_8 = 0 \\ -I_3 + I_6 + I_7 = 0 \\ R_1 I_1 + R_4 I_4 - R_5 I_5 - R_2 I_2 = E_4 - E_5 - E_1 \\ R_2 I_2 - R_7 I_7 - R_3 I_3 = 0 \\ R_5 I_5 - R_6 I_6 + R_7 I_7 = E_5 \end{cases} \qquad (1.1)$$

в) Розв'язок такої системи проведемо за допомогою пакета *MathCAD*.

Для цього можна застосувати матричну формулу, можливості вбудованої матричної алгебри, або оператори–функції *Given – Find(x1,x2,...), Given – Minerr(x1,x2,...)* , та інші.

Наприклад, для розв'язку системи (1.1) матричними засобами спочатку побудуємо матрицю коефіцієнтів (Δ) при невідомих струмах та вектор–стовпець відомих параметрів (*B*) (вектор впливу).

Для побудови матриць та векторів можна скористуватись операцією *Matrix* пункт *Insert* основного меню, або натиснути на піктограму із зображенням шаблона матриць на математичній панелі (*Math Palette*), або комбінацією клавіш *Ctrl+M* . Це призведе до появи діалогового вікна, де треба вказати кількість строк (Rows:=7) та стовпців (Columns:=7) матриці (якщо оберемо Columns:=1 – отримаємо вектор–стовпець).

Порядковий номер елемента (його адресу) називають *індексом*. Нижню границю індексу задаємо значенням системної змінної ORIGIN:=1 (*Math – Options… – Array Origin* – 1).

Заповнюємо матрицю (Δ) та вектор (B) згідно із системою (1.1):

$$\Delta := \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ R1 & -R2 & 0 & R4 & -R5 & 0 & 0 \\ 0 & R2 & -R3 & 0 & 0 & 0 & -R7 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R5 & -R6 & R7 \end{bmatrix} \quad B := \begin{bmatrix} 0 \\ J8 \\ -J8 \\ 0 \\ E4 - E5 - E1 \\ 0 \\ E5 \end{bmatrix} \quad I = \begin{bmatrix} 0.263 \\ -0.075 \\ -0.188 \\ 0.563 \\ 0 \\ -0.563 \\ 0.375 \end{bmatrix}$$

Розв’язок отримаємо за матричною формулою: I:=Δ–1B, або застосуємо вбудовану функцію

I:= lsolve(Δ,B) .

Результат (струми в *Амперах*) отримаємо у вигляді вектор–стовпця [I]:

Тут результат I_1 відповідає струму гілки I_1 електричного кола рис.3.1; $I_2 – I_2$; і так далі.

При застосуванні оператор–функцій *Given – Find* або *Given – minerr* треба спочатку задати початкові значення для розрахунку, наприклад: I1:=1, I2:=1, I3:=1 , I4:=1, I5:=1, I6:=1, I7:=1 .

Далі у робочому полі наберемо систему рівнянь:

Given

$I1 + I2 + I3 = 0$

$I4 - I1 = J8$

$I5 - I2 - I7 = -J8$

$I7 + I6 - I3 = 0$

$I1 \cdot R1 + I4 \cdot R4 - I2 \cdot R2 - I5 \cdot R5 = E4 - E5 - E1$

$I2 \cdot R2 - I3 \cdot R3 - I7 \cdot R7 = 0$

$I5 \cdot R5 + I7 \cdot R7 - I6 \cdot R6 = E5$

Струм := find(I1, I2, I3, I4, I5, I6, I7)

$$\text{Струм} = \begin{bmatrix} 0.263 \\ -0.075 \\ -0.188 \\ 0.563 \\ 0 \\ -0.563 \\ 0.375 \end{bmatrix}$$

Звертаємо Вашу увагу на те, що між операторами *Given – Find* обов'язкове застосування саме знака «*жирного рівняння*» (*Ctrl* =, жирний знак =), а не знаків «*присвоювання*» (:=) або «*дорівнює*» (=). Результат розв'язку цієї системи занесемо у вектор «Струм» .

Обов'язково також, щоб усі розрахунки мали відповідні пояснення. Наприклад, після запуску системи *MathCAD*

(«Пуск – Программи – MathSoft Apps – MathCad 2000 Professional») відкриємо текстове поле («Insert–Text Region», або натиснути: Shift»); обираємо мову (можна одночасним натисканням клавіш «Shift Ctrl» один або два рази), бажаний шрифт, розмір, стиль напису (у позиції *Format* основного меню); запишемо: Лабораторна робота №1 «Дослідження електричного кола постійного струму»; вийдемо у робоче поле; перейдемо на англійську мову.

Таким чином поступають кожний раз при поясненнях.

1.4.2 Метод вузлових потенціалів.

1.4.2.1 Метод вузлових потенціалів полягає в тому, що із рівнянь, складених за першим законом Кірхгофа, визначають потенціали вузлів щодо базисного вузла, потенціал якого умовно дорівнює нулеві. Тому кількість вузлових рівнянь повинна бути на

одиницю менше, ніж є кількість вузлів, що входять до складу дерева графа.

1.4.2.2 У загальному випадку система вузлових рівнянь має вигляд:

$$\begin{cases} G_{11}\varphi_1 - G_{12}\varphi_2 - G_{13}\varphi_3 - \ldots - G_{1n}\varphi_n = E_{11}\cdot G_{11} + J_{11} \\ -G_{21}\varphi_1 + G_{22}\varphi_2 - G_{23}\varphi_3 - \ldots - G_{2n}\varphi_n = E_{22}\cdot G_{22} + J_{22} \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ -G_{k1}\varphi_1 - \ldots + G_{kk}\varphi_3 - \ldots - G_{kn}\varphi_n = E_{kk}\cdot G_{kk} + J_{kk} \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ -G_{n1}\varphi_1 - G_{n2}\varphi_2 - G_{n3}\varphi_3 - \ldots + G_{nn}\varphi_n = E_{nn}\cdot G_{nn} + J_{nn} \end{cases},$$

де φ_k – потенціал *k*-го вузла;

G_{kk} – сума провідності усіх гілок, що приєднані до *k*-го вузла;

G_{kn} – сума провідності гілок, що безпосередньо з'єднують вузол *k* із вузлом *n*;

$E_{kk}\cdot G_{kk}$ – алгебраїчна сума добутків ЕРС гілок, що примикають до вузла *k* , на їхні провідності; при цьому зі знаком «плюс» беруться ті ЕРС, що спрямовані до вузла *k* , і зі знаком мінус – якщо від нього;

J_{kk} – алгебраїчна сума струмів джерел струму, приєднаних до вузла *k*; при цьому зі знаком «плюс» будуть ті струми, що спрямовані до вузла *k* , а зі знаком мінус – що спрямовані від вузла *k*.

1.4.2.3 Якщо коло має гілки з ідеальними джерелами ЕРС (без опорів), ці ЕРС із гілки з нульовим опором треба перенести через відповідний вузол в інші гілки, які приєднані до того ж вузлу і мають деякі значення опорів.

1.4.2.4 Потенціали вузлів визначаємо за матричною формулою $[\varphi] := [G]^{-1}\cdot[E\cdot G + J]$ (або за функцією φ:= lsolve(G, E·G+J)) .

1.4.2.5 Струми гілок за законом Ома: $I_n = \dfrac{\varphi_н - \varphi_к \pm E_n}{R_n}$,

де *н* – вузол дерева графа, з якого виходить хорда за номером *n*;

к – вузол дерева графа, де закінчується хорда за номером *n*;

n – номер гілки електричного кола, де знаходимо струм;

E_n , R_n – ЕРС та опір гілки за номером *n*.

1.4.2.6 Наприклад, для кола, що зображене на рис. 1.1 система вузлових рівнянь буде такою:

$$\begin{cases} G_{11}\varphi_a - G_{12}\varphi_b - G_{13}\varphi_c - G_{14}\varphi_f = \dfrac{E_1}{R_1} \\ -G_{21}\varphi_a + G_{22}\varphi_b - G_{23}\varphi_c - G_{24}\varphi_f = \dfrac{E_4}{R_4} - \dfrac{E_1}{R_1} + J_8 \\ -G_{31}\varphi_a - G_{32}\varphi_b + G_{33}\varphi_c - G_{34}\varphi_f = -\dfrac{E_5}{R_5} - J_8 \\ -G_{41}\varphi_a - G_{42}\varphi_b - G_{43}\varphi_c + G_{44}\varphi_f = 0 \end{cases} \quad (1.2)$$

1.4.2.7 Розв'яжемо цю систему засобами *MathCAD*

Збудуємо вузлову матрицю (Y:= *Ctrl+M* Rows:=4 Columns:=4 *OK*) та заповнюємо її відповідно до системи (1.2):

Сформуємо з них у *MathCAD* вектор стовпець правих частин (BY:= Ctrl+M Columns=1 OK). Знайдемо потенціали вузлів кола:

$$BY := \begin{bmatrix} I11 \\ I22 \\ I33 \\ I44 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} \frac{12}{5} \\ -11.1 \\ -1.5 \\ 0 \end{bmatrix} \qquad \phi := Y^{-1} \cdot BY \qquad \phi = \begin{bmatrix} -7.125 \\ -33.75 \\ -6 \\ -3.375 \end{bmatrix}$$

$$Y := \begin{bmatrix} G11 & -g12 & -g13 & -g14 \\ -g21 & G22 & -g23 & -g24 \\ -g31 & -g32 & G33 & -g34 \\ -g41 & -g42 & -g43 & G44 \end{bmatrix} \qquad Y = \begin{bmatrix} 0.217 & -0.1 & -0.067 & -0.05 \\ -0.1 & 0.35 & 0 & 0 \\ -0.067 & 0 & 0.41 & -0.143 \\ -0.05 & 0 & -0.143 & 0.36 \end{bmatrix}$$

- Праві частини системи вузлових рівнянь:

$$I11 := \frac{E1}{R1} \qquad I22 := \frac{-E1}{R1} - \frac{E4}{R4} + J8 \qquad I33 := \frac{-E5}{R5} - J8 \qquad I44 := 0$$

a := 1 b := 2 c := 3 f := 4 - інтерпретація індексів.

- Струми віток знайдемо за законом Ома:

$$I1 := \frac{\left(\phi_a - \phi_b\right) - E1}{R1} \qquad I2 := \frac{\phi_a - \phi_c}{R2}$$

$$I3 := \frac{\left(\phi_a - \phi_f\right)}{R3} \qquad I4 := \frac{\phi_b - 0 + E4}{R4}$$

$$I5 := \frac{\phi_c - 0 + E5}{R5} \qquad I6 := \frac{\phi_f - 0}{R6}$$

$$I7 := \frac{\left(\phi_f - \phi_c\right)}{R7}$$

Відповіді:

I1 = 0.262

I2 = −0.075

I3 = −0.188

I4 = 0.563

I5 = 0

I6 = −0.563

I7 = 0.375

Знайдена таким чином величина φ_1 відповідає потенціалу вузла *a* (φ_a = –7,125 В), φ_2 – потенціалу вузла *b* (φ_b = –33,75 В),, і так далі.

1.4.3 Метод контурних струмів.

1.4.3.1 Метод контурних струмів полягає в тому, що із рівнянь, складених за другим законом Кірхгофа, спочатку визначають допоміжні величини (так звані *контурні струми*). *Власні струми* кожної гілки кола знаходимо за принципом *суперпозицій*: як алгебраїчну суму контурних струмів, що проходять через вітку кола.

При розрахунку цим методом будемо вважати, що у кожному незалежному контурі тече свій контурний струм. Тому кількість незалежних рівнянь за методом контурних струмів дорівнює кількості незалежних контурів (гілок зв'язку спрямованого графа).

1.4.3.2 Для зручності запису системи рівнянь рекомендуємо усі контурні струми та струм від джерел струму спрямувати у одному напрямку, наприклад за обігом годинникової стрілки.

У загальному випадку система контурних рівнянь має вигляд:

$$\begin{cases} R_{11}I_{K1} - R_{12}I_{K2} - \ldots - R_{1\ell}I_{K\ell} = E_{11} \\ -R_{21}I_{K1} + R_{22}I_{K2} - \ldots - R_{2\ell}I_{K\ell} = E_{22} \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ -R_{\ell 1}I_{K1} - R_{\ell 2}I_{K2} - \ldots + R_{\ell\ell}I_{K\ell} = E_{\ell\ell} \end{cases} \qquad (1.3)$$

де I_{Kn} - контурні струми;

R_{nn} - власний опір контуру (сума опорів усіх гілок, що входять у даний контур);

R_{nk} - суміжні опори контурів *n* і *k*; причому $R_{nk} = R_{kn}$;

$E_{nn} = E_k \pm R_{kJ} \cdot J_k$ – алгебраїчна сума ЕРС, що входять до складу контуру, та падінь напруги від джерела струму J_k . Знак «+» застосовуємо, коли обхід контуру *не співпадає* із обходом джерела струму J_k . Якщо обхід контуру *співпадає* із обходом J_k – ставимо знак «–».

R_{kJ} - суміжний опір гілки контуру *k*, з контуром, що містить джерело струму J_k.

1.4.3.3 Приклад програми у середовищі MathCAD за методом контурних струмів для розрахунку струмів у колі (рис.1.1 а).

Обираємо обіг контурів *К*1 , *К*2 , *К*3 (рис.1.1 б) та контурних струмів у цих контурах (Ik_1 ; Ik_2 ; Ik_3) за обігом годинникової стрілки.

Струм джерела J_8 замикаємо через опори $R_4 - R_5$ теж за обігом годинникової стрілки.

- Власні опори у контурах: K1; K2; K3.

K1: R11 := R1+R2+R4+R5

K2: R22 :=R2+R3+R7

K3: R33 := R5+R6+R7

- Суміжні опори між контурами: R2; R5; R7.

- складаємо матрицю коефіцієнтів при контурних струмах:

$$a := \begin{bmatrix} R11 & -R2 & -R5 \\ -R2 & R22 & -R7 \\ -R5 & -R7 & R33 \end{bmatrix} \qquad a = \begin{bmatrix} 34 & -15 & -5 \\ -15 & 42 & -7 \\ -5 & -7 & 18 \end{bmatrix}$$

- Складаємо вектор-стовпець правих частин (вектор впливу):

$$b := \begin{bmatrix} (E4 - E5 - E1) - J8 \cdot (R4 + R5) \\ 0 \\ E5 + J8 \cdot R5 \end{bmatrix} \qquad b = \begin{bmatrix} 3.3 \\ 0 \\ 7.5 \end{bmatrix}$$

- Контурні струми: Ik := Isolve (a,b)

$$Ik = \begin{bmatrix} 0.262 \\ 0.187 \\ 0.562 \end{bmatrix}$$

- Власні струми гілок за принципом суперпозицій:

$i1 := Ik_1 \qquad i2 := Ik_2 - Ik_1 \qquad i1 = 0.262 \qquad i2 = -0.075$

$i3 := -Ik_2 \qquad i4 := Ik_1 + J8 \qquad i3 = -0.187 \qquad i4 = 0.562$

$i5 := Ik_3 - Ik_1 - J8 \qquad i6 := -Ik_3 \qquad i5 = 0 \qquad i6 = -0.562$

$i7 := Ik_3 - Ik_2 \qquad i7 = 0.375$

Тут результат i1 відповідає струму першої гілки на рис.1.1;

i2 – струму другої гілки на рис.1.1; і так далі.

- Напруга джерела струму:

$$\left(\phi_b - \phi_c\right) = -27.75 \quad \text{В}.$$

- Потужність джерел ЕРС:

$$E1 \cdot (-I1) = -6.3 \qquad E4 \cdot I4 = 20.25 \qquad E5 \cdot I5 = 0 \qquad \text{ВА}.$$

- Потужність джерела струму:

$$\left(\phi_b - \phi_c\right) \cdot J8 = -8.325 \quad \text{ВА}.$$

- Потужність джерел енергії усього кола:

$$S := E1 \cdot (-I1) + E4 \cdot I4 + E5 \cdot I5 + \left(\phi_b - \phi_c\right) \cdot J8 \qquad S = 5.625 \quad \text{ВА}.$$

- Потужність споживачів:

$$P := R1 \cdot I1^2 + R2 \cdot I2^2 + R3 \cdot I3^2 + R4 \cdot I4^2 + R5 \cdot I5^2 + R6 \cdot I6^2 + R7 \cdot I7^2$$

$$P = 5.625 \quad \text{Вт}.$$

1.5 Способи перевірки правильності розв'язку рівнянь

1.5.1 Баланс потужностей.

Оскільки P=S , баланс дотримано. Це означає, що розрахунки різними методами виконані правильно.

1.5.2 Потенціальна діаграма.

1.5.2.1 *Потенціальна діаграма* – це графічне зображення розподілу потенціалів уздовж замкнутого контуру електричного кола.

1.5.2.2 Приклад розрахунку і побудови діаграми засобами *MathCAD* наведено на наступній сторінці.

Рекомендований порядок розрахунку:

– обираємо замкнутий контур із якомога більшою кількістю ЕРС;

– потенціал однієї точки контуру обираємо за нуль;

– знаходимо потенціали усіх точок контуру за законом Ома;

– обираємо напрямок (порядок) обходу контуру. Сформуємо вектор–стовпець потенціалів у контурі (ψ:= *Ctrl+M* Rows:=7 Columns:=1 *OK*), обов'язково дотримуючись порядку його обходу;

– сформуємо вектор із опорів контуру (Rk:= *Ctrl+M* Rows=7 Columns=1 *OK*), обов'язково дотримуючись порядку його обходу і додаючи один до одного опори ділянок контуру;

– відкриємо шаблон графіків, натиснувши на піктограму *Graph Palette* , *X–Y* Plot (або *Shift*+2) ;

– на осі абсцис клавіатурою наберемо: Rk , на осі ординат – ψ ;
– вийдемо із графічного поля – отримаємо бажану діаграму;
– зайдемо у графічне поле; подвійний «клік» лівою кнопкою, миша відкриє меню формату (Formatting Currently Selected X–Y Plot). Зміною формату можна отримати бажану форму графіка (рис. 1.2).

Потенційна діаграма вздовж контура *d-h-c-f-a-l-b-m-d*

$$\phi_d := 0 \qquad \phi_h := \phi_d + I5 \cdot R5 \qquad \phi_l := \phi_a - I1 \cdot R1 \qquad \phi_m := \phi_b - I4 \cdot R4$$

Потенціали:

$$\psi := \left(\phi_d \;\; \phi_h \;\; \phi_c \;\; \phi_f \;\; \phi_a \;\; \phi_l \;\; \phi_b \;\; \phi_m \;\; \phi_d \right)^T$$

Рідрахунок опорів у контурі:

$$Rk := \begin{bmatrix} 0 \\ R5 \\ R5 \\ R5 + R7 \\ (R5 + R7) + R3 \\ (R5 + R7 + R3) + R1 \\ (R5 + R7 + R3) + R1 \\ (R5 + R7 + R3 + R1) + R4 \\ R5 + R7 + R3 + R1 + R4 \end{bmatrix} \qquad Rk = \begin{pmatrix} 0 \\ 5 \\ 5 \\ 12 \\ 32 \\ 42 \\ 42 \\ 46 \\ 46 \end{pmatrix}$$

Потенціали:

$$\psi = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -6 \\ -3.375 \\ -7.125 \\ -9.75 \\ -33.75 \\ -36 \\ 0 \end{pmatrix}$$

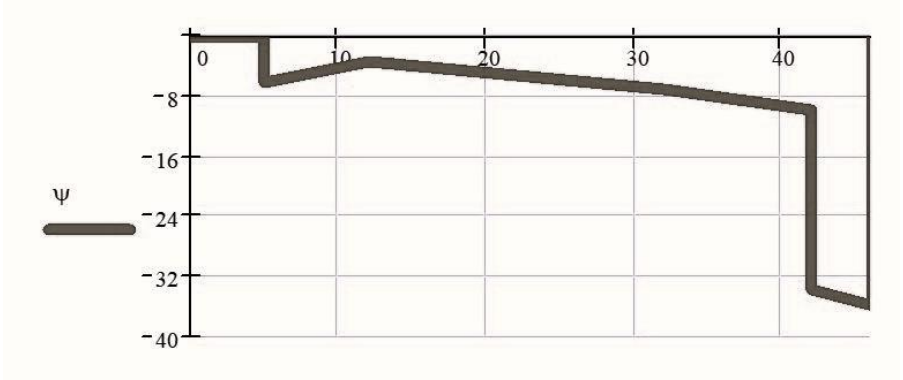

Рисунок 1.2 – Потенційна діаграма

2 АНАЛІЗ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОННИХ СХЕМ ЗА ДОПОМОГОЮ ELECTRONICS WORKBENCH

Для моделювання роботи електричного кола (рис. 2.1) у середовищі *Electronics Workbench* запустимо її звичайним шляхом (**Пуск – Програми - Electronics Workbench**). Коли на екрані монітора з'явиться оболонка інтерфейсу *EWB* – можна почати роботу.

Стрілкою маніпулятора «миша» на панелі компонентів обираємо необхідне поле, натискаємо ліву кнопку - входимо у відповідне поле компонентів. Обираємо необхідний елемент (прилад), утримуючи ліву кнопку маніпулятора, перемістимо цей елемент на робоче поле.

Натиснувши праву кнопку маніпулятора, відкриємо додаткове вікно із властивостями елементу (Label, Value,Fault, Display, Analysis Setup), які можна заповнити у разі потреби (не обов'язково).

З'єднаємо всі елементи та вимірювальні прилади у робочу схему.

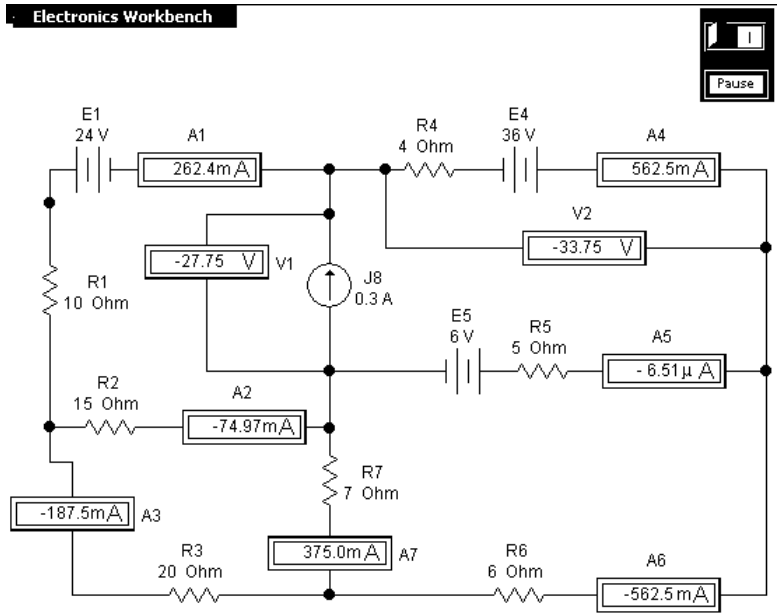

Рисунок 2.1 – Схема електричного кола у середовищі EWB

Аналіз роботи наданої схеми дає такі результати:

– струм першої гілки дорівнює 262.4 mA, або 0.2624 *A*;
– струм другої гілки дорівнює -74.97 mA, або -0.075 *A*;
– струм третьої гілки дорівнює -187.5 mA, або -0.188 *A*;
– струм четвертої гілки дорівнює 562.5 mA, або 0.563 *A*;
– струм п’ятої гілки дорівнює -6.51 μA, або -6.5 мкА. Отже його можна вважати таким, що дорівнює нулеві;
– струм шостої гілки дорівнює -562.5 mA, або -0.563 *A*;
– струм сьомої гілки дорівнює 375.0 mA , або 0.375 *A*;
– напруга на джерелі струму дорівнює -27.75 V;
– напруга між базовим вузлом (вузол *d*) та вузлом *b* електричного кола (рис. 2.1) дорівнює -33.75 V.

За результатами моделювання роботи електричного кола (рис. 2.1) можна зробити висновки, що результати розрахунку струмів та напруг, знайдені у за допомогою математичного пакету *MathCAD* відповідні до результатів аналізу у середовищі *Electronics Workbench.*

3 ЛАБОРАТОРНЕ ЗАВДАННЯ

Згідно із номером варіанту обрати схему для електричного кола, зображеного у Додатку Б. Далі треба виконати наступне.

3.1 Розрахунок вхідних параметрів схеми, наведеної в Додатку Б.

В схемі n – номер варіанту; d та h – додаткові коефіцієнти у вхідних даних (від 0 до 99). Для кожної академічної групи їх задає викладач, що веде практичні заняття з ТЕКС;

– опір надано у кілоомах, а ЕРС – у В:

$$R_1 = (5 \cdot h + d);\ R_2 = (2 \cdot d + h);\ R_3 = (8 \cdot h + 2 \cdot n);\ R_4 = (10 \cdot h + 2 \cdot n);$$

$$R_5 = 10 \cdot (2 \cdot n + d);\ R_6 = (10 \cdot h + d);\ R_7 = R_8 = (10 \cdot h + 5 \cdot d + 2 \cdot n);$$

$$E_1 = (10 - 2 \cdot n).$$

3.2 Складання спрямованого графу цього кола, обрати дерево графа (зобразити жирними лініями), гілки зв'язку.

3.3 Складання систем рівнянь за законами Кірхгофа та розрахунок струмів кожної гілки для обраної схеми електричного кола за допомогою математичного пакета *MathCAD*.

3.4 Складання системи рівнянь за методом вузлових потенціалів та розрахунок струмів кожної гілки електричного кола.

3.5 Складання системи рівнянь за методом контурних струмів та розрахунок власних струмів кожної гілки;

3.6 Перевірка балансу потужностей електричного кола, побудова потенціальної діаграми уздовж контуру із двома джерелами ЕРС.

3.7 Моделювання роботи кола у середовищі *Electronics Workbench*. Перевірка струмів кожної гілки та напруги між базовим вузлом та усіма іншими. Для цього під'єднати до схеми відповідні прилади із бібліотеки індикаторів середовища *EWB*.

3.8 Висновки про вплив вимірювальних приладів на розподіл струмів у електричному колі.

3.9 Порівняння результатів розрахунків кола у пакеті *MathCAD* із результатами моделювання в середовищі *Electronics Workbench*.

4 ЗМІСТ ЗВІТУ

Звіт необхідно оформити на білих аркушах стандарту А4 згідно вимогам ДСТУ 3008:2015. На титульному аркуші обов'язково повинні бути назва роботи, прізвище виконавця, номер академічної групи, номер варіанту.

Звіт повинен вміщувати в собі:

4.1 Титульний аркуш.

4.2 Мету роботи.

4.3 Схему електричну принципову.

4.4 Рівняння стану.

4.5 Програму розрахунку та результати розв'язку системи рівнянь в програмному середовищі *MathCAD.*

4.6 Схему вимірів та результати моделювання в середовищі *Electronics Workbench.*

5 КОНТОРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

5.1 Поняття рівняння енергетичного стану кола.

5.2 Топологічні методи аналізу складних кіл.

5.3 Суть методу рівнянь Кірхгофа.

5.4 Алгоритм аналізу кіл методом контурних струмів.

5.5 В чому полягає метод вузлових потенціалів?

5.6 Способи перевірки вірності розв'язку рівнянь енергетичного стану.

5.7 Порядок побудови потенціальної діаграми засобами *MathCAD.*

5.8 Основи роботи з інтерфейсом *MathCAD.*

5.9 Основи роботи з інтерфейсом *Electronics Workbench.*

5.10 Основні понятті теорії графів.

5.11 Що таке незалежні контури і незалежні вузли?

5.12 Від чого залежить кількість можливих незалежних рівнянь енергетичного стану кола?

5.13 Переваги і недоліки метода рівнянь Кірхгофа.

5.14 Переваги і недоліки метода контурних струмів.

5.15 Переваги і недоліки метода вузлових потенціалів

5.16 Властивості ідеальних джерел струму та напруги.

5.17 В чому полягають еквівалентні перетворення складних схем з метою їх спрощення?

5.18 Сформулюйте закони Ома та Кірхгофа.

5.19 Порівняльний аналіз методів аналізу складних кіл постійного струму.

5.20 Недоліки моделювання складних схем постійного струму в програмному середовищі *Electronics Workbench.*

5.21 Недоліки моделювання складних схем постійного струму в програмному середовищі *MathCAD.*

5.22 Засоби вимірювання струму, напруги та потужності в *Electronics Workbench.*

5.23 Що означають від'ємні значення струмів та напруг, що виміряні в *Electronics Workbench*?

5.24 Що означають від'ємні значення струмів, які отримані в результаті розв'язку системи рівнянь енергетичного стану кола?

5.25 Що може означати невиконання умов балансу потужностей кола?

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Конспект лекцій з дисципліни «Теорія електричних кіл та сигналів» для студентів спеціальності 172 «Електронні комунікації та радіотехніка» всіх форм навчання. Частина І. / Укл.: В.О. Костенко – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2024. – 108 с

2. Методичні вказівки «Моделювання резистивних схем в пакетах EWB, «Micro-Cap» призначені для студентів спеціальності G5 «Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка» всіх форм навчання / Укладачі: В.О. Костенко, С.С. Самойлик – Запоріжжя: НУЗП, 2026 – 44 с.

3. Основи теорії кіл, сигналів та процесів в системах технічного захисту інформації / Ю.О. Коваль, О. Милютченко, А.М. Олейніков, В.М. Шоколо / Заг. ред. В.М. Шокола – Харків.: НТМТ, 2011. – 544 с.

4. Маляр В.С. Теоретичні основи електротехніки / Маляр В.С. – Л. Profbook - Львівська політехніка. - 2018. – 416 с.

Додаток А
Правила виконання лабораторної роботи

Вся робота у математичному пакеті *MathCAD* та прикладному пакеті *EWB* виконується у комп'ютерному класі кафедри радіотехніки ЗНТУ згідно із розкладом занять академічної групи та учбовим планом кафедри. Результати розрахунків студенти зберігають у пам'яті комп'ютера у «папках», що будуть відведені для кожного студента системним адміністратором комп'ютерного класу.

Працювати у комп'ютерному класі треба із дотриманням правил техніки безпеки:

– до початку роботи на комп'ютері студент зобов'язаний засвоїти правила безпечної роботи. Комп'ютер необхідно використовувати тільки для виконання своєї розрахункової роботи у своєму «робочому просторі». Ні в якому разі не відкривати інші папки, системи, програми, тим більше вносити туди зміни або видаляти їх;

– переконатися у наявності Вашої «Папки» на «Робочому столі» комп'ютера, відкрити «*MathCAD*» («Пуск – Програми – MathSoft Apps – MathCad 2000 Professional») або «*Electronics Workbench*» («Пуск – Програми – Electronics Workbench»);

– увійти до свого робочого файлу (головне меню File – пункт Open…, або *Ctrl+O*), працювати тільки із ним;

– результати роботи показати викладачу, що проводить заняття у комп'ютерному класі;

– періодично через 15-20 хв. зберігати результати роботи (головне меню File – пункт Save As…, або Save , або *Ctrl+S*) у файл із оригінальним ім'ям, який розташувати у свою «Папку». По закінченні занять обов'язково зберегти результати своєї роботи, завершити всі програми і сеанс.

Додаток Б
Схеми

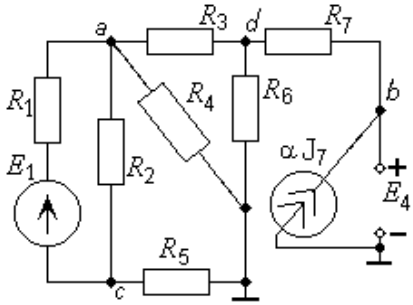

Рисунок Б.1 – Схема

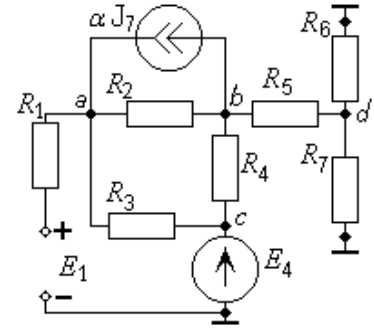

Рисунок Б.2 – Схема

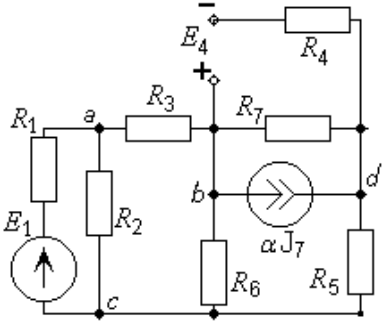

Рисунок Б.3 – Схема

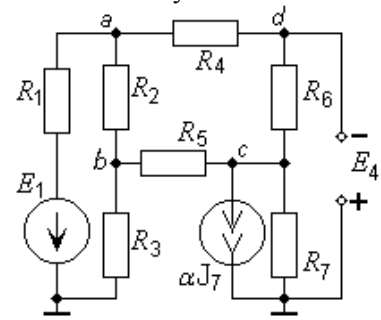

Рисунок Б.4 – Схема

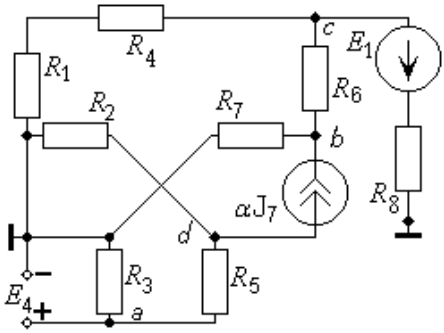

Рисунок Б.5 – Схема

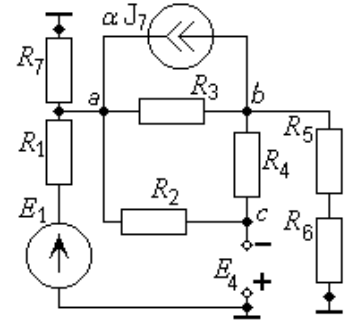

Рисунок Б.6 – Схема

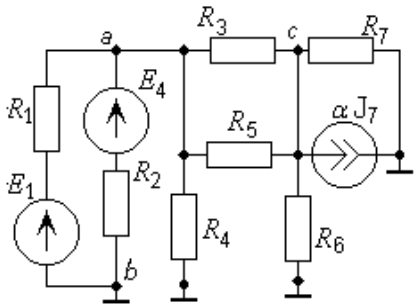

Рисунок Б.7 – Схема

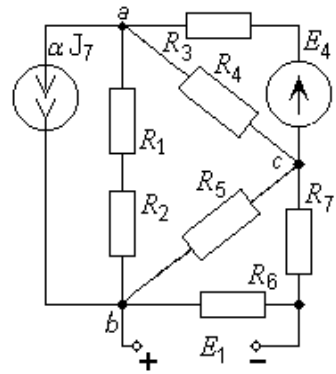

Рисунок Б.8 – Схема

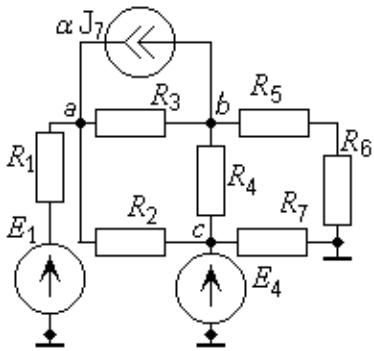

Рисунок Б.9 – Схема

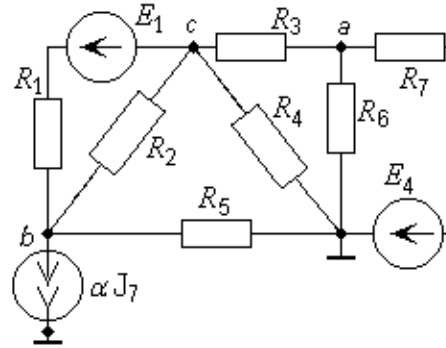

Рисунок Б.10 – Схема

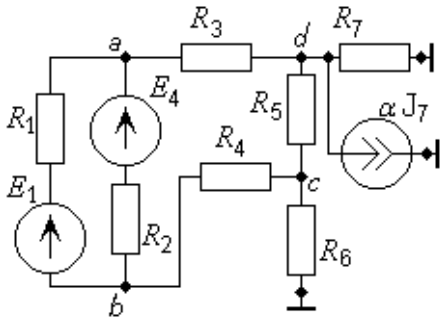

Рисунок Б.11 – Схема

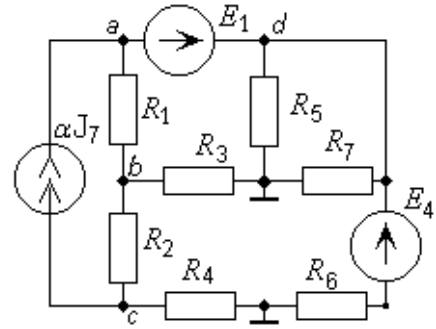

Рисунок Б.12 – Схема

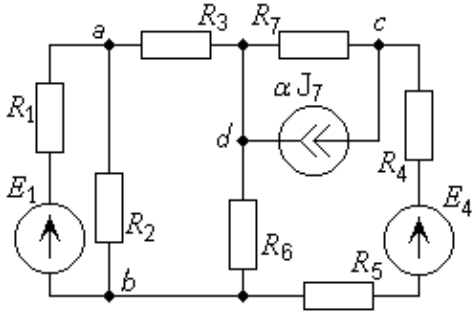

Рисунок Б.13 – Схема

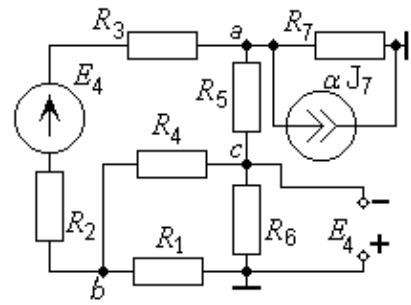

Рисунок Б.14 – Схема

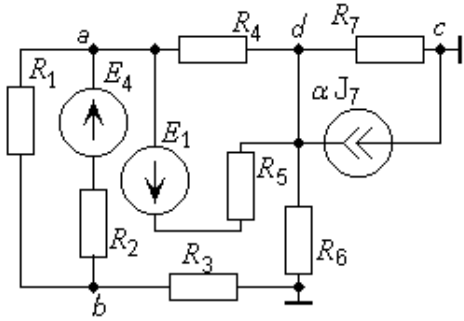

Рисунок Б.15 – Схема

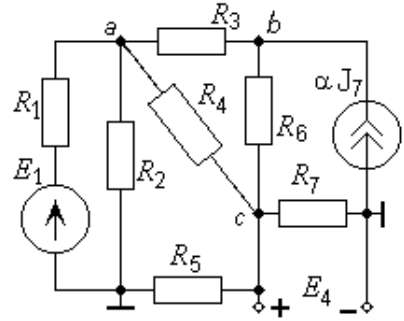

Рисунок Б.16 – Схема

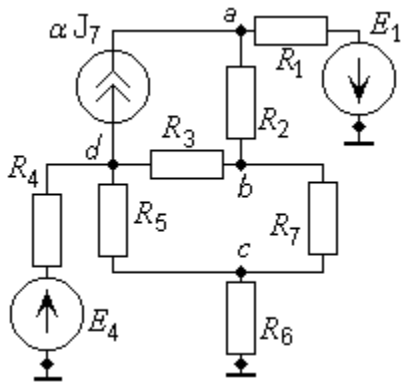

Рисунок Б.17 – Схема

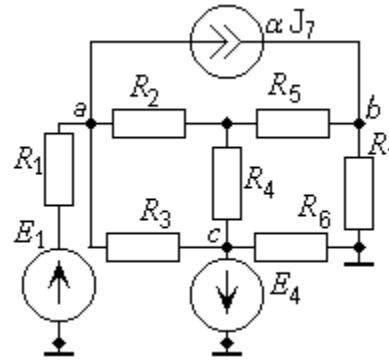

Рисунок Б.18 – Схема

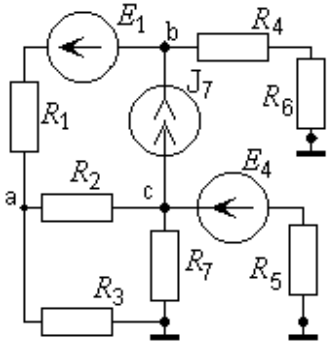

Рисунок Б.19 – Схема

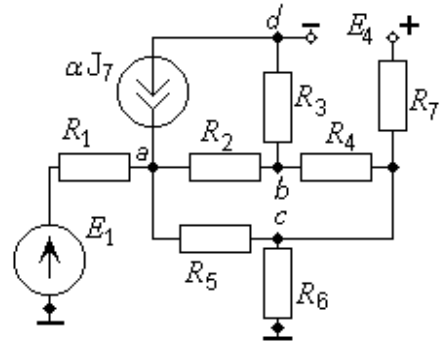

Рисунок Б.20 – Схема

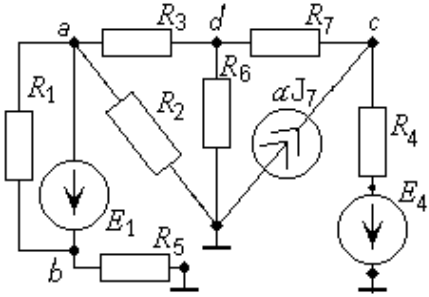

Рисунок Б.21 – Схема

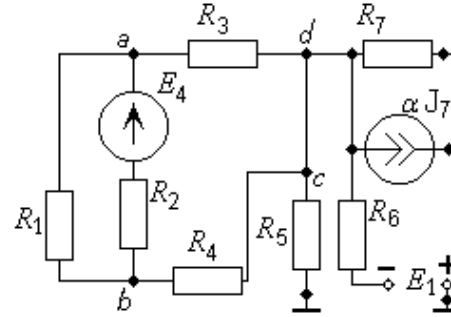

Рисунок Б.22 – Схема

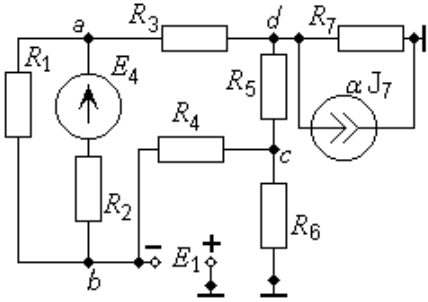

Рисунок Б.23 – Схема

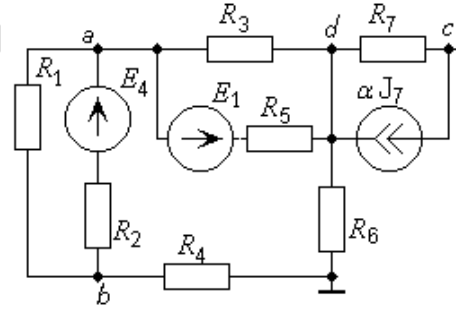

Рисунок Б.24 – Схема

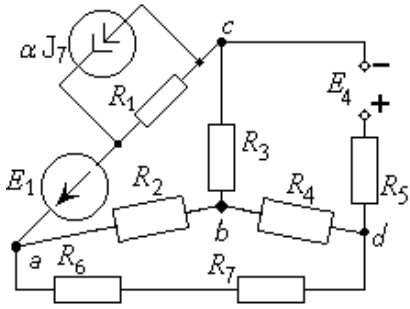

Рисунок Б.25 – Схема

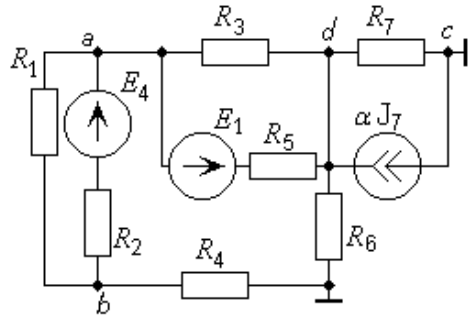

Рисунок Б.26 – Схема

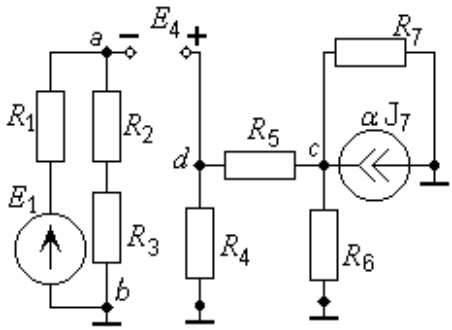

Рисунок Б.27 – Схема

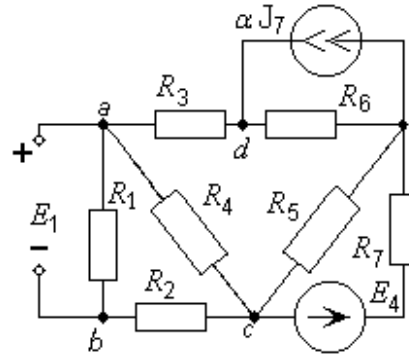

Рисунок Б.28 – Схема

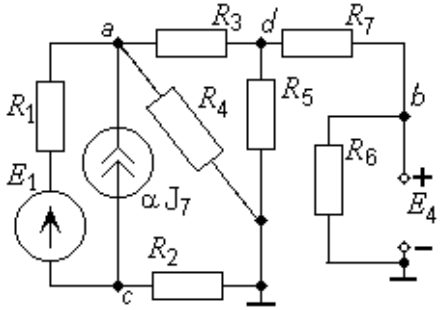

Рисунок Б.29 – Схема

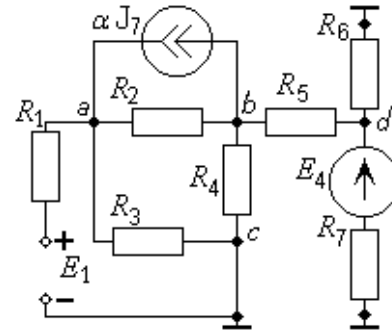

Рисунок Б.30 – Схема

Додаток В
Додаткові вхідні параметри

№ варіанту	Додаткові вхідні параметри		
	E_4 , *В*	J_7 , *мА*	Коефіцієнт підсилення α
1	10+*d*	1,0+*h*	0.91
2	8+*h*	2,0+*d*	0.92
3	6+*d*	3,0+*h*	0.93
4	4+*h*	4,0+*d*	0.94
5	2+*d*	5,0+*h*	0.95
6	10+*h*	0,6+*d*	0.96
7	8+*d*	0,7+*h*	0.97
8	6+*h*	0,8+*d*	0.98
9	4+*d*	0,9+*h*	0.99
10	2+*h*	1,0+*d*	0.91
11	10+*d*–*n*	1,1+*h*	0.92
12	8+*h*–*n*	1,2+*d*	0.93
13	6+*d*–*n*	1,3+*h*	0.94
14	4+*h*–*n*	1,4+*d*	0.95
15	2+*d*–*n*	1,5+*h*	0.96
16	10+*h*–*n*	1,6+*d*	0.97
17	8+*d*–*n*	1,7+*h*	0.98
18	5+*h*	1,8+*d*	0.99
19	4+*d*	1,9+*h*	0.9
20	6+*h*	2,0+*d*	0.91
21	7+*d*	2,1+*h*	0.92
22	5+*h*	2,2+*d*	0.93
23	12+*h*+*d*	2,3+*h*	0.94
24	24+*h*+*d*	2,4+*d*	0.95
25	36+*h*+*d*	2,5+*h*	0.96
26	42+*h*	2,6+*h*	0.97
27	24+*d*	2,7+*d*	0.98
28	12+*h*	2,8+*h*	0.99
29	6+*d*	2,9+*d*	0.9