

Міністерство освіти і науки України
Національний університет Запорізька політехніка

Методичні вказівки
до виконання лабораторної роботи з дисципліни

ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ ТА СИГНАЛІВ

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

**Методи розрахунку лінійних кіл синусоїдного струму
зі застосуванням прикладних пакетів
MathCAD та *Electronics Workbench***

Запоріжжя – 2026

Методичні вказівки «Методи розрахунку лінійних кіл синусоїдного струму зі застосуванням прикладних пакетів *MathCAD* та *Electronics Workbench*» призначені для студентів спеціальності G5 «Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка» та 172 «Електронні комунікації та радіотехніка» всіх форм навчання / Укладачі В.О. Костенко, Л.М. Карпуков – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2026 – 26 с.

Укладачі:

канд. техн. наук, доцент
д-р тех. наук, професор

В.О. Костенко
Л.М. Карпуков

Відповідальний за випуск:

канд. техн. наук, доцент

В.О. Костенко

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

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

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА.....	4
1 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ.....	5
1.1 Мета роботи	5
1.2 Загальні відомості	5
1.3 Матеріали, інструменти, прилади, обладнання	7
1.4 Вказівки з техніки безпеки	7
2 ОБСЯГ ЗАВДАННЯ НА ЛАБОРАТОРНУ РОБОТУ.....	8
2.1 Підготовча робота	8
2.2 Розв’язок задачі у середовищі <i>Electronics Workbench</i>	8
2.3 Розв’язок задачі за допомогою пакету <i>MathCAD</i>	9
2.4 Перевірка балансу потужностей допомогою <i>MathCAD</i>	9
3 РОБОТА У ПРИКЛАДНОМУ ПАКЕТІ <i>Electronics</i> <i>Workbench</i>	10
3.1 Стислі відомості про пакет <i>Electronics Workbench</i>	10
3.2 Порядок виконання роботи у пакеті <i>Electronics</i> <i>Workbench</i>	12
3.3 Приклад розв’язку у пакеті <i>Electronics</i> <i>Workbench</i>	12
4 РОБОТА У МАТЕМАТИЧНОМУ ПАКЕТІ <i>MathCAD</i>	15
4.1 Стислі відомості про пакет <i>MathCAD</i>	15
4.2 Порядок виконання роботи у пакеті <i>MathCAD</i>	16
5 ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ У ПАКЕТІ <i>MathCAD</i>	17
5.1 Початкові дані	17
5.2 Порядок розв’язку методом еквівалентних перетворень	17
5.3 Розв’язок за законами Кірхгофа шляхом обертання матриць.....	19
5.4 Розв’язок за законами Кірхгофа шляхом використання оператор-функцій.....	20
6 ПЕРЕВІРКА ВІРНОСТІ РОЗВ’ЯЗКУ ШЛЯХОМ СКЛАДАННЯ БАЛАНСУ ПОТУЖНОСТЕЙ.....	21
7 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ.....	22
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	23
Додаток. Схеми до лабораторної роботи.....	24

ПЕРЕДМОВА

Методичні вказівки містять у собі короткі теоретичні поняття, перелік основних методів розрахунку, а також завдання до лабораторної роботи з дисципліни «Теорія електричних кіл та сигналів» [1]. Вони призначені для кращої підготовки студентів та раціонального використання часу, що відведено для лабораторних робіт, поліпшенню впровадження комп'ютерів при виконанні й оформленні звітів за допомогою математичного пакета *MathCAD* та прикладного пакету *Electronics Workbench* (далі *EWB*).

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

Завдання до лабораторної роботи обирають згідно із номером варіанту, що відповідає номеру студента в списку журналу академічної групи, складеному на початок семестру. Номер схеми (Додаток) відповідає номеру варіанта, вхідні параметри надані поряд зі схемою. Деякі з цих даних для окремої академічної групи може змінити викладач, що веде лабораторні роботи з ТЕКС.

На виконання лабораторної роботи відведено 4 години аудиторного часу.

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

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

1 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ

1.1 Мета роботи

Набуття навичок у застосуванні прикладного пакету *Electronics Workbench* та математичного пакету *MathCAD* при розрахунках електричних кіл гармонічного струму.

1.2 Загальні відомості

1.2.1 Розрахунок електричних кіл синусоїдного (змінного або гармонійного) струму проводять у символічній (комплексній) формі. Усі методи (закони, формули), що були застосовані при розрахунках кіл постійного струму придатні для розрахунків синусоїдного струму тільки за однієї умови: всі величини (струми, напруги, опори, потужності тощо) – це комплексні числа.

1.2.2 Комплексним називають число, що складаються із двох частин – дійсної та уявної – і має три форми запису:

– *алгебраїчна форма* запису (має вигляд $a + j \cdot b$),

де a – дійсна частина комплексного числа;

b – уявна частина комплексного числа;

$j = \sqrt{-1}$ – уявна одиниця;

– *показова форма* запису комплексного числа складається з двох величин (модуль $|M|$ і кут зсуву ψ) і має такий вигляд: $|M| \cdot e^{j\psi}$,

де: $|M| = \sqrt{a^2 + b^2}$ – модуль комплексного числа;

$\psi = \arg(M)$ – кут зсуву щодо осі дійсних чисел на комплексній площині;

– *тригонометрична форма* – допоміжна форма для переходу від показової до алгебраїчної форми: $|M| \cdot \cos \psi + j \cdot |M| \cdot \sin \psi$.

1.2.3 Джерела енергії зображують, як правило [2], у показовій формі. Наприклад, якщо миттєве значення ідеального джерела напруги $e(t) = E_m \sin(\omega t + \psi)$, тоді комплекс діючого значення:

$$\underline{E} = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \cdot e^{j(\omega t + \psi)}, \text{ або: } \underline{E} = E \cdot e^{j\psi}.$$

1.2.4 Опір споживачів поділяють на активний, реактивний і повний:

$$\underline{Z} = R + j(X_L - X_C) = R + jX = Z \cdot e^{j\varphi},$$

де: активний опір R – це дійсна частина комплексного опору;
 реактивний опір X – уявна частина комплексного опору;
 повний опір є *геометричною сумою* активного і реактивного:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2};$$

кут зсуву фаз $\varphi = \arg(Z)$;

індуктивний опір $X_L = \omega L$;

ємнісний опір $X_C = \frac{1}{\omega C}$.

Наприклад, комплексний опір ідеальної котушки індуктивності

$$\underline{Z}_L = j\omega L = X_L \cdot e^{j90^\circ}.$$

Комплексний опір ідеальної ємності:

$$\underline{Z}_C = \frac{1}{j\omega C} = \frac{X_C}{j} = -jX_C = X_C \cdot e^{-j90^\circ}.$$

1.2.5 Вимірювальні прилади електромагнітної системи вказують на діюче значення струмів та напруг в електричному колі змінного струму. Осцилограф призначено для досліджень миттєвих значень струму (напруги), форм кривих електричних величин. Осцилографом вимірюють також максимальні значення струмів та напруг, кути зсуву фаз між ними.

1.3 Матеріали, інструменти, прилади, обладнання

Для виконання лабораторної роботи необхідно мати комп'ютер зі встановленими пакетами *MathCAD* та *Electronics Workbench*.

1.4 Вказівки з техніки безпеки

У комп'ютерному класі кафедри Радіотехніки (ауд.30) кожний студент може отримати дозвіл на роботу та робоче місце, якщо пройде інструктаж з «Правил безпеки та охорони праці при роботі у комп'ютерному класі», зареєструється у системного адміністратора класу, та буде сумлінно дотримуватись правила техніки безпеки та порядку роботи за комп'ютером.

Перед початком роботи треба пересвідчитись, що на «Робочому столі» комп'ютера встановлена Ваша «Папка», тільки потім відкрити необхідну програму («ПУСК» – «ПРОГРАМИ» – Mathsoft Apps – MathCAD) або («ПУСК» – «ПРОГРАМИ» – Electronics Workbench.).

Працювати треба із дотримуванням правил безпеки, тільки у своєму «робочому просторі». Ні в якому разі не відкривати інші папки, системи, програми, тим більше вносити туди зміни або видаляти їх.

Періодично (через 15–20 хв.) зберігати результати роботи. За 5 хвилин до закінчення занять обов'язково треба зробити збереження своїх результатів у Вашу «Папку», результати записати у бланк лабораторної роботи, закрити всі робочі програми, привести робоче місце у належний стан.

2 ОБСЯГ ЗАВДАННЯ НА ЛАБОРАТОРНУ РОБОТУ

Для електричного кола із гармонічними (що змінюється у часі за законом синуса) джерелами живлення ($U_k(t)$), наданого у Додатку зробити таке:

2.1 Підготовча робота

2.1.1 Підготувати бланк звіту до роботи, який повинен містити тему і мету роботи, схему електричного кола відповідно до номеру Вашого варіанту завдання, порівняльну таблицю вихідних даних (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Порівняльна таблиця вихідних даних

Струм №, напруга №		I_1	I_2	...	U_1	...	U_n
Результати роботи в <i>EWB</i>							
Math- Cad	Закони Кірхгофа						
	Контурні струми						
	Вузлові потенціали						

2.1.2 Вказати умовний напрям струмів у гілках схеми та їх нумерацію.

2.1.3 Записати опір кожного елемента кола в комплексній формі запису: надані на схемі числові значення опорів котушок індуктивності помножити на j , а числові значення опорів ємності – на $-j$; опір резисторів залишаються дійсними числами

2.1.4 Скласти систему рівнянь для наданої схеми за методом контурних струмів.

2.1.5 Скласти систему рівнянь для наданої схеми за методом вузлових потенціалів.

2.2 Розв'язок задачі у середовищі *Electronics Workbench*

2.2.1 Скласти із бібліотеки елементів середовища *EWB* схему електричного кола із необхідними вимірювальними приладами, визначити струми та напруги на кожному елементі кола при наданій частоті джерела живлення.

2.2.2 Результати вимірів усіх струмів і потрібних напруг занотувати у порівняльну таблицю вихідних даних.

2.3 Розв’язок задачі за допомогою пакету *MathCAD*

2.3.1 Увійти у математичний пакет *MathCAD* звичайним шляхом, відкрити новий файл, призначений для розв’язання задачі, ввести вихідні дані, необхідні коментарі.

2.3.2 Скласти систему алгебраїчних рівнянь за пунктами 2.1.4 та 2.1.5. Розв’язати надані системи матричними методами та за допомогою обчислювального блоку *Given-Find*, визначити струми та напруги на кожному елементі кола, показання вимірювальних приладів.

2.3.3 Результати розрахунків усіх струмів і потрібних напруг занотувати у порівняльну таблицю вихідних даних.

2.4 Перевірка балансу потужностей за допомогою *MathCAD*

2.4.1 Визначити сумарну потужність всіх джерел енергії. Занести її у бланк звіту [3].

2.4.2 Визначити сумарну потужність всіх споживачів, порівняти її із сумарною потужністю всіх джерел, занотувати до бланку звіту.

3 РОБОТА У ПРИКЛАДНОМУ ПАКЕТІ *Electronics Workbench*

3.1 Стислі відомості про пакет *Electronics Workbench*

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

3.1.1 Інтерфейс пакета EWB складається з наступних частин:

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

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

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

3.1.4 Прилади для проведення вимірів розташовано у *полі індикаторів (Indicators)*, яке відображене відповідним значком. У кожній схемі можна застосувати кілька приладів одночасно.

3.1.5 Джерела енергії усіх різновидів розташовано у бібліотеці джерел (**Sources**), четвертий і п'ятий з яких (**AC Voltage Source**, **AC Current Source**) застосовують при аналізі кіл синусоїдного струму.

Компонент заземлення (**Ground**) має нульовий потенціал і таким чином забезпечує вихідну точку для відліку потенціалів. Заземлення обов'язково необхідно застосувати для моделювання схем

із операційними підсилювачами, мультиметром, трансформаторами, керованими джерелами енергії, осцилографом.

Внутрішній опір ідеального джерела електрорушійної сили (**AC Voltage Source**) синусоїдної форми дорівнює нулеві, тому напруга на його виході не залежить від струму, що тече через нього. Зажим «+» вказує умовний напрям електрорушійної сили.

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

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

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

3.1.7 Аналіз роботи електронних схем в пакеті *EWB* складається із наступних *операцій*:

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

3.2 Порядок виконання роботи у пакеті *Electronics Workbench*

Для роботи у середовищі *Electronics Workbench* запусимо його звичайним шляхом (Пуск – Програми - *Electronics Workbench*). На екрані монітора з'явиться оболонка інтерфейсу *EWB* – можна починати роботу.

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

Правою кнопкою маніпулятора відкриємо додаткове вікно зі властивостями елемента (Label, Value, Fault, Display, Analysis Setup), які можна заповнити у разі потреби. Наприклад, для приладів обов'язково треба змінити компонент DC на AC у властивостях Value.

З'єднаємо всі елементи та прилади у робочу схему (Приклад схеми наведено на рис. 3.2).

Для моделювання роботи електричного кола правою кнопкою маніпулятора натиснемо на вмикач (0/I), який підключає у роботу складену схему (його розташовано у правому верхньому куті панелі компонентів). На приладах побачимо діючі значення та одиниці вимірювання електричних величин. Після будь-яких змін у схемі показання приладів треба поновити, натиснувши на вмикач (O/I).

3.3 Приклад розв'язку у пакеті *Electronics Workbench*

3.3.1 Надано електричне коло (рис. 3.1) та його параметри:

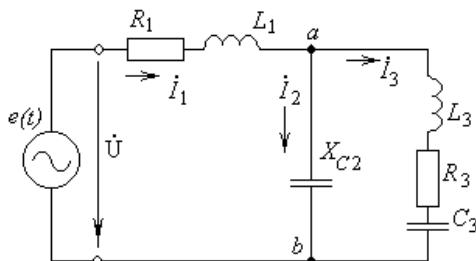


Рисунок 3.1 – Схема електричного кола змінного струму

- джерело живлення – ідеальне джерело напруги
 $e(t) = 17 \cdot \sin(\omega t + 90^\circ)$ В, частотою $f = 6$ КГц,
- величини активних опорів R_1 та R_3 , індуктивного опору котушки $L1$ та опір конденсатора $C3$ (в Ом):
 $R_1 = 30$; $X_{L1} = 113.1$; $X_{C3} = 26.53$; $R_3 = 15$;
- величини ємності $C2 = 0.47$ мкФ та індуктивності $L3 = 3.12$ мГн.

Треба визначити струми кожної гілки кола, напругу на окремих елементах, кут зсуву фаз між двома електричними величинами.

3.3.2 Попередніми розрахунками визначаємо ємності всіх конденсаторів та індуктивності всіх котушок, якщо їх не надано у вихідних даних.

3.3.3 Складемо віртуальне електричне коло за допомогою панелі компонентів (рис. 3.2), змінимо їх властивості, ввімкнемо його до роботи, натиснувши на вмикач (О/І), занотуємо результати вимірів на приладах.

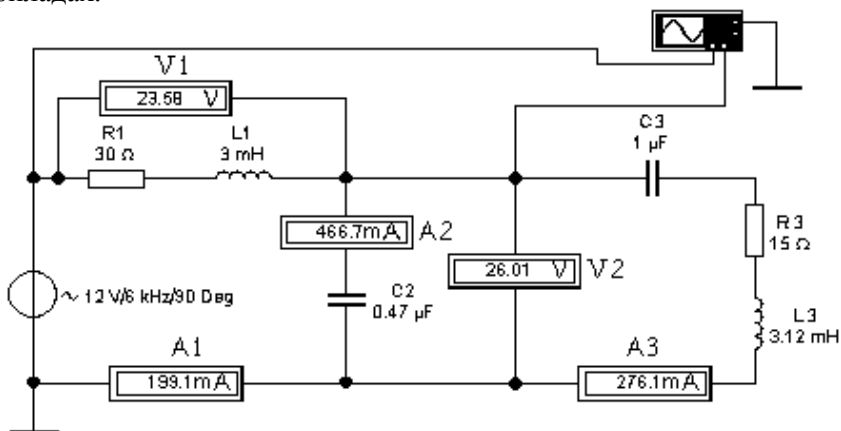


Рисунок 3.2 – Лабораторна установка у середовищі *Electronics Workbench*

3.3.4 Ввійдемо до робочого поля осцилографа, зробимо відповідні зміни його параметрів, що забезпечать необхідну якість і зручність його вимірів, занотуємо у бланк звіту результати роботи.

Як бачимо (на рис. 3.3) різниця у часі T2-T1 між гармонічними функціями становить 30,2579 мікросекунд. Оскільки період коливань наданих функцій становить

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{6000} = 167 \cdot 10^{-6} \text{ (с)} = 167 \text{ (мкс)} ,$$

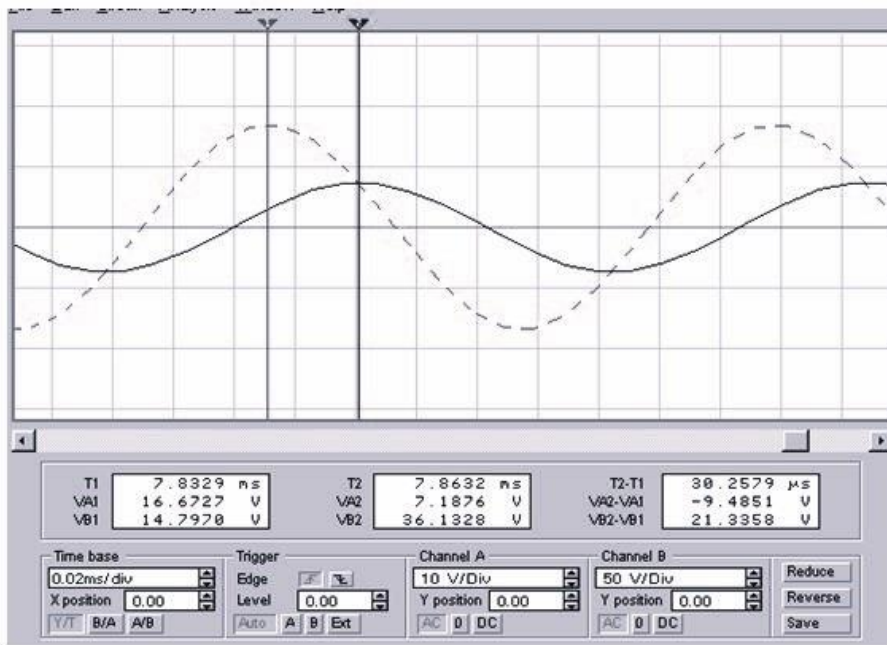


Рисунок 3.3 – Показання на осцилографі у середовищі *Electronics Workbench*

зсув фаз між джерелом і падінням напруги у першій гілці складає

$$\Delta\psi = 2 \times \pi \times (T2-T1)/T = 1.138 \text{ радіан або } 65.227^\circ .$$

Покажемо викладачу результати вимірів, занотуємо їх у бланк звіту лабораторної роботи, збережемо результат роботи у свою «Папку». Завершуємо сеанс роботи середовищі *Electronics Workbench* звичайним шляхом.

4 РОБОТА У МАТЕМАТИЧНОМУ ПАКЕТІ *MathCAD*

4.1 Стислі відомості про пакет *MathCAD*

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

Алфавіт *MathCAD* містить у собі:

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

Записи у робочому та графічному полях *MathCAD* повинні бути виключно повними та абсолютно точними. Текстове поле призначено для запису коментарів.

Системні змінні призначені для організації математичного процесу:

- $\pi = 3.1415926536$ – число π [Ctrl-P];
- $e = 2.71828182$ – основа натурального логарифму;
- ∞ – нескінченність [Ctrl-Z];
- % – відсотки;
- i ; j – уявна одиниця;
- $TOL = 10^{-3}$ – припустима похибка;
- $CTOL = 10^{-3}$ – встановлює точність обмежень у розрахунках;
- $ORIGIN = 0$ – визначає індекс першого елемента векторів та матриць;

- $FRAME = 0$ – лічильник для побудови анімацій;
- $PRN PRECISION = 4$ – кількість значущих цифр;
- $PRN COLWIDTH = 8$ – кількість позицій для числа.

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

4.2 Порядок виконання роботи у пакеті *MathCAD*

4.2.1 Відкрити із командної строки пакет *MathCAD* звичайним шляхом («ПУСК» – «ПРОГРАММИ»- Mathsoft Apps – MathCAD)

4.2.2 Відкрити текстове поле (**Вставка** – **Text Region**“ або **Shift+**”), перейти на українську мову та зробити запис заголовка:

Лабораторна робота № 2

«Дослідження електричного кола синусоїдного струму».

Якщо шрифт, що встановлено, не має слов'янських літер, тоді треба такий підключити. Рекомендована послідовність така:

– маніпулятором «миша» (або комбінацією клавіш **Sift** + **←**) відмітити кілька символів текстового поля. увійти у верхнє меню **Формат** – **Стиль**. З'явиться додаткове вікно («**Стили текста**»);

– обрати опцію зміни стилю («**Изменить**») – з'явиться нове додаткове вікно («**Определение стиля**»);

– натиснути правою кнопкою маніпулятора на клавішу вікна «Font» («Шрифт») – з'явиться нове вікно («Формат текста»). Обрати бажаний однобайтний шрифт (найліпше MS Sans Serif або MS Serif), його стиль, розмір, ефекти;

– підтвердити обрані зміни (ОК – ОК –«Закреть»);

– вийти у робоче поле, перейти на англійську мову.

4.2.3 Зробити присвоєння уявної одиниці $j := \sqrt{-1}$; а потім комп'ютерним змінним присвоїти вхідні дані (без одиниць виміру).

Набрати у робочому полі формули для розрахунку Вашого електричного кола (за прикладом розділу 5), а також необхідні до них коментарі у текстовому полі; розрахувати (**F9**). Порівняти із результатами, що отримали у *Electronics Workbench*.

4.2.4 Показати результати викладачу, занотувати їх у бланк звіту лабораторної роботи, зберегти у пам'ять комп'ютера (**Ctrl+S**). Завершуємо сеанс роботи у середовищі *MathCAD* звичайним шляхом.

5 ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ У ПАКЕТІ *MathCAD*

5.1 Початкові дані

5.1.1 Надано електричне коло (рис.3.1) та його параметри:

– джерело живлення – ідеальне джерело напруги

$$e(t) = 17 \cdot \sin(\omega t + 90^\circ) \text{ В, частотою } f = 6 \text{ КГц,}$$

– величини активних опорів R_1 та R_3 , індуктивного опору котушки $L1$ та опір конденсатора $C3$ (в Омх):

$$R_1 = 30; \quad X_{L1} = 113.1; \quad X_{C3} = 26.53; \quad R_3 = 15;$$

– величини ємності $C2 = 0.47 \text{ мкФ}$ та індуктивності $L3 = 3.12 \text{ мГн}$.

5.1.2 Треба визначити струми у гілках кола, перевірити баланс активних і реактивних потужностей.

Для розв'язку задачі застосувати математичний пакет *MathCAD*. Порівняти розрахунки із показаннями приладів експериментальної установки середовища *Electronics Workbench*.

5.2 Порядок розв'язку методом еквівалентних перетворень

5.2.1 Вводимо початкові дані [4]:

– комплекс діючого значення джерела живлення $E := 12 \cdot e^{j90 \cdot \text{deg}}$,

– частота $f := 6 \cdot 10^3$, $\omega := 2 \cdot \pi \cdot f$ $\omega = 3.77 \cdot 10^4$;

– опір $R_1 := 30$; $X_{L1} := 113.1$; $X_{C3} := 26.526$; $R_3 := 15$;

– ємність $C_2 := 0.47 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$;

– індуктивність $L_3 := 3.12 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$.

5.2.2 Знайдемо ємність третьої гілки $C_3 := \frac{1}{\omega \cdot X_{C3}}$ $C_3 = 1 \cdot 10^{-6}$,

індуктивність першої гілки: $L_1 := \frac{X_{L1}}{\omega}$ $L_1 = 3 \cdot 10^{-3}$.

5.2.3 Визначаємо комплекси опорів у гілках (в Ом).

– $Z_1 := R_1 + j \cdot (X_{L1})$; $Z_1 = 30 + 113.1j$ – опір першої гілки;

– $Z_2 := -j \cdot X_{C2}$; $Z_2 = -56.44j$ – опір другої гілки;

$-Z_3 := R_3 + j \cdot (X_{L3} - X_{C3})$; $Z_3 = 15 + 91.1j$ – опір третьої гілки.

5.2.4 Електричне коло має одне джерело енергії, два вузли і три гілки. Тому для розрахунків застосуємо еквівалентні перетворення.

Друга та третя вітки сполучені між собою паралельно. Тому еквівалентний опір розгалуженої ділянки:

$$Z_4 := \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3}; \quad Z_4 = 33.5 - 133.84j.$$

Повний опір цієї ділянки: $|Z_4| = 137.97$; $\arg(Z_4) = -76\text{deg}$.

Визначасмо еквівалентний опір всього кола

$$Z_{\text{екв}} := Z_1 + Z_4, \quad Z_{\text{екв}} = 63.5 - 20.747j.$$

5.2.5 Струм першої вітки знайдемо за законом Ома: $I_1 := \frac{E}{Z_{\text{екв}}}$

$$I_1 = -0.056 + 0.171j; \quad |I_1| = 0.18 \quad \arg(I_1) = 108.1\text{deg}.$$

У показовій формі запису $I_1 = 0.18 \cdot e^{j108 \cdot \text{deg}}$.

5.2.6 Напряга на розгалуженій ділянці кола $U_4 := Z_4 \cdot I_1$

$$U_4 = 21 + 13.19j; \quad |U_4| = 24.78; \quad \arg(U_4) = 32.1\text{deg}.$$

5.2.7 Визначаємо струми у розгалужених гілках кола.

$$I_2 := \frac{U_4}{Z_2} \quad I_2 = -0.234 + 0.372j; \quad |I_2| = 0.439 \quad \arg(I_2) = 122.1\text{deg};$$

$$I_3 := \frac{U_4}{Z_3} \quad I_3 = 0.178 - 0.201j; \quad |I_3| = 0.268 \quad \arg(I_3) = -48.5\text{deg}.$$

Отже, у показовій формі запису ці струми можна зобразити так:

$$I_2 = 0.439 \cdot e^{j122 \cdot \text{deg}}; \quad I_3 = 0.268 \cdot e^{-j48.5 \cdot \text{deg}}.$$

5.2.8 Падіння напруги на третій ділянці кола: $U_3 := Z_3 \cdot I_3$;

$$U_3 = 20.98 + 13.187j; \quad |U_3| = 24.784; \quad \arg(U_3) = 32.146\text{deg}.$$

5.2.9 Визначаємо кут зсуву фаз між джерелом живлення та падінням напруги на третій ділянці кола:

$$\arg(E) - \arg(U_3) = 57.85\text{deg}; \quad \text{або у радіанах } \arg(E) - \arg(U_3) = 1.01.$$

5.2.10 Миттєві значення струмів у колі:

$$i_1(t) = 0.18 \cdot \sin(\omega t + 108^0) \quad ; \quad i_2(t) = 0.439 \cdot \sin(\omega t + 122^0) \quad ; \\ i_3(t) = 0.268 \cdot \sin(\omega t - 48.5^0) \quad .$$

5.3 Розв'язок за законами Кірхгофа шляхом обернення матриць

5.3.1 Електричне коло має два вузли і три гілки. Тому за законами Кірхгофа треба скласти три рівняння: одне – за першим законом, два – за другим. У комплексній формі така система рівнянь може мати, наприклад, такий вигляд (5.1):

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_1 - \underline{I}_2 - \underline{I}_3 &= 0 \\ \underline{Z}_1 \underline{I}_1 + \underline{Z}_2 \underline{I}_2 &= \underline{E} \\ \underline{Z}_1 \underline{I}_1 + \underline{Z}_3 \underline{I}_3 &= \underline{E} \end{aligned} \right\} . \quad (5.1)$$

5.3.2 Розв'язання такої системи можна виконати із використанням матричної алгебри у наступній послідовності [5]:

- встановлюємо відлік індексів у матрицях, змінивши нижню границю індексу: ORIGIN:=1 (або Math – Options – Array Origin 1);
- переходимо до робочого поля і присвоюємо:

уявну одиницю $\mathbf{j} := \sqrt{-1}$, напругу джерела $E := 12 \cdot e^{j \cdot 90 \text{deg}}$, опір кожного елемента схеми: $Z1 := 30 + j \cdot 113.1$, $Z2 := -j \cdot 56.44$, $Z3 := 15 + j \cdot 91.1$;

- складаємо головну матрицю і вектор-стовпець правих частин:

$$\Delta := \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 \\ Z1 & Z2 & 0 \\ Z1 & 0 & Z3 \end{bmatrix} \quad B := \begin{bmatrix} 0 \\ E \\ E \end{bmatrix} .$$

Струми у гілках кола знаходимо або за формулою: $\mathbf{I} := \Delta^{-1} \cdot \mathbf{B}$, або за допомогою вбудованої функції $\mathbf{I} := \text{lsolve}(\Delta, \mathbf{B})$.
Результат в алгебраїчній формі запису має вигляд:

$$I = \begin{bmatrix} -0.056 + 0.171j \\ -0.234 + 0.372j \\ 0.178 - 0.201j \end{bmatrix},$$

або у показовій формі: $|I_1| = 0.18$, $\varphi_1 := \frac{\arg(I_1)}{\text{deg}}$ $\varphi_1 = 108.1^\circ$;

$$|I_2| = 0.439, \quad \varphi_2 := \frac{\arg(I_2)}{\text{deg}} \rightarrow 122.1^\circ;$$

$$|I_3| = 0.268, \quad \varphi_3 := \frac{\arg(I_3)}{\text{deg}} \rightarrow -48.5^\circ.$$

5.3.3 Спади напруг на гілках за законом Ома:

$$U1 := Z1 \cdot I_1, \quad \mathbf{U1} = -20.98 - 1.19j, \quad |U1| = 21.02 ;$$

$$U2 := Z2 \cdot I_2, \quad \mathbf{U2} = 20.98 + 13.19j, \quad |U2| = 24.78 ;$$

$$U3 := Z3 \cdot I_3, \quad \mathbf{U3} = 20.98 + 13.19j, \quad |U3| = 24.78 .$$

Як бачимо, $U2 = U3$, а рівняння за другим законом Кірхгофа:

$$U1 + U2 = E \quad \text{є перевірочним.}$$

5.4 Розв'язок за законами Кірхгофа шляхом використання оператор-функцій

Розв'язання системи рівнянь (5.1) у пакеті *MathCad* може бути виконано за допомогою операторів-функцій *Given – Find(x1,x2,...)* або *Given – Minerr(x1,x2,...)*. Для цього треба спочатку задати початкові значення для розрахунку, наприклад: $I_1:=1$, $I_2:=1$, $I_3:=1$.

Далі у робочому полі наберемо між операторами *Given – Find* систему рівнянь (5.1).

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

$$\text{Струм} := \text{Find}(I1, I2, I3) .$$

$$\begin{aligned} \text{Струм}_1 &= -0.056 + 0.171j & ; & & \text{Струм}_2 &= -0.234 + 0.372j & ; \\ \text{Струм}_3 &= 0.178 - 0.201j & . & & & & \end{aligned}$$

6 ПЕРЕВІРКА ВІРНОСТІ РОЗВ'ЗКУ ШЛЯХОМ СКЛАДАННЯ БАЛАНСУ ПОТУЖНОСТЕЙ

Потужність джерела $S1 := U \cdot \overline{I_1}$ $S1 = 2.049 - 0.669j$ ВА,
де $\overline{I_1}$ - спряжений комплекс струму, що проходить через джерело
енергії (клавіші SHIFT [""]).

Потужність споживачів

$$S2 := Z1 \cdot (|I_1|)^2 + Z2 \cdot (|I_2|)^2 + Z3 \cdot (|I_3|)^2,$$

Пересвідчимося, що $S2 = 2.049 - 0.669j$ – отже баланс
дотримано.

7 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

7.1 Що називають миттєвим, діючим, амплітудним, середнім значенням змінного струму?

7.2 Якщо постійний струм визначають одним параметром, наприклад $I = 5$ Ампер, то скільки треба величин для визначення змінного струму? Навести приклад.

7.3 Яким чином переходять від миттєвої до комплексної форми запису змінного струму? Які бувають різновиди форм запису комплексних чисел та формули співвідношень між ними?

7.4 Як залежить опір котушки індуктивності від частоти струму в ній? Наведіть приклади запису опору в комплексній формі.

7.5 Як залежить опір ємності від частоти зміни напруги на її обкладинках? Наведіть приклади запису опору в звичайній і комплексній формах.

7.6 Чому дорівнює повний опір ділянки електричного кола, яка складається із послідовного сполучення R та L елементів?

7.7 Чому дорівнює повний опір ділянки електричного кола, яка складається із послідовного сполучення R та C елементів?

7.8 Якщо напруга $u = 5 \cdot \sin(\omega \cdot t + 30^\circ)$ прикладена до кола із опором $Z = 3 + j4$. Чому дорівнює струм цього кола?

7.9 Якщо напруга $u = 5 \cdot \sin(10^6 \cdot t + 0^\circ)$ прикладена до кола із послідовного сполучення $R = 6$ Ом та $C = 12.5$ нФ. Чому дорівнює струм цього кола?

7.10 Як струм $i = 5 \cdot \sin(10^6 \cdot t - 135^\circ)$ представити у алгебраїчній та у експоненціальній формах запису?

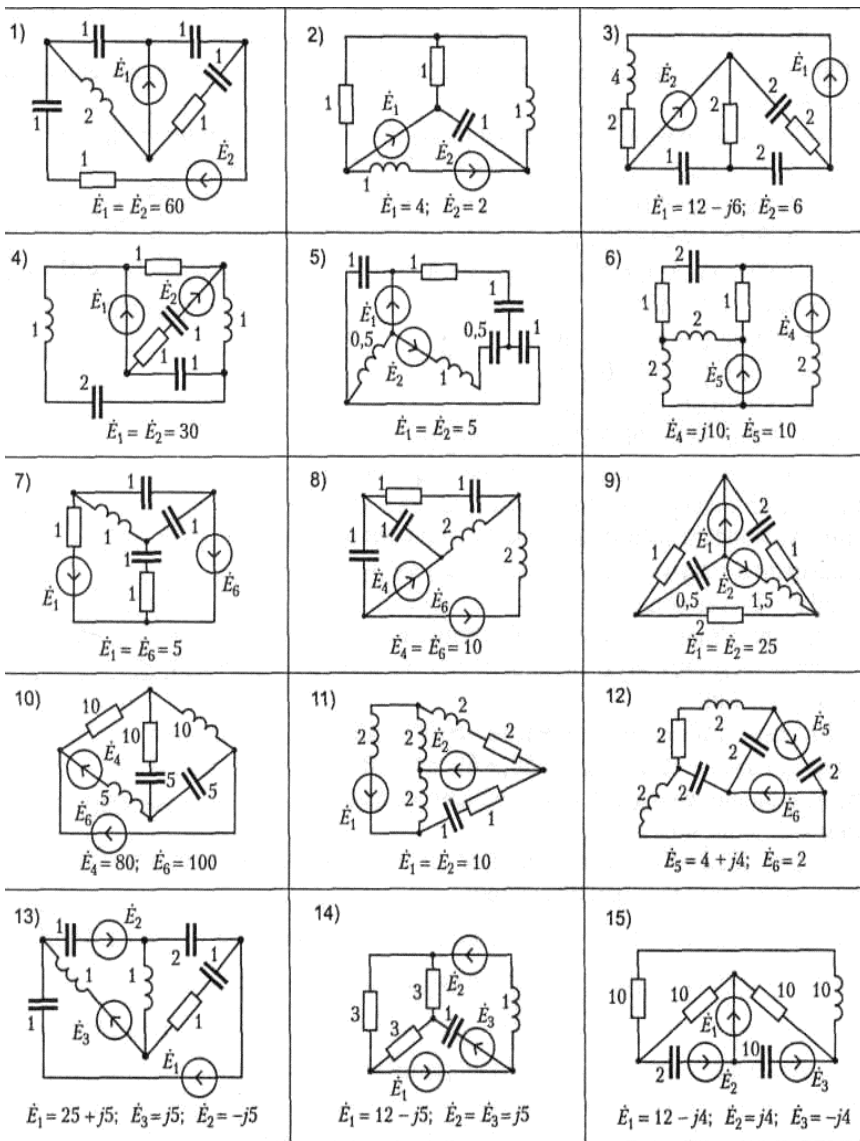
7.11 Як знайти повний, активний та реактивний опори ділянки електричного кола, яка складається із послідовного сполучення R , L та C - елементів?

7.12 Як знайти кут зсуву фаз між струмом і напругою на вході електричного кола, яка складається із послідовного сполучення R , L та C - елементів?

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

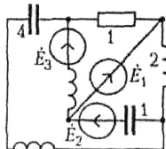
1. Конспект лекцій з дисципліни «Теорія електричних кіл та сигналів» для студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» всіх форм навчання. Частина I. / Укл.: В.О. Костенко – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2024. – 108 с.
2. Основи теорії кіл, сигналів та процесів в системах технічного захисту інформації / Ю.О. Коваль, О. Милютченко, А.М. Олейніков, В.М. Шоколо / Заг. ред. В.М. Шокола – Харків.: НТМТ, 2011. – 544 с.
3. Маляр В.С. Теоретичні основи електротехніки / Маляр В.С. – Л. Profbook – Львівська політехніка. – 2018. – 416 с.
4. Коваль Ю.О. Основи теорії кіл: підруч. [для студ. вищ. навч. закл.] / Ю.О.Коваль, Л.В.Гринченко, І.О.Милютченко, О.І.Рибін. – Харків: Компанія «СМІТ», 2008. – 432 с.
5. Паначевний Б.І. Загальна електротехніка: теорія і практикум / Б.І. Паначевний, Ю.Ф. Свєргун Ю.Ф. – К.: Каравела, 2003. – 440 с.

Додаток Схеми до лабораторної роботи



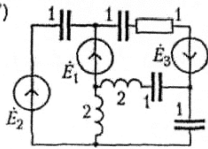
Продовження Додатку

16)



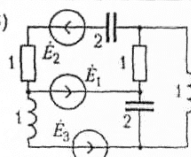
$$\dot{E}_1 = 10 + j25; \dot{E}_2 = \dot{E}_3 = 10$$

17)



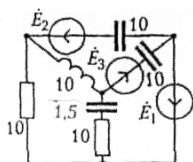
$$\dot{E}_1 = 5 - j5; \dot{E}_2 = -\dot{E}_3 = -j5$$

18)



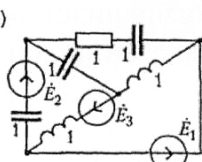
$$\dot{E}_1 = 65 + j30; \dot{E}_3 = -\dot{E}_2 = j30$$

19)



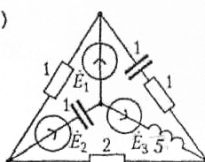
$$\dot{E}_1 = 20 + j50; \dot{E}_2 = -\dot{E}_3 = 20$$

20)



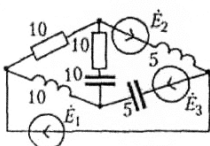
$$\dot{E}_1 = 20 - j10; \dot{E}_3 = -\dot{E}_2 = j10$$

21)



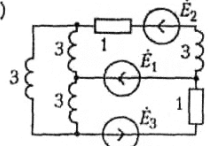
$$\dot{E}_1 = 50 - j8; \dot{E}_2 = -\dot{E}_3 = j8$$

22)



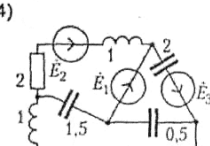
$$\dot{E}_1 = 50 - j10; \dot{E}_2 = -\dot{E}_3 = j10$$

23)



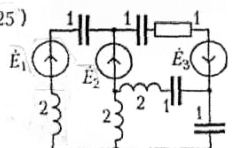
$$\dot{E}_1 = 18 - j9; \dot{E}_2 = -\dot{E}_3 = -j9$$

24)



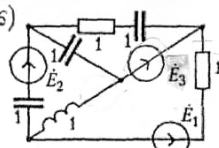
$$\dot{E}_1 = 15 + j9; \dot{E}_2 = -\dot{E}_3 = j9$$

25)



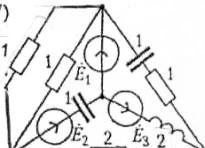
$$\dot{E}_1 = 5 - j5; \dot{E}_2 = -\dot{E}_3 = 20 + j50$$

26)



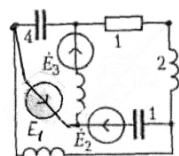
$$\dot{E}_1 = 10 - j10; \dot{E}_3 = -\dot{E}_2 = j10$$

27)



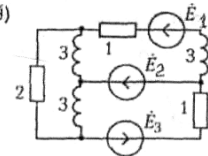
$$\dot{E}_1 = 20 - j8; \dot{E}_2 = -\dot{E}_3 = j8$$

28)



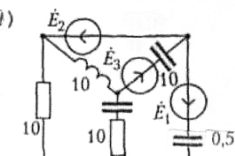
$$\dot{E}_1 = 10 + j25; \dot{E}_2 = \dot{E}_3 = 10$$

29)



$$\dot{E}_1 = 27 - j9; \dot{E}_2 = -\dot{E}_3 = -j9$$

30)



$$\dot{E}_1 = 10 + j50; \dot{E}_2 = -\dot{E}_3 = 20$$