

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний університет кораблебудування  
імені адмірала Макарова

**В. М. Рябенський**  
**О.О. Ушкаренко**  
**М.Я. Островерхов**  
**М.С. Махмуд Аль-Суод**

# **ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ТА АНАЛІЗУ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ**

Навчальний посібник

Київ  
Видавництво Ліра-К  
2021

УДК 621.3, 004.4  
P98

*Рекомендовано Вченою радою  
Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова  
(протокол № 3 від 15.03.2021 р.)*

*Рецензенти:* Резцов В.Ф., д.т.н., проф., чл.-кор. НАН України  
Щерба А.А., д.т.н., проф., чл.-кор. НАН України  
Павлов Г.В., д.т.н., проф., директор ІАЕ НУК

**Рябенський В.М.**

P98 Програмна реалізація методів розрахунку та аналізу електричних кіл : навчальний посібник / В.М. Рябенський, О.О. Ушкаренко, М.Я. Островерхов, Аль-Суод Махмуд М. С. – Київ : Видавництво Ліра-К, 2021. – 462 с.  
ISBN 978-617-520-112-1

У навчальному посібнику описуються особливості розробки програмного забезпечення на мовах програмування C/C++ для автоматизації процесів розрахунку та аналізу електричних кіл постійного та змінного струму різними методами. Кожен розділ навчального посібника складається з теоретичної частини, в якій наведено основні відомості про застосований метод для розв'язання задач, а також прикладів програм. Розглянуті приклади програмної реалізації методів розрахунку та аналізу лінійних та нелінійних електричних кіл постійного струму, однофазних та трифазних кіл змінного струму з активними і пасивними елементами, лінійних кіл при періодичних несинусоїдних напругах і струмах, чотириполюсників, електричних кіл з розподіленими параметрами, а також перехідних процесів в електричних колах.

Навчальний посібник призначений для здобувачів вищої освіти за спеціальностями 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», 171 «Електроніка», 172 «Телекомунікації та радіотехніка» і суміжних спеціальностей, а також всіх тих, хто цікавиться електротехнікою, електронікою та програмуванням.

**УДК 621.3, 004.4**

**ISBN 978-617-520-112-1**

© Рябенський В. М., Ушкаренко О. О.,  
Островерхов М.Я.,  
Махмуд Аль-Суод М.С., 2021  
© Видавництво Ліра-К, 2021

## ЗМІСТ

<b>Список умовних скорочень .....</b>	<b>6</b>
<b>Вступ .....</b>	<b>7</b>
<b>Розділ 1. Програмна реалізація методів розрахунку лінійних електричних кіл постійного струму .....</b>	<b>8</b>
1.1. Розробка програмного забезпечення для розрахунку кіл постійного струму за законом Ома .....	8
1.2. Розробка програм для розрахунку кіл постійного струму з використанням рівнянь Кірхгофа .....	14
1.3. Розробка програм для розрахунку кіл постійного струму методом контурних струмів .....	18
1.4. Програмна реалізація методу вузлових потенціалів для розрахунку електричних кіл постійного струму .....	22
1.5. Розробка програмних засобів з графічним інтерфейсом користувача для розрахунку електричних кіл постійного струму.....	28
1.6. Реалізація параметричного аналізу лінійних електричних кіл постійного струму .....	37
Завдання для самостійної роботи .....	42
<b>Розділ 2. Програмна реалізація методів розрахунку лінійних електричних кіл однофазного синусоїдального струму .....</b>	<b>49</b>
2.1. Програмні засоби розрахунку лінійних кіл змінного струму з використанням законів Ома та Кірхгофа.....	49
2.2. Використання комплексного методу в програмах розрахунку кіл змінного струму.....	69
2.3. Розробка програм для параметричного аналізу лінійних кіл змінного струму.....	90
2.4. Програмні засоби аналізу резонансних явищ в лінійних електричних колах змінного струму .....	96
2.5. Програмна реалізація методу провідностей при розрахунку змішаного з'єднання .....	107
2.6. Використання методів двох вузлів та контурних струмів для розрахунку лінійних кіл.....	117
2.7. Розрахунок лінійних кіл змінного струму при наявності індуктивно зв'язаних елементів.....	128
Завдання для самостійної роботи .....	136
<b>Розділ 3. Розробка програмного забезпечення для розрахунку трифазних електричних кіл синусоїдального струму.....</b>	<b>140</b>
3.1. Основні теоретичні відомості про трифазні електричні кола синусоїдального струму .....	140
3.2. Програмні засоби автоматизації розрахунку симетричних трифазних кіл.....	140

3.3. Розробка програмних засобів для розрахунку несиметричних трифазних кіл.....	160
Завдання для самостійної роботи .....	188

<b>Розділ 4. Програмне забезпечення для розрахунку лінійних електричних кіл при періодичних несинусоїдальних напругах і струмах .....</b>	<b>190</b>
4.1. Основні теоретичні положення про лінійні кола при періодичних несинусоїдальних напругах і струмах.....	190
4.2. Розрахунок однофазних кіл несинусоїдального струму при періодичних несинусоїдальних напругах і струмах.....	191
4.3. Розрахунок трифазних кіл несинусоїдального струму при періодичних несинусоїдальних напругах і струмах.....	202
4.4. Програмна реалізація дискретного перетворення Фур'є для аналізу спектрального складу сигналів.....	220
Завдання для самостійної роботи .....	230

<b>Розділ 5. Розробка програмних засобів для аналізу та розрахунку параметрів пасивних чотириполосників та фільтрів.....</b>	<b>232</b>
5.1. Основні теоретичні положення про чотириполосники .....	232
5.2. Рівняння пасивних чотириполосників з характеристичними параметрами та програмні засоби їх розрахунку.....	251
5.3. Розрахунок параметрів кіл при довільному з'єднанні чотириполосників.....	258
5.4. Програмне забезпечення для розрахунку параметрів та аналізу передатних функцій чотириполосників .....	262
5.5. Програмні засоби для побудови та аналізу амплітудно-частотних характеристик активних фільтрів .....	279
Завдання для самостійної роботи .....	296

<b>Розділ 6. Програмні засоби для розрахунку електричних кіл з розподіленими параметрами.....</b>	<b>299</b>
6.1. Основні теоретичні положення про електричні кола з розподіленими параметрами в сталому режимі.....	299
6.2. Реалізація програми розрахунку параметрів лінії та її режимів роботи .....	302
6.3. Розробка програми для розрахунку ліній при узгодженому навантаженні.....	315
6.4. Реалізація методу розрахунку ліній без спотворень.....	323
Завдання для самостійної роботи .....	326

<b>Розділ 7. Програмна реалізація методів розрахунку перехідних процесів в лінійних колах з зосередженими параметрами .....</b>	<b>328</b>
7.1. Класичний метод розрахунку перехідних процесів та принципи його використання в програмах .....	328

7.2. Розробка програмних засобів аналізу перехідних процесів в електричних колах з одним накопичувачем.....	330
7.3. Використання чисельних методів при розрахунку перехідних процесів .....	366
7.3.1. Програмна реалізація явного і неявного методів чисельного інтегрування Ейлера.....	367
7.3.2. Розробка програмних засобів аналізу перехідних процесів в електричних колах з двома накопичувачами .....	372
7.4. Програмні засоби параметричного аналізу електричних кіл під час перехідних процесів .....	382
7.5. Програмні засоби розрахунку перехідних процесів в трифазних колах .....	390
Завдання для самостійної роботи .....	403
<b>Розділ 8. Програмні засоби розрахунку та аналізу нелінійних електричних і магнітних кіл .....</b>	<b>407</b>
8.1. Розробка програмного забезпечення для розрахунку нелінійних електричних кіл постійного струму .....	407
8.2. Програмні засоби для автоматизації розрахунків магнітних кіл постійного струму .....	423
8.3. Програмна реалізація методів розрахунку та аналізу нелінійних електричних кіл з напівпровідниковими елементами .....	431
Завдання для самостійної роботи .....	458
<b>Список літератури.....</b>	<b>461</b>

## СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АФ – активний фільтр  
АФЧХ – амплітудно-фазова частотна характеристика  
АЦП – аналого-цифровий перетворювач  
АЧХ – амплітудно-частотна характеристика  
ДПФ – дискретне перетворення Фур'є  
ЕРС – електрорушійна сила  
ККД – коефіцієнт корисної дії  
КПФ – комплексна передатна функція  
ЛАЧХ – логарифмічна амплітудно-частотна характеристика  
ЛЕП – лінія електропередачі  
ЛРП – лінія з розподіленими параметрами  
ЛФЧХ – логарифмічна фазова частотна характеристика  
МВП – метод вузлових потенціалів  
МРС – магніторушійна сила  
ПП – перехідний процес  
САУ – система автоматичного управління  
ФЧХ – фазо-частотна характеристика

## ВСТУП

Безперервне розширення сфери застосування електричної енергії тягне за собою глибоке впровадження електротехніки в усі галузі промисловості, що потребує широкої автоматизації виробничих процесів і використання автоматизованих систем керування. Ці обставини вимагають забезпечення такої професійної підготовки фахівців, при якій вони будуть мати у своєму розпорядженні систему знань, умінь і навичок в актуальних для них областях електротехніки. Інструментальні засоби, які можуть бути потрібні інженеру, можуть бути як простим амперметром так і спектральним аналізатором, або складним програмним забезпеченням для виконання розрахунків та аналізу на етапі проектування і виробництва.

Навчальний посібник присвячено опису особливостей розробки програмного забезпечення на мовах програмування C/C++ для розрахунку та аналізу лінійних та нелінійних електричних кіл постійного та змінного струму різними методами. Кожен розділ навчального посібника складається з теоретичної частини, в якій наведено основні відомості про застосований метод для розв'язання задачі, а також прикладів програм. Розглянуті приклади розрахунку лінійних та нелінійних електричних кіл постійного струму, однофазних та трифазних кіл змінного струму з активними і реактивними елементами, лінійних кіл при періодичних несинусоїдних напругах і струмах, чотириполюсників, електричних кіл з розподіленими параметрами, а також перехідних процесів в електричних колах. Розглядаються як консольні програми, так і програми з розвиненими засобами графічного інтерфейсу користувача. Кожен приклад рішення задачі і відповідної програми показує принципи та особливості реалізації окремих методів розрахунку електричних кіл. Класи задач, які розглядаються в навчальному посібнику – це розрахунок і аналіз існуючих схем (визначення зв'язку між струмами, напругами, енергією) і розрахунок характеристик заданої схеми (ККД, втрат напруги, передавальних характеристик та ін.). При цьому значна увага приділяється питанням візуалізації результатів розрахунків у зручному для користувача графічному вигляді (осцилограми та спектри сигналів, векторні діаграми, амплітудно- та фазочастотні характеристики, годографи, вольт-амперні характеристики), і в текстовому вигляді (розраховані числові значення та рівняння, що описують миттєві значення напруг та струмів). Всі приклади програм, що розглядаються в навчальному посібнику, розроблені в середовищі Microsoft Visual Studio з використанням бібліотеки MFC (Microsoft Foundation Classes). Для поглиблення знань з теорії кіл та сигналів, а також отримання навичок розробки програмного забезпечення, в кінці кожного розділу пропонуються задачі для самостійного рішення. Теоретичні відомості з окремих тем, умови задач та приклади їх рішення, що розглянуті в цьому навчальному посібнику, наведені в [6, 7, 9, 10, 11].

# РОЗДІЛ 1. ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

## 1.1. Розробка програмного забезпечення для розрахунку кіл постійного струму за законом Ома

Для розрахунку простих кіл (або резистивних ділянок кіл) використовують узагальнений закон Ома [2, 6]:

$$I = \frac{U + \sum \pm E_i}{\sum r_k},$$

де  $U$  – напруга на ділянці кола, напрямлена за струмом,

$\sum r_k$  – сумарний резистивний опір ділянки, що розглядається,

$\sum \pm E_i$  – алгебраїчна сума ЕРС у гілці з обчислюваним струмом.

У записаному вище виразі ЕРС беруть зі знаком «плюс», якщо напрямок дії ЕРС збігається з напрямком струму. При розрахунку режиму роботи електричного кола, як правило, потрібно визначити струми, напруги та потужності на всіх її ділянках при заданих значеннях ЕРС джерел і опорів ланцюга.

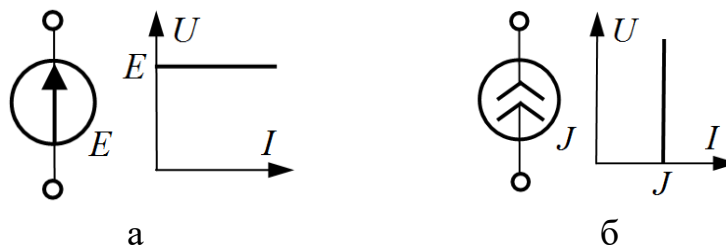


Рис. 1.1.

Для складання рівнянь по законам Кірхгофа необхідно задатися додатними напрямками струмів в кожній гілці.

Згідно першому закону Кірхгофа алгебраїчна сума струмів у вузлі дорівнює нулю. Математично це можна записати наступним чином:

$$\sum_q \pm I_q = 0.$$

Тут струми, напрямлені до вузла, беруться зі знаком «мінус», а струми, напрямлені від вузла – с «плюсом».

Згідно другого закону Кірхгофа, в будь-якому замкненому контурі електричного кола алгебраїчна сума падінь напруг на окремих ділянках дорівнює алгебраїчній сумі діючих в цьому ж контурі ЕРС:

$$\sum_q \pm I_q \cdot R_q = \sum_p \pm E_p.$$

Напрямок обходу контуру вибирається довільно, ЕРС і напруги, напрямки яких співпадають с обходом контуру, враховуються в рівнянні зі знаком «плюс», а напрямлені проти обходу – зі знаком «мінус». При складанні рівнянь повинно виконуватися правило, щоб в кожному наступному контурі була хоча б одна гілка, яка не увійшла в попередні



контури. Такі контури називають незалежними. Другий закон Кірхгофа неможна використовувати для контурів, що містять джерела струмів [6].

Розглянемо приклад розробки програми для розрахунку електричного кола на мові C++ у середовищі Visual Studio .NET. Перш за все, потрібно встановити на комп'ютер середовище розробки програм Visual Studio .NET. Завантажити пакет для інсталяції середовища розробки можна з офіційного сайту компанії Microsoft за посиланням:

<https://visualstudio.microsoft.com/ru/vs/features/net-development/?rr=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F>

На рис. 1.2 представлена сторінка сайту, з якого можна завантажити інсталяційний пакет середовища розробки.

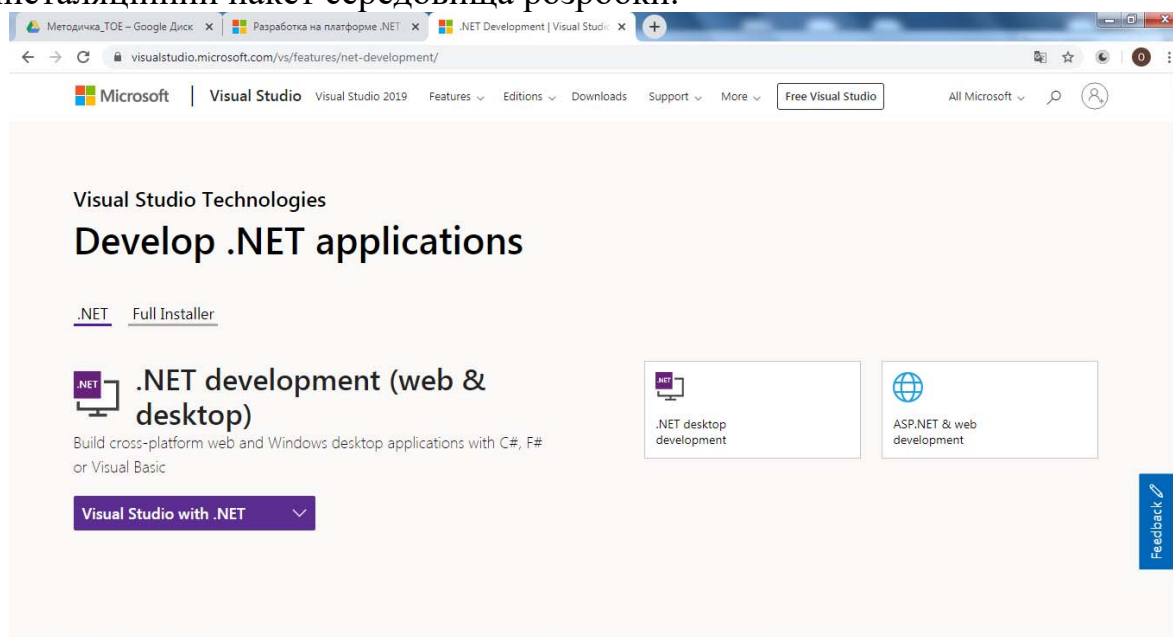


Рис. 1.2.

Для завантаження пакету інсталяції потрібно натиснути на кнопку з написом Community 2019. Після того, як інсталяційний пакет буде завантажено з мережі Інтернет, потрібно розпочати установку подвійним натисканням на файлі інсталяції. Процес установки середовища розробки є стандартним і не відрізняється від процесу установки інших програм для ОС Windows.

Після того, як середовище розробки встановлено, потрібно перейти до створення проекту. В даному прикладі буде написано консольну програму, яка не має графічного інтерфейсу користувача. В наступних прикладах буде розглянуто принципи створення програм з графічним інтерфейсом користувача.

Отже, для створення проекту потрібно виконати наступні дії. Після запуску середовища (Start → Programs → Visual Studio 2019) розробки у вікні, що з'явиться, потрібно вибрати у групі «Create a new project» пункт «Console App» (рис. 1.3).

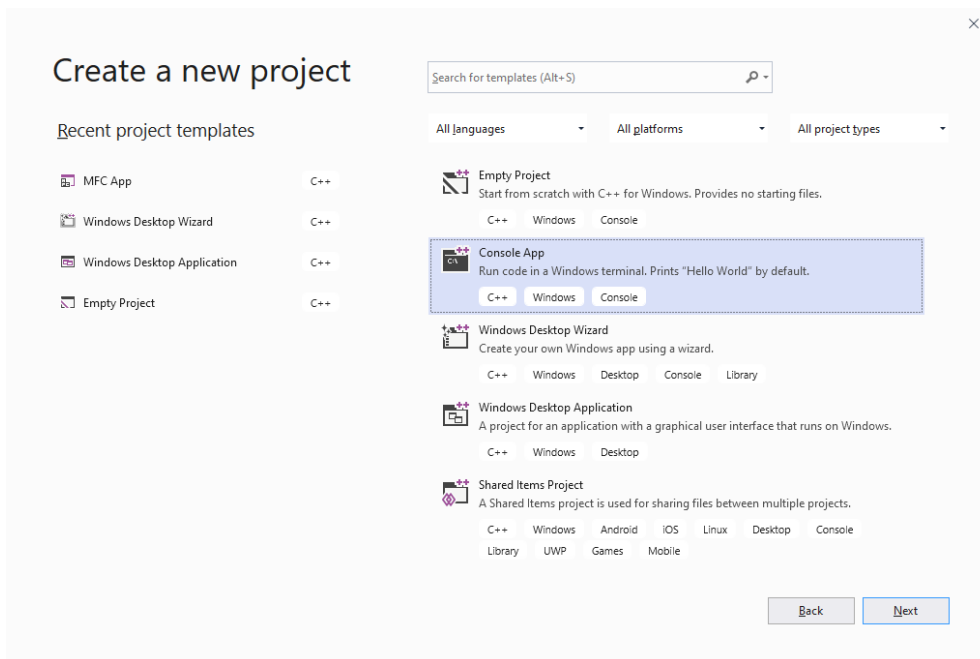


Рис. 1.3.

Далі відкриється вікно, показане на рис. 1.4, в якому необхідно дати назву новому проекту (в даному прикладі проект називається Lab1), та вказати шлях, по якому буде збережено файли проекту.

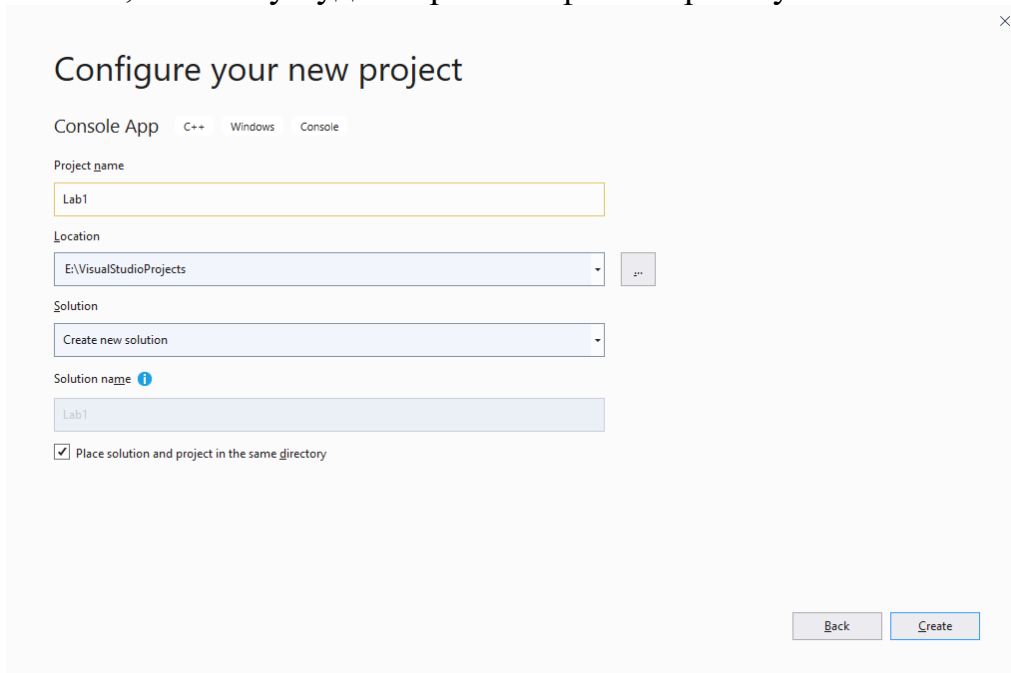


Рис. 1.4.

Після цього відкриється вікно середовища розробки (рис. 1.5), в якому необхідно набрати текст програми.

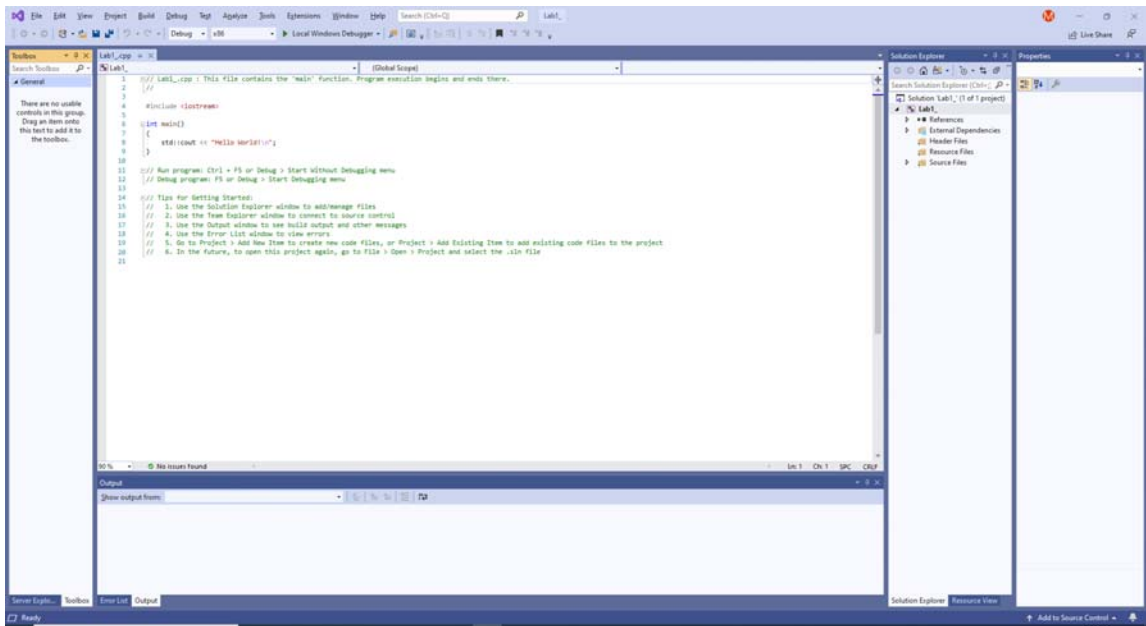


Рис. 1.5.

На рисунку видно, що середовищем розробки автоматично було створено деякий код, а саме підключено заготовочний файл `stdafx.h`, оголошено простір імен `System`, та створено функцію `main()`, з якої починається виконання програми. Цей код є стандартним для консольних додатків. Весь код програми буде розміщено всередині функції `main()`, як буде показано далі.

**ПРИКЛАД 1.1.** В схемі на рис. 1.5, а, визначити струми, якщо  $R1 = 4 \text{ Ом}$ ,  $R2 = 1 \text{ Ом}$ ,  $R3 = 2 \text{ Ом}$ ,  $R4 = 6 \text{ Ом}$ ,  $R5 = 6 \text{ Ом}$ ,  $U = 36 \text{ В}$  [6].

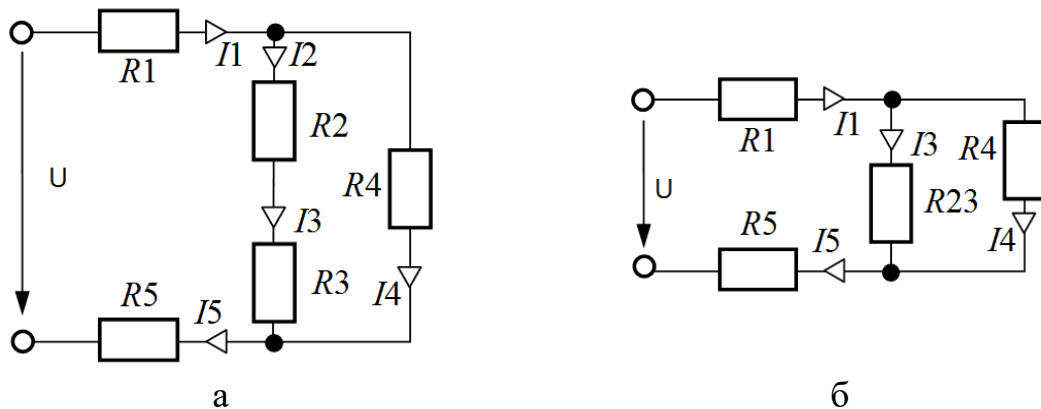


Рис. 1.6.

### Рішення

1. Позначимо додатні напрями струмів (рис. 1.6, а). Виконаємо розрахунок кола. Резистори  $R2$  і  $R3$  з'єднані послідовно, замінюємо їх одним еквівалентним:

$$R23 = R2 + R3.$$

Отримаємо схему рис. 1.6, б.

Паралельно з'єднані резистори  $R23$  і  $R4$  замінюємо опором:

$$R234 = R23 \cdot R4 / (R23 + R4) = 3 \cdot 6 / (3 + 6) = 2 \text{ Ом}.$$

Отримуємо коло з послідовним з'єднанням резисторів R1-R234-R5.

Вхідний опір отриманого кола:

$$R_{\text{вх}} = R1 + R234 + R5 = 4 + 2 + 6 = 12 \text{ Ом.}$$

Вхідний струм по закону Ома:

$$I1 = I5 = U/R_{\text{вх}} = 36/12 = 3 \text{ А.}$$

Інші струми визначаємо по правилу розкиду струму в паралельні гілки:

$$I2 = I3 = I1 \cdot R4 / (R23 + R4) = 3 \cdot 6 / 9 = 2 \text{ А;}$$

$$I4 = I1 \cdot R23 / (R23 + R4) = 3 \cdot 3 / 9 = 1 \text{ А.}$$

Отримані в результаті розрахунку числові значення допоможуть перевірити коректність роботи програми, написаної на мові Сі. Текст програми з коментарями, що вирішує цю задачу, має вигляд:

```
#include "stdafx.h"
#include <iostream>

using namespace std;

int main()
{
    double U; // оголошення змінної, в якій зберігатиметься значення напруги,
    // введене користувачем
    cout << "Enter value of U:"; // виведення на екран текстової строки
    // "Введіть значення U:"
    cin >> U; // зчитування в змінну U значення, введеного користувачем

    // оголошення змінних, в яких зберігатимуться значення опорів резисторів,
    // введених користувачем
    double R1, R2, R3, R4, R5;

    cout << "Enter value of R1:"; // виведення на екран текстової строки
    // "Введіть значення R1:"
    cin >> R1; // зчитування в змінну R1 значення, введеного користувачем
    cout << "Enter value of R2:"; // виведення на екран текстової строки
    // "Введіть значення R2:"
    cin >> R2; // зчитування в змінну R2 значення, введеного користувачем
    cout << "Enter value of R3:"; // виведення на екран текстової строки
    // "Введіть значення R3:"
    cin >> R3; // зчитування в змінну R3 значення, введеного користувачем
    cout << "Enter value of R4:"; // виведення на екран текстової строки
    // "Введіть значення R4:"
    cin >> R4; // зчитування в змінну R4 значення, введеного користувачем
    cout << "Enter value of R5:"; // виведення на екран текстової строки
    // "Введіть значення R5:"
    cin >> R5; // зчитування в змінну R5 значення, введеного користувачем

    double R23; // оголошення змінної, в якій зберігатиметься значення
    // еквівалентного опору
    // послідовно з'єднаних резисторів R2 та R3
    R23 = R2 + R3; // запис в змінну R23 суми опорів R2 та R3
```

```

double R234; // оголошення змінної, в якій зберігатиметься значення опору
// паралельно з'єднаних резисторів R23 та R4
R234 = R23 * R4 / (R23 + R4); // розрахунок еквівалентного опору
// паралельно з'єднаних резисторів R23 та R4

```

```

double Rin; // оголошення змінної, в якій зберігатиметься вхідний опір кола
Rin = R1 + R234 + R5; // вхідний опір кола складається з трьох
// послідовно з'єднаних резисторів,
// тому вони додаються

```

```

double I1, I2, I3, I4; // оголошення змінних, в яких зберігатимуться
// розраховані значення струмів

```

```

// розрахунок струмів
I1 = U / Rin;
I2 = I1 * R4 / (R23 + R4);
I3 = I2;
I4 = I1 * R23 / (R23 + R4);

```

```

// виведення отриманих результатів на екран монітору
cout << "I1=" << I1 << " A\n";
cout << "I2=" << I2 << " A\n";
cout << "I3=" << I3 << " A\n";
cout << "I4=" << I4 << " A\n";

```

```

// формування паузи для того, щоб вікно програми не закривалося
// відразу після завершення, і користувач мав би змогу побачити
// на екрані отримані результати
system("pause");

```

```
return 0;
```

```
}
```

Для компіляції та запуску програми потрібно натиснути на кнопку «Local Windows Debugger», яка розташована на панелі інструментів середовища розробки (рис. 1.7).

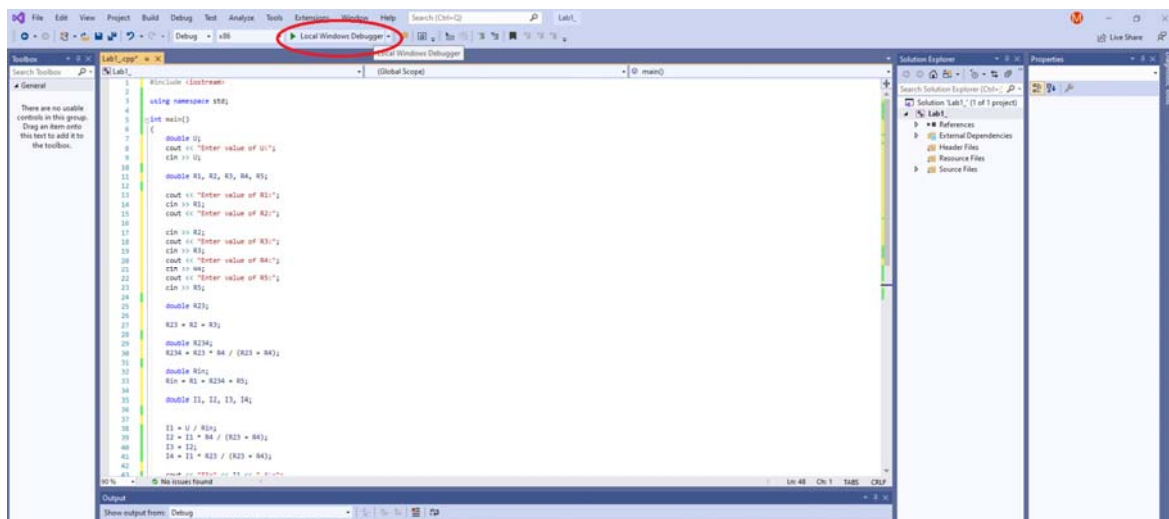


Рис. 1.7.

На рис. 1.8 показане вікно програми після введення вихідних даних та відображення результатів розрахунків. Як видно з результатів виконання програми, значення струмів повністю співпадають з розрахунковими. Що свідчить про коректність реалізації програми.

```

E:\VisualStudioProjects\Lab1_\Debug\Lab1_.exe
Enter value of U:36
Enter value of R1:4
Enter value of R2:1
Enter value of R3:2
Enter value of R4:6
Enter value of R5:6
I1=3 A
I2=2 A
I3=2 A
I4=1 A
Press any key to continue . . .
  
```

Рис. 1.8.

Тепер користувач може вводити будь-які значення напруги та опорів схеми, та отримувати розраховані значення струмів.

## 1.2. Розробка програм для розрахунку кіл постійного струму з використанням рівнянь Кірхгофа

У цьому параграфі розглядається застосування законів Кірхгофа для вирішення завдання розрахунку довільного електричного кола в класичній постановці: для заданої схеми з відомими параметрами (ЕРС і струми джерел, опору приймачів енергії) потрібно розрахувати струми.

Рекомендований порядок розрахунку електричного кола:

1. Виконується аналіз кола, тобто визначається кількість вузлів « $U$ », гілок « $B$ », кількість особливих гілок (гілки з нульовим опором « $B_0$ », гілки з відомим струмом « $B_T$ »), вибираються довільні напрямки невідомих струмів гілок.

2. Записується система з  $N_I = U - 1$  лінійно незалежних рівнянь за I законом Кірхгофа для всіх крім одного будь-якого вузлів.

3. Недостаюча кількість лінійно незалежних рівнянь записується на основі II закону Кірхгофа для незалежних контурів, що не містять джерела струму:  $N_{II} = B - (U - 1) - B_T$ .

4. Розв'язують систему  $N = N_I + N_{II}$  рівнянь і визначають величини струмів.

5. Правильність рішення перевіряють складанням балансу потужностей:  $\sum P_{дж} = \sum P_{пр}$ , тобто  $\sum E \cdot I + \sum J_k \cdot U_k = \sum I^2 \cdot r$ .

Напруга на клеммах джерела струму визначається за II законом Кірхгофа, а відносна похибка по балансу потужностей не повинна перевищувати  $3 \div 5\%$ .

**ПРИКЛАД 1.2.** Методом рівнянь Кірхгофа розрахувати струми в схемі рис. 1.9, а, при наступних параметрах [6]:

$$J_1 = 10 \text{ A}, E_2 = 100 \text{ B}, E_6 = 300 \text{ B}, r_3 = r_4 = r_5 = r_6 = 20 \text{ Ом}.$$