

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**Запорізький національний технічний університет**

## **МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

до виконання лабораторної роботи  
“Вивчення лінійних кіл постійного струму”  
із застосуванням прикладних пакетів  
*MathCAD* та *Electronics Workbench*

для студентів спеціальностей:

8.090.701 радіотехніка,  
7.160103 системи захисту від несанкціонованого доступу,  
7.160105 захист інформації в комп’ютерних мережах,  
7.093402 телекомунікації

всіх форм навчання

**2004**

Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи “Вивчення лінійних кіл постійного струму” із застосуванням прикладних пакетів *MathCAD* та *Electronics Workbench* для студентів спеціальностей: 8.090.701 радіотехніка, 7.160103 системи захисту від несанкціонованого доступу, 7.160105 захист інформації в комп’ютерних мережах, 7.093402 телекомунікації всієї форм навчання/ Укладачі: В.О.Костенко, Г.М.Романіченко, Т.І.Бугрова — Запоріжжя: ЗНТУ, 2004 – 31 с.

Укладачі: В.О.Костенко, доцент, канд. техн. наук,  
Г.М.Романіченко, асистент,  
Т.І.Бугрова, ст. викладач.

Рецензент: Б.М.Бондарєв, доцент, канд. техн. наук.

Відповідальний  
за випуск Б.М.Бондарєв, доцент, канд. техн. наук.

Експерт: М.М.Касьян, доцент, канд. техн. наук.

ЗАТВЕРДЖЕНО  
на засіданні кафедри  
Радіотехніки  
Протокол №10 від 2004.06.15

## ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА.....	4
1 ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ.....	5
1.1 Теорія графів .....	5
1.2.Математичний пакет <i>MathCAD</i> .....	6
1.3 Прикладний пакет <i>Electronics Workbench</i> .....	7
1.4 Методи розрахунку електричних кіл постійного струму.....	9
1.5 Способи перевірки вірності розв’язку рівнянь.....	18
2 АНАЛІЗ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОННИХ СХЕМ ЗА ДОПОМОГОЮ <i>ELECTRONICS WORKBENCH</i> ...	20
4 ЛАБОРАТОРНЕ ЗАВДАННЯ.....	21
5 ЗМІСТ ЗВІТУ.....	22
6 КОНТОРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ.....	23
7 РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА.....	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. Вони призначені для кращої підготовки студентів з ТЕК та ОТК, раціонального використання 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*).

Поширене практичне застосування цих двох пакетів комп'ютерних програм пов'язано з тим, що мова *MathCAD* дуже нагадує загальноприйнятую 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 СТП 15-96. 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.

**Мета роботи:** вивчення методів розрахунку складних електричних кіл постійного струму, набуття навичок практичного розрахунку за допомогою програмного середовища MathCad та моделювання у пакеті *Electronics Work Bench*.

## 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 2.1.а представлена електрична схема, а на рисунку 2.1.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 символний 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  $\pi$  [Ctrl-P];

$e = 2.71828182$  - основа натурального логарифму;

$\infty$  - нескінченність [Ctrl-Z];

% - відсотки;

$i$ ;  $j$  - уявна одиниця;

$TOL = 10^{-3}$  - припустима похибка;

$STOL = 10^{-3}$  – 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, мультиметр, 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  $90^\circ$  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, мультиметром, 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 рисою 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 Мультиметр – 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.

Закон балансу струмів у вузлах кола (перший закон Кірхгофа):

алгебраїчна сума струмів у вузлі дорівнює нулеві, або 
$$\sum_{K=3}^n I_K = 0 \quad .$$

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

контурі, або 
$$\sum_{K=1}^n E_K = \sum_{K=1}^n R_K I_K \quad .$$

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.  $E_1=24\text{ В}$ ,  $E_4=36\text{ В}$ ,  $E_5=6\text{ В}$ ;  
 величина джерела струму  $J_8=0,3\text{ А}$ ; опір резисторів (в  $\text{Омах}$ ):

$$R_1=10, \quad R_2=15, \quad R_3=20, \quad R_4=4, \quad R_5=5, \quad R_6=6, \quad R_7=7.$$

Потрібно: визначити струми у вітках за допомогою законів Кірхгофа.

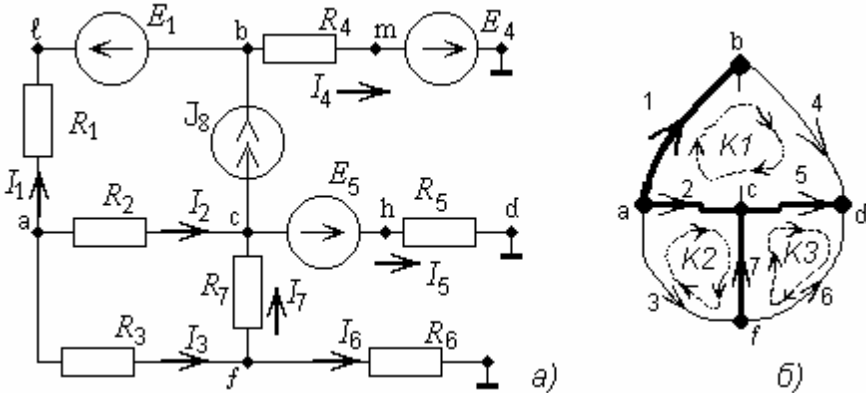


Рисунок 1.1 – Схема електричного кола (а) та його граф (б)

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:

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

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

Для цього можна застосувати матричну формулу, можливість вбудованої матричної алгебри, або оператори-функції *Given – Find*( $x_1, x_2, \dots$ ), *Given – Minerr*( $x_1, x_2, \dots$ ), та інші.

Наприклад, для розв'язку системи (3.1) матричними засобами спочатку побудуємо матрицю коефіцієнтів ( $\Delta$ ) 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 шаблону 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 ( $\Delta$ ) та вектор ( $B$ ) згідно із системою (3.1):

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

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

Розв'язок отримаємо за матричною формулою:  $I := \Delta^{-1} \cdot B$ ,

або застосуємо вбудовану функцію

$$I := \text{Isolve}(\Delta, B).$$

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-функції *Given - Find* або *Given - minerr* треба спочатку задати початкові значення для розрахунку, наприклад:  $I_1:=1, I_2:=1, I_3:=1, I_4:=1, I_5:=1, I_6:=1, I_7:=1$ .

Далі у робочому полі наберемо систему рівнянь:

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

Given

$$\begin{aligned} I_1 + I_2 + I_3 &= 0 \\ I_4 - I_1 &= J_8 \\ I_5 - I_2 - I_7 &= J_8 \\ I_7 + I_6 - I_3 &= 0 \\ I_1 \cdot R_1 + I_4 \cdot R_4 - I_2 \cdot R_2 - I_5 \cdot R_5 &= E_4 - E_5 - E_1 \\ I_2 \cdot R_2 - I_3 \cdot R_3 - I_7 \cdot R_7 &= 0 \\ I_5 \cdot R_5 + I_7 \cdot R_7 - I_6 \cdot R_6 &= E_5 \\ \text{Струм} &:= \text{find}(I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6, I_7) \end{aligned}$$

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



1.4.2.5 Струми гілок за законом Ома: 
$$I_n = \frac{\varphi_n - \varphi_\kappa \pm E_n}{R_n},$$

де  $n$  – вузол дерева графа, з якого виходить хорда за номером  $n$ ;  
 $\kappa$  – 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:

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

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:

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

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

- Праві частини системи вузлових рівнянь :

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

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

- Струми віток знайдемо за законом Ома :

$$\begin{aligned} I11 &:= \frac{(\phi_a - \phi_b) - E1}{R1} & I22 &:= \frac{\phi_a - \phi_c}{R2} & \text{Відповіді :} \\ I11 &= 0.262 \\ I33 &:= \frac{(\phi_a - \phi_f)}{R3} & I44 &:= \frac{\phi_b - 0 + E4}{R4} & I2 = -0.075 \\ I33 &= -0.188 \\ I55 &:= \frac{\phi_c - 0 + E5}{R5} & I66 &:= \frac{\phi_f - 0}{R6} & I4 = 0.563 \\ I55 &= 0 \\ I77 &:= \frac{(\phi_f - \phi_c)}{R7} & & & I6 = -0.563 \\ I77 &= 0.375 \end{aligned}$$



Обираємо обіг контурів  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  (Рис.3.1.б) та контурних струмів у цих контурах ( $I_{k_1}$ ;  $I_{k_2}$ ;  $I_{k_3}$ ) за обігом годинникової стрілки.

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

Тут результат  $i_1$  відповідає струму першої гілки на Рис.1.1;  $i_2$  – струму другої гілки на Рис.1.1;  $i$  так далі.

- Власні опори у контурах :  $K_1$  ;  $K_2$  ;  $K_3$  .

$$K_1 : R_{11} := R_1 + R_2 + R_4 + R_5$$

$$K_2 : R_{22} := R_2 + R_3 + R_7 \quad K_3 : R_{33} := R_5 + R_6 + R_7$$

- Суміжні опори між контурами:  $R_2$  ;  $R_5$  ;  $R_7$  .

- складаємо матрицю коефіцієнтів при контурних струмах:

$$a := \begin{bmatrix} R_{11} & -R_2 & -R_5 \\ -R_2 & R_{22} & -R_7 \\ -R_5 & -R_7 & R_{33} \end{bmatrix} \quad a = \begin{bmatrix} 34 & -15 & -5 \\ -15 & 42 & -7 \\ -5 & -7 & 18 \end{bmatrix}$$

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

$$b := \begin{bmatrix} (E_4 - E_5 - E_1) - J_8 \cdot (R_4 + R_5) \\ 0 \\ E_5 + J_8 \cdot R_5 \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} 3.3 \\ 0 \\ 7.5 \end{bmatrix}$$

- Контурні струми :  $I_k := \text{lsolve}(a, b)$

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

- Власні струми гілок за принципом суперпозицій :

$$i_1 := I_{k_1} \quad i_2 := I_{k_2} - I_{k_1} \quad i_1 = 0.262 \quad i_2 = -0.075$$

$$i_3 := -I_{k_2} \quad i_4 := I_{k_1} + J_8 \quad i_3 = -0.187 \quad i_4 = 0.562$$

$$i_5 := I_{k_3} - I_{k_1} - J_8 \quad i_6 := -I_{k_3} \quad i_5 = 0 \quad i_6 = -0.562$$

$$i_7 := I_{k_3} - I_{k_2} \quad i_7 = 0.375$$

## 1.5 Способи перевірки правильності розв'язку рівнянь

- Напруга на джерелі струму :  $(\phi_b - \phi_c) = -27.75 \text{ В} .$

- Потужність джерел ЕРС :

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

- Потужність джерела струму :  $(\phi_b - \phi_c) \cdot J8 = -8.325 \text{ ВА} .$

- Потужність джерел енергії усього кола:

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

- Потужність споживачів :

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

$$P = 5.625 \text{ Вт} .$$

### 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 ( $\psi := \text{Ctrl}+M$  Rows:=7 Columns:=1 ОК), обов'язково дотримуючись порядку його обходу;
- сформуємо вектор із опорів контуру ( $Rk := \text{Ctrl}+M$  Rows=7 Columns=1 ОК), 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:  $R_k$ , на осі ординат –  $\psi$ ;
- 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.

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

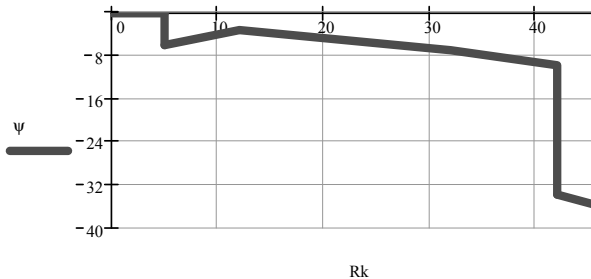
$$\phi_d := 0 \quad \phi_h := \phi_d + I5 \cdot R5 \quad \phi_l := \phi_a - I1 \cdot R1 \quad \phi_m := \phi_b - I4 \cdot R4$$

$$\text{Потенціали : } \psi := (\phi_d \ \phi_h \ \phi_c \ \phi_f \ \phi_a \ \phi_l \ \phi_b \ \phi_m \ \phi_d)^T$$

Підрахунок опорів у контурі:

Потенціали:

	0	0	0
	R5	5	0
	R5	5	-6
	R5 + R7	12	-3.375
Rk :=	(R5 + R7) + R3	Rk = 32	$\psi = -7.125$
	(R5 + R7 + R3) + R1	42	-9.75
	(R5 + R7 + R3) + R1	42	-33.75
	(R5 + R7 + R3 + R1) + R4	46	-36
	R5 + R7 + R3 + R1 + R4	46	0



Рисунк 1.2 - Потенційна діаграма

## 2 АНАЛІЗ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОННИХ СХЕМ ЗА ДОПОМОГОЮ *ELECTRONICS WORKBENCH*

Для моделювання роботи електричного кола (Рис.3.1) у середовищі *Electronics Workbench* запусимо 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 елемента (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.

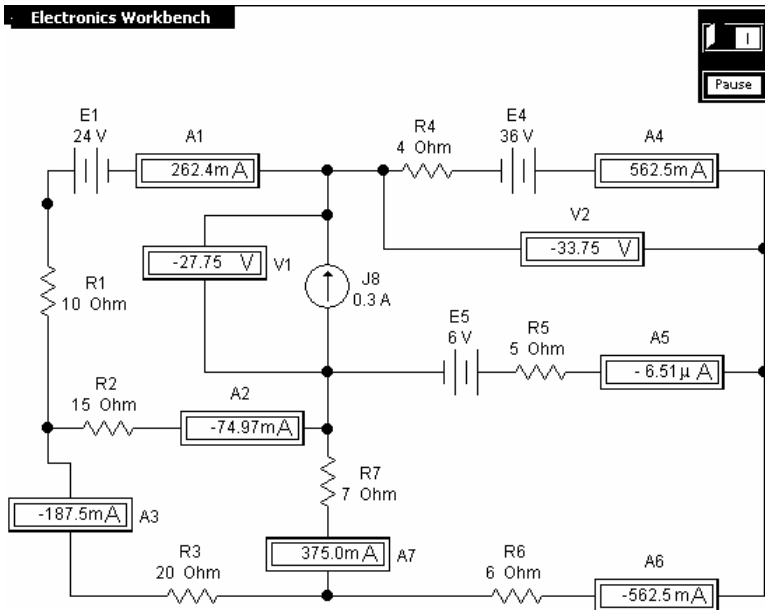


Рисунок 3.1 – Схема електричного кола у середовищі *EWB*

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  $\mu$ A, 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.1.1) дорівнює -33.75 V.

За результатами моделювання роботи електричного кола (Рис.1.1) можна зробити висновки, що результати розрахунку струмів та напруг, знайдені у за допомогою математичного пакету *MathCAD* відповідні до результатів аналізу у середовищі *Electronics Workbench*.

## 4 ЛАБОРАТОРНЕ ЗАВДАННЯ

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

4.1 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 ОТК;

– опір надано у кілоомах а ЕРС – у Вольтах:

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

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

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

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

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

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

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

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

4.7 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*.

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

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

## 5 ЗМІСТ ЗВІТУ

Звіт необхідно оформити на білих аркушах стандарту А4 згідно вимогам СТП 15-96. На титульному аркуші обов'язково повинні бути назва роботи, прізвище виконавця, номер академічної групи, номер варіанту.

Звіт повинен вміщувати в собі:

5.1 Титульний аркуш.

5.2 Мету роботи.

5.3 Схему електричну принципову.

5.4 Рівняння стану.

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

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

## 6 КОНТОРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

- 6.1 Поняття рівняння енергетичного стану кола.
- 6.2 Топологічні методи аналізу складних кіл.
- 6.3 Суть методу рівнянь Кірхгофа.
- 6.4 Алгоритм аналізу кіл методом контурних струмів.
- 6.5 В чому полягає метод вузлових потенціалів?
- 6.6 Способи перевірки вірності розв'язку рівнянь енергетичного стану.
- 6.7 Порядок побудови потенціальної діаграми засобами *MathCAD*.
- 6.8 Основи роботи з інтерфейсом *MathCAD*.
- 6.9 Основи роботи з інтерфейсом *Electronics Workbench*.
- 6.10 Основні понятті теорії графів.
- 6.11 Що таке незалежні контури і незалежні вузли?
- 6.12 Від чого залежить кількість можливих незалежних рівнянь енергетичного стану кола?
- 6.13 Переваги і недоліки метода рівнянь Кірхгофа.
- 6.14 Переваги і недоліки метода контурних струмів.
- 6.15 Переваги і недоліки метода вузлових потенціалів
- 6.16 Властивості ідеальних джерел струму та напруги.
- 6.17 В чому полягають еквівалентні перетворення складних схем з метою їх спрощення?
- 6.18 Сформулюйте закони Ома та Кірхгофа.
- 6.19 Порівняльний аналіз методів аналізу складних кіл постійного струму.
- 6.20 Недоліки моделювання складних схем постійного струму в програмному середовищі *Electronics Workbench*.
- 6.21 Недоліки моделювання складних схем постійного струму в програмному середовищі *MathCAD*.
- 6.22 Засоби вимірювання струму, напруги та потужності в *Electronics Workbench*.
- 6.23 Що означають від'ємні значення струмів та напруг, що виміряні в *Electronics Workbench*?
- 6.24 Що означають від'ємні значення струмів, які отримані в результаті розв'язку системи рівнянь енергетичного стану кола?

6.25 Що може означати невиконання умов балансу потужностей кола?

6.26 Коли потенційна діаграма не збігається?

## 7 РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. - М.: Высшая школа, 1984. – 528 .
2. Сборник задач и упражнений по теоретическим основам электротехники: Учебное пособие для вузов / под ред. проф. П.А.Ионкина. – М.: Энергоиздат, 1982. – 768 с., ил.
3. Карлашук В.И. Электронная лаборатория на IBM PC. *Electronics Workbench* и её применение. М.: СОЛОН – Р., 2001. – 726 .
4. Кирьянов Д.В. Самоучитель 2001 – СПб.: БХВ – Петербург, 2002. – 544 .

## 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 хвилин 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

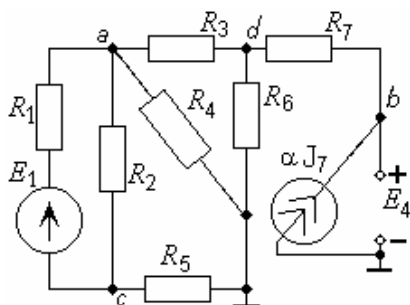


Рисунок Б.1 – Схеми

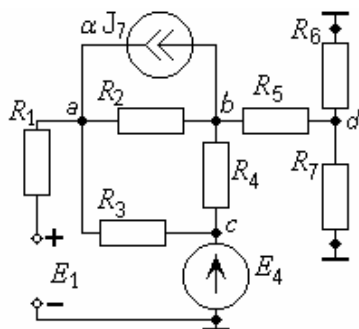


Рисунок Б.2 – Схеми

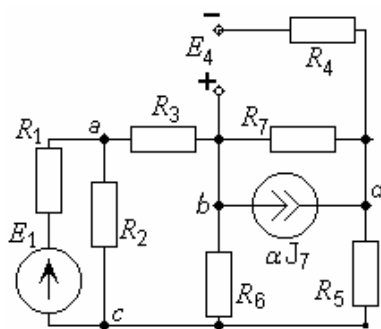


Рисунок Б.3 – Схеми

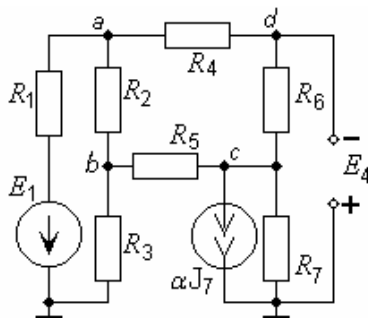


Рисунок Б.4 – Схеми

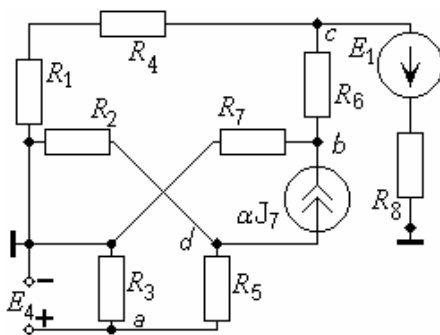


Рисунок Б.5 – Схеми

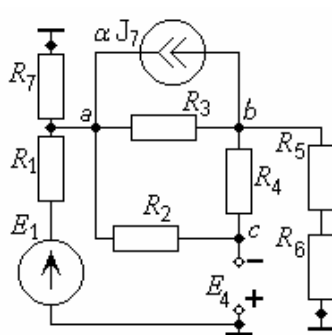


Рисунок Б.6 – Схеми

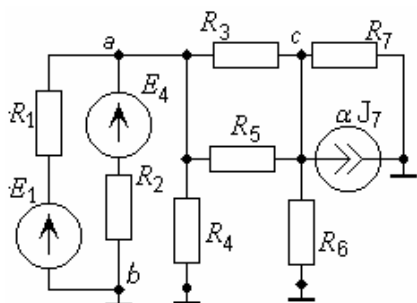


Рисунок Б.7 – Схема

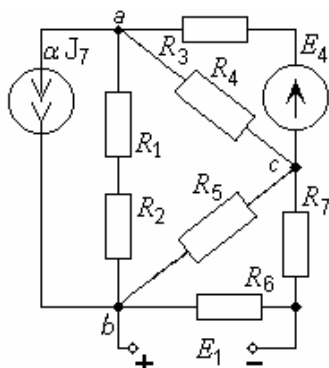


Рисунок Б.8 – Схема

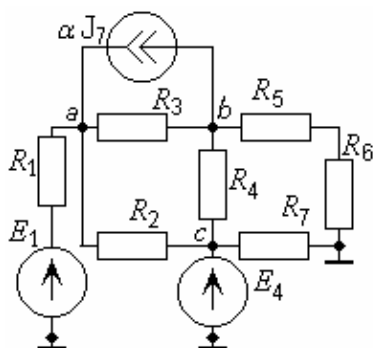


Рисунок Б.9 – Схема

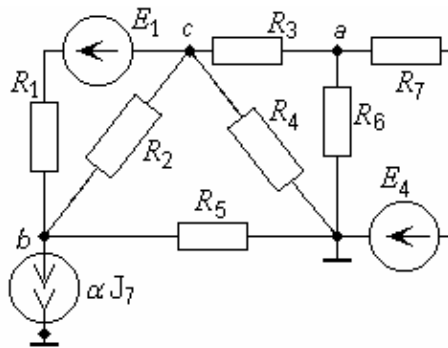


Рисунок Б.10 – Схема

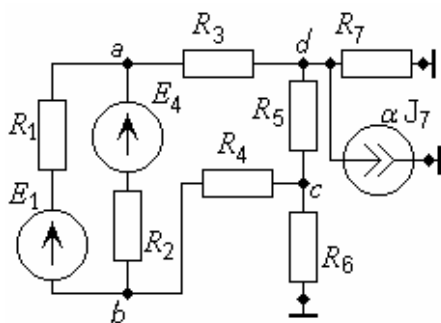


Рисунок Б.11 – Схема

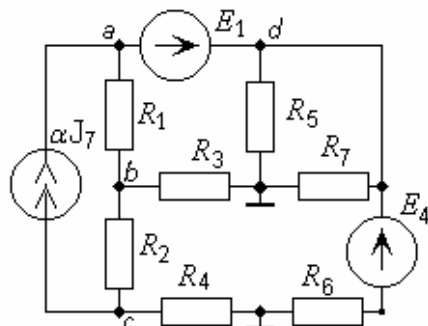


Рисунок Б.12 – Схема



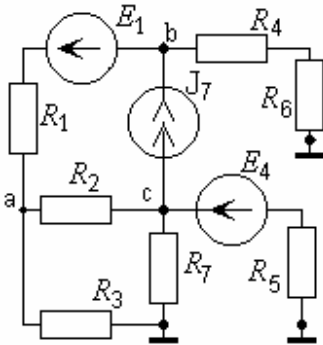


Рисунок Б.19 – Схема

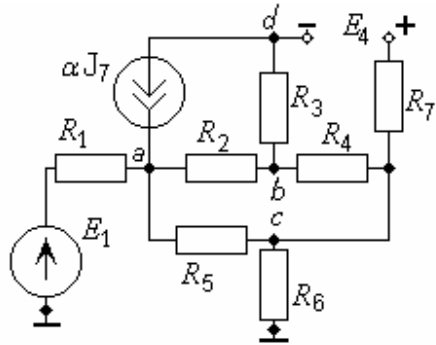


Рисунок Б.20 – Схема

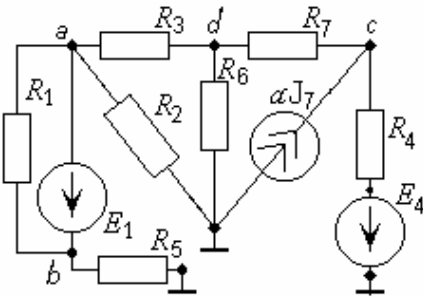


Рисунок Б.21 – Схема

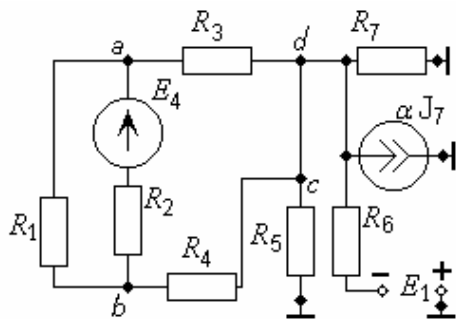


Рисунок Б.22 – Схема

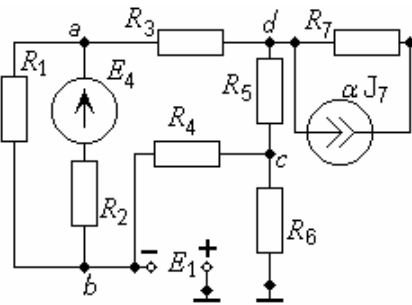


Рисунок Б.23 – Схема

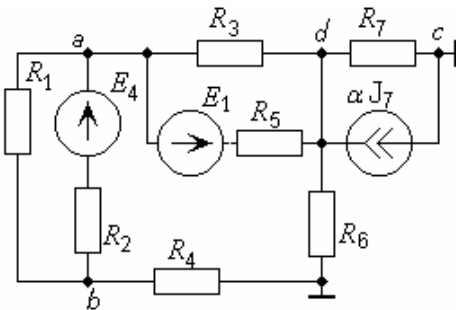


Рисунок Б.24 – Схема

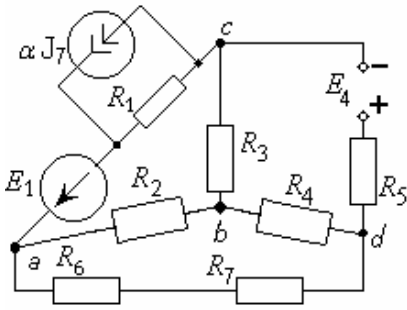


Рисунок Б.25 – Схема

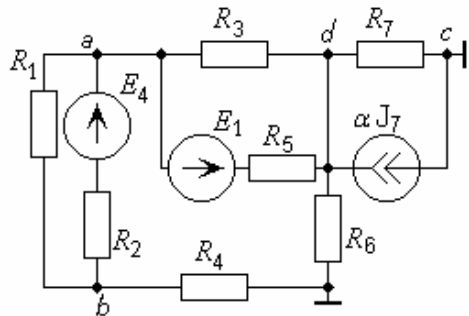


Рисунок Б.26 – Схема

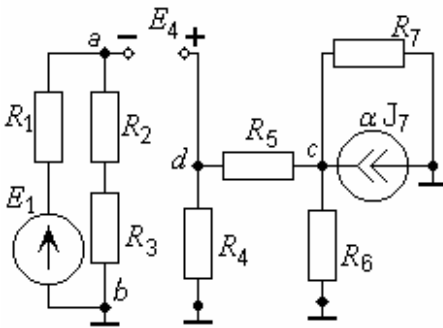


Рисунок Б.27 – Схема

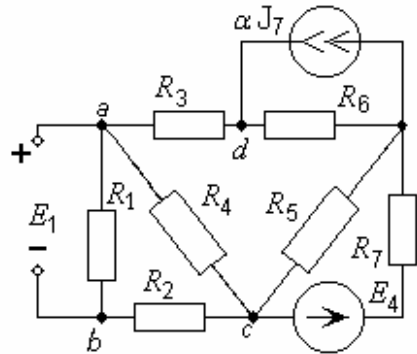


Рисунок Б.28 – Схема

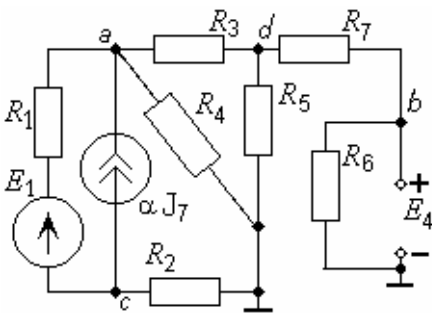


Рисунок Б.29 – Схема

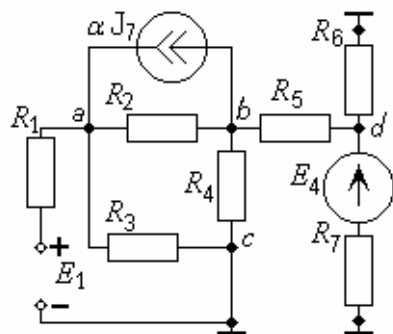


Рисунок Б.30 – Схема

## Додаток В – Додаткові вхідні параметри

№ варіанту	Додаткові вхідні параметри		
	$E_4,$ $B$	$J_7,$ $MA$	Коефіцієнт підсилення $\alpha$
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	$6+d$	$2,9+d$	$0.9$