

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**



**МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ**

**ДО ВИКОНАННЯ  
РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ  
З НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ**

**«ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ»**

**ЗА ТЕМОЮ**

**«РОЗРАХУНОК СКЛАДНОГО КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ  
І РОЗГАЛУЖЕНОГО КОЛА СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ»**

*(для студентів усіх форм навчання за спеціальністю  
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка)*

**Харків  
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова  
2020**

Методичні рекомендації до виконання розрахунково-графічної роботи з навчальної дисципліни «Теоретичні основи електротехніки» за темою «Розрахунок складного кола постійного струму і розгалуженого кола синусоїдного струму» (для студентів усіх форм навчання за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка) / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. : Я. Б. Форкун, М. Л. Глебова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020. – 54 с.

Укладачі : канд. техн. наук, доц. Я. Б. Форкун,  
канд. техн. наук, доц. М. Л. Глебова

#### **Рецензент**

**Д. В. Тугай**, доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри альтернативної електроенергетики та електротехніки Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

*Рекомендовано кафедрою альтернативної електроенергетики та електротехніки, протокол № 8 від 05.02.2020.*

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 ПЕРША ЧАСТИНА РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ «РОЗРАХУНОК СКЛАДНОГО КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ»..	5
1.1 Мета роботи.....	5
1.2 Підготовка до роботи.....	5
1.3 Робоче завдання на першу частину РГР.....	5
1.4 Приклад розрахунку.....	17
1.5 Контрольні запитання.....	24
2 ДРУГА ЧАСТИНА РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ «РОЗРАХУНОК РОЗГАЛУЖЕНОГО КОЛА СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ».....	25
2.1 Мета роботи.....	25
2.2 Підготовка до роботи.....	25
2.3 Робоче завдання на першу частину РГР.....	25
2.4 Порядок та методика проведення розрахунків.....	26
2.5 Приклад розрахунку.....	34
2.6 Контрольні запитання.....	50
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	51
ДОДАТКИ.....	52

## ВСТУП

Підвищення якості підготовки молодих спеціалістів тісно пов'язане з розширенням та удосконаленням самостійної роботи студентів у період навчання.

Студенти усіх освітніх програм спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка протягом двох семестрів вивчають відповідно першу та другу частини дисципліни «Теоретичні основи електротехніки. Частина 1, 2» (далі – ТОЕ), яка є базовою для цієї спеціальності. Для цієї дисципліни навчальними планами передбачено лекційні, лабораторні, практичні заняття, а також виконання розрахунково-графічної роботи (далі – РГР) у кожному семестрі.

Розрахунково-графічні роботи – один з основних видів самостійної роботи студентів при вивченні курсу ТОЕ. При вивченні першої частини дисципліни студенти виконують РГР за темою «Розрахунок складного кола постійного струму і розгалуженого кола синусоїдного струму», що складається з двох частин. Для кращого засвоєння матеріалу РГР в цих методичних вказівках наведено приклади розрахунку подібних задач.

Значну частину часу виконання РГР займають обчислення, які повинні бути проведені з високою точністю для забезпечення правильності подальших побудов (хвильових діаграм, графіків залежностей тощо). При цьому доцільно залучати нові технічні засоби, обчислювальну техніку, сучасні програми (MathCad Professional, MS Excel та ін.), що широко застосовуються для інтенсифікації праці при проведенні технічних розрахунків.

Отримані під час виконання РГР навички розрахунку електричних кіл повинні стати основою подальшого вивчення інших електротехнічних дисциплін.

Варіант роботи визначається за номером студента у журналі викладача, схема кола (рисунки 1.1–1.36 – перша частина РГР, 2.1–2.36 – друга частина РГР) відповідає варіанту; числові дані елементів схем визначаються за факультетом та номером групи з таблиць 1.2 та 2.1 і є спільними для всієї групи.

Пояснювальна записка кожної частини РГР повинна містити:

- титульний аркуш, приклади яких наведені нижче;
- вихідну схему, вихідні дані та робоче завдання на наступному аркуші;
- розрахунок за пунктами у послідовності відповідно до робочого завдання.

Електричні схеми необхідно виконувати відповідно до вимог державних стандартів із застосуванням креслярського знаряддя (рекомендується використання радіотехнічного трафарету); графіки, діаграми – на міліметрівці.

Загальне оформлення пояснювальної записки – згідно з ДСТУ 3008-95. Документація. Звіти у сфері науки й техніки.

Приклади оформлення титульних аркушів наведені в додатках А та Б.

# 1 ПЕРША ЧАСТИНА РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ «РОЗРАХУНОК СКЛАДНОГО КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ»

## 1.1 Мета роботи

Мета виконання першої частини РГР є:

- вивчення методики дослідження електричного кола постійного струму;
- оволодіння методами розрахунку електричних кіл, а саме, методом контурних струмів, вузлових потенціалів, еквівалентного генератора;
- вивчення правил складання балансу потужностей для електричного кола, що містить джерела напруги та струму, та побудування потенціальної діаграми для контуру.

## 1.2 Підготовка до роботи

Підготовка до роботи полягає в наступному:

- накреслити схему кола відповідно до свого варіанту (рис. 1.1–1.36);
- числові дані елементів схем узяти з таблиці 1.1 відповідно до факультету та номеру групи, який визначає викладач;
- провести необхідні перетворення, а саме поєднати точки кола з однаковими потенціалами, а також вилучити вітки з вольтметрами (внутрішній опір вольтметрів є значно більшим, ніж опори схеми);
- у схемі кола довільно обрати напрямки струмів у вітках.

## 1.3 Робоче завдання на першу частину РГР

Пункти робочого завдання:

- 1) скласти систему рівнянь за законами Кірхгофа;
- 2) провести перетворення в схемі, що досліджується, джерела струму  $j$  на еквівалентне джерело електрорушійної сили (ЕРС)  $E_j$ ;
- 3) розрахувати усі струми схеми методом контурних струмів;
- 4) для вихідної схеми з джерелом струму скласти баланс потужностей, за допомогою якого перевірити правильність попередніх розрахунків;
- 5) побудувати для зовнішнього контуру потенціальну діаграму;
- 6) розрахувати усі струми схеми методом вузлових потенціалів;
- 7) розрахувати струм вітки з ЕРС  $E_2$  методом еквівалентного генератора;
- 8) визначити показання вольтметрів;
- 9) Результати обчислень струмів різними методами занести до порівняльної таблиці (табл. 1.1); порівняти отримані різними методами розрахунку струми кожної вітки, обчислення похибки також занести до таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Вихідні дані для розрахунку

Позначення на схемах	Факультет електропостачання та освітлення міст							Факультет транспортних систем та технологій						
	Номери груп							Номери груп						
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>
$R_1, \text{OM}$	8	6	5	4	3	6	5	2	2	4	5	3	7	3
$R_2, \text{OM}$	5	4	5	4	4	3	3	3	4	6	4	5	4	6
$R_3, \text{OM}$	4	5	6	5	4	4	2	4	6	8	4	6	3	4
$R_4, \text{OM}$	6	4	5	3	5	6	4	6	2	2	5	3	5	8
$R_5, \text{OM}$	6	5	2	2	6	4	8	4	4	4	3	5	5	2
$R_6, \text{OM}$	7	8	2	3	7	3	2	4	6	3	6	4	4	4
$R_7, \text{OM}$	2	3	2	2	8	2	4	7	2	3	4	2	2	3
$R_8, \text{OM}$	3	2	2	3	2	4	3	8	4	5	6	2	3	4
$E_1, \text{B}$	20	30	40	20	30	10	30	20	10	30	10	20	40	20
$E_2, \text{B}$	50	40	50	40	20	30	20	30	40	35	30	40	20	40
$E_3, \text{B}$	30	30	40	50	30	50	40	40	50	40	40	20	30	30
$E_4, \text{B}$	40	30	30	60	40	30	30	30	40	70	30	30	40	20
$E_5, \text{B}$	50	50	20	30	50	20	20	60	20	25	20	30	20	10
$E_6, \text{B}$	30	20	10	15	20	10	15	20	10	15	20	10	20	30
$j, \text{A}$	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

Примітка: похибка  $\delta$  не повинна перевищувати 5 %:

$$\delta = \left| \frac{I_k - I'_k}{I_k} \right| \cdot 100\% \leq 5\%,$$

де  $I_k$  – струм вітки з номером  $k$ , розрахований методом контурних струмів,

$I'_k$  – струм вітки з номером  $k$ , розрахований методом вузлових потенціалів.

У рівнянні енергетичного балансу розходження між потужністю джерел енергії  $P_{дж.}$  та потужністю, що розсіюється в навантаженнях кола  $P_{навант.}$ , не повинно перевищувати 5 %.

Приклад розрахунку (пункт 1.4) наведений нижче.

Таблиця 1.2 – Порівняльна таблиця результатів розрахунку досліджуваного електричного кола різними методами

№ з/п	Методи	Струми, А						Потенціали вузлів, В				$U_{2XX}$ , В	$R_{BX}$ , Ом	$P_{дж.} \cong P_{навант.}$
		$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_4$	$I_5$	$I_6$	$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\varphi_3$	$\varphi_4$			
1	Метод контурних струмів							-	-	-	-	-	-	
2	Метод вузлових потенціалів										0	-	-	
3	Метод еквівалентного генератора	-		-	-	-	-	-	-	-	-			
4	Похибка розрахунків							-	-	-	-	-	-	





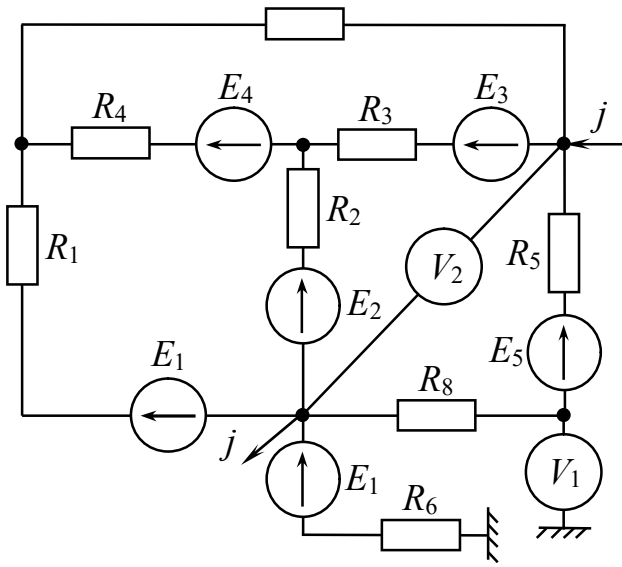


Рисунок 1.5 – Варіант № 5

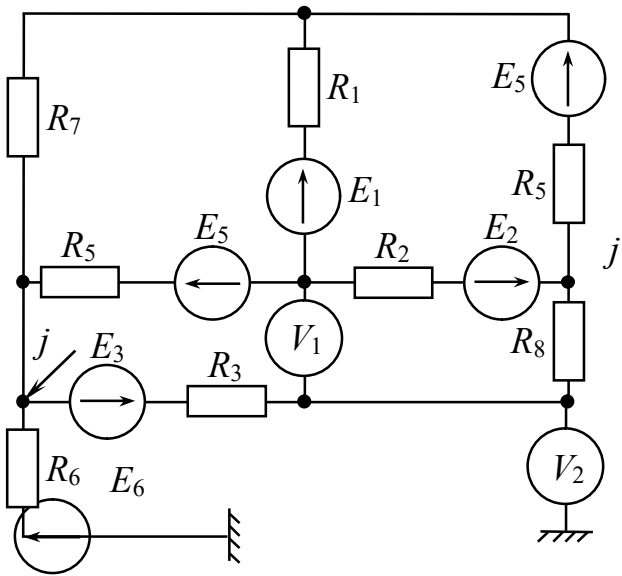


Рисунок 1.6 – Варіант № 6

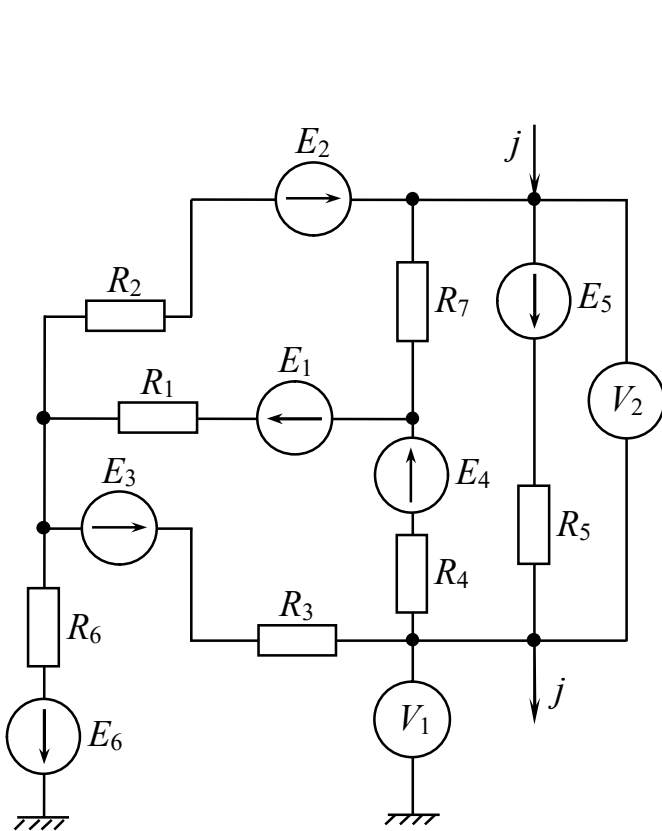


Рисунок 1.7 – Варіант № 7

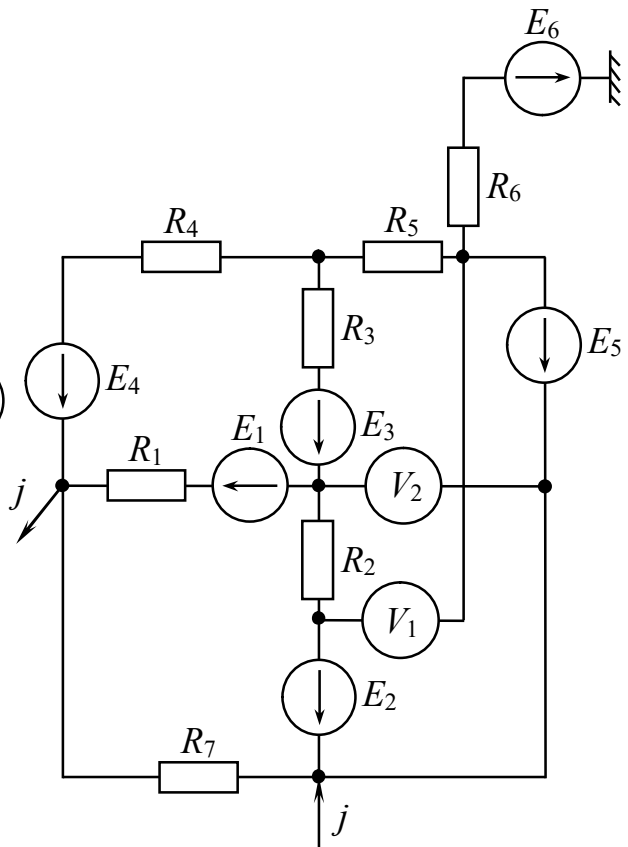


Рисунок 1.8 – Варіант № 8

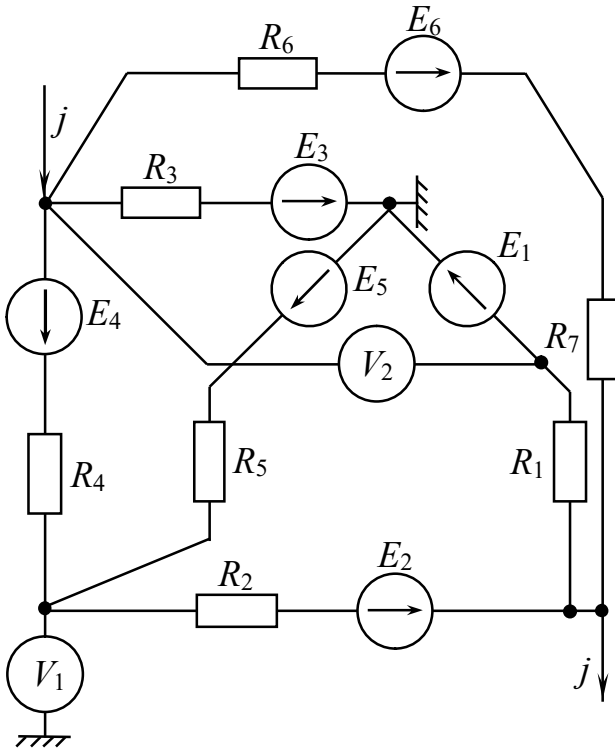


Рисунок 1.9 – Варіант № 9

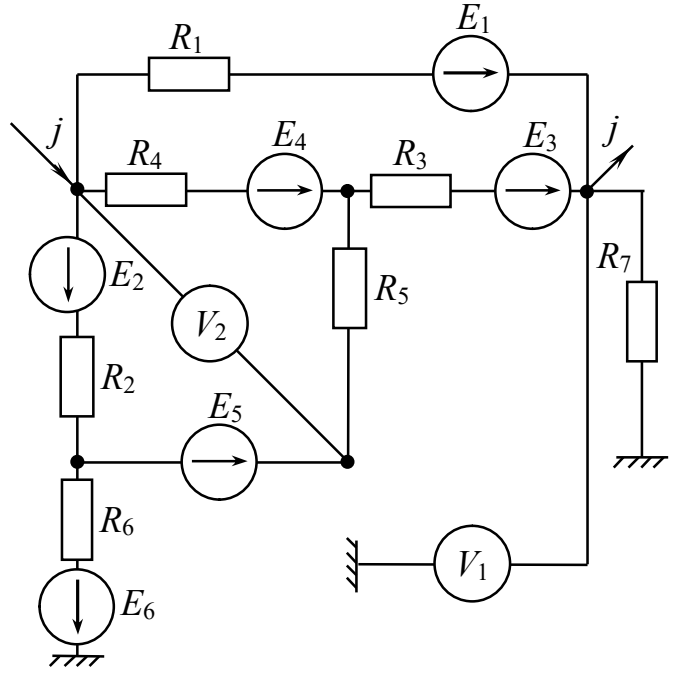


Рисунок 1.10 – Варіант № 10

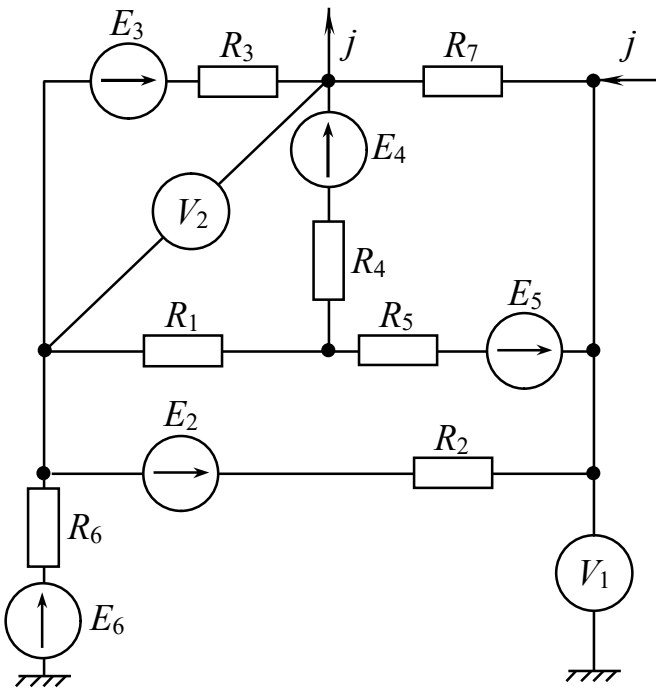


Рисунок 1.11 – Варіант № 11

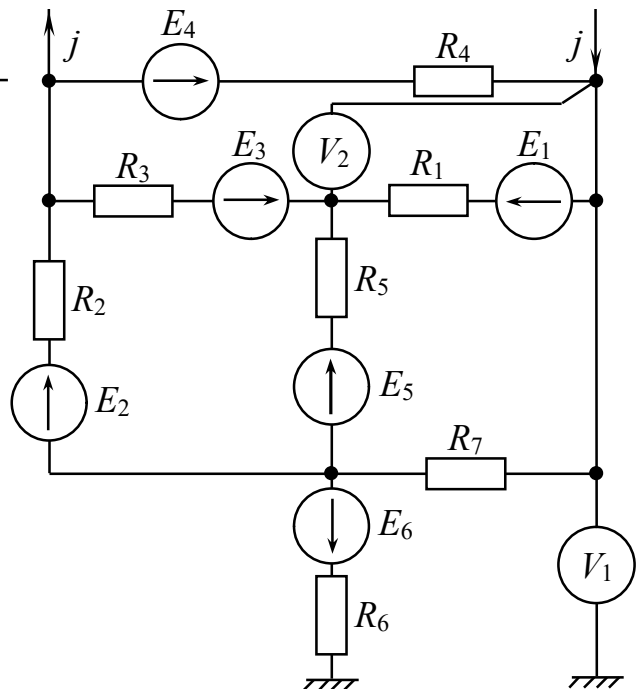


Рисунок 1.12 – Варіант № 12

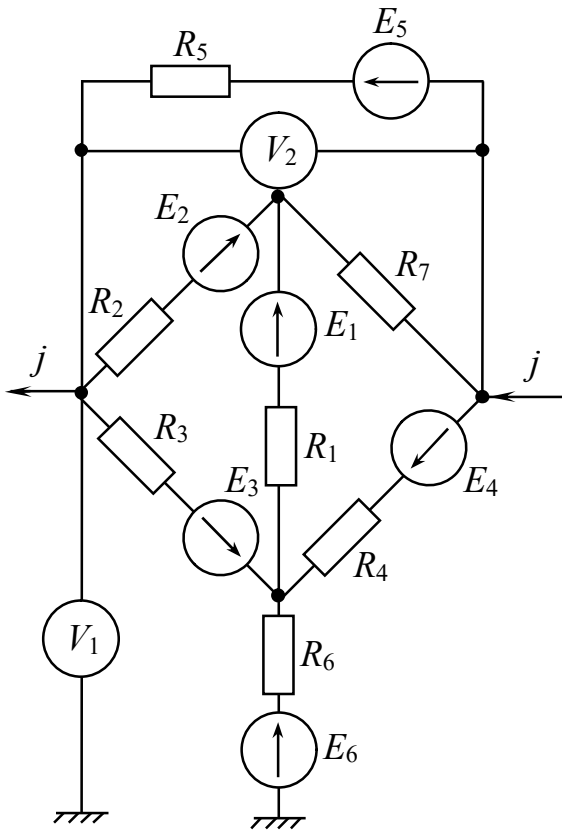


Рисунок 1.13 – Варіант № 13

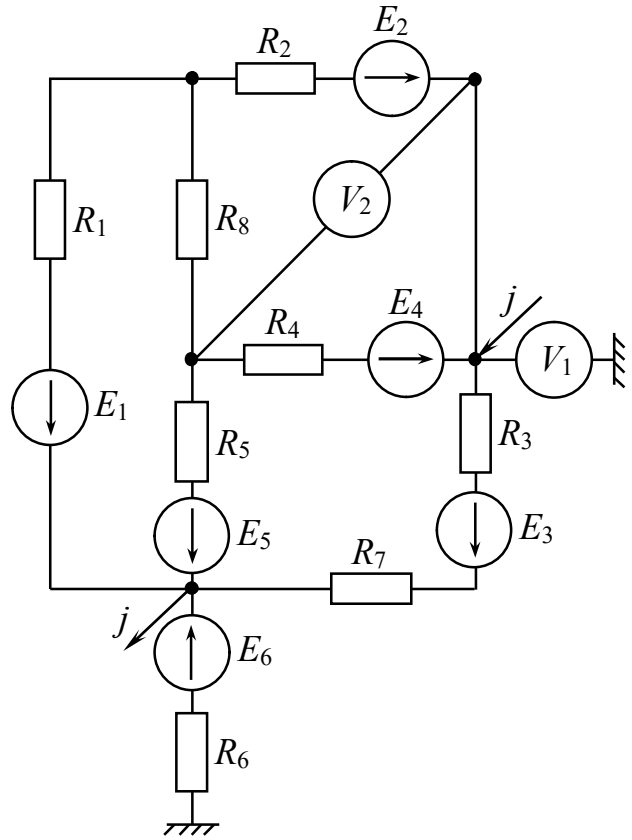


Рисунок 1.14 – Варіант № 14

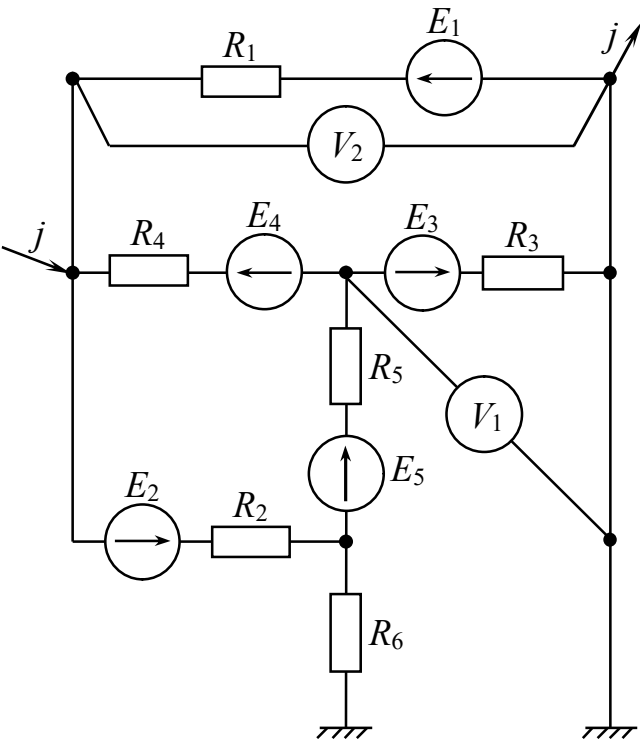


Рисунок 1.15 – Варіант № 15

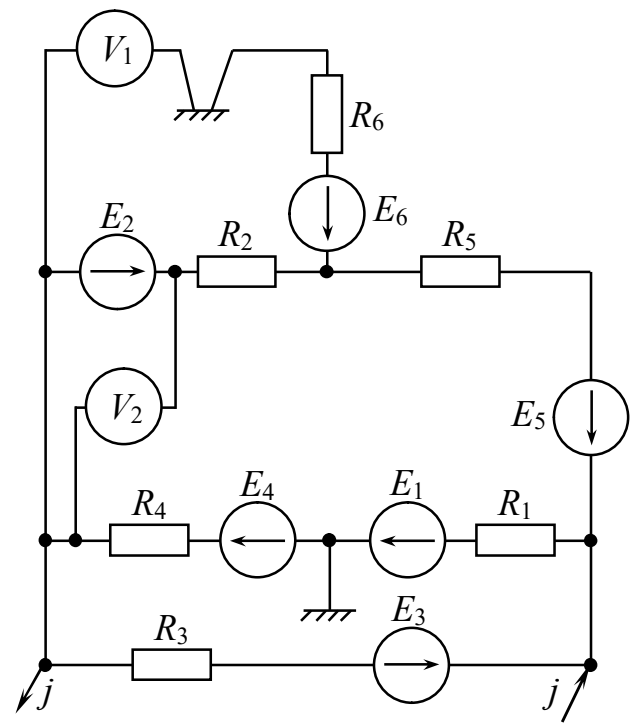


Рисунок 1.16 – Варіант № 16

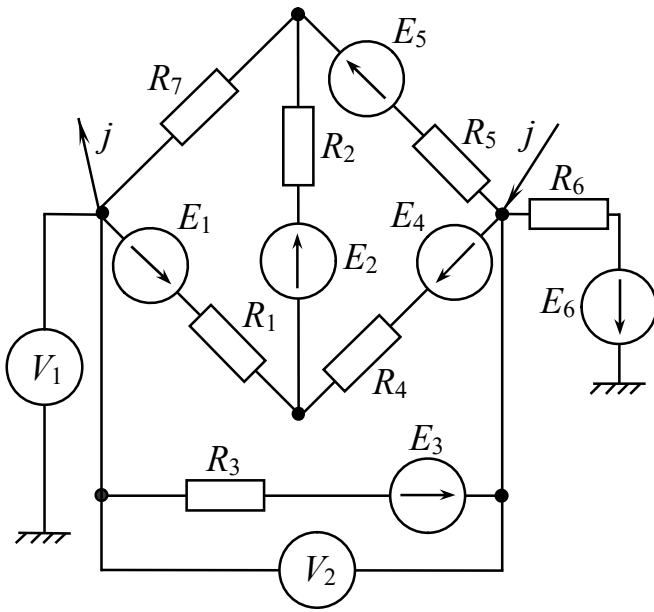


Рисунок 1.17 – Варіант № 17

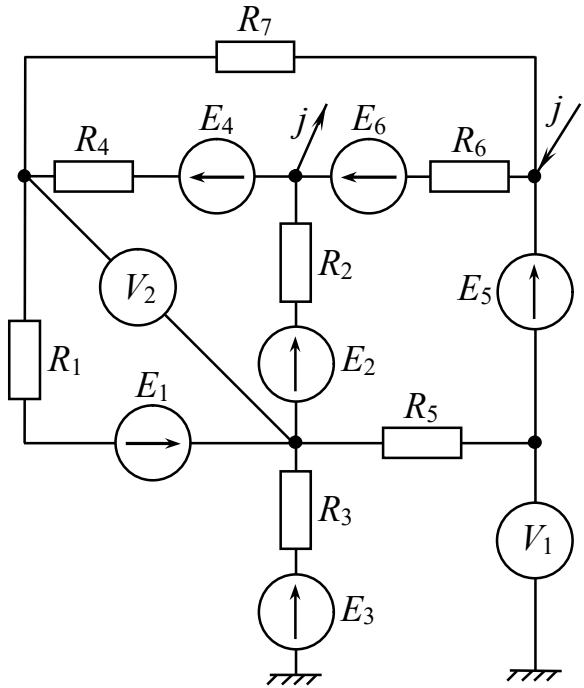


Рисунок 1.18 – Варіант № 18

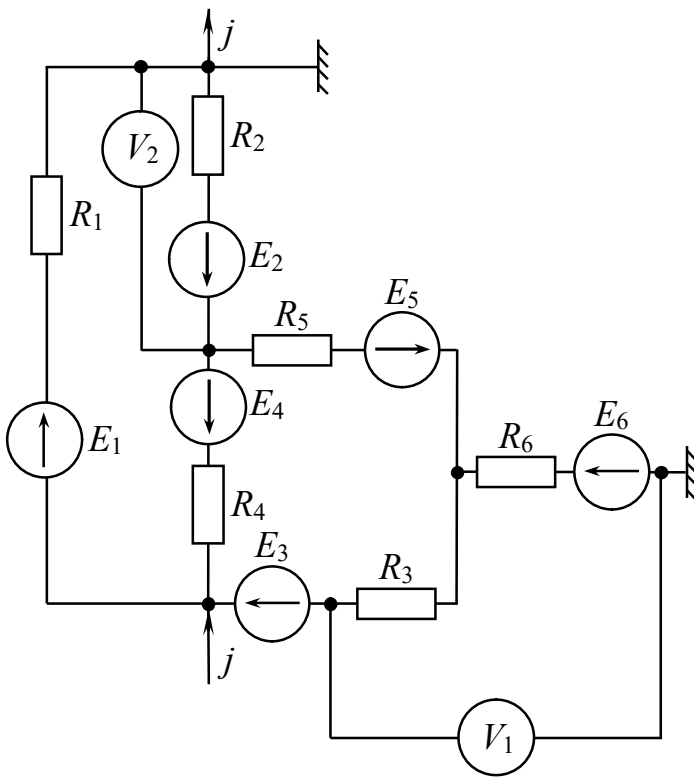


Рисунок 1.19 – Варіант № 19

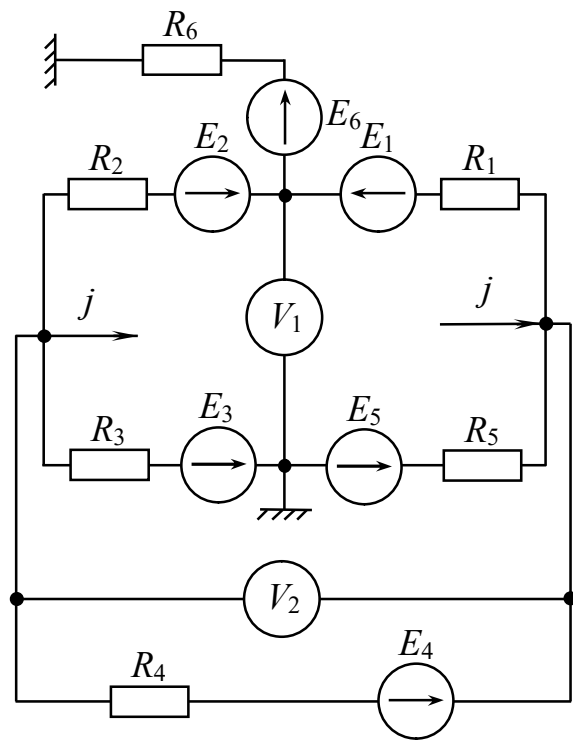


Рисунок 1.20 – Варіант № 20

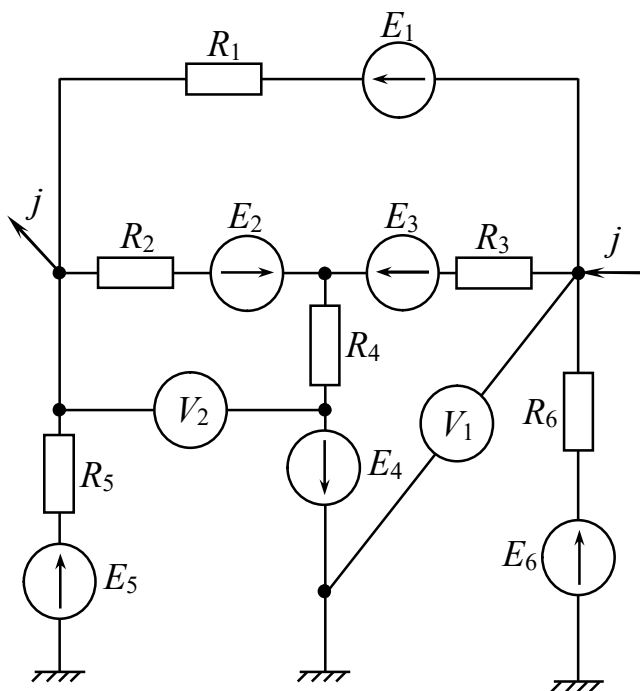


Рисунок 1.21 – Варіант № 21

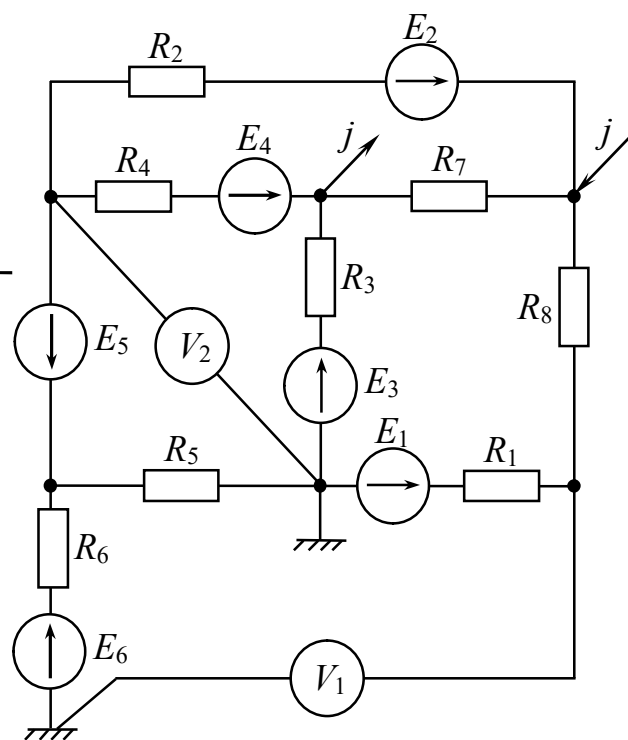


Рисунок 1.22 – Варіант № 22

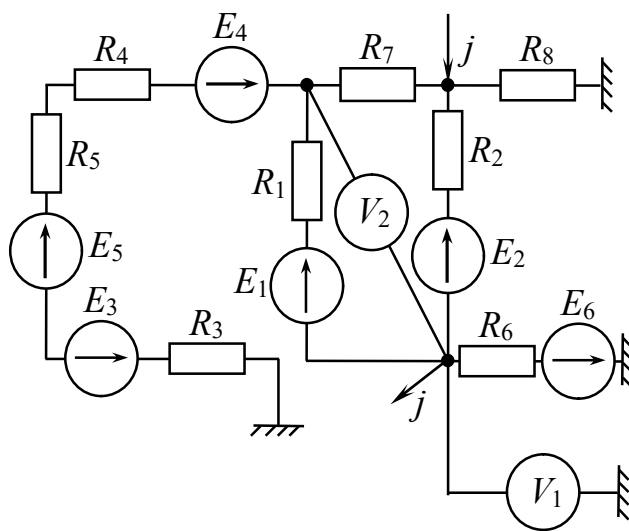


Рисунок 1.23 – Варіант № 23

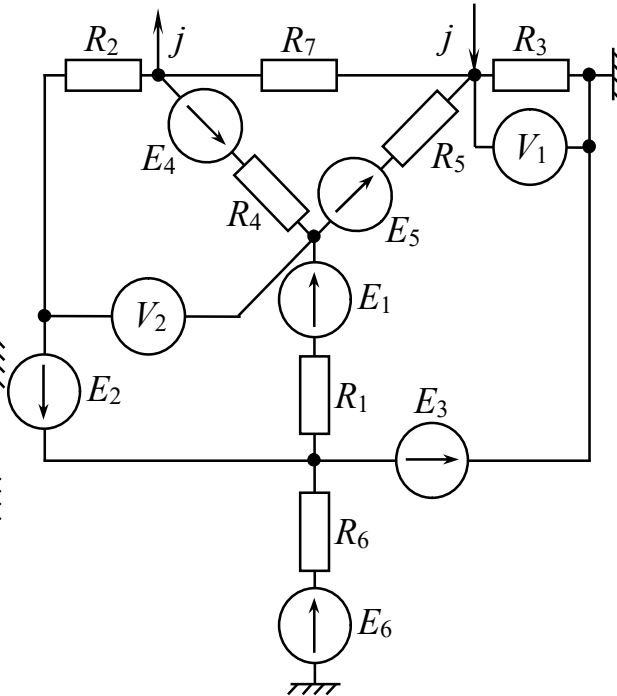


Рисунок 1.24 – Варіант № 24

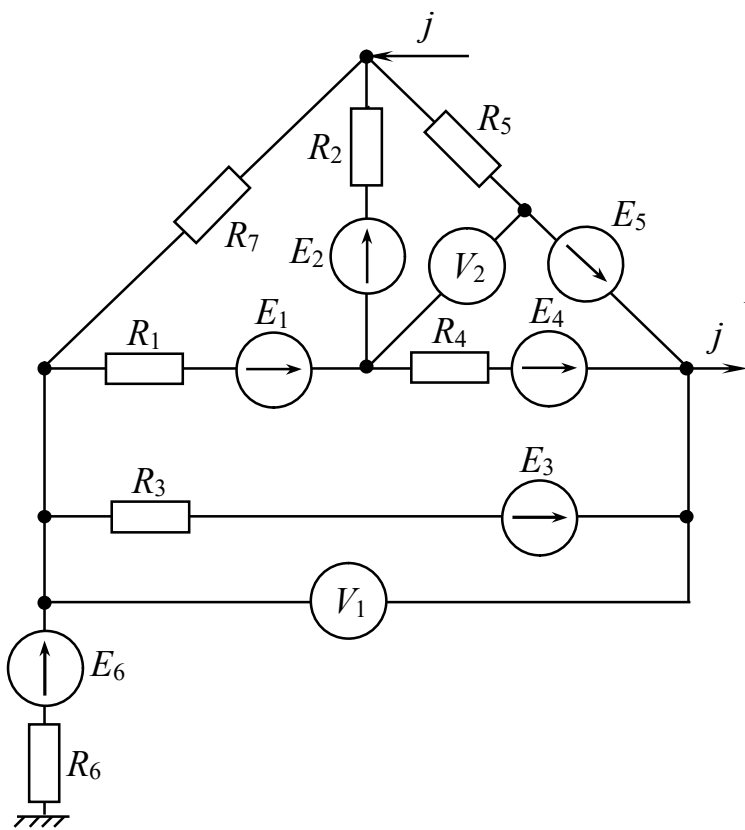


Рисунок 1.25 – Варіант № 25

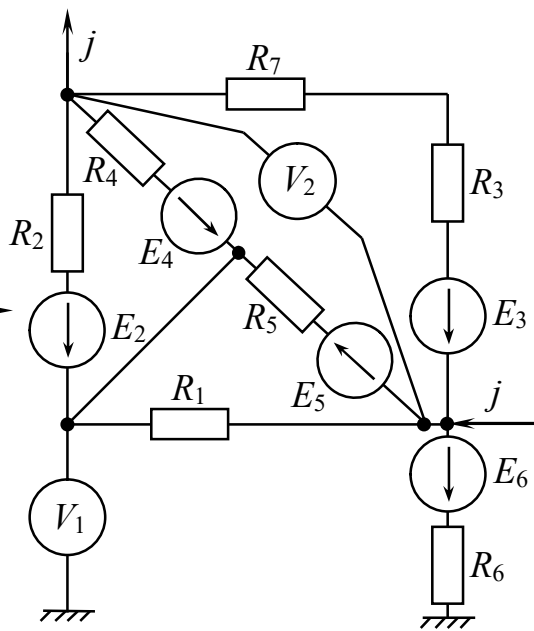


Рисунок 1.26 – Варіант № 26

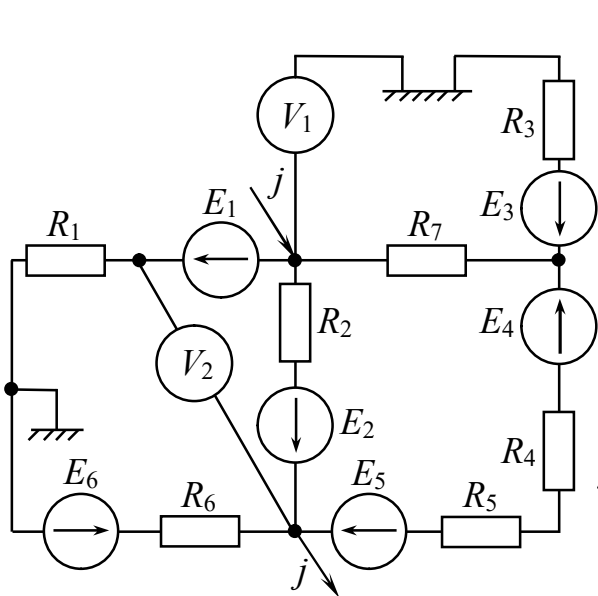


Рисунок 1.27 – Варіант № 27

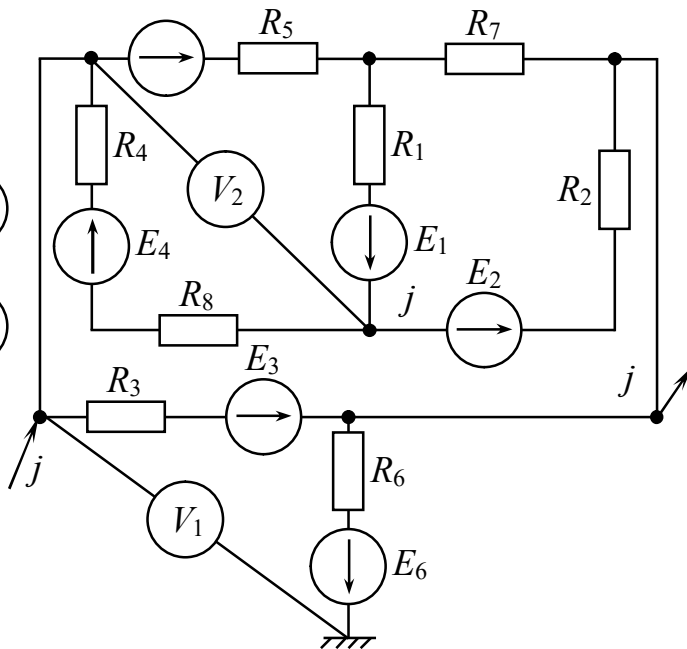


Рисунок 1.28 – Варіант № 28

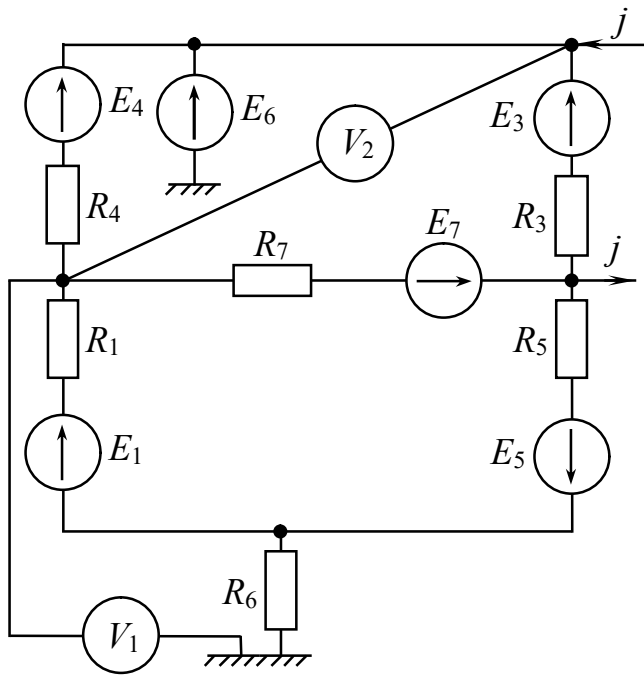


Рисунок 1.29 – Варіант № 29

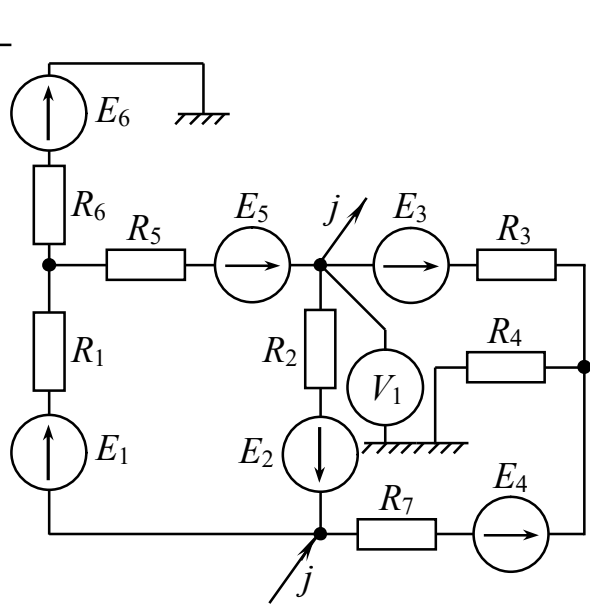


Рисунок 1.30 – Варіант № 30

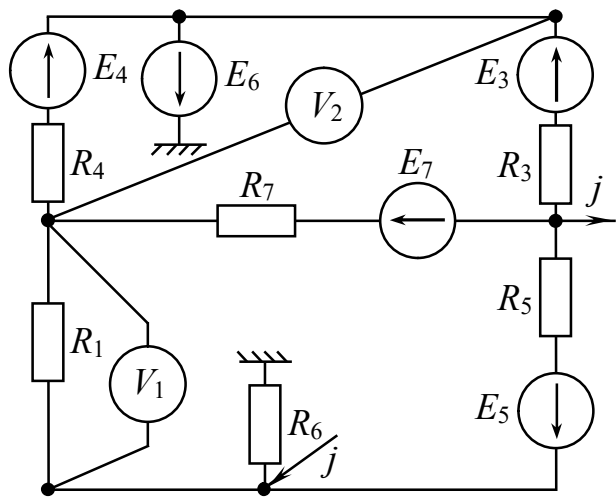


Рисунок 1.31 – Варіант № 31

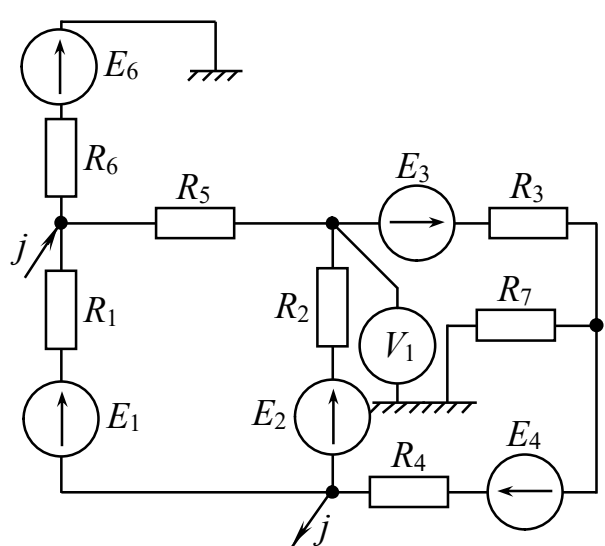


Рисунок 1.32 – Варіант № 32

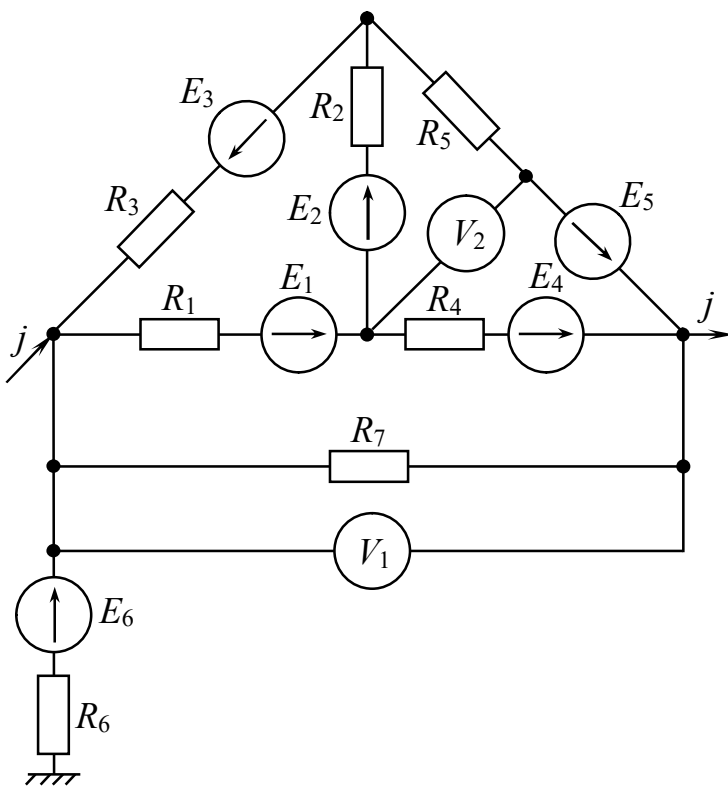


Рисунок 1.33 – Варіант № 33

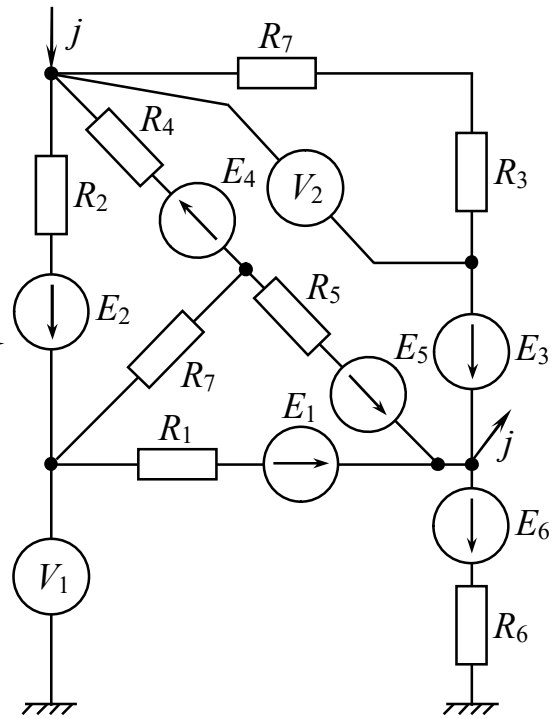


Рисунок 1.34 – Варіант № 34

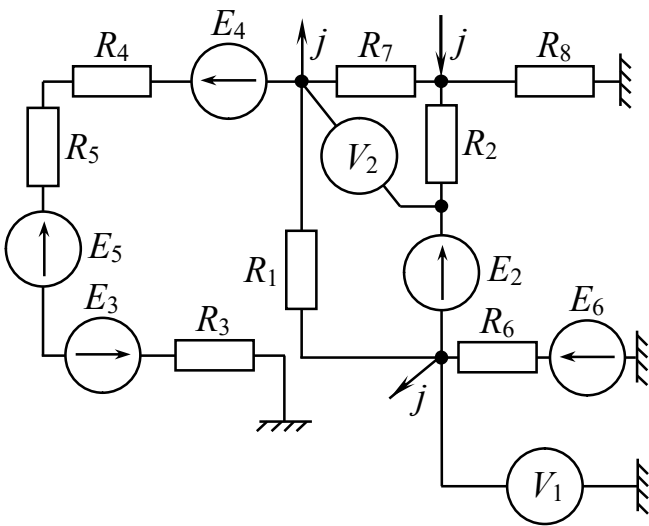


Рисунок 1.35 – Варіант № 35

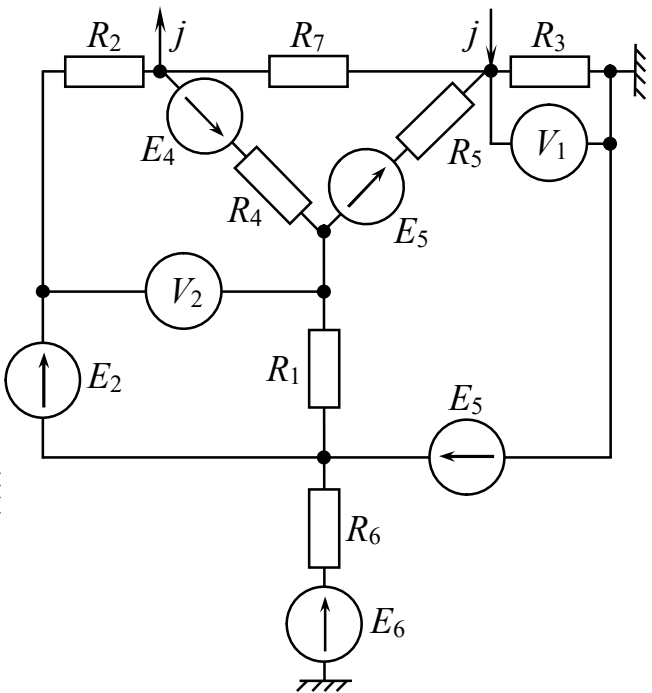


Рисунок 1.36 – Варіант № 36



## 1.4 Приклад розрахунку

Вихідна схема (варіант № 37)

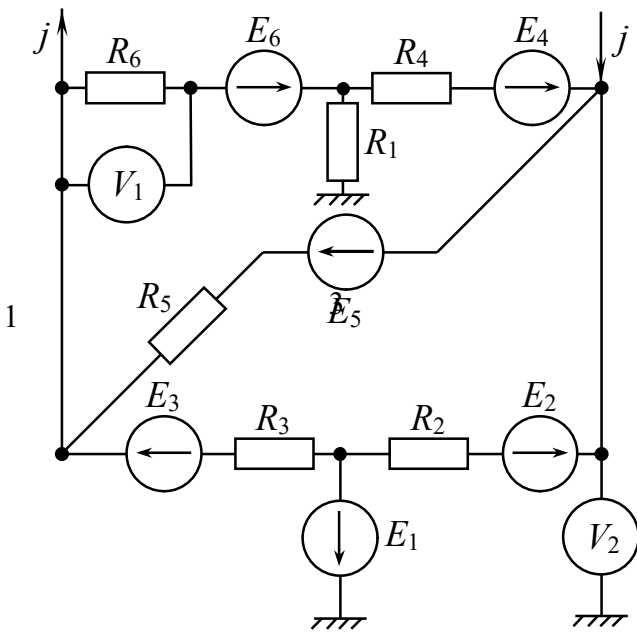


Рисунок 1.37 – Варіант № 37

Вихідні дані

$$\begin{aligned}
 R_1 &= R_4 = 5 \text{ Ом}, \\
 R_2 &= 4 \text{ Ом}; R_3 = 6 \text{ Ом}; \\
 R_5 &= 8 \text{ Ом}; R_6 = 7 \text{ Ом}; \\
 E_1 &= 55 \text{ В}; E_2 = 30 \text{ В}; \\
 E_3 &= 40 \text{ В}; E_4 = 20 \text{ В}; \\
 E_5 &= 50 \text{ В}; E_6 = 30 \text{ В}; \\
 j &= 4 \text{ А}.
 \end{aligned}$$

Розрахунок відповідно до  
робочого завдання

1. Система рівнянь за законами Кірхгофа.

За першим законом Кірхгофа треба скласти  $n-1$  рівнянь ( $n$  – кількість вузлів у схемі). За другим законом Кірхгофа треба скласти  $m - n + 1$  рівнянь ( $m$  – кількість віток у схемі). Таким чином, для досліджуваної схеми кількість рівнянь за обома законами дорівнює трьом ( $4 - 1 = 3$ ;  $6 - 4 + 1 = 3$ ).

Перед складанням системи рівнянь у вихідній схемі (рис. 1.41) після здійснення підготовки відповідно до підрозділу 1.2, задаємося напрямками обходу контурів та позначаємо вузли (обхід контурів – за годинниковою стрілкою).

Система рівнянь виглядає так:

$$\begin{cases}
 I_1 - I_4 + I_6 = 0 & \text{– для вузла «2»} \\
 I_3 + I_5 - I_6 - j = 0 & \text{– для вузла «1»} \\
 I_2 - I_3 + I_4 + j = 0 & \text{– для вузла «4»} \\
 I_4 \cdot R_4 + I_5 \cdot R_5 + I_6 \cdot R_6 = E_6 + E_4 + E_5 & \text{– для контуру «I»} \\
 -I_2 \cdot R_2 + I_3 \cdot R_3 - I_5 \cdot R_5 = E_3 - E_5 - E_2 & \text{– для контуру «II»} \\
 -I_1 \cdot R_1 + I_2 \cdot R_2 - I_4 \cdot R_4 = E_2 - E_4 - E_1 & \text{– для контуру «III»}
 \end{cases}$$

2. Перетворення джерела струму  $j$  на еквівалентне джерело ЕРС  $E_j$

$$E_j = j \cdot R_5 = 4 \cdot 8 = 32 \text{ В} \text{ – рисунок 1.38.}$$

### 3. Розрахунок струмів методом контурних струмів

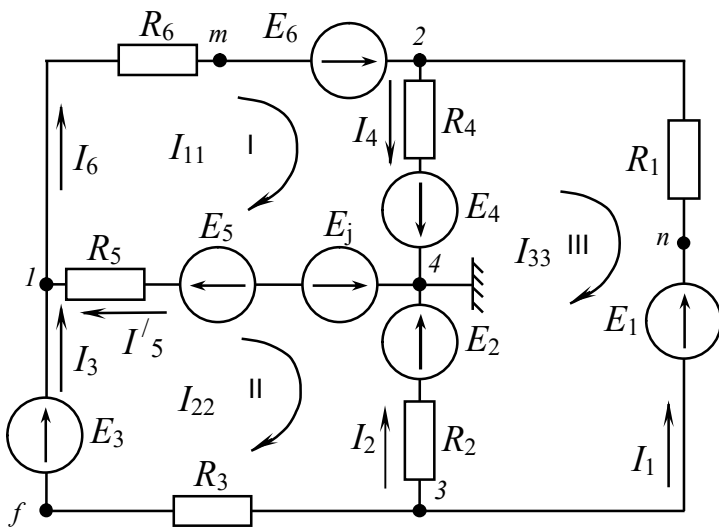


Рисунок 1.38 – Перетворена схема

У схемі на рисунку 1.38 довільно задаємося додатними напрямками контурних струмів у контурах (доцільно – в одну сторону). Складаємо систему рівнянь в загальному вигляді для трьох незалежних контурів:

$$\begin{cases} I_{11} \cdot R_{11} + I_{22} \cdot R_{12} + I_{33} \cdot R_{13} = E_{11} \\ I_{11} \cdot R_{21} + I_{22} \cdot R_{22} + I_{33} \cdot R_{23} = E_{22} \\ I_{11} \cdot R_{31} + I_{22} \cdot R_{32} + I_{33} \cdot R_{33} = E_{33} \end{cases}$$

Визначаємо коефіцієнти:

$$R_{11} = R_4 + R_5 + R_6 = 20 \text{ Ом} - \text{власний опір контуру I};$$

сний опір контуру I;

$$R_{22} = R_2 + R_3 + R_5 = 18 \text{ Ом} - \text{власний опір контуру II};$$

$$R_{33} = R_1 + R_2 + R_4 = 14 \text{ Ом} - \text{власний опір контуру III};$$

$$R_{12} = R_{21} = -R_5 = -8 \text{ Ом} - \text{взаємний опір контурів I та II};$$

$$R_{13} = R_{31} = -R_4 = -5 \text{ Ом} - \text{взаємний опір контурів I та III};$$

$$R_{23} = R_{32} = -R_2 = -4 \text{ Ом} - \text{взаємний опір контурів II та III};$$

$$E_{11} = E_6 + E_4 - E_j + E_5 = 68 \text{ В} - \text{власна ЕРС контуру I};$$

$$E_{22} = E_3 - E_5 - E_2 + E_j = -8 \text{ В} - \text{власна ЕРС контуру II};$$

$$E_{33} = E_2 - E_4 - E_1 = -45 \text{ В} - \text{власна ЕРС контуру III}.$$

Після підстановки коефіцієнтів система рівнянь набуває такого вигляду:

$$\begin{cases} 20 \cdot I_{11} - 8 \cdot I_{22} - 5 \cdot I_{33} = 68 \\ -8 \cdot I_{11} + 18 \cdot I_{22} - 4 \cdot I_{33} = -8 \\ -5 \cdot I_{11} - 4 \cdot I_{22} + 14 \cdot I_{33} = -45 \end{cases}$$

Визначаємо контурні струми, А:

$$I_{11} = 3,1133; \quad I_{22} = 0,50295; \quad I_{33} = -1,9594.$$

Визначаємо струми в вітках, А:

$$I_1 = -I_{33} = 1,9594; \quad I_2 = I_{33} - I_{22} = -2,4623;$$

$$I_3 = I_{22} = 0,50295; \quad I_4 = I_{11} - I_{33} = 3,1133 + 1,9594 = 5,0727;$$

$$I'_5 = I_{11} - I_{22} = 3,1133 - 0,50295 = 2,61035; \quad I_6 = I_{11} = 3,1133.$$

Оскільки була проведена заміна джерела струму  $j$  на еквівалентне джерело  $EPC E_j$ , то дійсне значення струму  $I_5$  (для вихідної схеми рис. 1.41) визначається за першим законом Кірхгофа:

$$I_5 = I_{11} - I_{22} + j = 3,1133 - 0,50295 + 4 = 6,6103 \text{ A.}$$

4. Баланс потужностей для вихідної схеми з джерелом струму  $j$  (рис. 1.41)

$$\text{Баланс у загальному вигляді: } \sum P_{\text{ист}} = \sum P_{\text{навант.}}$$

Для досліджуваної схеми:

$$\begin{aligned} E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2 + E_3 \cdot I_3 + E_4 \cdot I_4 + E_5 \cdot I_5 + E_6 \cdot I_6 + j \cdot U_{41} = \\ = I_1^2 \cdot R_1 + I_2^2 \cdot R_2 + I_3^2 \cdot R_3 + I_4^2 \cdot R_4 + I_5^2 \cdot R_5 + I_6^2 \cdot R_6 \end{aligned}$$

де  $U_{41}$  – напруга між точками «4» та «1».

$$U_{41} = I_5 \cdot R_5 - E_5 = 6,6103 \cdot 8 - 50 = 2,908 \text{ В.}$$

$$\begin{aligned} 55 \cdot 1,9594 + 30 \cdot (-2,4623) + 40 \cdot 0,50295 + 20 \cdot 5,0727 + 50 \cdot 6,6103 + 30 \cdot 3,1133 + 4 \cdot 2,908 = \\ = 1,9594^2 \cdot 5 + (-2,4623)^2 \cdot 4 + 0,50295^2 \cdot 6 + 5,0727^2 \cdot 5 + 6,6103^2 \cdot 8 + 3,1133^2 \cdot 7 \end{aligned}$$

$$591,1 \approx 591,05 \text{ (Вт).}$$

$$\Delta = \frac{591,1 - 591,05}{591,05} \cdot 100\% \approx 0,01\%$$

5. Потенціальна діаграма для зовнішнього контуру (рис. 1.39)

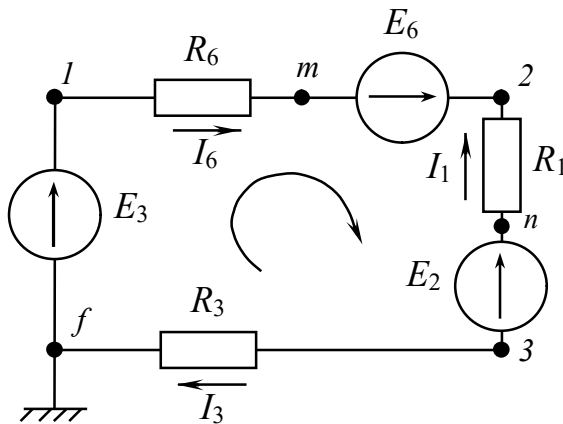


Рисунок 1.39 – Зовнішній контур

Припустимо, що  $\varphi_f = 0 \text{ В}$ . Тоді:

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \varphi_f + E_3 = 40 \text{ В.} \\ \varphi_m &= \varphi_1 - I_6 \cdot R_6 = 18,2069 \text{ В.} \\ \varphi_2 &= \varphi_m + E_6 = 48,2069 \text{ В.} \\ \varphi_n &= \varphi_2 + I_1 \cdot R_1 = 58,0044 \text{ В.} \\ \varphi_3 &= \varphi_n - E_1 = 3,0044 \text{ В} \\ \varphi_f &= \varphi_3 - I_3 \cdot R_3 = -0,01 \approx 0 \text{ В} \end{aligned}$$

Діаграма подана на рисунку 1.40.

6. Метод вузлових потенціалів

Потенціал одного з вузлів схеми з джерелом струму (рис. 1.41) приймаємо рівним нулю:  $\varphi_4 = 0$ . Система рівнянь відносно потенціалів інших вузлів:

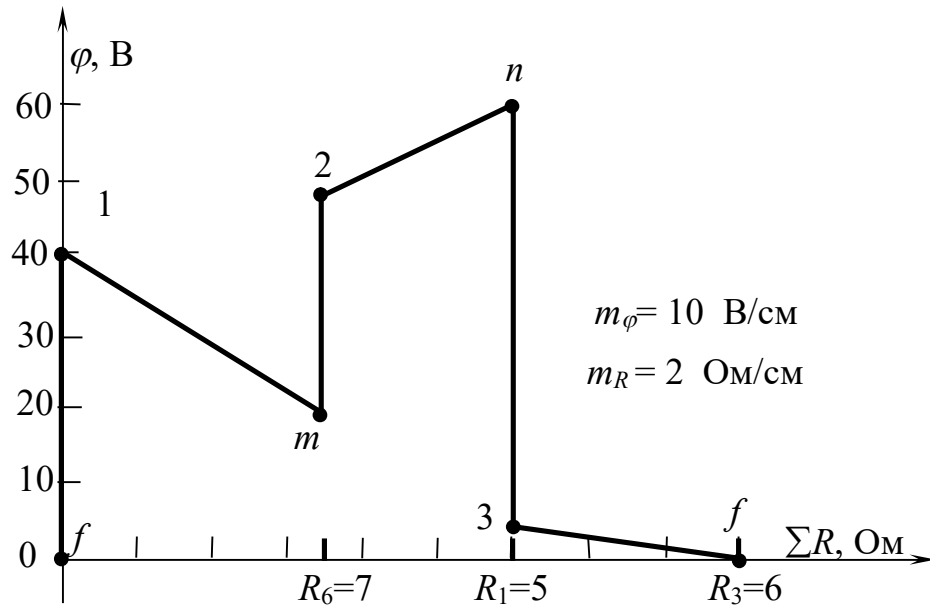


Рисунок 1.40 – Потенціальна діаграма для зовнішнього контуру

$$\begin{cases} \varphi_1 \cdot G_{11} - \varphi_2 \cdot G_{12} - \varphi_3 \cdot G_{13} = \left( \sum_1 \pm E_k \cdot G_k \right) \pm j_k \\ -\varphi_1 \cdot G_{21} + \varphi_2 \cdot G_{22} - \varphi_3 \cdot G_{23} = \left( \sum_2 \pm E_k \cdot G_k \right) \pm j_k \\ -\varphi_1 \cdot G_{31} - \varphi_2 \cdot G_{32} + \varphi_3 \cdot G_{33} = \left( \sum_3 \pm E_k \cdot G_k \right) \pm j_k \end{cases}$$

Визначаємо коефіцієнти лівої частини системи рівнянь за методом:

$$G_{11} = \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6} = 0,4345 \text{ См} - \text{власна провідність } 1 \text{ вузла,}$$

$$G_{22} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_6} = 0,5428 \text{ См} - \text{власна провідність } 2 \text{ вузла,}$$

$$G_{33} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = 0,6167 \text{ См} - \text{власна провідність } 3 \text{ вузла,}$$

$$G_{13} = G_{31} = \frac{1}{R_3} = 0,1667 \text{ См} - \text{взаємна провідність } 1 \text{ та } 3 \text{ вузлів,}$$

$$G_{12} = G_{21} = \frac{1}{R_6} = 0,1428 \text{ См} - \text{взаємна провідність } 1 \text{ та } 2 \text{ вузлів,}$$

$$G_{23} = G_{32} = \frac{1}{R_1} = 0,2 \text{ См} - \text{взаємна провідність } 2 \text{ та } 3 \text{ вузлів.}$$

Визначаємо значення правої частини системи рівнянь (так звані вузлові струми):

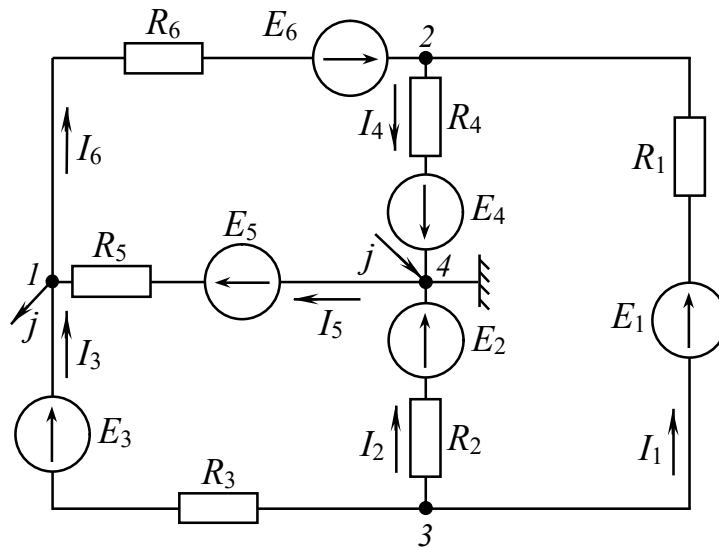


Рисунок 1.41 – Схема для складання системи рівнянь за законами Кірхгофа та розрахунку методом вузлових потенціалів

$$\frac{E_3}{R_3} - \frac{E_6}{R_6} + \frac{E_5}{R_5} - j = \frac{40}{6} - \frac{30}{7} + \frac{50}{8} - 4 = 4,6309 \text{ А} - \text{вузловий струм } I \text{ вузла};$$

$$\frac{E_6}{R_6} - \frac{E_4}{R_4} + \frac{E_1}{R_1} = \frac{30}{7} - \frac{20}{5} + \frac{55}{5} = 11,2857 \text{ А} - \text{вузловий струм } 2 \text{ вузла};$$

$$-\frac{E_1}{R_1} - \frac{E_2}{R_2} - \frac{E_3}{R_3} = -\frac{55}{5} - \frac{30}{4} - \frac{40}{6} = -25,1667 \text{ А} - \text{вузловий струм } 3 \text{ вузла}.$$

З підставленими значеннями коефіцієнтів система набуває вигляду:

$$\begin{cases} \varphi_1 \cdot 0,4345 - \varphi_2 \cdot 0,1428 - \varphi_3 \cdot 0,1667 = 4,6309 \\ -\varphi_1 \cdot 0,1428 + \varphi_2 \cdot 0,5428 - \varphi_3 \cdot 0,2 = 11,2857 \\ -\varphi_1 \cdot 0,1667 - \varphi_2 \cdot 0,2 + \varphi_3 \cdot 0,6167 = -25,1667 \end{cases}$$

З системи знаходимо потенціали вузлів:

$$\varphi_1 = -2,8706 \text{ В}; \quad \varphi_2 = 5,3539 \text{ В}; \quad \varphi_3 = -39,8483 \text{ В}.$$

За законом Ома знаходимо струми:

$$I_1 = \frac{\varphi_3 - \varphi_2 + E_1}{R_1} = \frac{-39,8483 - 5,3539 + 55}{5} = 1,95956 \text{ А};$$

$$I_2 = \frac{\varphi_3 - \varphi_4 + E_2}{R_2} = \frac{-39,8483 - 0 + 30}{4} = -2,4621 \text{ А};$$

$$I_3 = \frac{\varphi_3 - \varphi_1 + E_3}{R_3} = \frac{-39,8483 + 2,8706 + 40}{6} = 0,5037 \text{ А};$$

$$I_4 = \frac{\varphi_2 - \varphi_4 + E_4}{R_4} = \frac{5,3539 - 0 + 20}{5} = 5,071 \text{ A};$$

$$I_5 = \frac{\varphi_4 - \varphi_1 + E_5}{R_5} = \frac{0 + 2,8706 + 50}{8} = 6,6088 \text{ A};$$

$$I_6 = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + E_6}{R_6} = \frac{-2,8706 - 5,3539 + 30}{7} = 3,1108 \text{ A}.$$

7. Розрахунок струму вітки з ЕРС  $E_2$  методом еквівалентного генератора

Робимо розрив у вітці з ЕРС  $E_2$  – рисунок 1.42.

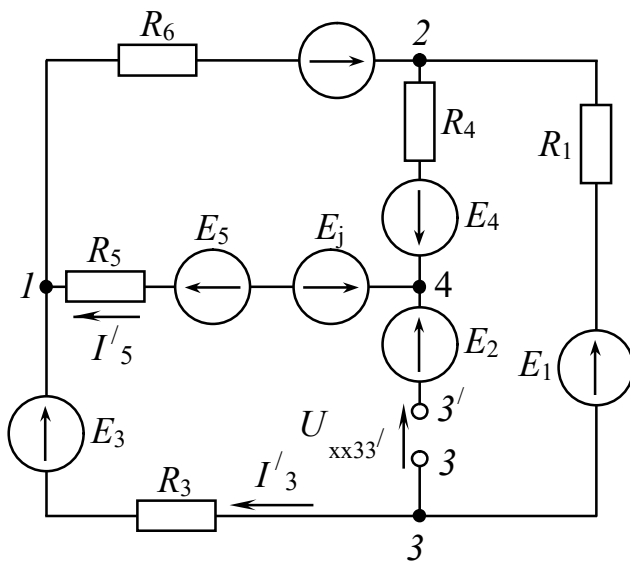


Рисунок 1.42 – Схема з розривом у другій вітці

За методом:  $I_2 = \frac{U_{xx}}{R_{6x} + R_{42}}$ .

Визначаємо напругу холостого ходу  $U_{xx}$  на затискачах розриву.

За другим законом Кірхгофа:

$$E_2 - E_j + E_5 - E_3 = U_{xx} + I'_5 \cdot R_5 - I'_3 \cdot R_3.$$

Тобто:

$$U_{xx33'} = E_2 - E_j + E_5 - E_3 - I'_5 \cdot R_5 + I'_3 \cdot R_3.$$

Знаходимо струми  $I'_5, I'_3$  за методом двох вузлів.

Напруга між вузлами 1 та 2:

$$U_{12xx} = \frac{\frac{E_4 - E_j + E_5}{R_5 + R_4} - \frac{E_6}{R_6} + \frac{E_3 - E_1}{R_1 + R_3}}{\frac{1}{R_5 + R_4} + \frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_1 + R_3}} = \frac{\frac{20 - 32 + 50}{8 + 5} - \frac{30}{7} + \frac{40 - 55}{5 + 6}}{\frac{1}{8 + 5} + \frac{1}{7} + \frac{1}{5 + 6}} = -8,7749 \text{ В};$$

За законом Ома знаходимо струми  $I'_5, I'_3$ :

$$I'_5 = \frac{-U_{12xx} + E_4 + E_5 - E_j}{R_5 + R_4} = \frac{8,7749 + 20 + 50 - 32}{8 + 5} = 3,5981 \text{ A};$$

$$I'_3 = \frac{-U_{12xx} + E_3 - E_1}{R_1 + R_3} = \frac{8,7749 + 40 - 55}{5 + 6} = -0,5659 \text{ A}.$$

Напруга холостого ходу таким чином:

$$U_{xx33'} = 30 - 32 + 50 - 40 - 3,5981 \cdot 8 - 0,5659 \cdot 6 = -24,18 \text{ В}.$$

Визначаємо вхідний опір  $R_{\text{вх}}$  відносно вхідних затискачів 3 та 3'.

Схема для визначення  $R_{\text{вх}}$  представлена на рисунку 1.43, а.

Перетворюємо трикутник опорів  $R_6 - R_5 - R_4$  у еквівалентну зірку опорів  $R_{65} - R_{54} - R_{64}$  - одержимо схему на рисунку 1.43, б):

$$R_{65} = \frac{R_6 \cdot R_5}{R_6 + R_5 + R_4} = \frac{7 \cdot 8}{7 + 8 + 5} = 2,667 \text{ Ом},$$

$$R_{54} = \frac{R_5 \cdot R_4}{R_6 + R_5 + R_4} = \frac{8 \cdot 5}{7 + 8 + 5} = 2 \text{ Ом}, \quad R_{64} = \frac{R_6 \cdot R_4}{R_6 + R_5 + R_4} = \frac{7 \cdot 5}{7 + 8 + 5} = 1,75 \text{ Ом},$$

$$R_{653} = R_{65} + R_3 = 2,667 + 6 = 8,667 \text{ Ом}, \quad R_{641} = R_{64} + R_1 = 1,75 + 5 = 6,75 \text{ Ом}.$$

Таким чином,  $R_{\text{вх}}$  (рисунок 1.43, в):

$$R_{\text{вх}} = R_{54} + \frac{R_{641} \cdot R_{653}}{R_{641} + R_{653}} = 2 + \frac{6,75 \cdot 8,667}{6,75 + 8,667} = 5,795 \text{ Ом}.$$

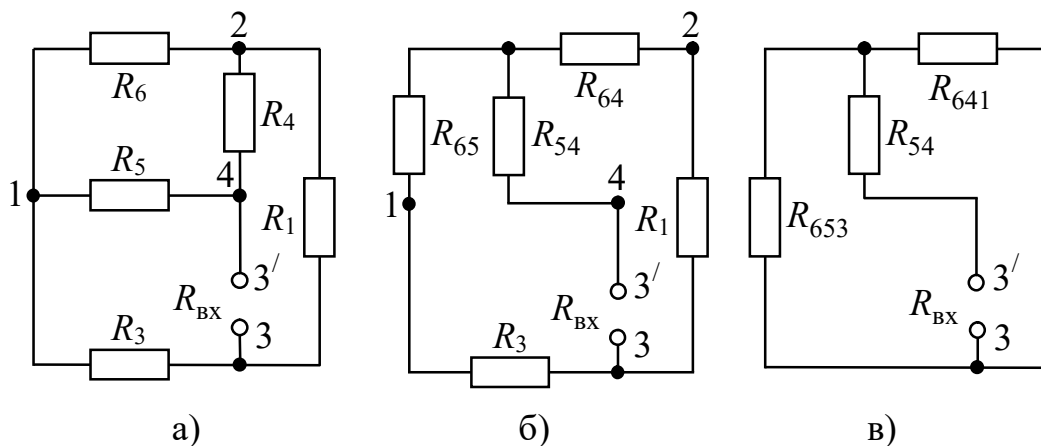


Рисунок 1.43 – Схеми для визначення вхідного опору

$$\text{Остаточно} - I_2 = \frac{U_{\text{вх}}}{R_{\text{вх}} + R_2} = \frac{-24,18}{5,795 + 4} = -2,4686 \text{ А}.$$

#### 8. Показання вольтметрів $V_1$ та $V_2$

Вольтметр  $V_1$  підключений до затискачів 1 та  $m$  (рисунки 1.37 та 1.38), тобто він вимірює напругу  $U_{1m}$ :  $U_{1m} = I_6 \cdot R_6 = 3,11 \cdot 7 = 21,77 \text{ В}$ .

Вольтметр  $V_2$  підключений до затискачів  $n$  та 4 - (рис. 1.37 та 1.38), тобто він вимірює напругу  $U_{n4}$ :

$$U_{n4} = E_1 - E_2 + I_2 \cdot R_2 = 55 - 30 + (-2,462) \cdot 4 = 15,152 \text{ В}.$$

## 9. Порівняльна таблиця результатів розрахунків

Таблиця 1.3 – Порівняльна таблиця результатів розрахунку для розглянутого прикладу

№ п/п	Методи	Струми віток, А						Потенціали вузлів, В				U <sub>xx</sub> , В	R <sub>вх</sub> , Ом	P <sub>дж.</sub> ≈ P <sub>нав.</sub> , Вт	
		I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>	I <sub>3</sub>	I <sub>4</sub>	I <sub>5</sub>	I <sub>6</sub>	φ <sub>1</sub>	φ <sub>2</sub>	φ <sub>3</sub>	φ <sub>4</sub>				
1	Метод контурних струмів	1,9594	-2,4623	0,5029	5,0727	6,6103	3,1133	.	.	.	.	.	.	.	591,1 ≈ 591,05
2	Метод вузлових потенціалів	1,9596	-2,4621	0,5037	5,071	6,6088	3,1108	-2,8706	5,3539	-39,8483	0	.	.	.	
3	Метод еквівалентного генератора	.	-2,4686	.	.	.	.	.	.	.	.	-24,18	5,795	.	
4	Похибка розрахунків (%)	0,01	0,008	0,008	0,159	0,159	0,08	.	.	.	.	.	.	.	

### 1.5 Контрольні запитання

1. Сформулювати закони Кірхгофа та надати порядок розрахунку кола за ними.
2. Охарактеризувати метод контурних струмів, порядок та особливості його використання.
3. Охарактеризувати метод вузлових потенціалів, порядок та особливості його використання.
4. Пояснити, як здійснюється побудування потенціальної діаграми для контуру кола?
5. Навести правила складання балансу для електричних кіл, що містять джерела струму та джерела ЕРС.
6. Дати визначення двополюснику. Сформулювати теорему про активний двополюсник.
7. Пояснити, як розраховують струм однієї вітки за методом активного двополюсника (еквівалентного генератора).
8. Порівняти методи розрахунку кіл постійного струму.



## 2 ДРУГА ЧАСТИНА РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ

### «РОЗРАХУНОК РОЗГАЛУЖЕНОГО КОЛА СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ»

#### 2.1 Мета роботи

Метою виконання другої частини РГР є:

- вивчити комплексний метод розрахунку електричного кола синусоїдного струму;
- навчитися складати баланс активних та реактивних потужностей для кіл синусоїдного струму;
- вивчити методику побудування векторно-топографічних та кругових діаграм;
- вивчити методику визначення коефіцієнтів чотиріполюсника розрахунковим методом.

#### 2.2 Підготовка до роботи

- накреслити схему кола відповідно до свого варіанта (рис. 2.1÷2.36),
- числові дані елементів схем узяти з таблиці 2.1 відповідно до факультету та номеру групи (визначає викладач);
- у схемі кола позначити напрямки струмів у вітках.

#### 2.3 Робоче завдання на другу частину РГР

Пункти робочого завдання:

- 1) скласти систему рівнянь за законами Кірхгофа в комплексній формі для досліджуваного кола;
- 2) символічним (комплексним) методом визначити струми в усіх вітках, а також напругу на змінному опорі;
- 3) скласти баланс активних та реактивних потужностей;
- 4) для схеми, що задана, побудувати векторну діаграму струмів та векторно-топографічну діаграму напруг;
- 5) записати вирази миттєвих значень ЕРС  $e(\omega t)$  та загального струму  $i(\omega t)$ , побудувати сумісні графіки залежностей цих величин від часу;
- 6) побудувати кругову діаграму для струму другої вітки за зміни модуля опору в вітці зі струмом  $I_5$ ;
- 7) визначити коефіцієнти  $T$ -образного чотиріполюсника відносно його вхідного струму  $I_2$  (струм  $I_5$  – вихідний), записати основні рівняння чотиріполюсника (А-форма), зробити перевірку для вихідних даних свого варіанта.

Примітка: за вказівкою викладача виконується 6) або 7) пункт.

## 2.4 Порядок та методика проведення розрахунків

### 1. Визначення струмів у вітках символічним методом

Спочатку визначають комплексні опори віток, а потім складають розрахункову схему з комплексними опорами. За допомогою еквівалентних перетворень у схемі та закону Ома символічним методом визначають комплекси струмів.

### 2. Складання балансу активних та реактивних потужностей.

Спочатку визначають повну, активну, реактивну потужності кожної вітки, а потім повну, активну, реактивну потужності всього кола.

Розходження між активною потужністю джерела енергії та активною потужністю навантаження не повинно перевищувати 5 %. Аналогічно – для реактивної потужності.

### 3. Побудування векторної діаграми струмів та векторно-топографічної діаграми напруг.

Спочатку на комплексній площині будують векторну діаграму струмів та, користуючись напрямками цих струмів, будують векторно-топографічну діаграму напруг, відображаючи потенціали усіх точок схеми.

### 4. Побудування кругової діаграми для струму другої вітки за зміни модуля опору в вітці зі струмом $I_5$ в межах від нуля до нескінченності ( $\infty$ ). Опір, що змінюється, позначений на схемі стрілкою.

Досліджувана схема подається у вигляді  $T$ -образного чотиріполюсника, після чого визначаються усі комплексні величини, що входять у рівняння кругової діаграми чотиріполюсника. Струм другої вітки, отриманий за розрахунком символічним методом, порівнюють зі струмом цієї ж вітки, що отриманий з рівняння кругової діаграми та з самої кругової діаграми.

Для визначення коефіцієнтів  $T$ -образного чотиріполюсника досліджувана схема подається у вигляді  $T$ -образного чотиріполюсника; після чого визначають усі комплексні величини, що входять у рівняння для визначення коефіцієнтів чотиріполюсника та роблять перевірку за основним співвідношенням коефіцієнтів. Записують  $A$ -форму основних рівнянь чотиріполюсника, у яку підставляють значення  $\underline{E} = \underline{U}_1$  та струму  $I_2$ , що отримані розрахунком символічним методом (у результаті такої підстановки повинні бути отримані такі ж самі значення  $\underline{U}_{cb}$  та струму  $I_5$ , як і символічним методом).

Приклад розрахунку (підрозділ 2.5) наведений нижче.

Таблиця 2.1 – Вихідні дані для розрахунку

Позначення на схемах	Числові дані												
	Факультет електропостачання та освітлення міст						Факультет транспортних систем та технологій						
	Номери груп						Номери груп						
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>
$R_1, \text{ Ом}$	4	6	6	8	10	100	12	20	40	3	40	20	80
$R_2, \text{ Ом}$	5	4	8	8	12	30	14	34	30	4	20	10	20
$R_3, \text{ Ом}$	2	4	6	6	8	30	4	16	24	3	10	5	15
$R_4, \text{ Ом}$	8	5	4	2	10	40	8	14	20	5	30	10	30
$R_5, \text{ Ом}$	6	8	5	4	6	80	6	20	26	6	20	15	40
$L_1, \text{ мГ}$	20	30	40	4	6	2	2	10	3	30	10	20	4
$L_2, \text{ мГ}$	30	50	10	6	4	4	8	8	10	40	50	30	10
$L_3, \text{ мГ}$	10	20	60	4	8	5	5	4	2	20	30	20	10
$L_4, \text{ мГ}$	20	30	50	8	6	6	4	6	5	50	40	40	12
$L_5, \text{ мГ}$	10	40	20	2	10	8	8	5	8	60	20	50	15
$C_1, \text{ мкФ}$	200	200	300	40	90	20	20	50	10	300	100	200	30
$C_2, \text{ мкФ}$	250	300	200	30	40	30	100	30	14	200	200	150	60
$C_3, \text{ мкФ}$	400	300	200	36	80	20	50	10	20	400	300	150	40
$C_4, \text{ мкФ}$	300	400	300	20	70	40	40	20	24	250	100	300	60
$C_5, \text{ мкФ}$	150	200	400	60	100	40	80	40	16	300	400	200	50
$E, \text{ В}$	100	100	220	200	200	1000	200	240	280	400	50	40	660
$\varphi_E, \text{ град}$	30	45	60	90	30	90	45	60	90	30	45	60	30
$f, \text{ Гц}$	50	50	50	400	400	500	500	500	500	50	50	50	50

Варіанти електричних схем

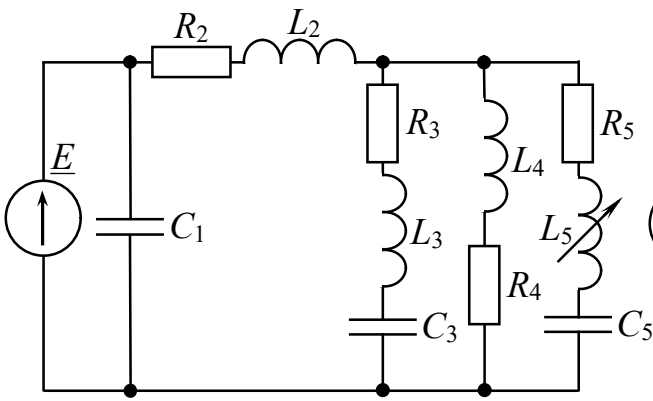


Рисунок 2.1 – Варіант № 1

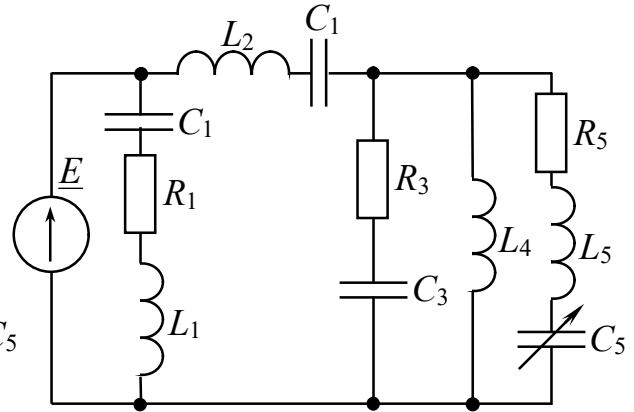


Рисунок 2.2 – Варіант № 2

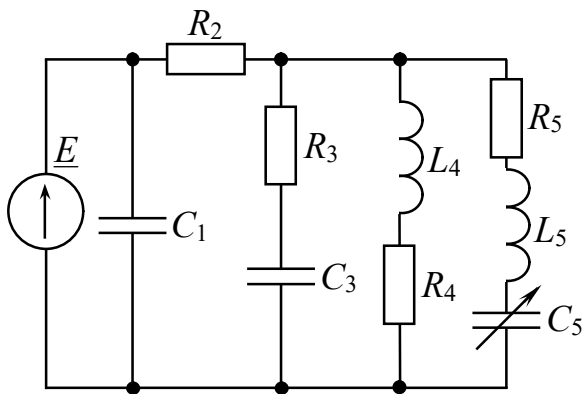


Рисунок 2.3 – Варіант № 3

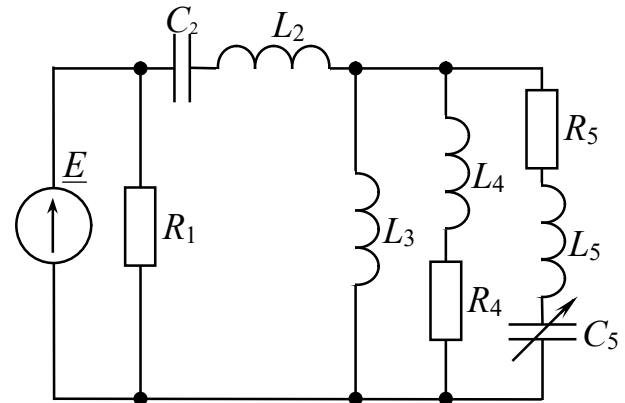


Рисунок 2.4 – Варіант № 4

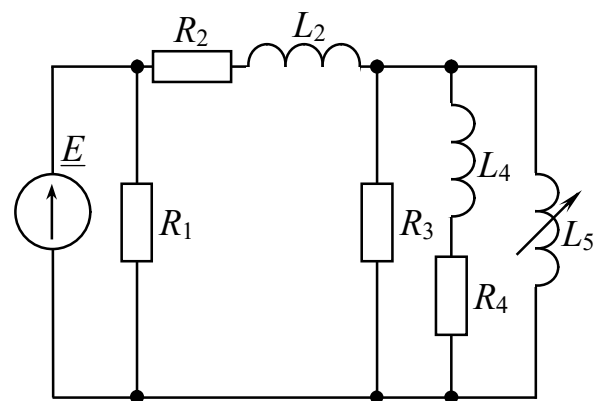


Рисунок 2.5 – Варіант № 5

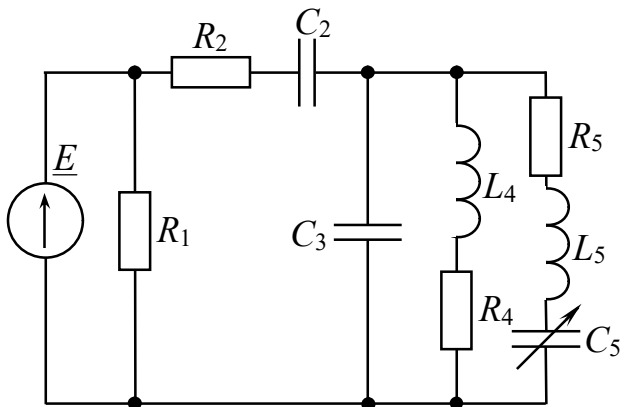


Рисунок 2.6 – Варіант № 6

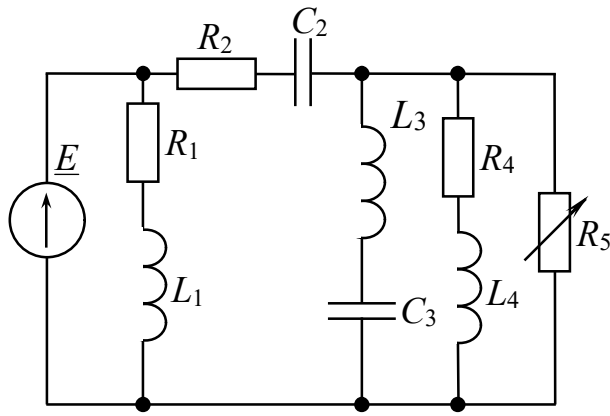


Рисунок 2.7 – Варіант № 7

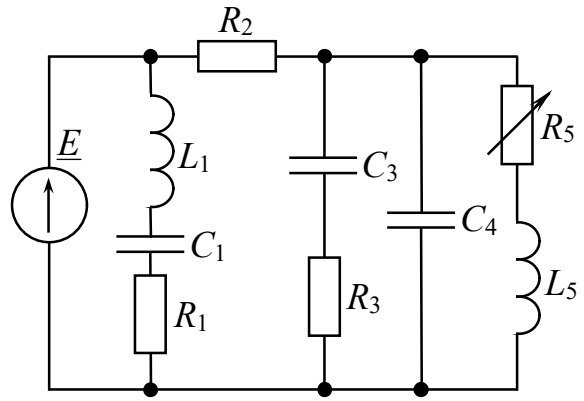


Рисунок 2.8 – Варіант № 8

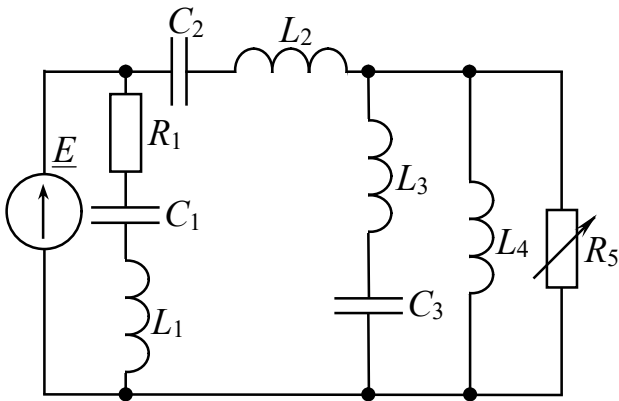


Рисунок 2.9 – Варіант № 9

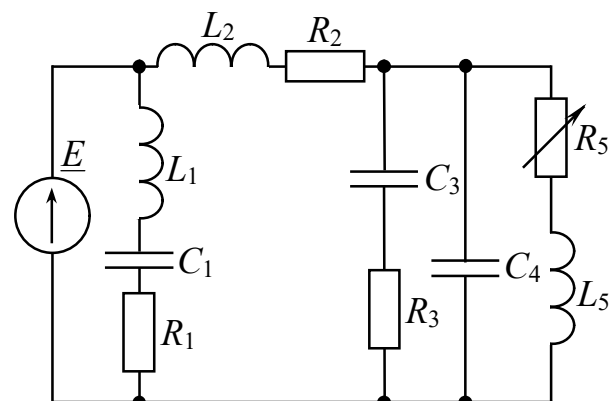


Рисунок 2.10 – Варіант № 10

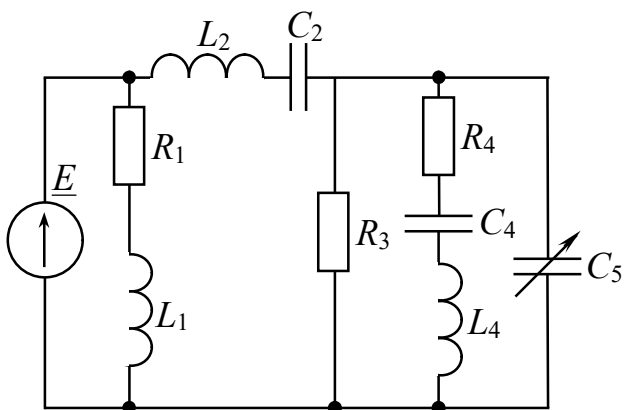


Рисунок 2.11 – Варіант № 11

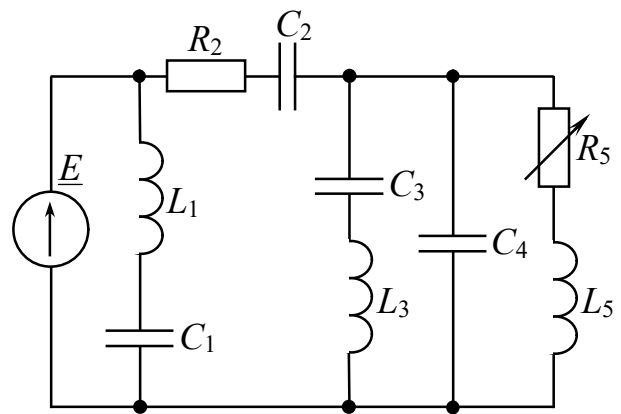


Рисунок 2.12 – Варіант № 12

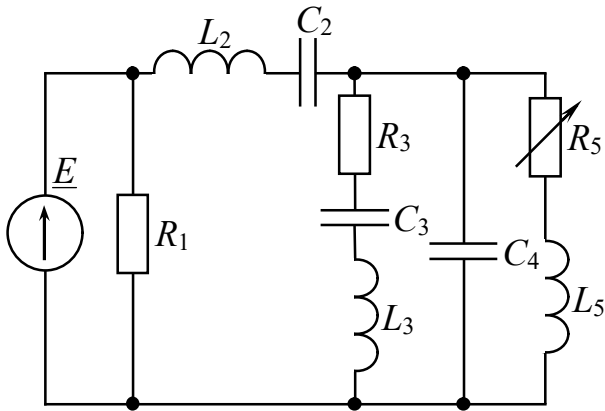


Рисунок 2.13 – Варіант № 13

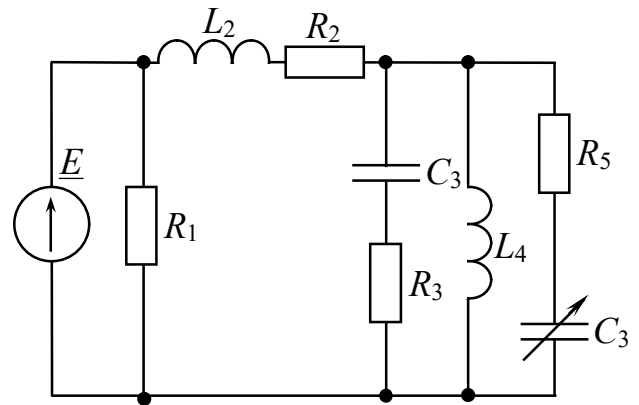


Рисунок 2.14 – Варіант № 14

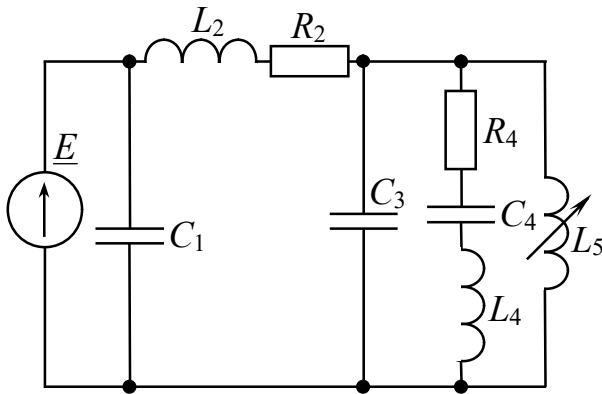


Рисунок 2.15 – Варіант № 15

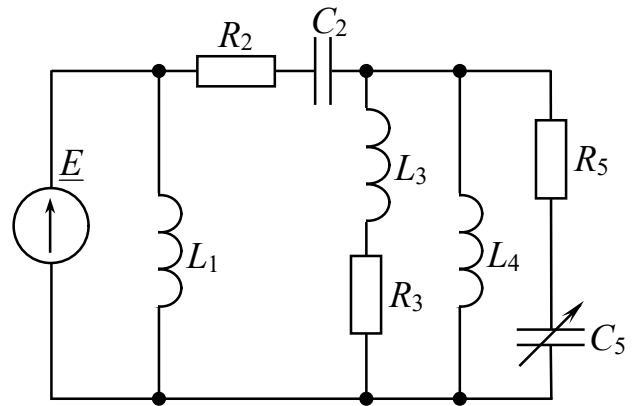


Рисунок 2.16 – Варіант № 16

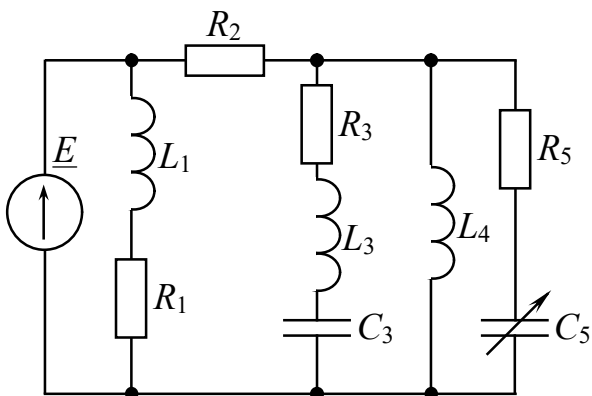


Рисунок 2.17 – Варіант № 17

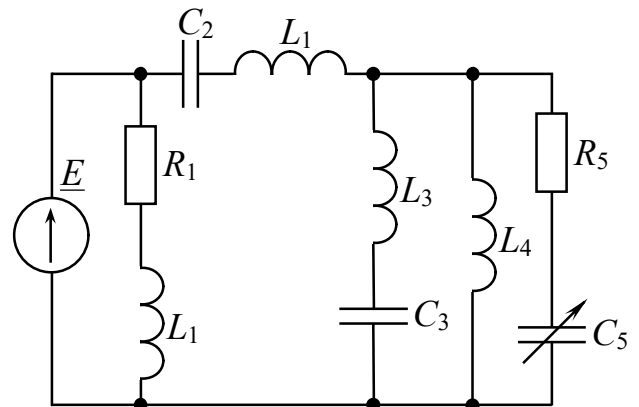


Рисунок 2.18 – Варіант № 18

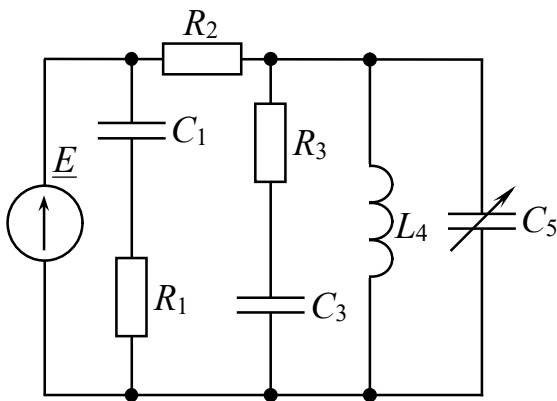


Рисунок 2.19 – Вариант № 19

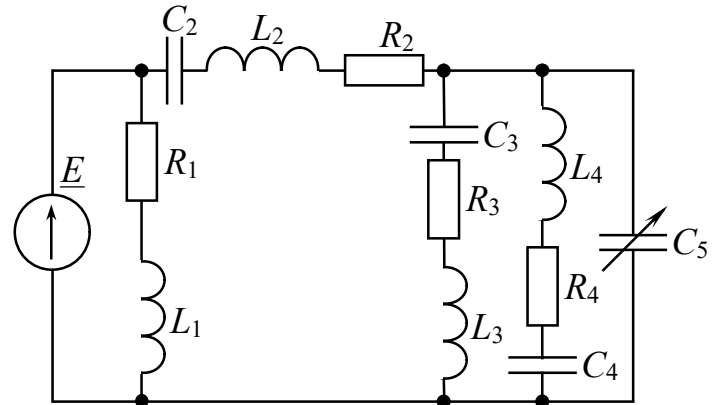


Рисунок 2.20 – Вариант № 20

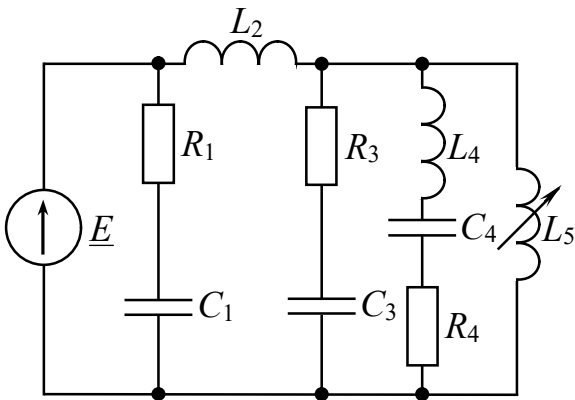


Рисунок 2.21 – Вариант № 21

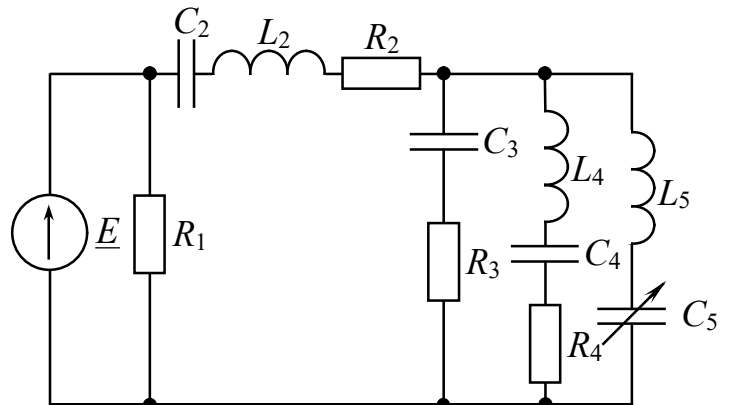


Рисунок 2.22 – Вариант № 22

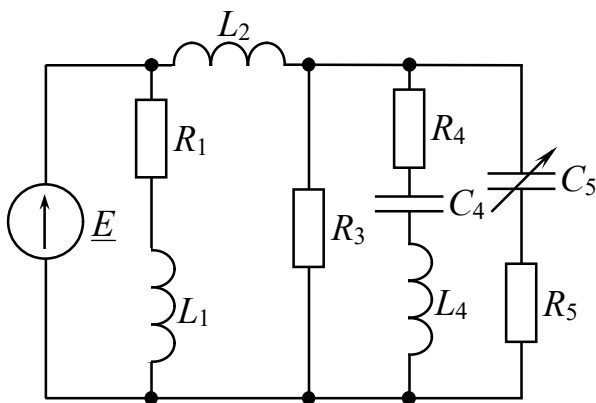


Рисунок 2.23 – Вариант № 23

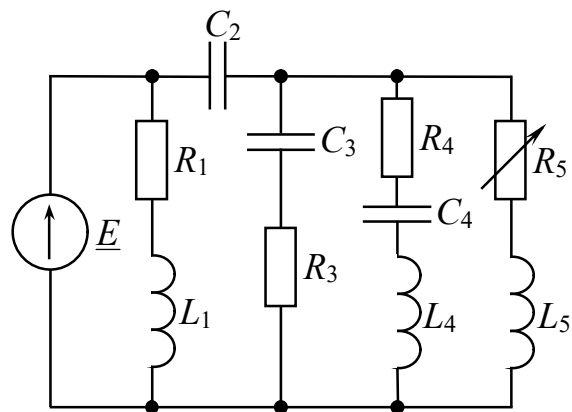


Рисунок 2.24 – Вариант № 24

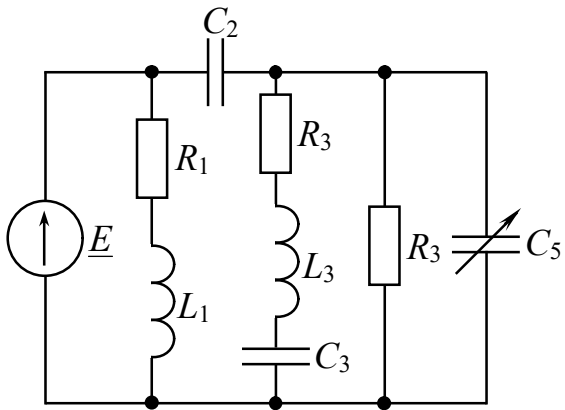


Рисунок 2.25 – Вариант № 25

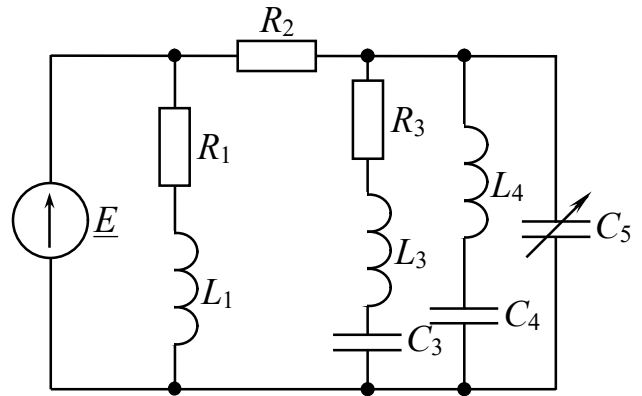


Рисунок 2.26 – Вариант № 26

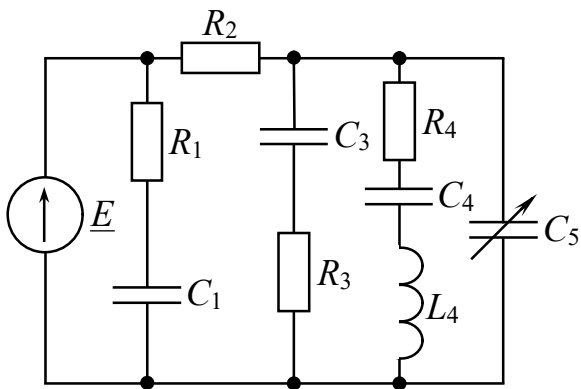


Рисунок 2.27 – Вариант № 27

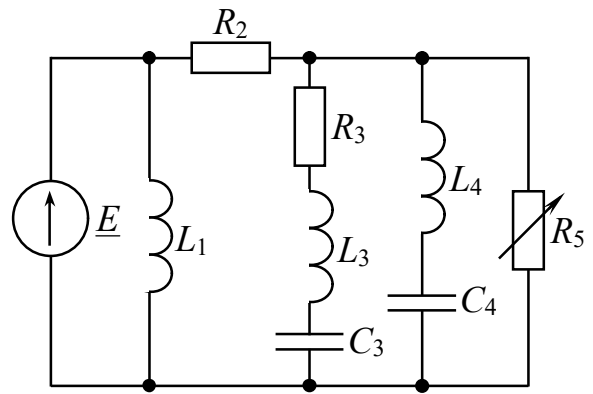


Рисунок 2.28 – Вариант № 28

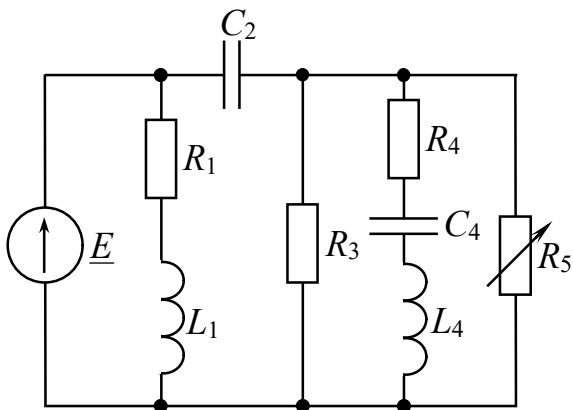


Рисунок 2.29 – Вариант № 29

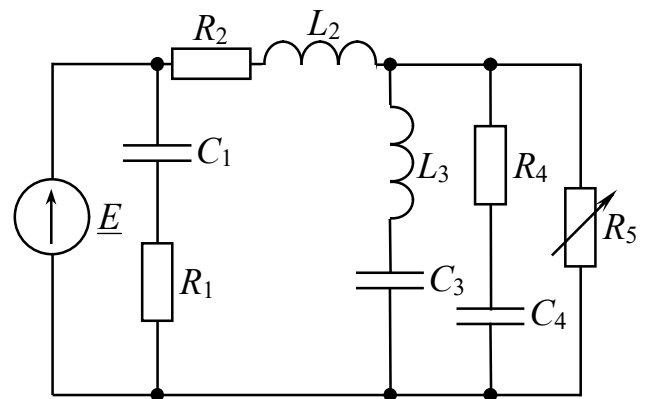


Рисунок 2.30 – Вариант № 30



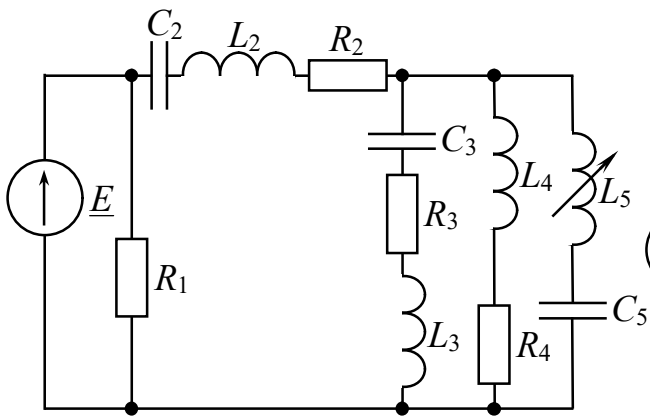


Рисунок 2.31 – Варіант № 31

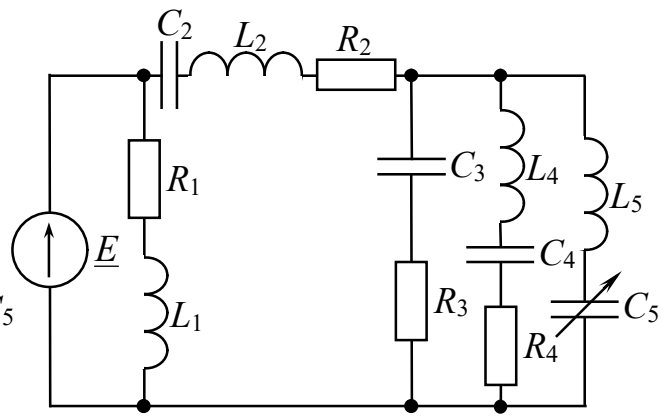


Рисунок 2.32 – Варіант № 32

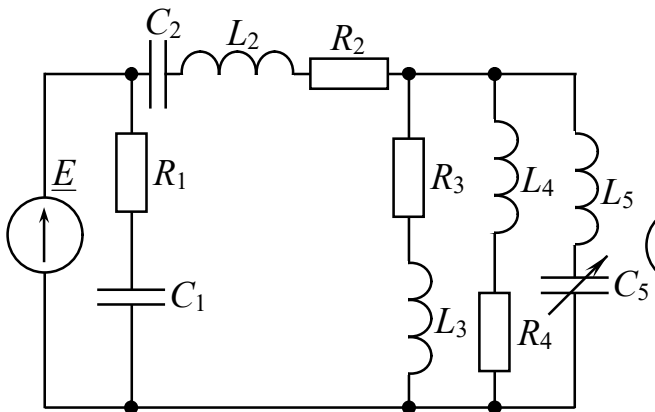


Рисунок 2.33 – Варіант № 33

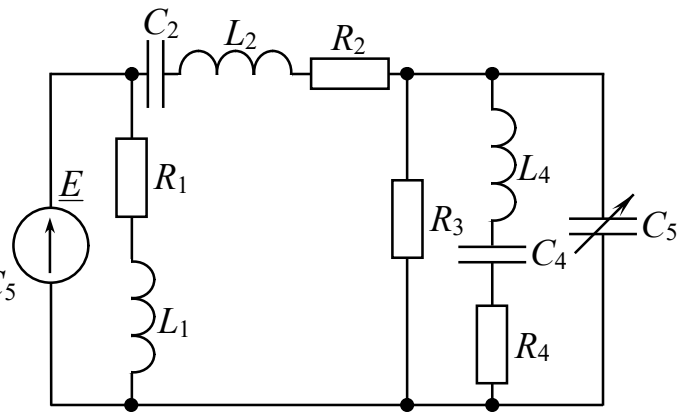


Рисунок 2.34 – Варіант № 34

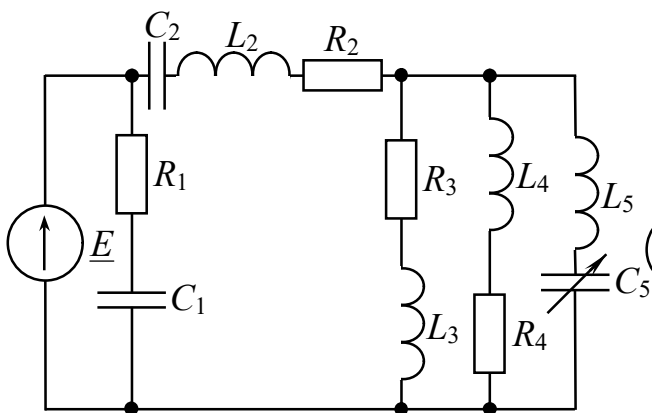


Рисунок 2.35 – Варіант № 35

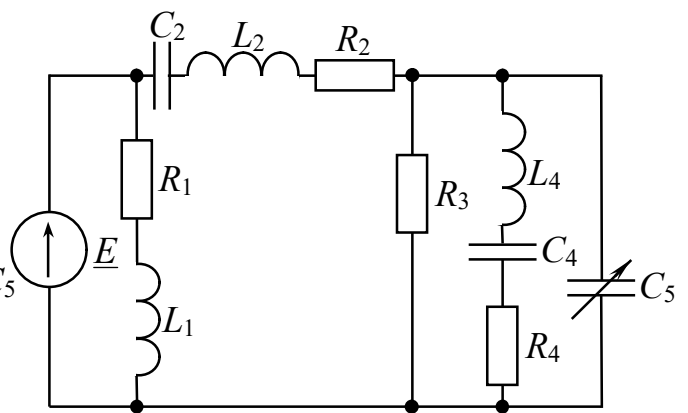


Рисунок 2.36 – Варіант № 36

## 2.5 Приклад розрахунку

Розглянемо розрахунок на прикладі схеми рисунку 2.37.

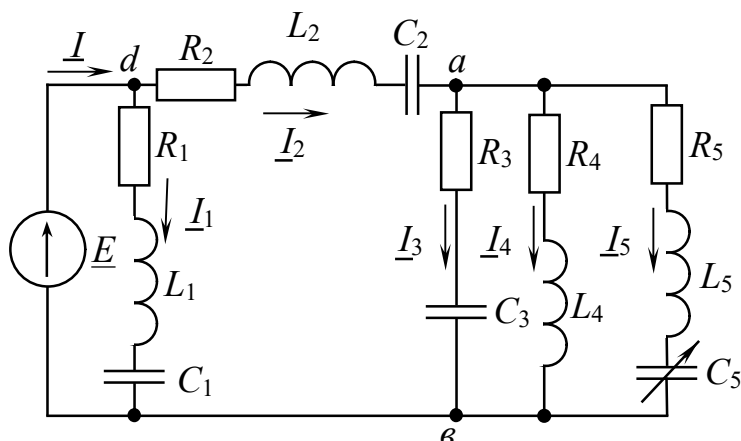


Рисунок 2.37 – Схема варіанту № 37

Вихідні дані для розрахунку:

$R_1=10$  Ом,  $R_2=12$  Ом,  
 $R_3=8$  Ом,  $R_4=10$  Ом,  $R_5=6$  Ом,  
 $E=200$  В,  $\varphi_E=30^\circ$ ,  
 $f=400$  Гц,  $L_1=6$  мГн,  $L_2=4$  мГн,  
 $L_4=6$  мГн,  $L_5=6$  мГн,  
 $C_1=90$  мкФ,  $C_2=40$  мкФ,  
 $C_3=80$  мкФ,  $C_5=100$  мкФ.

1. Складаємо систему рівнянь за законами Кірхгофа в комплексній формі для досліджуваного кола.

$$\begin{cases} \underline{I} - \underline{I}_1 - \underline{I}_2 = 0 \\ \underline{I}_2 - \underline{I}_3 - \underline{I}_4 - \underline{I}_5 = 0 \\ \underline{I}_1 \cdot \left( R_1 + j \cdot \left( \omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} \right) \right) = \underline{E} \\ -\underline{I}_1 \cdot \left( R_1 + j \cdot \left( \omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} \right) \right) + \underline{I}_2 \cdot \left( R_2 + j \cdot \left( \omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2} \right) \right) + \underline{I}_3 \cdot \left( R_3 + j \cdot \left( -\frac{1}{\omega C_3} \right) \right) = 0 \\ -\underline{I}_3 \cdot \left( R_3 + j \cdot \left( -\frac{1}{\omega C_3} \right) \right) + \underline{I}_4 \cdot (R_4 + j \cdot \omega L_4) = 0 \\ -\underline{I}_4 \cdot (R_4 + j \cdot \omega L_4) + \underline{I}_5 \cdot \left( R_5 + j \cdot \left( \omega L_5 - \frac{1}{\omega C_5} \right) \right) = \underline{E} \end{cases}$$

2. Визначаємо комплексні опори кожної вітки

Кутова частота:  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot 3,14 \cdot 400 = 2512$  (рад/с).

Комплексні опори віток:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_1 &= R_1 + j \cdot \left( \omega \cdot L_1 - \frac{1}{\omega \cdot C_1} \right) = 10 + j \cdot \left( 2512 \cdot 6 \cdot 10^{-3} - \frac{1}{2512 \cdot 90 \cdot 10^{-6}} \right) = \\ &= 10 + j \cdot (15,07 - 4,42) = 10 + j \cdot 10,65 = 14,61 \cdot e^{j \cdot 46,8^\circ} \text{ Ом;} \end{aligned}$$

$$\underline{Z}_2 = R_2 + j \cdot \left( \omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2} \right) = 12 + j \cdot \left( 2512 \cdot 4 \cdot 10^{-3} - \frac{1}{2512 \cdot 40 \cdot 10^{-6}} \right) =$$

$$= 12 + j \cdot (10,05 - 9,95) = 12 + j \cdot 0,1 = 12,0004 \cdot e^{j \cdot 0,48^\circ} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_3 = R_3 - j \cdot \frac{1}{\omega \cdot C_3} = 8 - j \cdot \frac{1}{2512 \cdot 80 \cdot 10^{-6}} = 8 - j \cdot 4,98 = 9,42 \cdot e^{-j \cdot 31,9^\circ} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_4 = R_4 + j \cdot \omega \cdot L_4 = 10 + j \cdot 2512 \cdot 6 \cdot 10^{-3} = 10 + j \cdot 15,07 = 18,09 \cdot e^{j \cdot 56,4^\circ} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_5 = R_5 + j \cdot \left( \omega \cdot L_5 - \frac{1}{\omega \cdot C_5} \right) = 6 + j \cdot \left( 2512 \cdot 6 \cdot 10^{-3} - \frac{1}{2512 \cdot 100 \cdot 10^{-6}} \right) =$$

$$= 6 + j \cdot (15,07 - 3,98) = 6 + j \cdot 11,09 = 12,61 \cdot e^{j \cdot 61,6^\circ} \text{ Ом}.$$

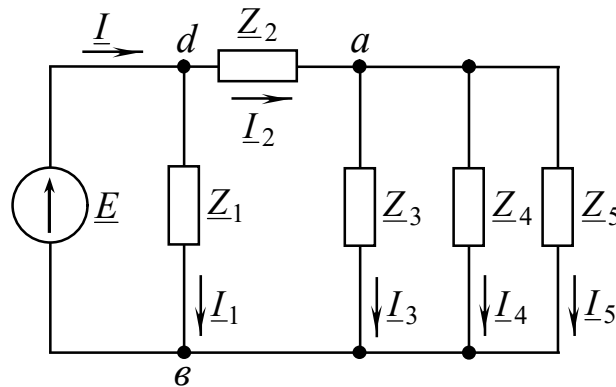


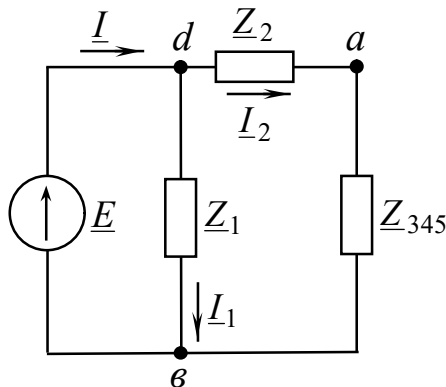
Рисунок 2.38 – Розрахункова схема

3. Визначаємо струми в вітках для розрахункової схеми (рис. 2.38)

Проводимо заміну паралельного з'єднання опорів  $\underline{Z}_3, \underline{Z}_4, \underline{Z}_5$  еквівалентним опором  $\underline{Z}_{345}$ :

$$\underline{Z}_{34} = \frac{\underline{Z}_3 \cdot \underline{Z}_4}{\underline{Z}_3 + \underline{Z}_4} = \frac{9,42 \cdot e^{j \cdot (-31,9)^\circ} \cdot 18,09 \cdot e^{j \cdot 56,4^\circ}}{8 - j \cdot 4,98 + 10 + j \cdot 15,07} = \frac{170,41 \cdot e^{j \cdot 24,5^\circ}}{18 + j \cdot 10,09} = \frac{170,41 \cdot e^{j \cdot 24,5^\circ}}{20,635 \cdot e^{j \cdot 29,273^\circ}} =$$

$$= 8,258 \cdot e^{j \cdot (-4,77)^\circ} = 8,22 - j \cdot 0,686 \text{ Ом}.$$



$$\underline{Z}_{345} = \frac{\underline{Z}_{34} \cdot \underline{Z}_5}{\underline{Z}_{34} + \underline{Z}_5} = \frac{8,258 \cdot e^{j \cdot (-4,77)^\circ} \cdot 12,61 \cdot e^{j \cdot 61,6^\circ}}{8,22 - j \cdot 0,686 + 6 + j \cdot 11,09} =$$

$$= \frac{104,13 \cdot e^{j \cdot 56,83^\circ}}{14,22 + j \cdot 10,404} = \frac{104,13 \cdot e^{j \cdot 56,83^\circ}}{17,62 \cdot e^{j \cdot 36,2^\circ}} =$$

$$= 5,91 \cdot e^{j \cdot 20,63^\circ} = 5,53 + j \cdot 2,08 \text{ Ом}.$$

Після заміни схема набуває вигляду – рисунок 2.39.

Рисунок 2.39 – Розрахункова схема після перетворення

Опір  $\underline{Z}_{345}$  можна також розрахувати наступним чином:

$$- \underline{Y}_3 = \frac{1}{\underline{Z}_3}; \underline{Y}_4 = \frac{1}{\underline{Z}_4}; \underline{Y}_5 = \frac{1}{\underline{Z}_5} \text{ – провідності паралельних віток, См;}$$

$$- \underline{Y}_{345} = \underline{Y}_3 + \underline{Y}_4 + \underline{Y}_5 \text{ – еквівалентна провідність паралельних віток, См;}$$

$$- \underline{Z}_{345} = \frac{1}{\underline{Y}_{345}} \text{ – еквівалентний опір паралельних віток, Ом.}$$

$$\text{За законом Ома: } \underline{I}_1 = \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_1} = \frac{200 \cdot e^{j30^\circ}}{14,61 \cdot e^{j46,8^\circ}} = 13,69 \cdot e^{j(-16,8)^\circ} = 13,11 - j \cdot 3,96 \text{ А;}$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_2 &= \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_{345}} = \frac{200 \cdot e^{j30^\circ}}{12 + j \cdot 0,1 + 5,53 + j \cdot 2,08} = \frac{200 \cdot e^{j30^\circ}}{17,53 + j \cdot 2,18} = \frac{200 \cdot e^{j30^\circ}}{17,665 \cdot e^{j7,09^\circ}} = \\ &= 11,32 \cdot e^{j22,91^\circ} = 10,427 + j \cdot 4,406 \text{ А.} \end{aligned}$$

Загальний струм за першим законом Кірхгофа:

$$\underline{I} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 = 13,11 - j \cdot 3,96 + 10,427 - j \cdot 4,406 = 23,537 + j \cdot 0,446 = 23,541 \cdot e^{j1,085^\circ} \text{ А,}$$

Або за законом Ома:

$$\underline{I} = \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_{12345}} = \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_1 \cdot (\underline{Z}_2 + \underline{Z}_{345})} = 23,537 + j \cdot 0,446 = 23,541 \cdot e^{j1,085^\circ} \text{ А.}$$

За законом Ома:

$$\underline{U}_{av} = \underline{I}_2 \cdot \underline{Z}_{345} = 11,32 \cdot e^{j22,91^\circ} \cdot 5,91 \cdot e^{j20,63^\circ} = 66,9 \cdot e^{j43,54^\circ} = 48,49 + j \cdot 46,08 \text{ В.}$$

$$\underline{I}_3 = \frac{\underline{U}_{av}}{\underline{Z}_3} = \frac{66,96 \cdot e^{j43,54^\circ}}{9,42 \cdot e^{j(-31,9)^\circ}} = 7,108 \cdot e^{j75,44^\circ} = 1,78 + j \cdot 6,88 \text{ А.}$$

$$\underline{I}_4 = \frac{\underline{U}_{av}}{\underline{Z}_4} = \frac{66,96 \cdot e^{j43,54^\circ}}{18,09 \cdot e^{j56,4^\circ}} = 3,701 \cdot e^{j(-12,86)^\circ} = 3,608 - j \cdot 0,823 \text{ А.}$$

$$\underline{I}_5 = \frac{\underline{U}_{av}}{\underline{Z}_5} = \frac{66,96 \cdot e^{j43,54^\circ}}{12,61 \cdot e^{j61,6^\circ}} = 5,31 \cdot e^{j(-18,06)^\circ} = 5,048 - j \cdot 1,646 \text{ А.}$$

Напруга на змінному ємнісному опорі:

$$\underline{U}_{cb} = \underline{I}_5 \cdot X_{C_5} \cdot e^{j(-90)^\circ} = 5,31 \cdot e^{j(-18,06)^\circ} \cdot 3,98 \cdot e^{j(-90)^\circ} = 21,13 \cdot e^{j(-108,06)^\circ} \text{ В.}$$

Перевірка за першим законом Кірхгофа:

$$\underline{I}_2 = \underline{I}_3 + \underline{I}_4 + \underline{I}_5 = 1,78 + j \cdot 6,88 + 3,608 - j \cdot 0,823 + 5,048 - j \cdot 1,646 = 10,436 + j \cdot 4,41 = 11,329 \cdot e^{j \cdot 22,9^\circ} \text{ А.}$$

$$10,436 \approx 10,427 \text{ А}; \quad 4,41 \approx 4,406 \text{ А.}$$

#### 4. Баланс реактивних та активних потужностей

Комплекс повної потужності для першої вітки:

$$\tilde{S}_1 = \underline{E} \cdot \underline{I}_1^* = 200 \cdot e^{j \cdot 30^\circ} \cdot 13,69 \cdot e^{j \cdot 16,8^\circ} = 2738 \cdot e^{j \cdot 46,8^\circ} = 1874,29 + j \cdot 1995,9 \text{ ВА.}$$

Активна потужність –  $P_1 = 1874,29$  Вт, реактивна потужність

$$Q_1 = 1995,9 \text{ ВАр.}$$

Комплекс повної потужності для другої вітки:

$$\begin{aligned} \tilde{S}_2 &= (\underline{E} - \underline{U}_{ab}) \cdot \underline{I}_2^* = \underline{U}_{da} \cdot \underline{I}_2^* = I_2^2 \cdot \underline{Z}_2 = (200 \cdot e^{j \cdot 30^\circ} - 66,9 \cdot e^{j \cdot 43,54^\circ}) \cdot 11,32 \cdot e^{j \cdot (-22,91)^\circ} = \\ &= (173,2 + j \cdot 100 - 48,49 - j \cdot 46,08) \cdot 11,32 \cdot e^{j \cdot (-22,91)^\circ} = (124,71 + j \cdot 53,92) \cdot \\ &\cdot 11,32 \cdot e^{j \cdot (-22,91)^\circ} = 135,86 \cdot e^{j \cdot 23,38^\circ} \cdot 11,32 \cdot e^{j \cdot (-22,91)^\circ} = \\ &= 1537,93 \cdot e^{j \cdot 0,47^\circ} = 1537,88 + j \cdot 12,61 \text{ ВА.} \end{aligned}$$

Активна потужність –  $P_2 = 1537,88$  Вт, реактивна потужність –

$$Q_2 = 12,61 \text{ ВАр.}$$

Комплекс повної потужності для третьої вітки:

$$\begin{aligned} \tilde{S}_3 &= \underline{U}_{ab} \cdot \underline{I}_3^* = 66,9 \cdot e^{j \cdot 43,54^\circ} \cdot 7,108 \cdot e^{j \cdot (-75,44)^\circ} = 475,52 \cdot e^{j \cdot (-31,99)^\circ} = \\ &= 403,703 - j \cdot 251,28 \text{ ВА.} \end{aligned}$$

Активна потужність –  $P_3 = 403,703$  Вт, реактивна потужність –

$$Q_3 = -251,28 \text{ ВАр.}$$

Комплекс повної потужності для четвертої вітки:

$$\begin{aligned} \tilde{S}_4 &= \underline{U}_{ab} \cdot \underline{I}_4^* = 66,9 \cdot e^{j \cdot 43,54^\circ} \cdot 3,701 \cdot e^{j \cdot 12,86^\circ} = 247,6 \cdot e^{j \cdot 56,54^\circ} = \\ &= 137,019 + j \cdot 206,23 \text{ ВА.} \end{aligned}$$

Активна потужність  $P_4 = 137,019$  Вт; реактивна потужність –

$$Q_4 = 206,23 \text{ ВАр.}$$

Комплекс повної потужності для п'ятої вітки:

$$\begin{aligned} \tilde{S}_5 &= \underline{U}_{ab} \cdot \underline{I}_5^* = 66,9 \cdot e^{j \cdot 43,54^\circ} \cdot 5,31 \cdot e^{j \cdot 18,06^\circ} = 355,24 \cdot e^{j \cdot 61,6^\circ} = \\ &= 168,96 + j \cdot 312,48 \text{ ВА.} \end{aligned}$$

Активна потужність –  $P_5 = 168,96$  Вт ; реактивна потужність –  $Q_5 = 312,48$  ВАр.

Комплекс повної потужності для всього кола:

$$\begin{aligned}\tilde{S} &= \underline{E} \cdot \underline{I}^* = 200 \cdot e^{j \cdot 30^\circ} \cdot 23,541 \cdot e^{j \cdot (-1,085)^\circ} = 4708,2 \cdot e^{j \cdot 28,915^\circ} = \\ &= 4121,465 + j \cdot 2276,109 \text{ ВА.}\end{aligned}$$

Активна потужність –  $P = 4121,465$  Вт ; реактивна потужність –  $Q = 2276,11$  ВАр.

Перевіряємо баланс активних потужностей:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 = 1874,29 + 1537,88 + 403,703 + 137,019 + 168,96 = 4121,852 \text{ Вт.}$$

$$4121,465 \approx 4121,852, \text{ Вт.}$$

Розходження – 0,009%.

Перевіряємо баланс реактивних потужностей:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 = 1995,9 + 12,61 - 251,28 + 206,23 + 312,48 = 2275,94 \text{ ВАд.}$$

$$2276,11 \approx 2275,94, \text{ ВАр.}$$

Розходження – 0,007 %.

## 5. Побудова векторно-топографічної діаграми

Будуємо на комплексній площині в обраному масштабі усі струми відповідно до їх напрямків відносно осі дійсних чисел. Якщо, наприклад, обраний масштаб за струмом –  $m_1 = 1,5 \frac{\text{А}}{\text{см}}$ , то вектор струму  $\underline{I}_1$  має довжину 9,12 см і розташований під кутом « $-16,8^\circ$ » до осі дійсних чисел.

Позначаємо точки на схемі між елементами (рис. 2.40). Нехай потенціал точки «в» дорівнює нулю ( $\varphi_{\text{в}} = 0$ ), тому розташовуємо точку «в» у початку координат на комплексній площині.

Для вітки «ав»: вектор напруги  $\underline{U}_{\text{ав}} = \varphi_{\text{а}} - \varphi_{\text{в}} = \underline{I}_3 \cdot \underline{X}_{C_3}$  відстає від вектора струму  $\underline{I}_3$  на кут  $90^\circ$  за фазою, а вектор напруги  $\underline{U}_{\text{ал}} = \varphi_{\text{а}} - \varphi_{\text{л}} = \underline{I}_3 \cdot R_3$  співпадає з вектором струму  $\underline{I}_3$  за фазою.

Для вітки «afe»: вектор напруги  $\underline{U}_{fb} = \varphi_f - \varphi_b = \underline{I}_4 \cdot \underline{X}_{L_4}$  випереджає вектор струму  $\underline{I}_4$  на кут  $90^\circ$  за фазою, а вектор напруги  $\underline{U}_{af} = \varphi_a - \varphi_f = \underline{I}_4 \cdot R_4$  співпадає з вектором струму  $\underline{I}_4$  за фазою.

Для вітки «aесв»: вектор напруги  $\underline{U}_{cb} = \varphi_c - \varphi_b = \underline{I}_5 \cdot \underline{X}_{C_5}$  відстає від вектора струму  $\underline{I}_5$  на кут  $90^\circ$ , вектор напруги  $\underline{U}_{ec} = \varphi_e - \varphi_c = \underline{I}_5 \cdot \underline{X}_{L_5}$  випереджає вектор струму  $\underline{I}_5$  на кут  $90^\circ$ , а вектор напруги  $\underline{U}_{ae} = \varphi_a - \varphi_e = \underline{I}_5 \cdot R_5$  співпадає з вектором струму  $\underline{I}_5$  за фазою.

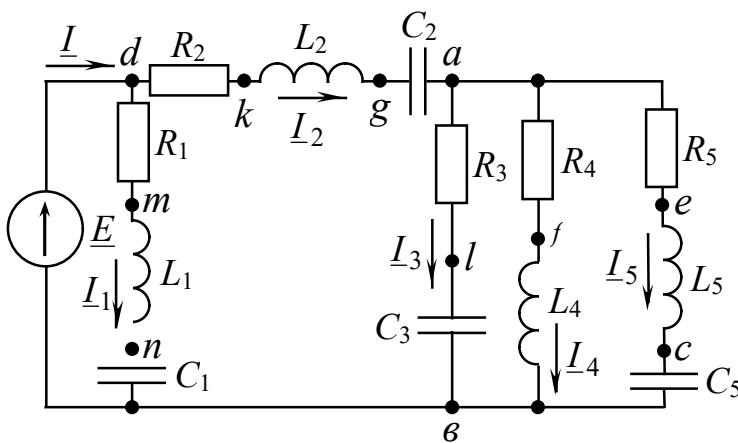


Рисунок 2.40 – Схема для побудови векторно-топографічної діаграми

Для вітки «dkga»: вектор напруги  $\underline{U}_{ga} = \varphi_g - \varphi_a = \underline{I}_2 \cdot \underline{X}_{C_2}$  відстає від вектору струму  $\underline{I}_2$  на кут  $90^\circ$ , вектор напруги  $\underline{U}_{kg} = \varphi_k - \varphi_g = \underline{I}_2 \cdot \underline{X}_{L_2}$  випереджає вектор струму  $\underline{I}_2$  за фазою на кут  $90^\circ$ ; а вектор напруги  $\underline{U}_{dk} = \varphi_d - \varphi_k = \underline{I}_2 \cdot R_2$  співпадає з вектором струму  $\underline{I}_2$  за фазою.

Для вітки «dтпв»: вектор напруги  $\underline{U}_{nb} = \varphi_n - \varphi_b = \underline{I}_1 \cdot \underline{X}_{C_1}$  відстає від вектору струму  $\underline{I}_1$  на кут  $90^\circ$ , вектор напруги  $\underline{U}_{mn} = \varphi_m - \varphi_n = \underline{I}_1 \cdot \underline{X}_{L_1}$  випереджає струм  $\underline{I}_1$  на кут  $90^\circ$ , а вектор напруги  $\underline{U}_{dm} = \varphi_d - \varphi_m = \underline{I}_1 \cdot R_1$  співпадає з вектором струму  $\underline{I}_1$  за фазою.

Обираємо масштаб за напругою –  $m_U = 11 \frac{\text{В}}{\text{см}}$ .

Модулі падіння напруги на ділянках дорівнюють, В:

$$U_{lb} = I_3 \cdot X_{C_3} = 7,108 \cdot 4,98 = 35,39 [3,22 \text{ см}];$$

$$U_{al} = I_3 \cdot R_3 = 7,108 \cdot 8 = 56,864 [5,17 \text{ см}];$$

$$U_{fb} = I_4 \cdot X_{L_4} = 3,701 \cdot 15,07 = 55,77 [5,07 \text{ см}];$$

$$U_{af} = I_4 \cdot R_4 = 3,701 \cdot 10 = 37,01 [3,36 \text{ см}];$$

$$U_{cb} = I_5 \cdot X_{C_5} = 5,31 \cdot 3,98 = 21,13 [1,92 \text{ см}];$$

$$U_{ec} = I_5 \cdot X_{L_5} = 5,31 \cdot 15,07 = 80 [7,27 \text{ см}];$$

$$U_{ae} = I_5 \cdot R_5 = 5,31 \cdot 6 = 31,86 [2,89 \text{ см}];$$

$$U_{ga} = I_2 \cdot X_{C_2} = 11,32 \cdot 9,95 = 112,63 [10,2 \text{ см}];$$

$$U_{kg} = I_2 \cdot X_{L_2} = 11,32 \cdot 10,05 = 113,8 [10,3 \text{ см}];$$

$$U_{dk} = I_2 \cdot R_2 = 11,32 \cdot 12 = 135,84 [12,3 \text{ см}];$$

$$U_{ne} = I_1 \cdot X_{C_1} = 13,69 \cdot 4,42 = 60,51 [5,5 \text{ см}];$$

$$U_{mn} = I_1 \cdot X_{L_1} = 13,69 \cdot 15,07 = 205,7 [18,7 \text{ см}];$$

$$U_{dm} = I_1 \cdot R_1 = 13,69 \cdot 10 = 136,9 [12,44 \text{ см}];$$

$$U_{de} = E = 200 [18,2 \text{ см}].$$

У квадратних дужках поряд зі значеннями модулів напруг вказані довжини векторів напруг на векторно-топографічній діаграмі в обраному масштабі  $m_U = 11 \frac{\text{В}}{\text{см}}$ .

Векторно-топографічна діаграма представлена на рисунку 2.41.

6. Вирази для миттєвих значень ЕРС ( $e(t)$ ) та загального струму ( $i(t)$ ); сумісні графіки залежностей цих величин від часу

$$e(t) = E_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_u) = 200 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2512 \cdot t + 30^\circ) = 282,84 \cdot \sin(2512 \cdot t + 30^\circ), \text{ В.}$$

$$i(t) = I_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_i) = 23,541 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2512 \cdot t + 1,085^\circ) = 33,29 \cdot \sin(2512 \cdot t + 1,085^\circ), \text{ А.}$$

Графіки залежностей величин  $e(t)$  та  $i(t)$  представлені на рисунку 2.42.



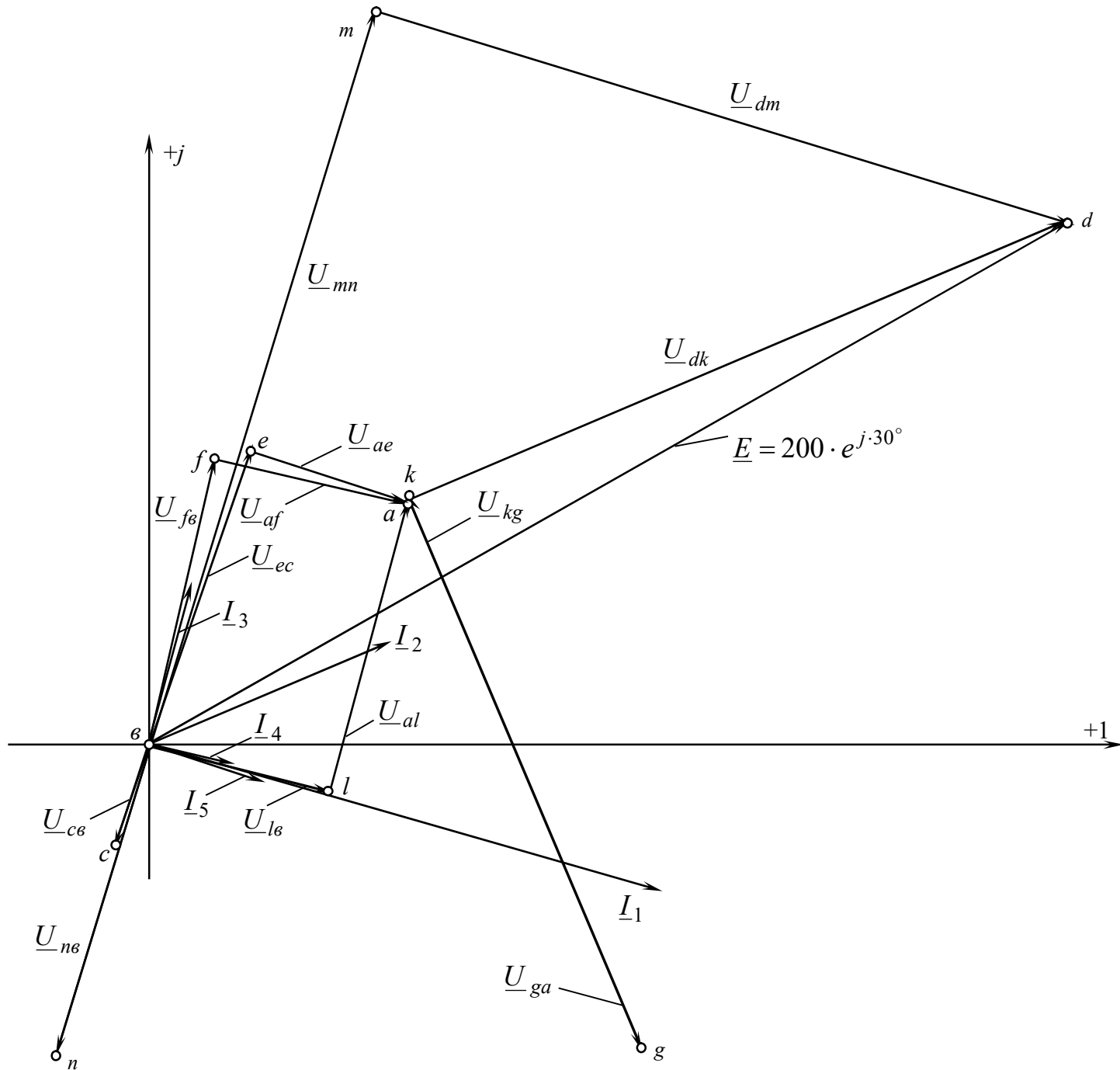
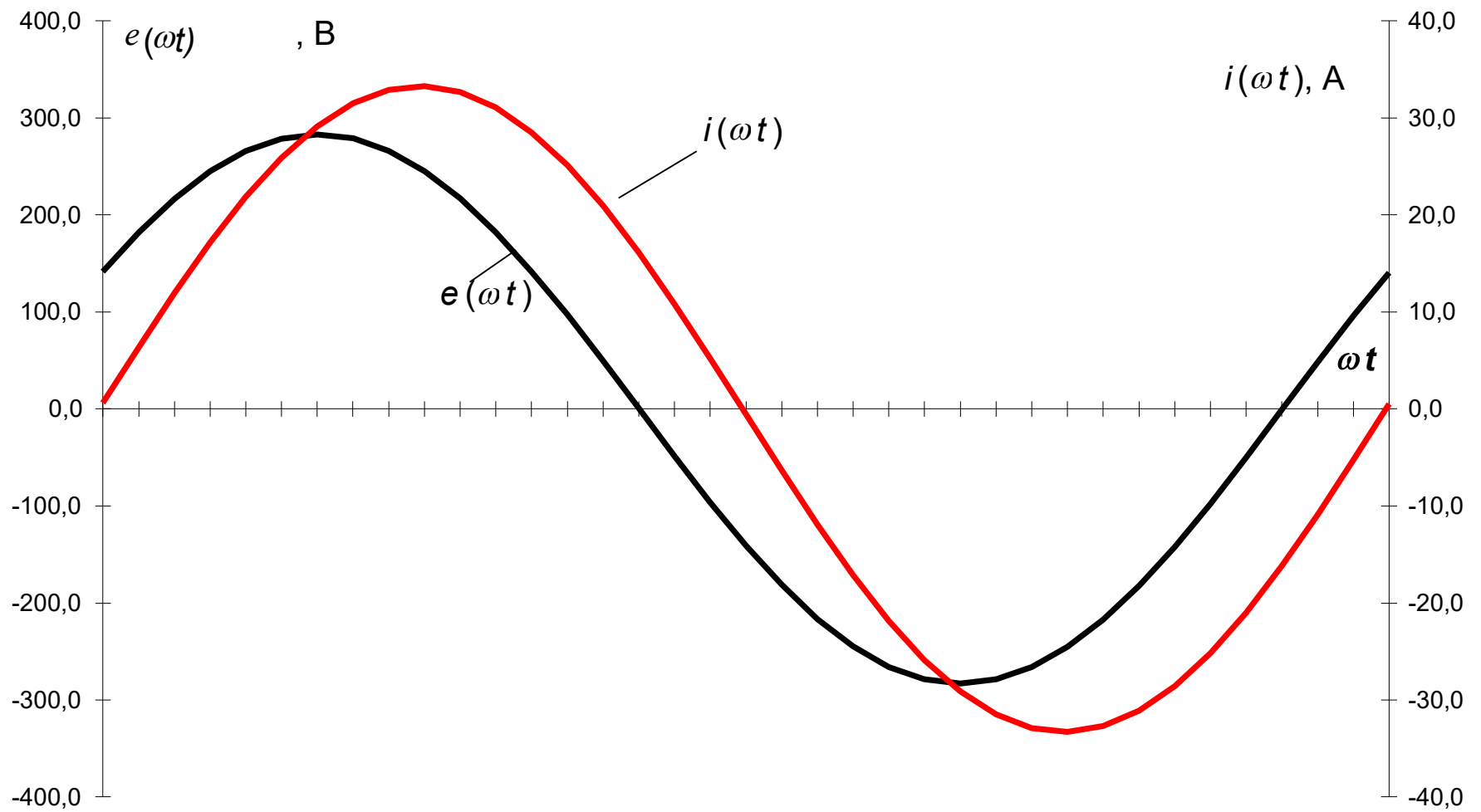


Рисунок 2.41 – Векторно-топографічна діаграма

Рисунок 2.42 – Графіки ЕРС  $e(t)$  та струму  $i(t)$

## 7. Побудова кругової діаграми

Розглянемо вихідну схему рисунку 2.37 у вигляді чотириполюсника (Ч) відносно струму  $\underline{I}_2$  – рисунок 2.43. Отримаємо Т-подібний чотириполюсник – рисунок 2.44,  $\underline{X}_{C5}$  – навантаження чотириполюсника. На рисунку 2.44 опір  $\underline{Z}'_5$  дорівнює:

$$\underline{Z}'_5 = R_5 + j \cdot \omega \cdot L_5 = 6 + j \cdot 2512 \cdot 6 \cdot 10^{-3} = 16,22 \cdot e^{j68,3^\circ} \text{ Ом.}$$

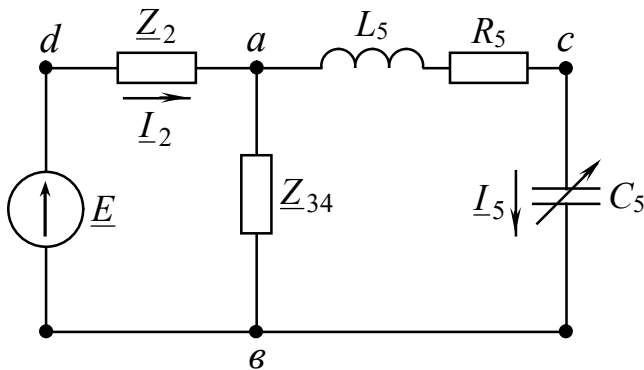


Рисунок 2.43 – Схема рисунку 2.37 у вигляді чотириполюсника

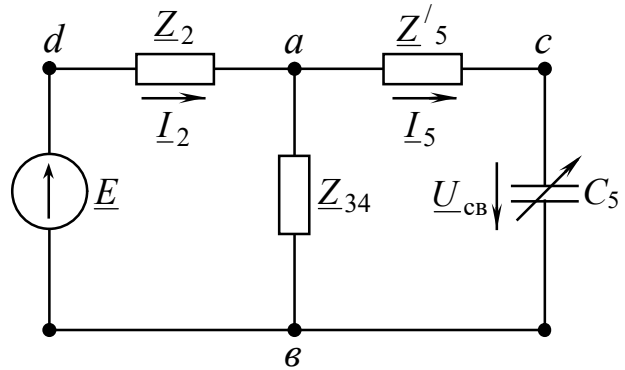


Рисунок 2.44 – Т-подібний чотириполюсник

Рівняння кругової діаграми:

$$\underline{I}_2 = \underline{I}_{2x} + \frac{\underline{I}_{2k} - \underline{I}_{2x}}{1 + \frac{X_{C5}}{Z_{5k}} \cdot e^{j(\varphi_H - \varphi_{5k})}} = \underline{I}_{2x} + \frac{\underline{I}_{2k} - \underline{I}_{2x}}{1 + \frac{X_{C5}}{Z_{5k}} \cdot e^{j(-90^\circ - \varphi_{5k})}} = \underline{I}_{2x} + \frac{\underline{I}_{2k} - \underline{I}_{2x}}{1 + \frac{X_{C5}}{Z_{5k}} \cdot e^{j\psi}},$$

де  $\psi = (-90^\circ - \varphi_{5k})$ .

Струм через опір  $\underline{Z}_2$  в режимі холостого ходу на виході чотириполюсника  $\underline{I}_{2x}$  (рис. 2.45):

$$\underline{I}_{2x} = \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_{34}} = \frac{200 \cdot e^{j30^\circ}}{12 + j \cdot 0,1 + 8,22 - j \cdot 0,686} = 9,887 \cdot e^{j31,66^\circ} = 8,415 + j \cdot 5,19 \text{ А.}$$

Струм  $\underline{I}_{2k}$  через опір  $\underline{Z}_2$  в режимі короткого замикання на виході чотириполюсника (рис. 2.46) дорівнює:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{2k} &= \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_2 + \frac{\underline{Z}_{34} \cdot \underline{Z}'_5}{\underline{Z}_{34} + \underline{Z}'_5}} = \frac{200 \cdot e^{j30^\circ}}{12 + j \cdot 0,1 + \frac{8,258 \cdot e^{j(-4,77^\circ)} \cdot 16,22 \cdot e^{j68,3^\circ}}{8,22 - j \cdot 0,686 + 6 + j \cdot 15,07}} = \\ &= 10,858 \cdot e^{j23,24^\circ} = 9,977 + j \cdot 4,284 \text{ А.} \end{aligned}$$

Опір  $\underline{Z}_{5к}$  з боку виходу чотириполюсника в режимі короткого замикання на його вході дорівнює (рис. 2.47):

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{5к} &= \underline{Z}'_5 + \frac{\underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_{3-4}}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_{3-4}} = 6 + j \cdot 15,07 + \frac{12,0004 \cdot e^{j \cdot 0,48^\circ} \cdot 8,258 \cdot e^{j \cdot (-4,77)^\circ}}{12 + j \cdot 0,1 + 8,22 - j \cdot 0,686} = \\ &= 6 + j \cdot 15,07 + \frac{99,0993 \cdot e^{j \cdot (-4,29)^\circ}}{20,228 \cdot e^{j \cdot (-1,66)^\circ}} = 6 + j \cdot 15,07 + 4,899 \cdot e^{j \cdot (-2,63)^\circ} = \\ &= 6 + j \cdot 15,07 + 4,894 - j \cdot 0,225 = 10,894 + j \cdot 14,845 = 18,413 \cdot e^{j \cdot 53,73^\circ} \text{ Ом} . \end{aligned}$$

Оскільки  $\varphi_{5к} = 53,73^\circ$ , тоді  $\psi = -90^\circ - \varphi_{5к} = -90^\circ - 53,73^\circ = -143,73^\circ$ .

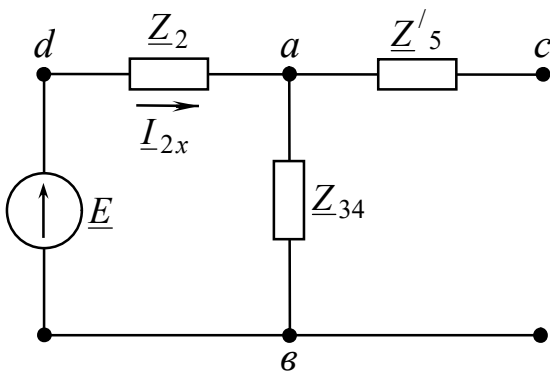


Рисунок 2.45 – Схема для визначення струму  $I_{2x}$  через опір  $\underline{Z}_2$  в режимі холостого ходу на виході чотириполюсника

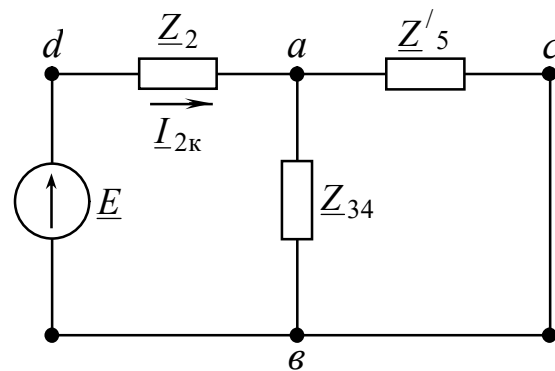


Рисунок 2.46 – Схема для визначення струму  $I_{2к}$  через опір  $\underline{Z}_2$  в режимі короткого замикання на виході чотириполюсника

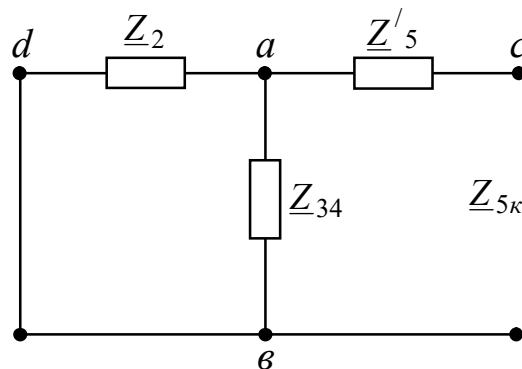


Рисунок 2.47 – Схема для визначення опору  $\underline{Z}_{5к}$

Після підстановки в рівняння кругової діаграми  $\underline{I}_{2x}$   $\underline{I}_{2k}$   $\underline{Z}_{5k}$  матиме вигляд:

$$\begin{aligned} \underline{I}_2 &= 9,887 \cdot e^{j(-31,66)^\circ} + \frac{10,858 \cdot e^{j23,34^\circ} - 9,887 \cdot e^{j31,66^\circ}}{1 + \frac{3,98}{18,413} \cdot e^{j(-143,73)^\circ}} = \\ &= 8,415 + j \cdot 5,19 + \frac{9,977 + j \cdot 4,284 - 8,415 - j \cdot 5,19}{1 + 0,216 \cdot e^{j(-143,73)^\circ}} = 8,415 + j \cdot 5,19 + \\ &+ \frac{1,562 - j \cdot 0,906}{1 - 0,1743 - j \cdot 0,1279} = 8,415 + j \cdot 5,19 + \frac{1,806 \cdot e^{j(-30,115)^\circ}}{0,8355 \cdot e^{j(-8,803)^\circ}} = 8,415 + j \cdot 5,19 + \\ &+ 2,1616 \cdot e^{j(-21,312)^\circ} = 10,429 + j \cdot 4,404 = 11,32 \cdot e^{j22,89^\circ} \text{ А.} \end{aligned}$$

Порівнюємо отриманий результат із струмом другої вітки, знайденим в пункті 3):  $11,32 \cdot e^{j22,91^\circ} \approx 11,32 \cdot e^{j22,89^\circ} \text{ А.}$

Кругову діаграму (рисунок 2.48) будемо на комплексній площині в такій послідовності:

– відкладаємо вектор  $\underline{I}_{2x}$  у обраному масштабі  $m_I = 0,5 \text{ А/см}$ , його кінець позначаємо точкою  $O_1$ ;

– відкладаємо вектор  $\underline{I}_{2k}$ , його кінець позначаємо точкою  $K$ ;

– з'єднуємо точки  $O_1$  і  $K$  та отримуємо хорду  $O_1K$ , довжина якої в обраному масштабі дорівнює 3,6 см;

– з точки  $K$  під кутом  $-\Psi = -(-143,7^\circ)$  до хорди  $O_1K$  відкладаємо луч  $KN'$  (це – лінія змінного параметру);

на лінії змінного параметру в масштабі  $m_Z = \frac{Z_{5k}}{O_1K} = \frac{18,39}{3,6} = 5,11 \text{ Ом/см}$ ,

відкладаємо відрізок  $KN$  довжиною  $|KN| = \frac{X_{C5}}{m_Z} = \frac{3,98}{5,11} = 0,78 \text{ см}$ ;

– із середини хорди  $O_1K$  проводимо перпендикуляр до  $O_1K$ ;

– проводимо перпендикуляр з точки  $O_1$  до луча  $KN'$  (перпендикуляри перетинаються у точці  $C$  – це і є центр окружності);

проводимо робочу дугу окружності з тієї же сторони від хорди, де знаходиться лінія змінного параметру (ЛЗП)  $KN'$ ;

поєднуємо точки  $O_1$  та  $N$  (луч  $O_1N$  перетинає дугу окружності у робочій точці  $M$ ).

Струм  $\underline{I}_2$  за даного значення опору  $X_{C_5}$  – це вектор  $\overrightarrow{OM}$ . Довжина цього  $|OM| \cdot m_I$  є модулем струму  $\underline{I}_2$ , а значення початкової фази цього струму вимірюю транспортиром (це кут, що складають вектор  $\underline{I}_2$  та вісь дійсних чисел).

З побудованої діаграми маємо –  $\underline{I}_2 \approx 11,3 \cdot e^{j22,5^\circ}$  А.

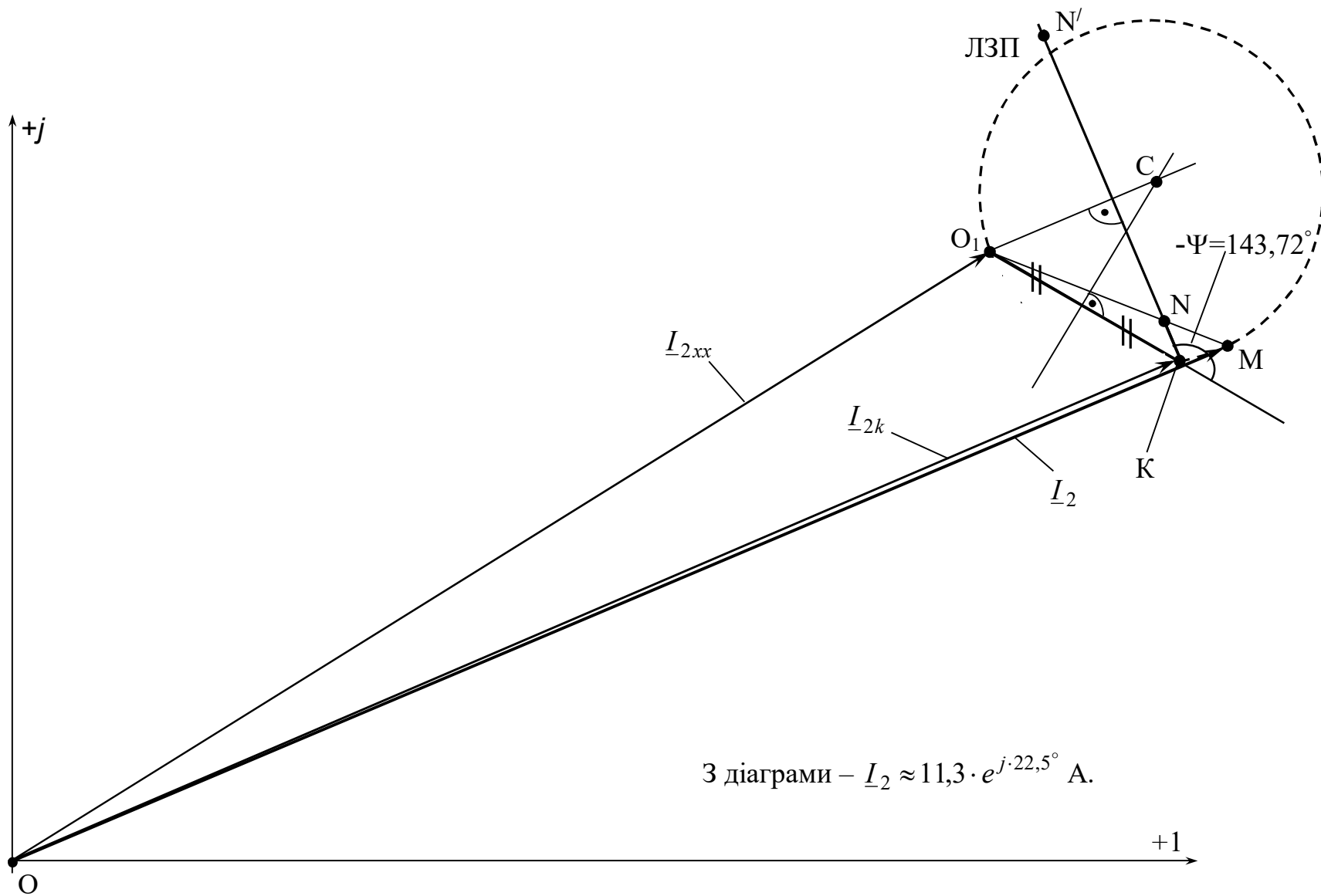


Рисунок 2.48 – Кругова діаграма

За допомогою діаграми можна побудувати графік залежності модуля струму  $\underline{I}_2$  від модулю опору  $X_{C_5}$ . Припустимо, що модуль струму  $\underline{I}_2$  змінюється від нуля до розрахункового значення 3,98 Ом. Тоді відрізок  $KN$  треба поділити на декілька рівних частин. Точки поділу з'єднують з  $O_1$  та отримують робочі точки на дузі окружності. Поєднуючи ці точки з точкою початку координат  $O$  отримують різні значення струму  $I_2$  (що відповідають певним значенням опора  $X_{C_5}$ ). Далі на осі абсцис відкладають значення опору  $X_{C_5}$ , а на осі ординат – відповідні значення струму  $I_2$ .

#### 8) Визначення коефіцієнтів Т-образного чотириполюсника

Розглянемо вихідну схему у вигляді чотириполюсника відносно струму  $\underline{I}_2$ . Отримаємо Т-подібний чотириполюсник (рис. 2.44).

Основні рівняння пасивного чотириполюсника (А-форма запису) для структурної схеми чотириполюсника (рис. 2.49):

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = A \cdot \underline{U}_2 + B \cdot \underline{I}_2 \\ \underline{I}_1 = C \cdot \underline{U}_2 + D \cdot \underline{I}_2 \end{cases}$$

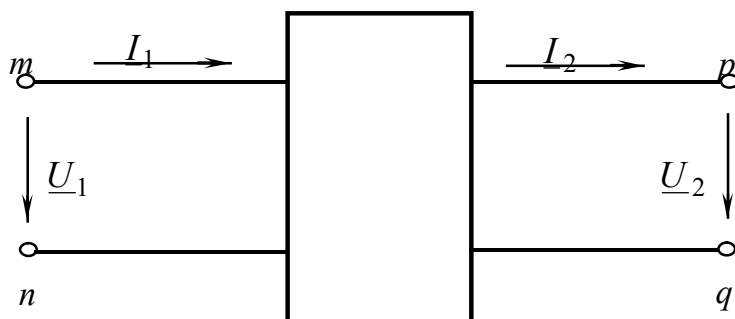


Рисунок 2.49 – Вихідна схему у вигляді Т-подібного чотириполюсника відносно струму

Якщо порівняти рисунок 2.49 та рисунок 2.44, то зрозуміло, що вхідній напрузі  $\underline{U}_1$  та вхідному струму  $\underline{I}_1$  на рисунку 2.49 відповідають ЕРС  $\underline{E} = 200 \cdot e^{j \cdot 30^\circ}$  та струм  $\underline{I}_2 = 11,32 \cdot e^{j \cdot 22,91^\circ}$  на рисунку 2.44; також вихідній напрузі  $\underline{U}_2$  та вихідному струму  $\underline{I}_2$  на рисунку 2.49 відповідають напруга  $\underline{U}_{cb} = 21,13 \cdot e^{j \cdot (-108,06)^\circ}$  та струм  $\underline{I}_5 = 5,31 \cdot e^{j \cdot (-18,06)^\circ}$  на рисунку 2.44.



Формули для визначення коефіцієнтів  $A$ ,  $B$ ,  $C$  та  $D$  :

$$A = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{1x} \cdot \underline{Z}_{1k}}{\underline{Z}_{2k} \cdot (\underline{Z}_{1x} - \underline{Z}_{1k})}}; C = \frac{A}{\underline{Z}_{1x}}; B = A \cdot \underline{Z}_{2k}; D = \frac{B}{\underline{Z}_{1k}},$$

де  $\underline{Z}_{1x}$  – опір в режимі холостого ходу на виході та живленні зі сторони входу чотириполюсника:

$$\underline{Z}_{1x} = \underline{Z}_2 + \underline{Z}_{34} = 12 + j \cdot 0,1 + 8,22 - j \cdot 0,686 = 20,22 - j \cdot 0,586 = 20,228 \cdot e^{j \cdot (-1,66)^\circ} \text{ Ом};$$

$\underline{Z}_{1k}$  – опір в режимі короткого замикання на виході та живленні зі сторони входу чотириполюсника:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{1k} &= \underline{Z}_2 + \frac{\underline{Z}_{34} \cdot \underline{Z}'_5}{\underline{Z}_{34} + \underline{Z}'_5} = 12 + j \cdot 0,1 + \frac{8,258 \cdot e^{j \cdot (-4,77)^\circ} \cdot 16,22 \cdot e^{j \cdot 68,3^\circ}}{8,22 - j \cdot 0,686 + 6 + j \cdot 15,07} = 18,291 + j \cdot 2,168 = \\ &= 18,419 \cdot e^{j \cdot 6,76^\circ} \text{ Ом}; \end{aligned}$$

$\underline{Z}_{2k}$  – опір за короткого замикання на вході та живленні зі сторони виходу чотириполюсника:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{2k} &= \underline{Z}'_5 + \frac{\underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_{34}}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_{34}} = 6 + j \cdot 15,07 + \frac{12,0004 \cdot e^{j \cdot 0,48^\circ} \cdot 8,258 \cdot e^{j \cdot (-4,77)^\circ}}{12 + j \cdot 0,1 + 8,22 - j \cdot 0,686} = \\ &= 6 + j \cdot 15,07 + \frac{99,0993 \cdot e^{j \cdot (-4,29)^\circ}}{20,228 \cdot e^{j \cdot (-166)^\circ}} = 10,894 + j \cdot 14,845 = 18,413 \cdot e^{j \cdot 53,73^\circ} \text{ (Ом)}. \end{aligned}$$

Тоді коефіцієнти дорівнюють:

$$A = \sqrt{\frac{20,228 \cdot e^{j \cdot (-1,66)^\circ} \cdot 18,419 \cdot e^{j \cdot 6,76^\circ}}{18,413 \cdot e^{j \cdot 53,73^\circ} \cdot (20,22 - j \cdot 0,586 - 18,291 - j \cdot 2,168)}} = 2,453 \cdot e^{j \cdot 3,18^\circ};$$

$$C = \frac{2,453 \cdot e^{j \cdot 3,18^\circ}}{20,228 \cdot e^{j \cdot (-1,66)^\circ}} = 0,1213 \cdot e^{j \cdot 4,84^\circ}$$

$$B = 2,453 \cdot e^{j \cdot 3,18^\circ} \cdot 18,413 \cdot e^{j \cdot 53,73^\circ} = 45,167 \cdot e^{j \cdot 56,91^\circ} \text{ Ом};$$

$$D = \frac{45,167 \cdot e^{j \cdot 56,91^\circ}}{18,419 \cdot e^{j \cdot 6,76^\circ}} = 2,452 \cdot e^{j \cdot 50,15^\circ}.$$

Перевірка правильності розрахунків за формулою  $A \cdot D - B \cdot C = 1$ :

$$\begin{aligned} &2,453 \cdot e^{j \cdot 3,18^\circ} \cdot 2,452 \cdot e^{j \cdot 50,15^\circ} - 45,167 \cdot e^{j \cdot 56,91^\circ} \cdot 0,1213 \cdot e^{j \cdot 4,84^\circ} = 6,015 \cdot e^{j \cdot 53,33^\circ} - \\ &- 5,479 \cdot e^{j \cdot 61,75^\circ} = 3,592 + j \cdot 4,825 - 2,593 - j \cdot 4,826 \approx 1. \end{aligned}$$

Основні рівняння чотириполюсника зі знайденими коефіцієнтами:

$$\begin{cases} \underline{E} = 2,453 \cdot e^{j \cdot 3,18^\circ} \cdot \underline{U}_{ce} + 45,167 \cdot e^{j \cdot 56,91^\circ} \cdot \underline{I}_5 \\ \underline{I}_2 = 0,1213 \cdot e^{j \cdot 4,84^\circ} \cdot \underline{U}_{ce} + 2,452 \cdot e^{j \cdot 50,15^\circ} \cdot \underline{I}_5 \end{cases}$$

Перевірка для значень  $\underline{E}$  та  $\underline{I}_2$ :

$$\begin{cases} \underline{E} = 2,453 \cdot e^{j \cdot 3,18^\circ} \cdot 21,13 \cdot e^{j \cdot (-108,06)^\circ} + 45,167 \cdot e^{j \cdot 56,91^\circ} \cdot 5,31 \cdot e^{j \cdot (-18,06)^\circ} \\ \underline{I}_2 = 0,1213 \cdot e^{j \cdot 4,84^\circ} \cdot 21,13 \cdot e^{j \cdot (-108,06)^\circ} + 2,452 \cdot e^{j \cdot 50,15^\circ} \cdot 5,31 \cdot e^{j \cdot (-18,06)^\circ} \end{cases}$$

Обчисливши, отримаємо:

$$\underline{E} = 51,83 \cdot e^{j \cdot (-104,88)^\circ} + 239,837 \cdot e^{j \cdot 38,85^\circ} \cdot 5,31 \cdot e^{j \cdot (-18,06)^\circ} = -13,31 - j \cdot 50,092 + 186,783 + j \cdot 150,445 = 173,473 + j \cdot 100,35 = 200,41 \cdot e^{j \cdot 30,05^\circ} \approx 200 \cdot e^{j \cdot 30,05^\circ} \text{ В.}$$

$$\underline{I}_2 = 2,563 \cdot e^{j \cdot (-103,22)^\circ} + 13,02 \cdot e^{j \cdot 32,09^\circ} = -0,586 - j \cdot 2,495 + 11,030 + j \cdot 6,917 = 10,444 + j \cdot 4,422 = 11,34 \cdot e^{j \cdot 22,93^\circ} \approx 11,32 \cdot e^{j \cdot 22,91^\circ} \text{ А.}$$

## 2.6 Контрольні запитання

1. Дати визначення синусоїдному струму і основним величинам, що його характеризують.
2. Дати визначення середньому та діючому значенню синусоїдної величини.
3. Дати визначення комплексній амплітуді, комплексу діючого значення.
4. Сформулювати закони Ома і Кірхгофа в комплексній формі запису.
5. Які існують методи розрахунку кіл синусоїдного струму?
6. Записати вирази для комплексного опору та комплексної провідності ділянки кола; вирази залежності між опорам та провідністю ділянки кола.
7. Дати визначення активній, реактивній, повній потужності та комплексної формі запису повної потужності.
8. Поясніть, як здійснюють баланс активних та реактивних потужностей в електричних колах синусоїдного струму.
8. Як здійснюють побудування векторної діаграми струмів та векторно-топографічної діаграми напруг для розгалуженого кола синусоїдного струму?
9. Дати визначення чотириполюснику та навести класифікацію чотириполюсників.
10. Записати основні рівняння чотириполюсника (А-форма) та охарактеризувати методи визначення коефіцієнтів чотириполюсника
11. Дати визначення годографам. Навести приклади побудови лінійних діаграм опорів та кругових діаграм провідностей простих електричних кіл.

## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи : учебник / Л. А. Бессонов. – М. : Гардарики, 2002 – 640 с.
2. Основы теории цепей : учебник для вузов / [Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 1989– 528 с.
3. Теоретические основы электротехники. 4-е издание, дополненное для самостоятельного изучения курса / К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин, В. Л. Чечурин. – Издательство «Питер», 2004 (т. 1 – 462 с., т. 2 – 575 с., т. 3 – 376 с.).
4. Шебес М. Р. Задачник по теории линейных электрических цепей / М. Р. Шебес, М. В. Каблукова. – М. : «Высшая школа», 1990 – 544 с.
5. М. П. Рибалко. Теоретичні основи електротехніки. Лінійні електричні кола : підручник / М. П. Рибалко, В. О. Єсауленко, В. І. Костенко. – Донецьк : Новий світ, 2003 – 513 с.
6. Перхач В. С. Теоретична електротехніка. Лінійні кола / В. С. Перхач. – Київ : Вища школа, 1992 – 439 с.

ДОДАТОК А

Зразок оформлення титульного аркуша РГР (частина 1)

---

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКА НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

КАФЕДРА АЛЬТЕРНАТИВНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ  
ТА ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ

РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНА РОБОТА  
(частина 1)

**«РОЗРАХУНОК СКЛАДНОГО КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ»**

Виконав:  
студент гр. НВДЕ 2017-1

Перепелиця А. С.

Варіант № 11

Перевірила:

доц. Форкун Я. Б.

Харків – 2020

---

ДОДАТОК Б

Зразок оформлення титульного аркуша РГР (частина 2)

---

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКА НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

КАФЕДРА АЛЬТЕРНАТИВНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ  
ТА ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ

РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНА РОБОТА

(частина 2)

**«РОЗРАХУНОК РОЗГАЛУЖЕНОГО КОЛА СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ»**

Виконав:  
студент гр. НВДЕ 2017-1

Перепелиця А.С.

Варіант № 11

Перевірила:

доц. Форкун Я.Б.

Харків – 2020

---

*Виробничо-практичне видання*

**МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ**

до виконання  
розрахунково-графічної роботи  
з навчальної дисципліни

**«ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ»**

за темою

**«РОЗРАХУНОК СКЛАДНОГО КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ  
І РОЗГАЛУЖЕНОГО КОЛА СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ»**

*(для студентів усіх форм навчання за спеціальністю  
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка)*

Укладачі : **ФОРКУН** Яна Борисівна,  
**ГЛЄБОВА** Марина Леонідівна

Відповідальний за випуск *Я. Б. Форкун*

*За авторською редакцією*

Комп'ютерне верстання *І. В. Волосожарова*

План 2020, поз. 205 М

---

Підп. до друку 25.02.2020. Формат 60 × 84/16.

Друк на ризографі. Ум. друк. арк. 3,1

Тираж 50 пр. Зам. № .

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет  
міського господарства імені О. М. Бекетова,  
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002.

Електронна адреса: rectorat@kname.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 5328 від 11.04.2017.