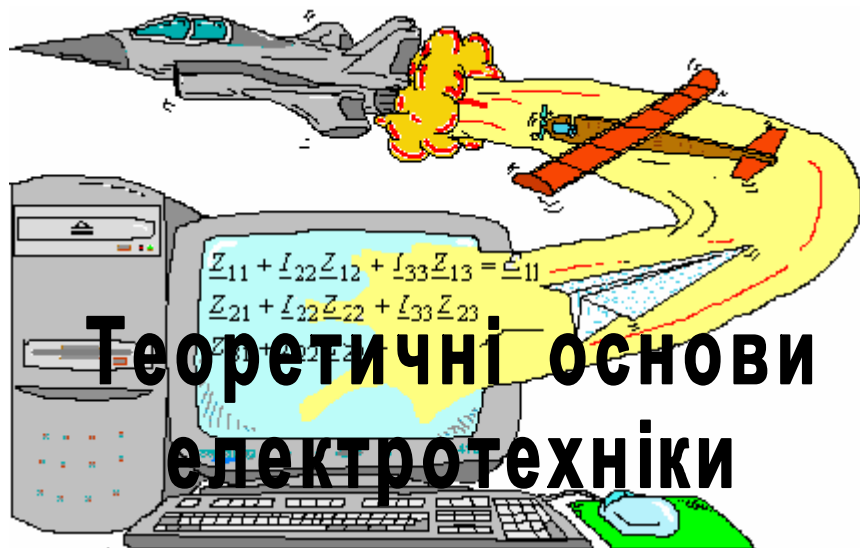


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ



Віртуальна лабораторія

Методичний посібник

*О.А. ЗЕЛЕНКОВ
О.О. БУНЧУК*

Київ 2003

ВСТУП.

Поширюється коло професій, для яких комп'ютерна грамотність стає необхідною. Потреба у відповідній освіті призводить до появи різноманітної літератури – від довідників до монографій. До цього типу літератури відноситься і ряд запланованих авторами до видання навчальних посібників. Звичайно, оволодіння абеткою комп'ютерного освіти не зробить читача кваліфікованим програмістом або користувачем. Для цього необхідно вивчення більш спеціалізованої літератури і особливо особистий досвід розв'язання конкретних задач. Але ефективність того і іншого різко зростає, якщо зрозумілі найпростіші питання. Вдосконалення знань може бути продовжене самостійно у виробничій діяльності в тому і тільки в тому випадку, якщо для цього закладені основи в процесі навчання у вузі. Саме по собі детальне вивчення тих або інших мов програмування (асемблер, Паскаль, Бейсик, Сі і т. ін.) актуальне лише в процесі розробки конкретного програмного забезпечення або модернізації існуючого. Так детальне вивчення макроасемблера доцільно в випадку написання асемблерних програм з наступною трансляцією і розміщенням в ПЗП ЕОМ, що функціонує в реальному масштабі часу. А от детальне вивчення основ алгоритмізації (поняття алгоритму, типи алгоритмів, правила їх складання і т.ін.) і програмування (принципи структурного та об'єктного програмування, інструментальні засоби програмування, структура і особливості прикладного програмного забезпечення і т.ін.) безвідносно до мов програмування є обов'язковим.

У загальному випадку при організації комп'ютерної освіти для майбутніх інженерів всіх спеціальностей факультету систем управління можна виділити наступні розділи, логічно пов'язані між собою:

- основні загальні відомості про персональні ЕОМ (ПЕОМ) і програмування;
- елементи і функціональні вузли мікропроцесорних систем;
- програмне забезпечення ПЕОМ;
- математичні моделі, числові засоби обчислювальної математики і математичне моделювання;
- комп'ютерні технології.

Впровадження технологічних процесів, які дозволили на одному зрізі кристалу площею в декілька десятків квадратних міліметрів розмішувати електронні схеми, що складаються з сотень тисяч логічних активних елементів, дозволило масово виробляти мікропроцесори, що по своїм параметрам і функціональним можливостям значно переважають центральні процесори великих дорогих стаціонарних ЕОМ. На основі мікропроцесорів створюються мікро- і міні-ЕОМ, персональні ЕОМ різноманітного призначення і високопродуктивні обчислювальні системи. Необхідно при цьому підкреслити, що мікромініатюризація не самоціль, а, очевидно, в сучасних умовах єдиний шлях до досягнення головної мети – підвищення швидкодії і збільшення логічних можливостей обчислювальних систем. Швидкодія елементів перемикачів досягла настільки високих порядків, що швидкодія схеми в цілому визначається довжиною провідників, що зв'язують окремі логічні елементи, бо враховується час подолання електричним сигналом навіть дуже невеликих відстаней, що вимірюються сотими частками міліметра.

Перехід до великих інтегральних схем різко підвищив надійність ЕОМ. Важливість чинника надійності і його вплив на можливість застосування засобів обчислювальної техніки в різноманітних областях виробничої діяльності, науки, освіти, побуту неможливо переоцінити.

Революція в області обчислювальної техніки підняла на новий рівень значення інформатики, що в широкому трактуванні об'єднує ціле гроно науково-технічних напрямків. Сюди передусім входить новий напрям сучасної математики, пов'язаний із створенням засобів математичного моделювання явищ природи і суспільної діяльності людини, а на основі цих засобів – алгоритмів і програм для ЕОМ. Значимість математики в створенні універсальних засобів обробки даних, придатних для рішення цілого класу різноманітних по своїй фізичній суті задач, важко переоцінити.

Важливо відзначити, що «комп'ютерна» математика свої головні зусилля спрямовує на врахування точності задання вхідних даних, що цілком необхідно для отримання практично надійних результатів. Необхідність такого наближення до практичних потреб зажадала створення нових теорій, по логічній глибині переважаючих ті, що були створені в класичній математиці. У сучасній «комп'ютерній» математиці подальший розвиток отримала теорія

алгоритмів, що лягла в теоретичну основу програмування. Програмування зі своїми численними проблемами в діапазоні від теоретичних засобів доказу правильності програм до засобів оптимізації машинних кодів входить в склад цієї нової математики як її невід'ємний розділ. Особливе місце в програмуванні займає теорія і практика розробки системного математичного забезпечення, що перетворює позбавлену інтелекту апаратуру ЕОМ в логічно розвинений інструмент, «що думає».

В тісній взаємодії між «комп'ютерною» математикою і комп'ютерною інженерією особлива роль належить програмуванню і дискретній математиці. Теоретичні результати цих розділів математики дадуть методику побудови алгоритмів автоматичного проектування окремих приладів і обчислювальних систем в цілому.

Комп'ютерна революція виявила вплив не тільки на науково-технічні дисципліни, але і на всю сферу виробничої і суспільної діяльності людей. Темпи впровадження ЕОМ в ці сфери різко зросли, в результаті чого лавинно збільшилася потреба у фахівцях, що уміють використовувати цей універсальний логічний інструмент в різноманітних галузях виробництва, в управлінні, в освіті, науці. ЕОМ різних класів і типів стають невід'ємним елементом в повсякденній виробничій і управлінській діяльності.

Програми і навчальні плани підготовки фахівців безперервно удосконалюються з урахуванням потреб розвитку інформатики і її сучасної матеріальної основи – обчислювальної техніки. З основними загальними відомостями про ПЕОМ і програмування знайомлять студентів 1–го і 2–го курсів у рамках предмету «Обчислювальна техніка і програмне забезпечення». Дисципліна по мікропроцесорам ПЕОМ (3 курс) є логічним продовженням цього основного курсу. В ній більш детально розглядаються специфічні особливості означуваної техніки, широкі можливі сфери її застосування і її програмне забезпечення. Для фахівців, що використають мікропроцесори і вбудовані мікро-ЕОМ, як основну логічну ланку цифрової автоматики, дуже важливо мати більш повне подання про структуру мікропроцесора, про систему його команд, про засоби взаємодії з зовнішніми приладами.

Комп'ютерні технології знаходять все більше застосування в якості автоматизованих робочих місць, систем проектування різноманітного призначення, в якості інтелектуальних терміналів в

обчислювальних системах автоматизації наукових досліджень, в якості робочих місць систем автоматизації управлінської, обліково–бухгалтерської, економічної, видавничької діяльності. Для цих автоматизованих робочих місць важливий діалоговий інтерактивний режим спілкування з обчислювальною системою, з іншими абонентами цього середовища. Дуже істотно, що діалог з ПЕОМ майже в усіх випадках базується на використанні дисплею, що служить не тільки для візуалізації результатів розв’язання поставленої перед ПЕОМ задачі, але головним чином є індикатором для створення текстових і графічних документів з можливістю їхнього виправлення, заміни, модифікації під час роботи. Для розгляду цих питань призначається курс «Комп’ютерні технології».

Математичне моделювання є частиною процесу створення сучасних технічних засобів автоматики і інформаційно – вимірювальної техніки. Обчислювальні засоби, що програмно реалізуються на ЕОМ, стали основним практичним інструментом розробників автоматичних вимірювальних інформаційних приладів, систем автоматичного управління. Створюється спеціальне програмне забезпечення для розв’язання різноманітних задач у цій області, основними типами яких є:

- ідентифікація динамічних характеристик лінійних систем при використанні різноманітних описів вхідних впливів;

- дослідження нелінійних автоматичних систем на основі наближених засобів рішення нелінійних диференціальних рівнянь;

- статистичне імітаційне моделювання на ЕОМ автоматичних систем управління, що містить генерацію випадкових впливів, моделювання перетворення інформативних параметрів сигналів у досліджуваних системах і статистичну обробку вихідних сигналів (побудова гістограм, кореляційних функцій, оцінка по критеріям);

- розв’язання задачі по визначенню імовірності знаходження вектору досліджуваних параметрів, що характеризують систему управління, в заданій допустимій області;

- аналіз спектрів різноманітних сигналів з використанням швидкого перетворення Фур’є в задачах розпізнання образів і цифрової обробки сигналів;

- аналіз і оцінка погрішностей вимірювальних систем на основі засобів частинних похідних, імовірнісного моделювання і ін.;

дослідження приладів автоматики шляхом планування експерименту;

розв'язання задач автоматичного проектування систем автоматичного управління з використанням різноманітних пакетів прикладних програм;

розв'язання задач кількісної оцінки надійності власне програмного забезпечення, що є частиною системи цифрового автоматичного управління.

Для розв'язання цих задач створюються спеціалізовані пакети прикладних програм – найбільш розповсюджена форма програмного забезпечення. Майбутні фахівці повинні уміти використовувати розроблені прикладні програми і при необхідності доповнювати їх своїми програмами для конкретної мети. Звичайно пакети прикладних програм мають модульну структуру. Кожний модуль має власне ім'я, за допомогою якого він може бути викликаний іншим модулем програми, і власний набір даних. Наприклад, модуль може являти собою програмну реалізацію якого–небудь чисельного засобу обчислювальної математики (метод Н'ютона–Рафсона для чисельного рішення системи нелінійних алгебраїчних рівнянь, метод Рунге–Кутта для чисельного рішення системи диференціальних рівнянь, метод найменших квадратів і т. ін.) або групи методів. Це дозволяє поширити склад пакету на основі знов розроблених алгоритмів, здійснити заміну окремих модулів і проводити подальше поповнення пакетів. Оскільки пакети функціонують під управлінням операційних систем (наприклад DOS або WINDOWS), то вони повинні задовольняти основним вимогам до цих систем. Таким чином, можна вважати, що пакет прикладних програм – це особливим чином організовані програмні модулі орієнтовані на певну операційну систему і клас ЕОМ, що розроблюються для розв'язання типових задач з метою забезпечення різноманітних потреб великого числа користувачів.

Необхідно відзначити тісний зв'язок між математичним моделюванням і чисельними засобами обчислювальної математики, що дозволяють отримати рішення поставленої задачі з необхідною точністю на ЕОМ. В той же час, з розвитком засобів обчислювальної математики нерозривно пов'язаний розвиток програмування, що іде по шляху спрощення засобів спілкування людини з ЕОМ.

Досвід розв'язання різноманітних наукових і технічних задач із застосуванням ЕОМ, а також консультації з широким колом фахівців в області комп'ютерних технологій дозволяє авторам зробити висновок, що для становлення професійної бази майбутнього фахівця, що володіє основами комп'ютерної освіти в області різноманітних комп'ютерних технологій, необхідне послідовне вивчення відповідних питань, логічно пов'язаних між собою «за принципом від простого до складного». Рекомендована авторами послідовність вивчення матеріалу знайшла відображення в наступних навчальних посібниках:

Бунчук А.А., Зеленков А.А. ПЕОМ і основи програмування. Практичний курс.

Зеленков А.А. Елементи і функціональні вузли мікропроцесорних систем.

Зеленков А.А., Соченко П.С. Мікропроцесорні системи.

Зеленков А.А., Кудиненко А.В. Матричні і топологічні методи аналізу і моделювання електричних кіл.

Зеленков А.А., Бунчук А.А. Математичні моделі в розрахунках на ЕОМ.

Головна мета цих навчальних посібників – первинне ознайомлення з найважливішими напрямками сучасної інформатики (комп'ютерні технології і математичне моделювання) тих читачів, що хочуть в порівняно стислій і доступній формі ознайомитися з їх теоретичними основами і принципами використання.

Різнomanітність майбутніх професій і рівня підготовки передбачуваного читача змушують авторів відмовитися від традиційного для подібного типу літератури, надто формалізованого стилю викладання. Викладання ведеться, в основному, на «фізичному» рівні строгості і орієнтується не стільки на математичну підготовленість читача (що тим не менше повинна бути), а на здоровий глузд і кмітливість. Як правило, розгляд того або іншого питання проводиться на простому типовому прикладі, а після цього намічаються шляхи узагальнення отриманих результатів на більш складні випадки. В деяких посібниках в кінці кожного розділу поміщені задачі різних ступенів складності. Для розв'язання більшості з них потрібне ясне розуміння принципів, викладених в основному тексті, і спроможність самостійно вирішувати їх.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЛІНІЇ ПЕРЕДАЧІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Основна задача роботи: дослідження різних режимів роботи лінії передачі електричної енергії і визначення її основних енергетичних характеристик.

Порядок виконання роботи

1. Скориставшись можливостями пакету Electronics Workbench (див. дод.), побудувати еквівалентну схему моделювання лінії передачі, враховуючи опір лінії $R_{л}$, опір навантаження (споживача) $R_{н}$ і генератора постійної напруги з ЕРС E (внутрішній опір генератора вважати рівним нулю).

Параметри лінії передачі вказані в табл.1 згідно з варіантом. Вибір варіанта погоджується з викладачем.

2. Визначити енергетичні характеристики лінії передачі, використовуючи програмне забезпечення MathCAD:

струм у лінії I ;

напруга навантаження лінії $U_{н}$;

потужність на навантаженні $P_{н}$;

потужність генератора $P_{г}$;

коефіцієнт корисної дії η ;

втрати напруги у лінії ΔU .

3. Побудувати залежність енергетичних характеристик від опору навантаження $I = f(R_{н})$, $U_{н} = f(R_{н})$, $P_{н} = f(R_{н})$, $\eta = f(R_{н})$ згідно з заданими границями вимірювання.

4. Здійснити математичне моделювання лінії передачі постійного струму, вимірюючи струм, напругу втрат у лінії і напругу на навантаженні при зміні опору навантаження (рис.1).

Дані вимірювання занести у таблицю, використовуючи додаток EXCEL з пакету Microsoft OFFICE.

Таблиця 1

Номер варіанта	Опір лінії $R_{Л}$, Ом	Опір навантаження $R_{Н}$, Ом	ЕРС генератора E , кВ	Діапазон вимірювань $R_{Н}$, Ом
1	2	8	1	0–20
2	6	12	2	0–30
3	5	15	5	0–20
4	8	15	5	0–20
5	6	20	3	0–20
6	5	20	2	0–30
7	8	30	1	0–50
8	5	20	1	0–30
9	10	30	5	0–50
10	8	25	4	0–40
11	6	16	3	0–30
12	6	18	3	0–30

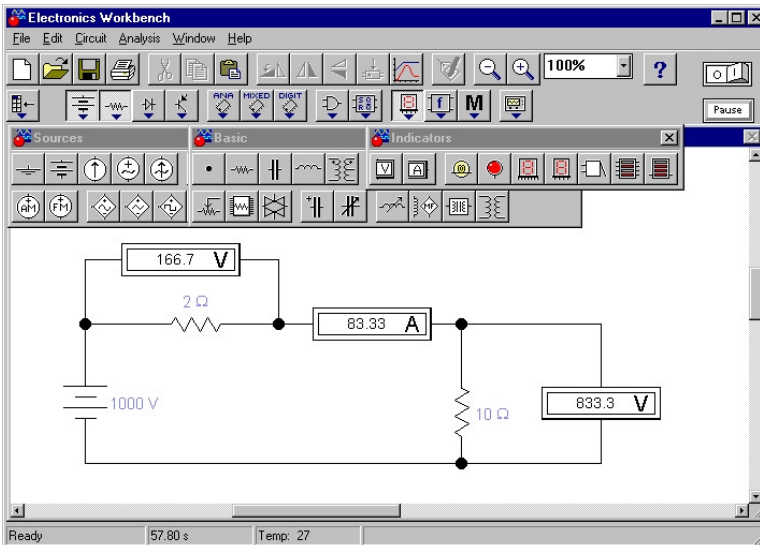


Рис. 1

5. Побудувати графік потужності навантаження в залежності від опору навантаження.

Зміст звіту

Основна задача та порядок виконання роботи.

Схема віртуальної лінії передачі електричної енергії з підключеними вимірювальними приладами.

Розрахункові формули.

Таблиця результатів моделювання.

Графіки залежностей (п.3 виконання роботи).

Графіки залежностей (п.5 виконання роботи).

Висновки до лабораторної роботи.

Запитання для самоперевірки

1. Що таке лінія передачі і для чого вона використовується?
2. Довести наступні формули, що визначають основні електричні характеристики:

$$U_H = \frac{E}{1 + \frac{R_L}{R_H}}, \quad \Delta U = \frac{E}{1 + \frac{R_H}{R_L}}, \quad P_G = \frac{E^2}{R_L + R_H}, \quad P_H = \frac{E^2}{\left(1 + \frac{R_L}{R_H}\right)^2} \frac{1}{R_H},$$

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{R_L}{R_H}}.$$

3. Довести, що потужність споживача (потужність навантаження) буде максимальною при умові

$$R_L = R_H.$$

4. Які режими роботи використовуються в лініях передачі?
5. Де і чому використовується режим передачі електричної енергії з максимальною потужністю?
6. Які допущення прийняті при моделюванні лінії передачі?

Література: [1, с.47–50].

Робота 2

ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗГАЛУЖЕНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Основна задача роботи: дослідження електричного кола постійного струму шляхом експериментальної перевірки результатів розрахунку методом рівнянь Кірхгофа.

Порядок виконання роботи

1. Накреслити схему розгалуженого кола з параметрами відповідно до варіанта (табл. 2).

Таблиця 2

Номер варіанта	E_1 , В	E_2 , В	R_1 , Ом	R_2 , Ом	R_3 , Ом	R_4 , Ом	R_5 , Ом	R_6 , Ом
1	50	100	2	4	2	6	8	4
2	100	50	4	2	6	4	4	8
3	60	120	6	3	6	4	9	6
4	120	60	4	8	8	6	4	8
5	80	80	8	10	10	6	4	5
6	50	50	12	4	6	2	8	10
7	100	100	8	8	8	4	4	4
8	120	120	6	9	9	8	10	12
9	80	60	3	3	8	4	4	6
10	90	120	12	10	10	9	9	12
11	180	90	10	12	12	8	8	6
12	90	60	9	6	9	6	10	12

2. Розрахувати струми у всіх гілках електричного кола методом рівнянь Кірхгофа. Результат розрахунку записати до табл. 3.

3. Здійснити математичне моделювання заданого електричного кола, вимірюючи струми у всіх гілках (рис. 2). Результати вимірювань занести до табл. 3.

4. Порівняти результати розрахунку та моделювання шляхом визначення відносної похибки.

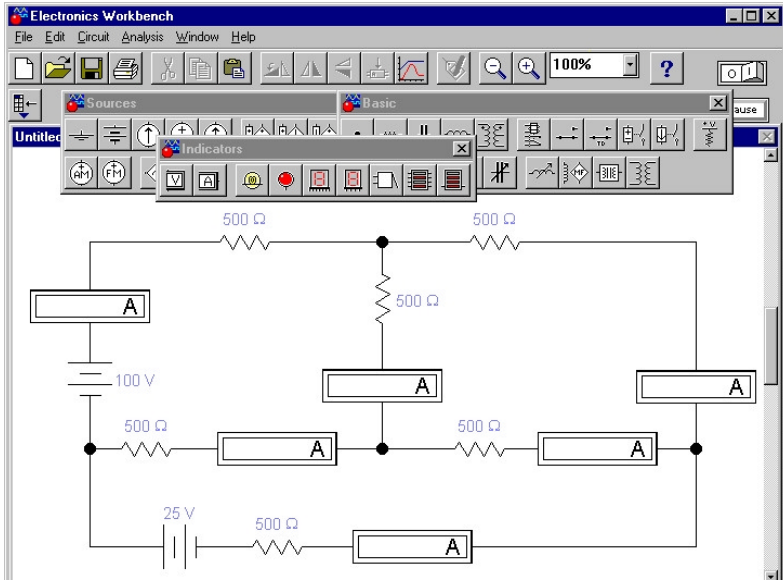


Рис. 2

Таблиця 3

Режим	Значення струмів					
	I_1 , мА	I_2 , мА	I_3 , мА	I_4 , мА	I_5 , мА	I_6 , мА
Розрахунок моделювання						
Похибка						
Моделювання з джерелом напруги E_1						
Моделювання з джерелом напруги E_2						
Алгебраїчна сума за принципом суперпозиції						

5. Здійснити математичне моделювання заданого електричного кола з використанням принципу суперпозиції. Результати моделювання записати до табл. 3.

6. Довести еквівалентність заміни “зірка–трикутник” шляхом моделювання відповідного електричного кола.

Зміст звіту

Основна задача та порядок виконання роботи.

Схема електричного кола з підключеними вимірювальними приладами.

Розрахунок заданого електричного кола.

Таблиця результатів моделювання та розрахунку.

Схема електричного кола, що пояснює еквівалентність заміни “зірка–трикутник”.

Висновки до лабораторної роботи.

Запитання для самоперевірки

1. Які методи можуть бути використані для розрахунку складних електричних кіл постійного струму?

2. Як складаються рівняння Кірхгофа?

3. Як перевірити правильність розрахунку електричного кола?

4. Чому відрізняються результати розрахунку та моделювання?

5. В яких випадках доцільно використовувати метод суперпозиції для розрахунку електричних кіл?

6. В яких випадках перетворення гілок складного електричного кола вважається еквівалентним?

7. Поясніть принцип розрахунку струмів у гілках електричного кола методом суперпозиції.

Література: [1, с.31, 44, 45–48, 60–61].

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА
СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ З ПОСЛІДОВНИМ
З'ЄДНАННЯМ РЕЗИСТОРА, ІНДУКТИВНОСТІ
ТА КОНДЕНСАТОРА**

Основна задача роботи: засвоєння основних законів синусоїдного струму для електричного кола з послідовним з'єднанням пасивних елементів: резистора r , індуктивності L і конденсатора C .

Порядок виконання роботи

1. Накреслити схему електричного кола з параметрами відповідно до варіанта (табл. 4).

Таблиця 4

Номер варіанта	Амплітуда ЕРС, E_m , В	Частота ω , рад/с	Опір R , Ом	Індуктивність L , Гн	Ємність C , мкФ
1	100	100	10	0,2	1000
2	100	200	20	0,25	500
3	120	200	15	0,15	750
4	150	300	25	0,1	400
5	180	100	20	0,25	500
6	200	150	30	0,2	800
7	100	250	20	0,1	500
8	120	300	10	0,05	300
9	180	200	15	0,15	400
10	150	100	15	0,3	1200
11	200	300	25	0,08	400
12	250	300	20	0,06	500

2. Розв'язати систему диференціальних рівнянь, що описують задане послідовне електричне коло, відносно струму $i(t)$ та напруги на конденсаторі $u_C(t)$ у відповідному програмному середовищі.

Примітка. Розв'язання системи диференціальних рівнянь провести при нульових початкових умовах та заміні змінних i на y_0 , u_C на y_1 .

Згідно з другим законом Кірхгофа $ir + L \frac{di}{dt} + u_C = e$ та диференціальним співвідношенням між струмом та напругою на конденсаторі $i = C \frac{du_C}{dt}$ маємо систему рівнянь

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dy_0}{dt} = \frac{1}{L} e - \frac{r}{L} y_0 - \frac{1}{L} y_1 \\ \frac{dy_1}{dt} = \frac{1}{C} y_0 \end{array} \right\}$$

Рішення системи диференціальних рівнянь здійснюються за допомогою блоку:

$$y := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad D(t, y) := \begin{pmatrix} \frac{1}{L} \cdot E_m \cdot \sin(\omega \cdot t) - \frac{R}{L} \cdot y_0 - \frac{1}{L} \cdot y_1 \\ \frac{1}{C} \cdot y_0 \end{pmatrix}$$

$$Z := \text{rkfixed}(y, a, b, k, D)$$

Для визначення невідомої Z вбудована функція *rkfixed* використовує такі параметри: a – час початку спостереження (початку інтегрування системи рівнянь), b – час закінчення спостереження, k – кількість розрахункових точок на інтервалі спостереження. Слід зазначити, що всі змінні, які використовуються у виразах (формулах) повинні бути активізовані заздалегідь.

Рішення Z є матрицею (рис. 3), що має k рядків, нульовий стовпчик відповідає поточному часу, перший стовпчик відповідає

першій змінній y_0 (тобто $i(t)$), другий – другій змінній y_1 (тобто $u_C(t)$).

	0	1	2
2	$1.257 \cdot 10^{-3}$	0.061	0.051
3	$1.885 \cdot 10^{-3}$	0.133	0.171
4	$2.513 \cdot 10^{-3}$	0.231	0.397
5	$3.142 \cdot 10^{-3}$	0.349	0.759
6	$3.77 \cdot 10^{-3}$	0.486	1.282
7	$4.398 \cdot 10^{-3}$	0.637	1.986
8	$5.027 \cdot 10^{-3}$	0.798	2.886
Z = 9	$5.655 \cdot 10^{-3}$	0.965	3.993
10	$6.283 \cdot 10^{-3}$	1.134	5.312
11	$6.912 \cdot 10^{-3}$	1.301	6.843
12	$7.54 \cdot 10^{-3}$	1.461	8.579
13	$8.168 \cdot 10^{-3}$	1.611	10.511
14	$8.796 \cdot 10^{-3}$	1.747	12.623
15	$9.425 \cdot 10^{-3}$	1.865	14.894
16	0.01	1.962	17.301
17	0.011	2.035	19.814

Рис. 3

3. Побудувати графіки миттєвих значень синусоїдного струму $i(t)$, синусоїдної ЕРС $e(t)$ та напруг на резисторі $u_r(t)$, індуктивності $u_L(t)$ і ємності $u_C(f)$. (Графік $i(t)$ необхідно побудувати у масштабі з метою визначення фазових співвідношень).

Примітка. Графіки можуть бути побудовані за співвідношеннями (наприклад, для $k = 200$):

$$t := Z^{(0)} \cdot s$$

$$i := Z^{(1)} \cdot A$$

$$u_C := Z^{(2)} \cdot V$$

$$u_R := R \cdot i$$

$$e := E_m \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

$$u_L := e - u_R - u_C$$

4. Визначити фазові співвідношення між струмом $i(t)$ та напругами $u_r(t)$, $u_C(t)$, $u_L(t)$, та $e(t)$ графічним методом (рис.4).

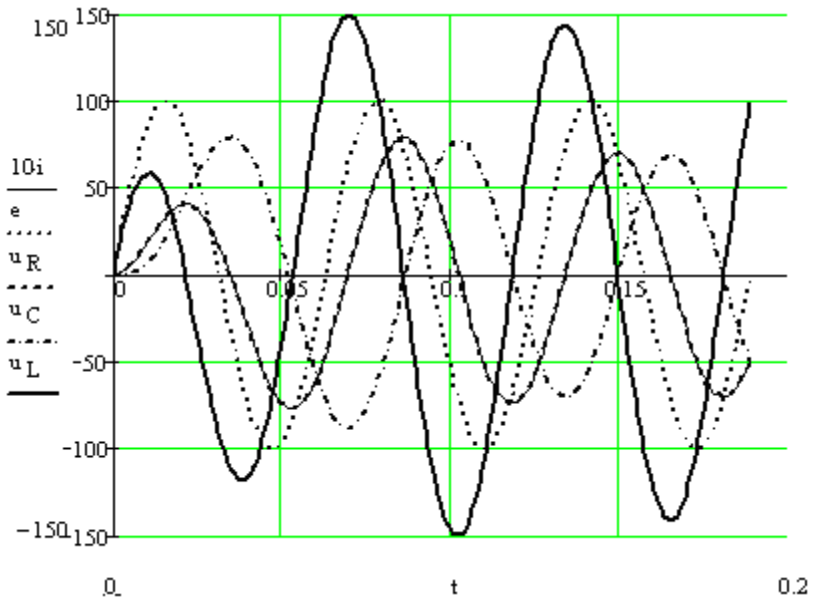


Рис. 4

5. Розрахувати діючі значення струму I , ЕРС E та напруг u_r , u_L , u_C за допомогою закону Ома. Розрахувати діючі значення

напруг на комбінаціях елементів r , L та C , а також зсуву фаз між струмом та ЕРС.

6. Здійснити математичне моделювання послідовного електричного кола (рис.5). Вимірити значення струму в колі та напруг на елементах та їх комбінаціях. За допомогою віртуального осцилографа виміряти фазовий зсув між $i(t)$ та $e(t)$, амплітудні значення струму та напруги на елементах.

Результати вимірювання порівняти з результатами розрахунку.

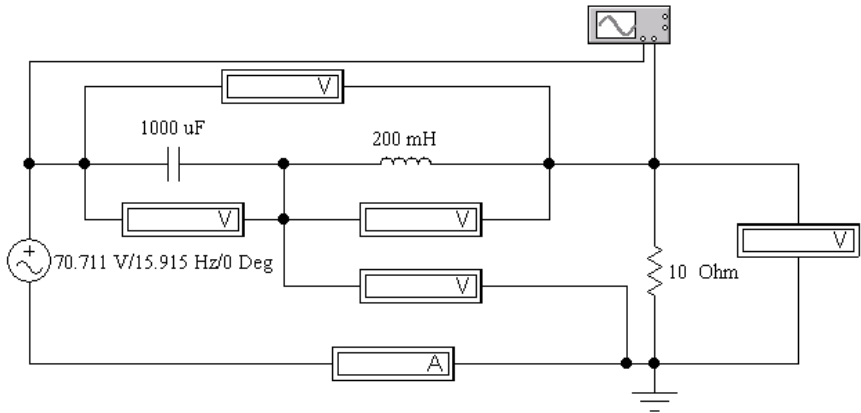


Рис. 5

7. Побудувати векторну діаграму напруг для послідовного електричного кола за результатами моделювання.

Зміст звіту

Основна задача та порядок виконання роботи.

Схема електричного кола з підключеними вимірювальними приладами.

Розрахунок системи диференціальних рівнянь.

Графіки миттєвих значень струму та напруги на елементах електричного кола.

Розрахунок діючих значень струму в електричному колі і напруги на елементах та їх комбінаціях.

Результати математичного моделювання послідовного електричного кола.

Осцилограми результатів моделювання.

Векторна діаграма напруг.

Висновки до лабораторної роботи.

Запитання для самоперевірки

1. Одержати диференціальні рівняння другого порядку відносно струму $i(t)$, напруги на конденсаторі $u_C(t)$ та напруги на індуктивності $u_L(t)$ для послідовного електричного кола.

2. Як одержати систему диференціальних рівнянь першого порядку для послідовного електричного кола?

3. В яких випадках диференціальні рівняння можуть бути перетворені в алгебраїчні рівняння, що описують послідовне електричне коло?

4. Як розраховується повний опір послідовного кола та фазовий зсув між струмом $i(t)$ та ЕРС $e(t)$?

5. Записати закон Ома та другий закон Кірхгофа у комплексній формі в розгорнутому вигляді.

6. Що таке трикутник напруги в послідовному колі? Які формули можливо одержати з трикутника напруг?

7. Як побудувати векторну діаграму напруг і як визначити фазовий зсув φ за допомогою цієї діаграми?

8. Записати значення комплексного опору послідовного кола і дати визначення його компонентів.

9. Які форми запису комплексних чисел використовуються при розрахунках електричних кіл?

10. Що таке трикутник опорів у послідовному колі? Які формули можна одержати з трикутника опорів?

Література: [1, с.82–88].

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ З ПАРАЛЕЛЬНИМ З'ЄДНАННЯМ ЕЛЕМЕНТІВ

Основна задача роботи: засвоєння основних законів синусоїдного струму для електричного кола з паралельним з'єднанням елементів r , L і C .

Порядок виконання роботи

1. Накреслити схему електричного кола з параметрами відповідного варіанта (див. табл.4 роботи 3).
2. Розрахувати миттєві значення струмів через резистор $i_r(t)$ та конденсатор $i_C(t)$.
3. Побудувати графіки миттєвих значень струму до розгалуження $i(t)$ та струмів у гілках паралельного кола $i_r(t)$, $i_L(t)$, $i_C(t)$. Визначити фазові співвідношення між струмами.
4. Побудувати графіки миттєвих значень струму до розгалуження $i(t)$ та ЕРС $e(t)$ (у масштабі) і визначити фазовий зсув графічним методом.
5. Розрахувати діючі значення ЕРС E , струму до розгалуження I та струмів I_r , I_L , I_C . Провести розрахунок зсуву фаз між струмами $i(t)$ та ЕРС $e(t)$.
6. Здійснити математичне моделювання паралельного електричного кола (рис.6).

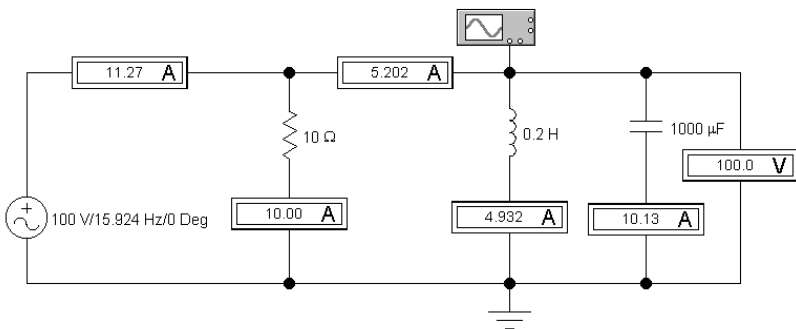


Рис. 6

Вимірити значення струмів у всіх гілках електричного кола. За допомогою віртуального осцилографа вимірити фазовий зсув між $i(t)$ та $e(t)$, амплітудні значення струмів. Результати вимірювань порівняти з результатами розрахунку.

7. Побудувати векторну діаграму струмів для паралельного електричного кола за результатами моделювання.

Зміст звіту

Основна задача та порядок виконання роботи.

Схема електричного кола з підключеними вимірювальними приладами.

Розрахунок струмів у гілках паралельного кола.

Графіки миттєвих значень струмів, струму до розгалуження та ЕРС $e(t)$.

Розрахунок діючих значень струмів та фазових зсувів.

Результати математичного моделювання паралельного електричного кола.

Осцилограми результатів моделювання.

Векторна діаграма струмів.

Висновки до лабораторної роботи.

Запитання для самоперевірки

1. Записати диференціальні співвідношення між струмом та напругою для елементів паралельного електричного кола.

2. Як розраховується повна провідність паралельного електричного кола та фазові зсуви між струмом до розгалуження $i(t)$ та ЕРС $e(t)$?

3. Записати перший закон Кірхгофа у комплексній формі у розгорнутому вигляді.

4. Які формули можна отримати з трикутника струмів?

5. Як побудувати векторну діаграму струмів і як визначити фазовий зсув φ за допомогою цієї діаграми?

6. Записати значення комплексної провідності паралельного кола і дати визначення її компонентів.

7. Що таке трикутник провідностей? Які формули можна одержати з трикутника провідностей?

Література: [1, с.89–91].

**ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЗОНАНСНИХ ЯВИЩ
У ПОСЛІДОВНОМУ І ПАРАЛЕЛЬНОМУ
КОЛИВАЛЬНИХ КОНТУРАХ**

Основна задача роботи: визначення резонансних характеристик струму та напруги на реактивних елементах контура, визначення характеристик контура при зміні його параметрів.

Порядок виконання роботи

1. Накреслити схему послідовного контура з параметрами відповідного варіанта (табл. 5).

Таблиця 5

Номер варіанта	Резонансна частота ω_0 , рад/с	Амплітуда ЕРС E_m , В	Опір R , Ом	Індуктивність L , Гн	Ємність C , мкФ
1	100	100	8	0,2	500
2	200	200	4	0,1	250
3	200	300	2,5	0,05	500
4	100	500	4	0,1	1000
5	500	500	5	0,04	100
6	500	400	2	0,02	200
7	400	200	4	0,05	125
8	500	100	2	0,01	400
9	400	100	2	0,025	250
10	200	200	16	0,4	62,5
11	100	100	10	0,4	250
12	100	500	16	0,8	125

2. Розрахувати значення добротності контура Q , його характеристичний опір ρ та діючі значення струму і напруг на реактивних елементах.

3. Побудувати графіки резонансних характеристик струму послідовного контура

$$I(\omega) = \frac{E}{r \sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}}$$

для різних значень добротності контура $Q = 1, 10$.

4. Побудувати графіки резонансних характеристик напруг на конденсаторі та індуктивності

$$U_L(\omega) = \frac{QE}{\frac{\omega_0}{\omega} \sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}}, \quad U_C(\omega) = \frac{QE}{\frac{\omega}{\omega_0} \sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}}$$

для різних значень добротності контура $Q = 1, 10$.

5. Побудувати графіки залежності повного опору та зсуву фаз послідовного контура від частоти та фазової характеристики

$$Z(\omega) = r \sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}, \quad \varphi(\omega) = \text{atan} \left(\frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{r} \right) \frac{180}{\pi}$$

для різних значень добротності контура $Q = 1, 10$.

6. Накреслити схему реального паралельного контура з параметрами відповідного варіанта (див. табл. 6)

7. Побудувати графіки залежності повного вхідного опору $Z_{\text{вх}}(\omega)$ та його активної $R_{\text{вх}}(\omega)$ і реактивної $X_{\text{вх}}(\omega)$ складових від частоти, а також графік фазової характеристики $\varphi(\omega)$ паралельного контура:

$$X(\omega) = \omega L - \frac{1}{\omega C}$$

$$R_{\text{вх}}(\omega) = \frac{r \rho^2}{[r^2 + X(\omega)^2]} \quad X_{\text{вх}}(\omega) = -\frac{\rho^2 X(\omega)}{[r^2 + X(\omega)^2]}$$

$$Z_{\text{BX}} = \frac{Q\rho}{\sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}}, \quad \varphi(\omega) = \text{atan}\left[\frac{X_{\text{BX}}(\omega)}{R_{\text{BX}}(\omega)}\right] \frac{180}{\pi}$$

9. Побудувати графіки резонансних кривих струмів у гілках паралельного контура та на його вході

$$I_L(\omega) = \frac{E}{\sqrt{r^2 + (\omega L)^2}}$$

$$I_C(\omega) = \omega CE$$

$$I(\omega) = \frac{E}{Z_{\text{BX}}(\omega)}$$

10. Здійснити математичне моделювання послідовного контура (рис. 7). Вимірити значення струму та напруг U_C на всіх елементах контура для різних значень добротності контура $Q = 1, 10$. За допомогою віртуального осцилографа (рис. 8) вимірити фазовий зсув між струмом у контурі $i(t)$ та ЕРС $e(t)$, амплітудні значення напруг.

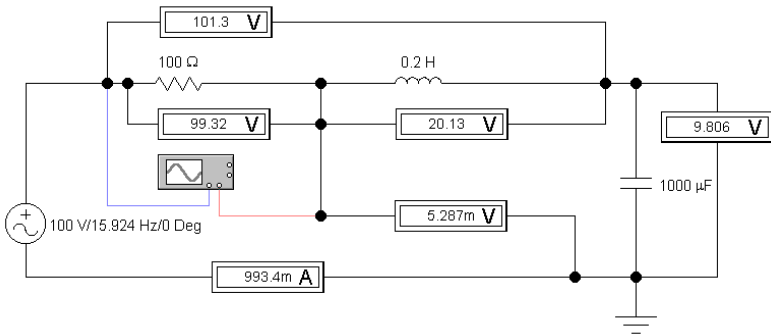


Рис. 7

Результати вимірювання порівняти з результатами розрахунку.

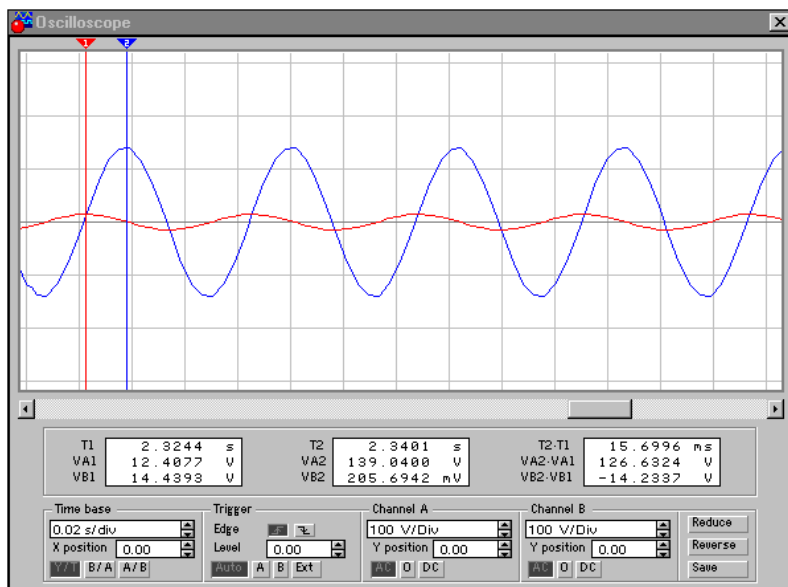


Рис. 8

11. Здійснити математичне моделювання паралельного контура (рис.9). Вимірити значення струмів у всіх гілках контура. За допомогою віртуального осцилографа вимірити фазовий зсув між струмом на вході контура $i(t)$ та ЕРС $e(t)$. Результати вимірювання порівняти з результатами розрахунку.

Зміст звіту

Основна задача та порядок виконання роботи.

Схема послідовного контура з підключеними вимірювальними приладами.

Результати розрахунку параметрів послідовного контура.

Графік резонансних характеристик послідовного контура $I(\omega), U_L(\omega), U_C(\omega), Z(\omega), \varphi(\omega)$.

Результати математичного моделювання послідовного контура.

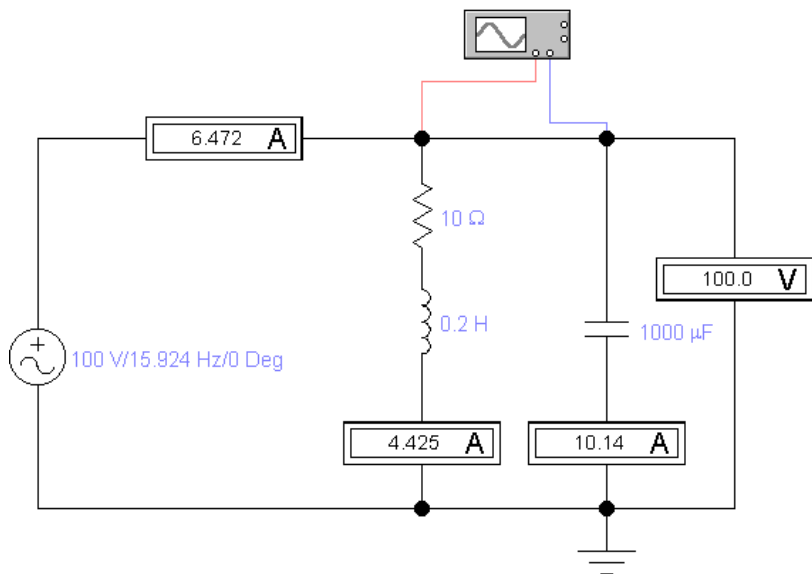


Рис. 9

Схема паралельного контура з підключеними вимірювальними приладами.

Результати розрахунку паралельного контура.

Графік резонансних характеристик паралельного контура $I(\omega)$, $I_L(\omega)$, $I_C(\omega)$.

Результати математичного моделювання паралельного контура.

Висновки до лабораторної роботи.

Запитання для самоперевірки

1. Яка загальна умова виникнення резонансу в електричному колі?
2. Довести співвідношення:

$$U_L(\omega) = \frac{QE}{\frac{\omega_0}{\omega} \sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}}$$

$$U_C(\omega) = \frac{QE}{\frac{\omega}{\omega_0} \sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}}$$

$$I(\omega) = \frac{E}{r \sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}}$$

3. Як змінюється резонансна характеристика струму для різних значень добротності контура?

4. На яких частотах досягаються максимальні значення напруг на реактивних елементах послідовного контура?

5. Як змінюється повний опір паралельного контура залежно від частоти?

6. Довести співвідношення, що мають місце під час резонансу у паралельному контурі

$$I_L = QI, I_C = QI, I = \frac{E}{Q\rho}.$$

7. Довести співвідношення для паралельного контура

$$Z(\omega) = \frac{Q\rho}{\sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}}$$

8. Як визначається смуга пропускання резонансного контура?

Література: [1, с.112–124].

Робота 6**РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА
СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ**

Основна задача роботи: дослідження електричного кола синусоїдного струму шляхом експериментальної перевірки основних законів синусоїдного струму та результатів розрахунку.

Порядок виконання роботи

1. Накреслити схему розгалуженого електричного кола з параметрами відповідного варіанта (табл. 6).

Таблиця 6

Номер варіанта	E_1 , В	E_2 , В	ω_0 , рад/с	r , Ом	L_1 10^{-2} Гн	L_2 10^{-2} Гн	C_1 , мкФ	C_2 , мкФ	Ме тод
1	100	100	300	10	2	4	400	500	К
2	120	150	300	15	2	3	300	400	К
3	150	120	400	20	2	3	400	300	КС
4	100	200	400	20	3	3	400	400	КС
5	200	100	500	25	2	4	300	500	КС
6	150	100	500	25	3	2	200	400	ВН
7	100	150	300	10	4	3	500	300	ВН
8	120	120	400	25	4	3	400	500	ВН
9	150	150	400	15	2	5	350	250	К
10	200	200	300	15	3	4	250	350	К
11	200	300	500	20	3	3	200	500	КС
12	300	100	500	30	5	2	500	200	ВН

Тут К– метод рівнянь Кірхгофа;
КС– метод контурних струмів;
ВН– метод вузлових напруг.

2. Провести розрахунок діючих значень струмів у всіх гілках електричного кола, використовуючи заданий метод розрахунку. Результати розрахунку записати до табл. 7.

3. Перевірити розрахунок електричного кола за допомогою балансу потужностей.

4. Провести перетворення “зірки” по відношенню до вузлів 1, 2 і 3 електричного кола в еквівалентний трикутник. Розрахувати значення параметрів кожної сторони трикутника.

Таблиця 7

Режим	Значення струмів					
	I_1 , мА	I_2 , мА	I_3 , мА	I_4 , мА	I_5 , мА	I_6 , мА
Розрахунок						
Моделювання						
Похибка						

5. Здійснити математичне моделювання заданого електричного кола і визначити показання амперметра в усіх гілках схеми (рис. 10). Результати вимірювання занести до табл. 7. Порівняти результати розрахунку і моделювання шляхом визначення відносної похибки.

6. Здійснити математичне моделювання перетвореного електричного кола і визначити показання амперметрів у тих гілках схеми, які не перетворювалися. Порівняти результати вимірювання з результатами п.5.

Зміст звіту

Основна задача та порядок виконання роботи.

Схема електричного кола з підключеними вимірювальними приладами.

Розрахунок заданого електричного кола.

Таблиця результатів моделювання та розрахунку.

Схема електричного кола, що пояснює еквівалентність заміни “зірка–трикутник”.

Висновки до лабораторної роботи.

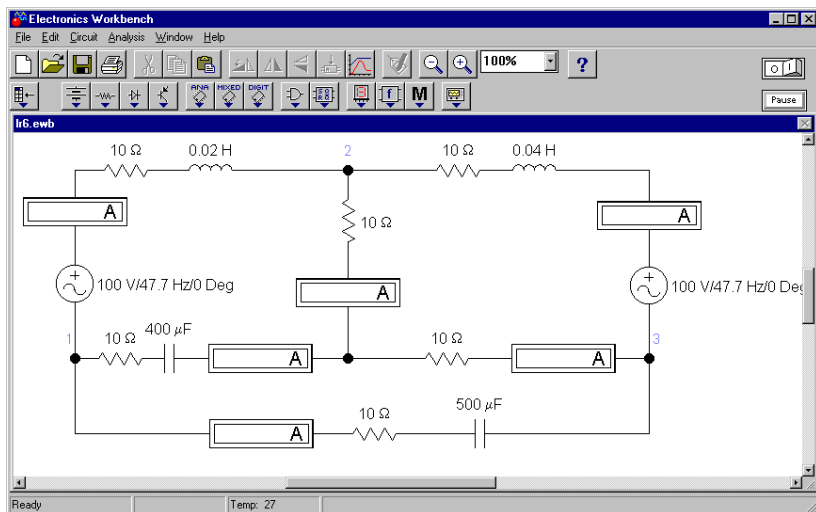


Рис. 10

Запитання для самоперевірки

1. Які методи можуть бути використані для розрахунку складних електричних кіл синусоїдного струму?
2. Як перевірити правильність розрахунку та моделювання?
3. Як розраховуються комплексні опори гілок електричного кола?
4. Як визначити діюче значення напруги на окремій гілці електричного кола, якщо відомі діючі значення напруг на її елементах?
5. Як побудувати векторну діаграму напруг для окремої гілки електричного кола?
6. Сформулювати закони Кірхгофа в комплексній формі та пояснити їх на прикладі заданого електричного кола.
7. Записати закон Ома в комплексній формі для резистора, індуктивності та конденсатора і визначити фазові співвідношення.
8. Що таке трикутники напруги та опору? Пояснити основні співвідношення.

Література: [1, с.106–112].

ДОСЛІДЖЕННЯ ЛІНІЇ ПЕРЕДАЧІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ СИНУСОЇДНИМ СТРУМОМ

Основна задача роботи: ознайомитися з основними властивостями лінії передачі та методами підвищення коефіцієнта корисної дії лінії.

Порядок виконання роботи

1. Визначити енергетичні характеристики лінії передачі для заданих параметрів згідно з варіантом (табл. 7):
 струм в лінії I (діюче значення),
 активну потужність навантаження P_n ,
 коефіцієнт корисної дії η ,
 напругу навантаження U_n (діюче значення),
 коефіцієнт потужності $\cos \varphi$.

Таблиця 7

Номер варіанта	ЕРС генератора E , кВ	Опір лінії передачі $\underline{Z}_л$, Ом	Опір лінії навантаження $\underline{Z}_н$, Ом	Частота ω , рад/с
1	10	$5+j0,8$	$50+j32$	400
2	10	$4+j1$	$40+j36$	400
3	20	$5+j1,2$	$50+j30$	400
4	20	$5+j1$	$45+j25$	500
5	30	$3+j0,6$	$40+j20$	500
6	30	$3+j0,5$	$50+j50$	300
7	40	$4+j1$	$40+j25$	300
8	40	$4+j1,2$	$30+j30$	200
9	50	$5+j1,2$	$30+j60$	500
10	50	$5+j1$	$50+j80$	300
11	60	$6+j0,8$	$30+j40$	400
12	60	$6+j1,2$	$40+j10$	200

2. Розрахувати залежності струму в лінії $I(r_n)$ і активної потужності навантаження $P(r_n)$ від активної складової опору навантаження R_n для кількох значень реактивної складової опору наван-

таження $0,5 X_H$, X_H , $2 X_H$, $5 X_H$. Побудувати відповідні графічні залежності, використовуючи програмне забезпечення MathCAD:

$$x_H := 2 \quad r_H := 0, 0.1.. 50$$

$$I(r_H) := \frac{E}{\sqrt{(r_L + r_H)^2 + (x_L + x_H)^2}}$$

$$P(r_H) := I(r_H)^2 \cdot r_H$$

3. Повторити п.2 для значень реактивної складової опору навантаження $-0,5 X_H$, $-X_H$, $-2 X_H$, $-5 X_H$.

4. Побудувати графік залежності коефіцієнта корисної дії η від коефіцієнта потужності $\cos \varphi$.

5. Розрахувати ємність конденсатора, що підключається паралельно до навантаження, з метою підвищення коефіцієнта корисної дії η . Визначити коефіцієнт η .

6. Здійснити математичне моделювання лінії передачі, використовуючи відповідне програмне забезпечення, вимірюючи струм у лінії, напругу втрат лінії і напругу на навантаженні для кількох значень r_H , рис.11. Дані вимірювання занести у табл. 8, використовуючи додаток EXCEL з пакету Microsoft OFFICE.

7. Побудувати відповідні графічні залежності $I(r_H)$, $U_H(r_H)$ та напруги втрати $U_B(r_H)$.

8. Здійснити математичне моделювання лінії передачі в режимі максимального коефіцієнта корисної дії.

Таблиця 8

Значення опору r_H , Ом	Значення струму в лінії I , А	Значення напруги на навантаженні U_H , В	Значення напруги втрати U_B , В
$0,1 r_H$			
$0,2 r_H$			
...			
r_H			

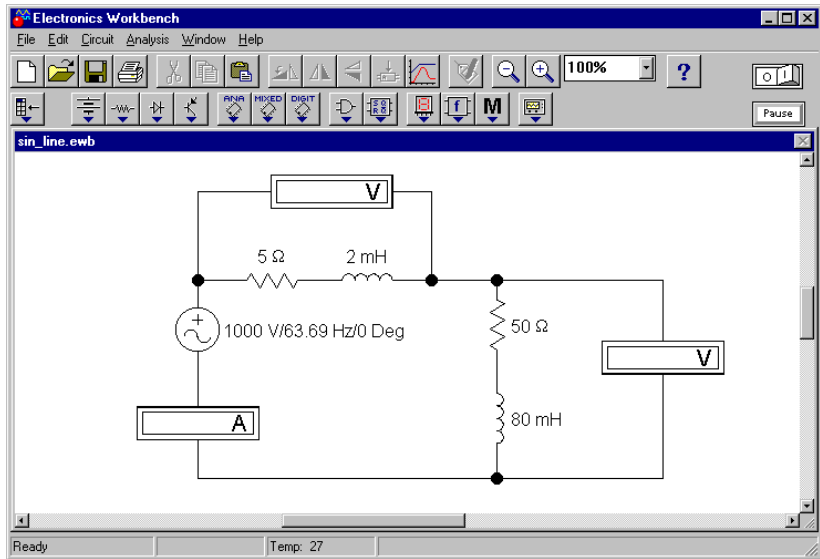


Рис. 11

Зміст звіту

Основна задача та порядок виконання роботи.

Схема лінії передачі з підключеними вимірювальними приладами.

Розрахункові формули.

Таблиці результатів моделювання.

Графіки залежностей (пп. 2, 3 та 7 виконання роботи).

Графік залежності $\eta(\cos(\varphi))$.

Висновки до лабораторної роботи.

Запитання для самоперевірки

1. Які особливості має лінія передачі енергії синусоїдним струмом?
2. При якій умові можливий режим передачі енергії з максимальною потужністю?
3. Як підвищити коефіцієнт корисної дії лінії передачі?

4. Які допущення прийняті при моделюванні лінії передачі енергії змінним струмом?

5. Довести співвідношення для коефіцієнта корисної дії

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{P_{\text{н}} r_{\text{л}}}{U_{\text{н}}^2 \cos^2(\varphi)}} .$$

6. Побудувати векторну діаграму напруг в лінії передачі.

Література: [1, с.100–102].

Робота 8

ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНОЇ СИСТЕМИ ПРИ З'ЄДНАННІ НАВАНТАЖЕННЯ ЗІРКОЮ

Основна задача роботи: ознайомитися з роботою трифазної системи при з'єднанні навантаження зіркою в симетричному, несиметричному та аварійних режимах, визначити роль нульового проводу.

Порядок виконання роботи

1. Накреслити схему трифазної системи (трипровідної і чотирипровідної) з параметрами відповідного варіанта (табл. 9).

2. Розрахувати симетричний режим трипровідної трифазної системи. Визначити фазні струми, а також фазні та лінійні напруги навантаження (їхні діючі значення).

3. Розрахувати несиметричний режим чотирипровідної системи і визначити діючі значення струмів і напруг навантаження.

4. Розрахувати несиметричний режим трипровідної трифазної системи і визначити діючі значення струмів і напруг навантаження.

5. Здійснити математичне моделювання функціонування трифазних систем у режимах, заданих пп. 2–4, рис.12–14.

6. Здійснити математичне моделювання функціонування аварійних режимів у чотирипровідній трифазній системі (обрив лінійного проводу, обрив фазного навантаження) та у трипровідній системі (обрив лінійного проводу, обрив фазного навантаження, коротке замикання фазного навантаження).

7. Результати розрахунку і моделювання за пп. 2–6 занести до табл.10.

8. Побудувати векторні діаграми струмів і напруг для режимів пп. 2–4, 6.

Таблиця 9

Номер варіанта	Значення ЕРС E_{ϕ} , В та частоти ω , рад/с	Значення опору навантаження в симетричному режимі \underline{Z} , Ом	Значення опорів навантаження в несиметричному режимі $\underline{Z}_a, \underline{Z}_b, \underline{Z}_c$, Ом	Значення опору навантаження в аварійному режимі \underline{Z} , Ом
1	$E_{\phi}=220$ $\omega=1000$	$10+j5$	$2+j3$ $3+j4$ $2-j2$	10
2	$E_{\phi}=380$ $\omega=500$	$5-j5$	$2-j5$ $3-j2$ $4-j1$	10
3	$E_{\phi}=220$ $\omega=600$	$8+j6$	$4-j3$ $4+j3$ 4	15
4	$E_{\phi}=220$ $\omega=600$	$12-j8$	$5+j4$ $4+j5$ $3-j4$	20
5	$E_{\phi}=380$ $\omega=1000$	$20+j15$	$10-j10$ $10-j20$ $20+j10$	10
6	$E_{\phi}=380$ $\omega=2000$	$15-j15$	$8+j6$ $6+j8$ $8-j6$	15
7	$E_{\phi}=220$ $\omega=1000$	$8+j8$	$12-j10$ $10+j6$ $8+j6$	25

Закінчення табл. 9

Номер варіанта	Значення E_{ϕ} , В та частоти ω , рад/с	Значення опору навантаження в симетричному режимі \underline{Z} , Ом	Значення опорів навантаження в несиметричному режимі: \underline{Z}_a , \underline{Z}_b , \underline{Z}_c , Ом	Значення опору наванта- ження в аварійно- му режи- мі \underline{Z} , Ом
8	$E_{\phi}=220$ $\omega=2000$	$4+j6$	$8-j4$ $8-j8$ $4+j6$	30
9	$E_{\phi}=380$ $\omega=1500$	$12+j18$	$10+j12$ $12-j6$ $6+j8$	25
10	$E_{\phi}=380$ $\omega=1200$	$14-j18$	$8-j6$ $6+j8$ $10+j12$	20
11	$E_{\phi}=220$ $\omega=1500$	$6+j8$	$8+j6$ $6+j8$ $10+j12$	10
12	$E_{\phi}=220$ $\omega=1000$	$8+j4$	$5-j5$ $5-j10$ $6+j8$	20

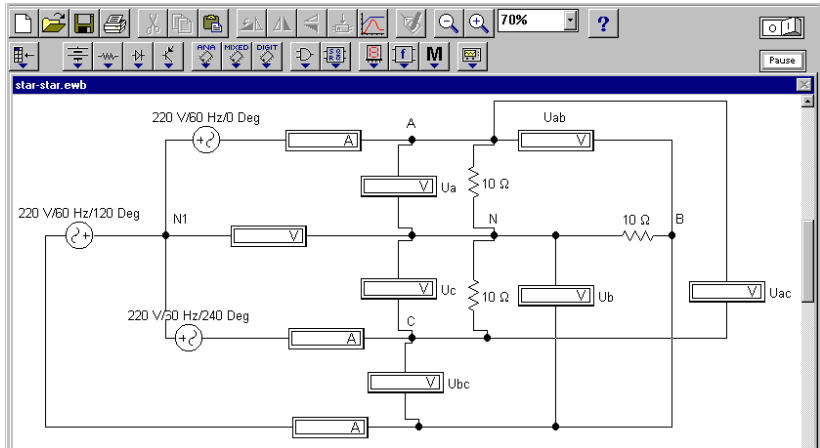


Рис. 12

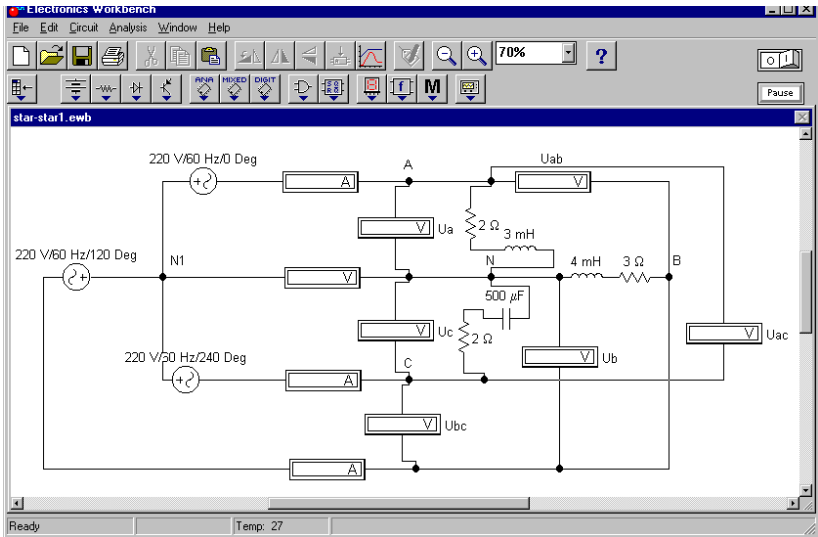


Рис. 13

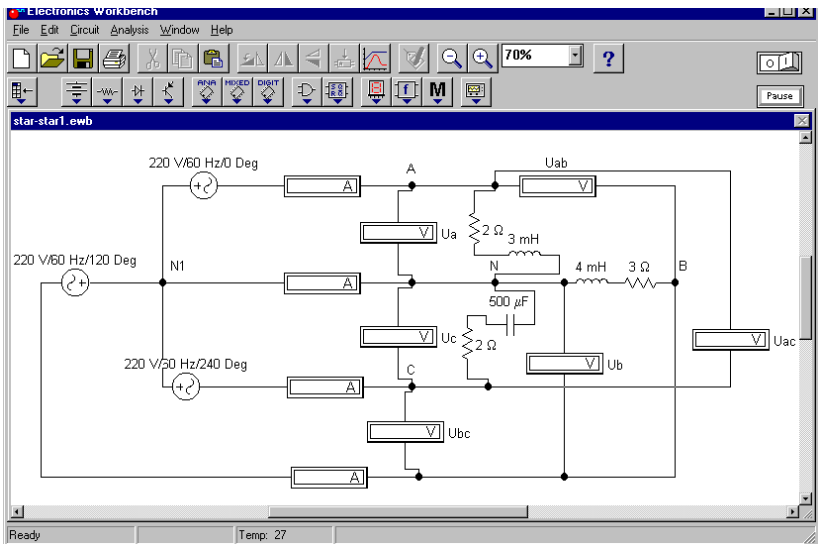


Рис. 14

Таблиця 10

Тип	Режим	I_a	I_b	I_c	I_N	U_a	U_b	U_c	U_{ab}	U_{bc}	U_{ca}	U_{nN}
		А	А	А	А	В	В	В	В	В	В	В
Трипровідна	Симетричний											
	Несиметричний											
Чотирипровідна	Несиметричний											
	Обрив лінійного проводу											
	Обрив фази											
Трипровідна	Обрив лінійного проводу											
	Обрив фази											
	Коротке замикання											

Зміст звіту

Основна задача та порядок виконання роботи.

Схеми трифазних кіл з підключеними вимірювальними приладами.

Розрахунки заданих трифазних кіл.

Таблиця результатів моделювання та розрахунків.

Векторно-топографічні діаграми заданих режимів функціонування трифазної системи.

Висновки до лабораторної роботи.

Запитання для самоперевірки

1. Як одержати трифазний струм?
2. Як визначити фазні та лінійні напруги навантаження у трипровідній трифазній системі?
3. Як визначити напругу зміщення нейтралі?
4. Як розраховуються симетричні режими функціонування трифазного кола?
5. Як розраховуються несиметричні режими функціонування трифазного кола?
6. Яке призначення має нейтральний провід?
7. Як будуються векторно-топографічні діаграми для аварійних режимів роботи трифазного кола?
8. Як розраховуються трифазні кола за наявності опорів лінійних проводів? Який вигляд матиме векторно-топографічна діаграма напруг у цьому випадку?
9. Як змінюється розподіл напруг на навантаженні споживача у випадку короткого замикання однієї з фаз?
10. Як змінюється розподіл напруг на навантаженні споживача у випадку обриву лінійного проводу трипровідної трифазної системи?

Література: [2, с. 35–37, с.42–45].

ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНОЇ СИСТЕМИ ПРИ З'ЄДНАННІ НАВАНТАЖЕННЯ ТРИКУТНИКОМ

Основна задача роботи: ознайомитися з роботою трифазної системи при з'єднанні навантаження трикутником у симетричному, несиметричному та аварійних режимах.

Порядок виконання роботи

1. Накреслити схему трифазної системи з параметрами відповідного варіанта (табл. 11).
2. Розрахувати симетричний режим, враховуючи опір лінійних проводів трифазної системи. Визначити діючі значення лінійних та фазних струмів і напруг на навантаженні споживача.
3. Розрахувати несиметричний режим, ігноруючи опір лінійних проводів трифазної системи. Визначити діючі значення лінійних та фазних струмів.
4. Здійснити математичне моделювання функціонування трифазних систем у режимах, заданих пп. 2 і 3, рис. 15, 16.
5. Здійснити математичне моделювання аварійних режимів трифазної системи (обрив лінійного проводу та обрив фазного навантаження).
6. Результати розрахунків і моделювання за пп. 2–5 занести до табл. 12.
7. Побудувати векторно-топографічні діаграми струмів і напруг для режимів пп. 2, 3 і 5.

Зміст звіту

- Основна задача та порядок виконання роботи.
- Схеми трифазних кіл з підключеними вимірювальними приладами.
- Розрахунки заданих трифазних кіл.
- Таблиця результатів моделювання та розрахунків.
- Векторно-топографічні діаграми заданих режимів функціонування трифазної системи.
- Висновки до лабораторної роботи.

Таблиця 11

Номер варіанта	Значення ЕРС E_{ϕ} , В та частоти ω , рад/с	Значення опору навантаження в симетричному режимі \underline{Z} , Ом	Значення опорів навантаження в несиметричному режимі \underline{Z}_{ab} , \underline{Z}_{bc} , \underline{Z}_{ca} Ом	Значення опору навантаження в аварійному режимі \underline{Z} , Ом	Значення опору лінійних проводів $\underline{Z}_{л}$, Ом
1	2	3	4	5	6
1	$E_{\phi} = 380$ $\omega = 1000$	$20 + j20$	$6 + j4$ $4 + j1$ $2 - j1$	20	$1 + j1$
2	$E_{\phi} = 380$ $\omega = 1200$	$10 + j10$	$6 - j6$ $8 + j6$ $10 + j15$	10	$1 + j1$
3	$E_{\phi} = 380$ $\omega = 1500$	$8 + j8$	$8 + j4$ $4 - j2$ $6 - j8$	15	$1 + j0,8$
4	$E_{\phi} = 380$ $\omega = 2000$	$6 - j8$	$4 + j2$ $6 + j8$ $8 - j4$	20	$1,2 + j1$
5	$E_{\phi} = 380$ $\omega = 2500$	$12 + j6$	$6 + j6$ $8 + j8$ $4 - j4$	25	$0,8 + j1$
6	$E_{\phi} = 220$ $\omega = 1000$	$8 - j8$	$2 + j2$ $4 + j4$ $4 - j4$	20	$0,8 + j1$
7	$E_{\phi} = 220$ $\omega = 1200$	$6 + j8$	$4 + j6$ $6 + j4$ $4 - j6$	10	$1,2 + j0,8$
8	$E_{\phi} = 220$ $\omega = 1500$	$4 + j4$	$8 + j8$ $12 + j16$ $6 - j8$	15	$1 + j1,2$

Закінчення табл. 11

1	2	3	4	5	6
9	$E_{\phi} = 220$ $\omega = 2000$	$8+j10$	$15+j15$ $12-j10$ $6+j8$	10	$1,4+j1,6$
10	$E_{\phi} = 220$ $\omega = 2500$	$12+j16$	$10+j10$ $20+j12$ $10-j5$	12	$1+j0,6$
11	$E_{\phi} = 220$ $\omega = 3000$	$8+j5$	$10+j10$ $20+j12$ $10-j5$	12	$1,3+j0,3$
12	$E_{\phi} = 380$ $\omega = 3000$	$12+j20$	$6+j2$ $2+j6$ $4-j3$	10	$1,4+j0,9$

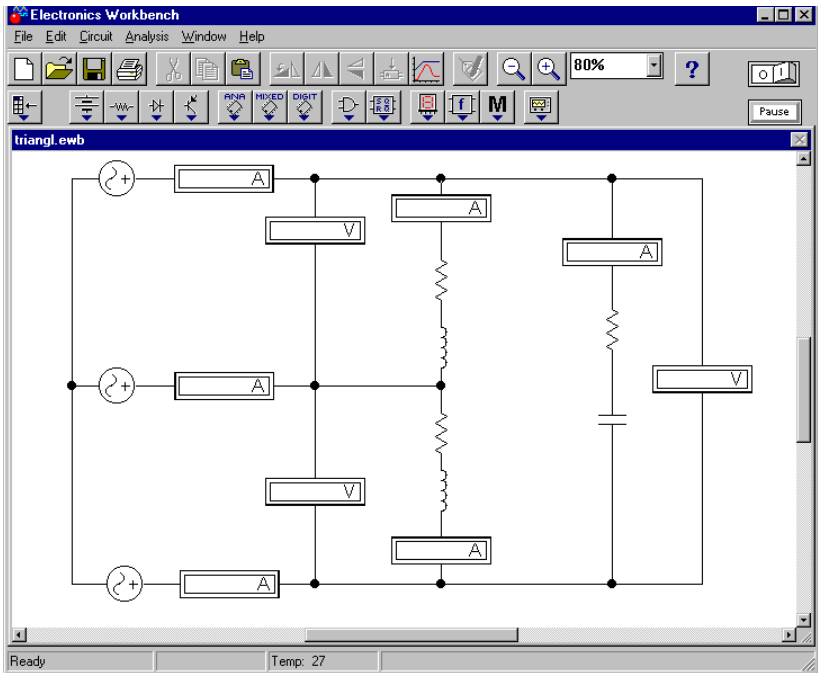


Рис. 15

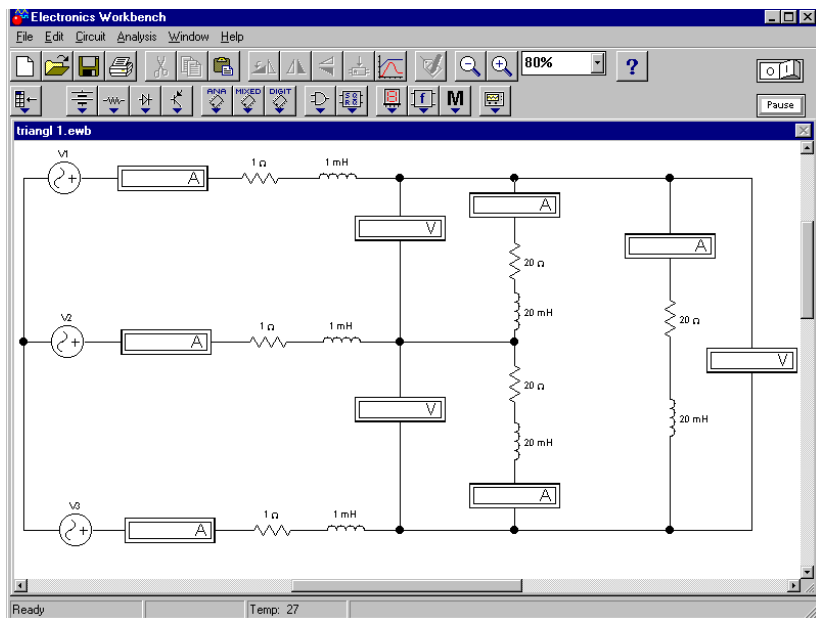


Рис. 16

Запитання для самоперевірки

1. Як визначити фазні та лінійні струми навантаження у трифазній системі?
2. Як проводиться розрахунок симетричного режиму функціонування трифазного кола з урахуванням опору лінійних проводів?
3. Як проводиться розрахунок несиметричного режиму трифазного кола?
4. Як будуються векторно-топографічні діаграми для аварійних режимів роботи трифазного кола?
5. Як змінюється розподіл напруг на навантаженні споживача у випадку обриву лінійного проводу?
6. Як змінюється розподіл напруг на навантаженні споживача у випадку обриву фази навантаження?

Таблиця 12

Режим	I_a А	I_b А	I_c А	I_{ab} В	I_{bc} В	I_{ca} В	U_{ab} В	U_{bc} В	U_{ca} В
Симетричний									
Несиметричний									
Обрив лінійного проводу									
Обрив фазного навантаження									

7. Які струми змінюються, якщо змінюється опір однієї з фаз навантаження?

8. Яка умова несиметричного режиму функціонування трифазної системи?

Література: [2, с. 38–40].

Робота 10

ДОСЛІДЖЕННЯ ЛІНІЙНОГО КОЛА ПРИ ДІЇ ДЖЕРЕЛА НЕСИНУСОЇДНОЇ НАПРУГИ

Основна задача роботи: провести розрахунок струму та напруги на реактивному елементі при дії джерела несинусоїдної напруги та порівняти результати розрахунку з результатами моделювання.

Порядок виконання роботи

1. Накреслити схему лінійного електричного кола (рис. 17) з параметрами відповідного варіанта (табл. 13).

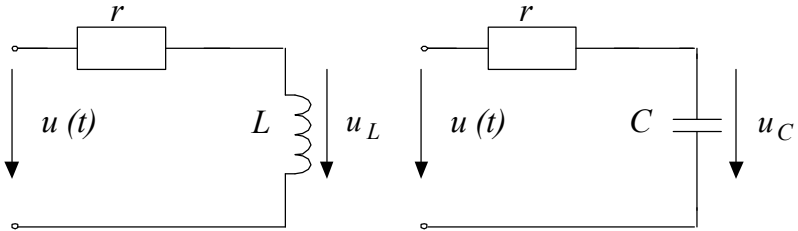


Рис. 17

2. Побудувати графічну залежність у часі заданої несинусоїдної напруги $u(t)$ (кількість членів ряду обмежити 11 гармоніками):

$$u(t) = \frac{8U_m}{\pi^2} \left[\sin(\omega t) - \frac{1}{9} \sin(3\omega t) + \frac{1}{25} \sin(5\omega t) - \frac{1}{49} \sin(7\omega t) + \right. \\ \left. + \frac{1}{81} \sin(9\omega t) - \frac{1}{121} \sin(11\omega t) \right].$$

3. Розрахувати діючі значення струму I та напруги на реактивному елементі U_x (U_L або U_C), використовуючи принцип суперпозиції. Результати розрахунку занести у табл. 14.

4. Визначити миттєві значення струму $i(t)$ та напруги $u_x(t)$ на реактивному елементі і побудувати відповідні графічні залежності.

5. Здійснити математичне моделювання заданого електричного кола окремо для кожної гармоніки (рис. 18).

Вимірити діючі значення струму та напруги і результати занести до табл. 14.

6. Здійснити математичне моделювання електричного кола із заданою несинусоїдною напругою (рис. 19).

Результати моделювання занести до табл. 14.

7. Порівняти результати моделювання і розрахунку. Визначити похибку результатів моделювання і розрахунку при визначенні діючих значень несинусоїдного I струму та напруги U_x .

Таблиця 13

Номер варіанта	Параметри електричного кола			Значення амплітуди U_m , В	Частота основної гармоніки ω , рад/с	Тип електричного кола
	r , Ом	L , Гн	C , мкФ			
1	40	0,1	100	100	100	RL
2	35	0,12	120	120	150	RC
3	32	0,15	90	100	180	RL
4	30	0,1	100	100	120	RC
5	45	0,08	90	100	150	RL
6	42	0,12	100	120	100	RC
7	30	0,15	120	150	120	RL
8	28	0,16	200	150	150	RC
9	25	0,15	150	120	100	RL
10	22	0,25	200	150	100	RC
11	20	0,25	250	100	200	RL
12	20	0,15	300	100	250	RC

Таблиця 14

Номер гармоніки	Діюче значення гармоніки				Діюче значення несинусоїдної величини			
	Розрахунок		Модель		Розрахунок		Модель	
	I , А	U_x , В	I , А	U_x , В	I , А	U_x , В	I , А	U_x , В
1								
3								
5								
7								
9								
11								

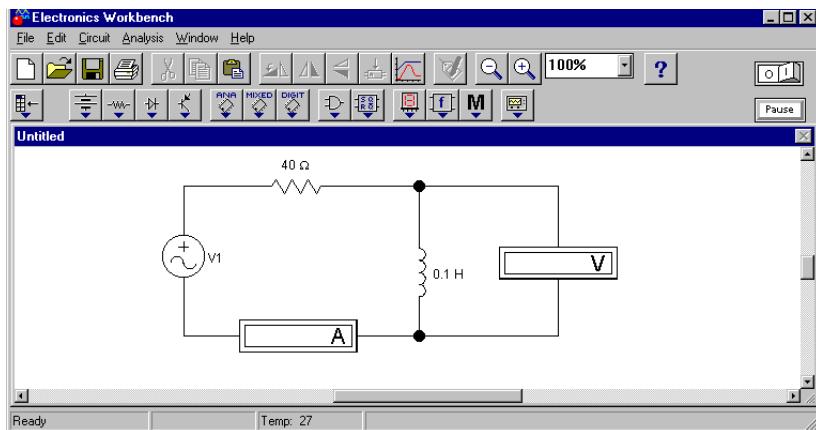


Рис. 18

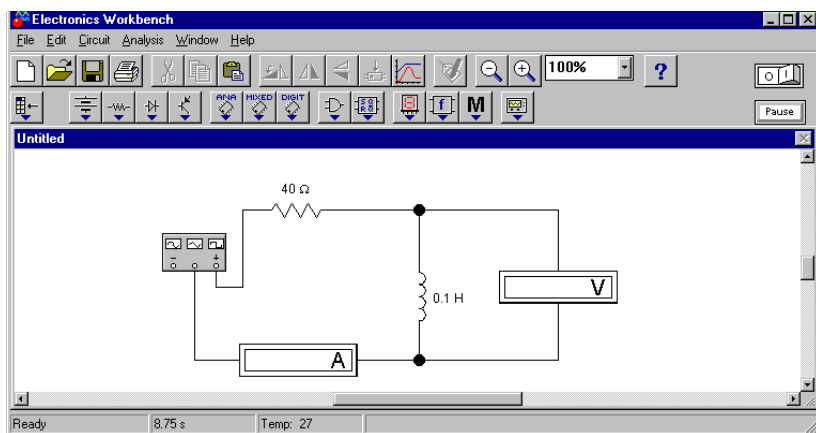


Рис. 19

Зміст звіту

Основна задача та порядок виконання роботи.

Схеми електричного кола з підключеними вимірювальними приладами.

Розрахунки діючих значень гармонік.

Таблиця результатів моделювання та розрахунків.

Графіки несинусоїдних напруг і струму в заданому електричному колі.

Висновки до лабораторної роботи.

Запитання для самоперевірки

1. У яких випадках в електричному колі виникають несинусоїдні струми та напруги?
2. Як проводиться розрахунок електричного кола, в якому діє несинусоїдна ЕРС?
3. Записати ряд Фур'є для періодичного несинусоїдного сигналу і дати коментар до складових ряду.
4. Як визначаються коефіцієнти ряду Фур'є?
5. Як визначаються діючі значення несинусоїдних струмів і напруг?
6. Як визначається активна та реактивна потужності несинусоїдного струму?
7. Які особливості мають реактивні елементи в електричному колі несинусоїдного струму?

Література: [2, с. 65–67, 74–77].

ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЛІНІЙНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Основна задача роботи: дослідження нелінійного кола постійного струму шляхом побудови вольт-амперних характеристик нелінійних елементів та розрахунку їх струмів і напруг, використовуючи графічний метод, а також метод заміни нелінійних елементів їх дискретними моделями (паралельними або послідовними).

Порядок виконання роботи

1. Накреслити схему лінійного електричного кола (рис. 20) з параметрами відповідного варіанта (табл. 15, 16).

2. Провести перетворення лінійної частини заданого нелінійного кола (другий нелінійний елемент $I_2(U_2)$ замінити лінійним резистором R з опором, який дорівнює опорю резистора R_6) в еквівалентний двополюсник E_e , R_e по відношенню до затискачів першого нелінійного елемента (рис. 21, а). Розрахувати значення E_e та R_e .

3. Використовуючи графічний метод перетину вольт-амперних характеристик лінійного та нелінійного елементів, розрахувати струм і напругу нелінійного елемента (рис. 21, б). Лінійна характеристика визначається рівнянням

$$U = E_e - IR_e,$$

звідки
$$I(U) = \frac{E_e - U}{R_e} = \frac{E_e}{R_e} - \frac{1}{R_e}U.$$

Результат графічного розрахунку перевірити методом балансу потужностей.

4. Розрахувати струми нелінійних елементів та напруги на їх затискачах, використовуючи метод контурних струмів для заданого нелінійного відповідного варіанта (рис. 20 а, б).

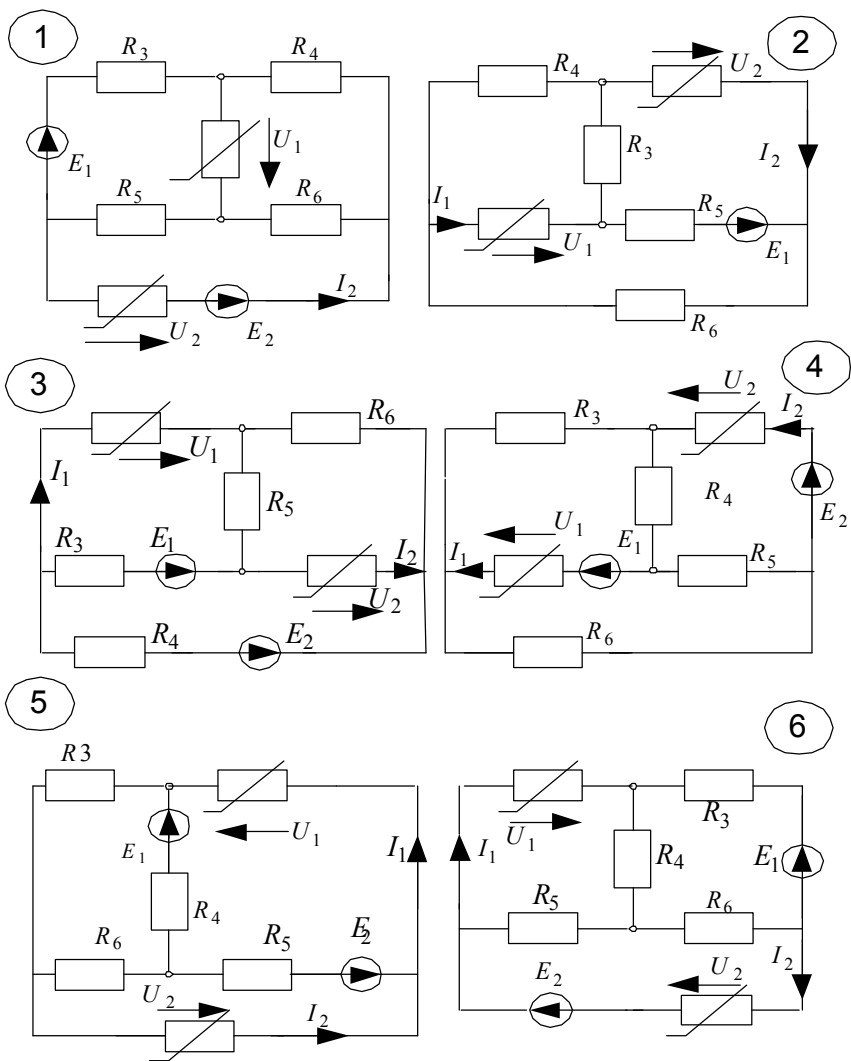


Рис. 20, а (див. також с. 53).

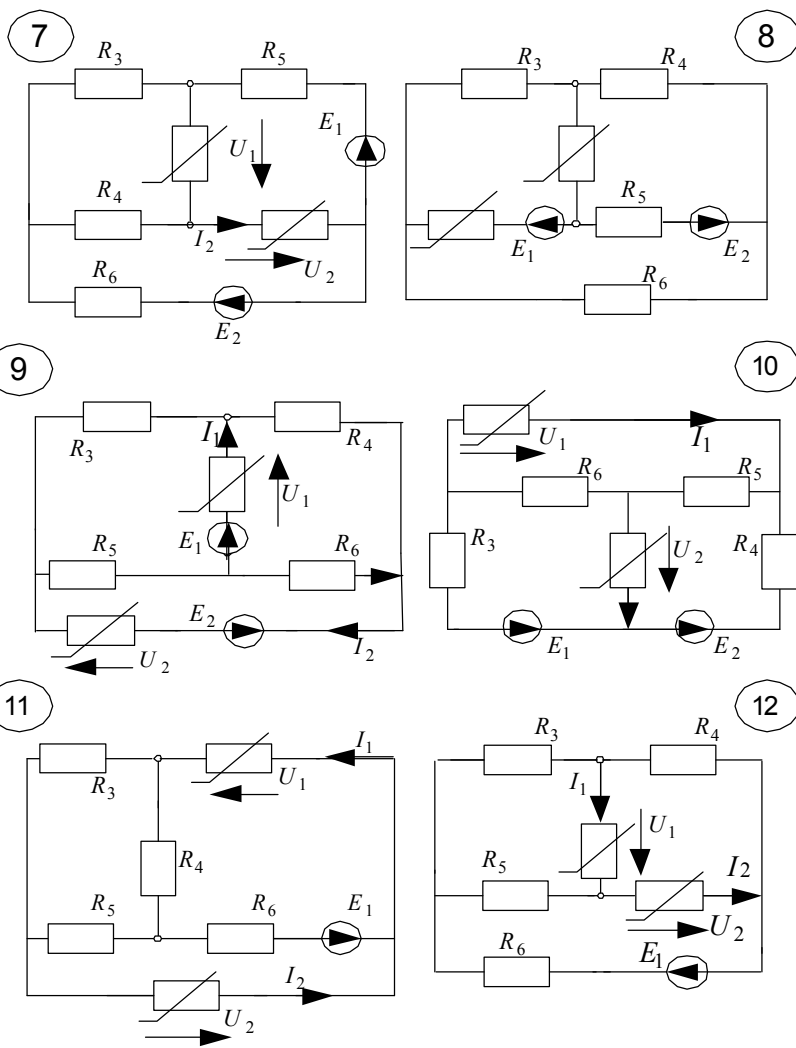


Рис. 20, б (закінчення).

Таблиця 15

Номер варіанта	$I_1 = f(U_1)$	$I_2 = f(U_2)$	Схема за-міщення
1	$I_1 = 0.5 \cdot 10^{-2} U_1^3$	$I_2 = \sqrt[3]{U_2}$	Паралельна
2	$I_1 = 0,5 \cdot \sqrt[3]{U_1}$	$I_2 = 2 \cdot 10^{-2} U_2^3$	Послідовна
3	$I_1 = 0.2 U_1^2$	$I_2 = 2 \cdot \sqrt[3]{U_2}$	Паралельна
4	$I_1 = 0.3 U_1^2$	$I_2 = 1,5 \cdot \sqrt[3]{2 \cdot U_2}$	Послідовна
5	$I_1 = U_1^2$	$I_2 = 4 \cdot \sqrt[3]{0,5 \cdot U_2}$	Паралельна
6	$I_1 = 10^{-2} U_1^3$	$I_2 = 3 \cdot \sqrt[3]{0,5 \cdot U_2}$	Послідовна
7	$I_1 = 2 \cdot 10^{-2} U_1^3$	$I_2 = 2 \cdot \sqrt[3]{U_2}$	Паралельна
8	$I_1 = 1,5 \cdot 10^{-2} U_1^3$	$I_2 = 2 \cdot \sqrt[3]{0,4 \cdot U_2}$	Послідовна
9	$I_1 = 10^{-2} U_1^3$	$I_2 = 1,8 \cdot \sqrt[3]{U_2}$	Паралельна
10	$I_1 = 1,5 \cdot 10^{-2} U_1^3$	$I_2 = 3 \cdot \sqrt[3]{0,6 \cdot U_2}$	Послідовна
11	$I_1 = U_1^2$	$I_2 = 4 \cdot \sqrt[3]{0,5 \cdot U_2}$	Паралельна
12	$I_1 = 2 \cdot 10^{-2} U_1^3$	$I_2 = 2 \cdot \sqrt[3]{U_2}$	Послідовна

Таблиця 16

Номер варіанта	$E_1, В$	$E_2, В$	$R_3, Ом$	$R_4, Ом$	$R_5, Ом$	$R_6, Ом$
1	40	60	12	12	18	6
2	30	40	6	12	6	12
3	30	30	8	8	10	12
4	40	40	12	6	8	12
5	60	60	10	8	12	6
6	50	40	16	12	12	8
7	60	30	10	8	6	6
8	45	30	12	16	16	12
9	70	50	10	8	10	8
10	60	50	12	6	18	18
11	60	0	10	8	12	6
12	60	0	10	8	6	6

5. Розрахувати параметри паралельної

$$G_k = \frac{dI_k}{dU_k}, J_k = I_k - U_k \cdot G_k$$

або послідовної

$$R_k = \frac{dU_k}{dI_k}, E_k = U_k - I_k \cdot R_k$$

дискретної схеми заміщення нелінійного елемента, рис. 22.

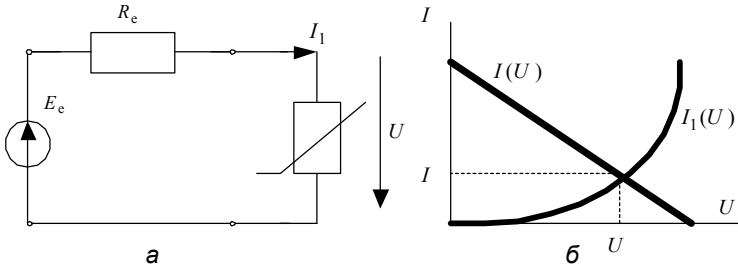


Рис. 21

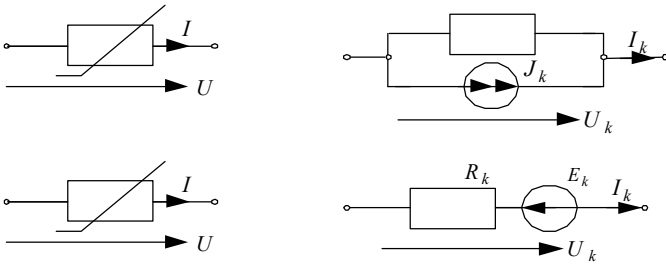


Рис.22

Наприклад, для вольт-амперної характеристики нелінійного елемента

$$I = \sqrt[3]{U^2}, I = U^{2/3}$$

маємо параметри

$$G_k = \frac{dI_k}{dU_k} = \frac{2}{3} U_k^{-1/3}; J_k = U_k^{2/3} - \frac{2}{3} U_k^{-1/3} U_k = \frac{1}{3} U_k^{2/3}$$

паралельної схеми заміщення.

Параметри послідовної схеми заміщення визначаються з характеристики

$$U = \sqrt{I^3}; U = I^{3/2};$$

$$R_k = \frac{dU_k}{dI_k} = \frac{3}{2} I_k^{1/2} = \frac{3}{2} \sqrt{I_k};$$

$$E_k = U_k - I_k R_k = I_k^{3/2} - I_k \frac{3}{2} I_k^{1/2} = -\frac{1}{2} I_k^{3/2}$$

У наведених виразах k є кроком наближення до точного значення розрахункової величини. Для початку розрахунку мають бути задані початкові значення ($k=0$) струмів або напруг I_0 та U_0 (вибираємо з інтервалу $0,5 \div 1$).

6. Здійснити математичне моделювання лінійної дискретної моделі заданого нелінійного кола для кількох значень k . Значення k обмежується необхідною точністю розрахунків (відносна похибка не повинна перевищувати 1%). Забезпечити вимірювання напруг U_k на паралельних або струмів I_k в послідовних схемах заміщення. Результати моделювання занести до табл. 17.

Схема моделювання деякого нелінійного кола з паралельними схемами заміщення нелінійних елементів показана на рис. 23

7. За одержаними значеннями напруг (струмів) нелінійних елементів розрахувати їх струми (напруги) і порівняти з результатами вимірювання.

Таблиця 17

Значення параметру наближення	Параметри моделі першого нелінійного елемента			Параметри моделі другого нелінійного елемента		
	$U, \text{В}$	$G, \text{Ом}^{-1}$	$J, \text{А}$	$U, \text{В}$	$G, \text{Ом}^{-1}$	$J, \text{А}$
0	0,5			0,5		
1						
2						
3						
4						

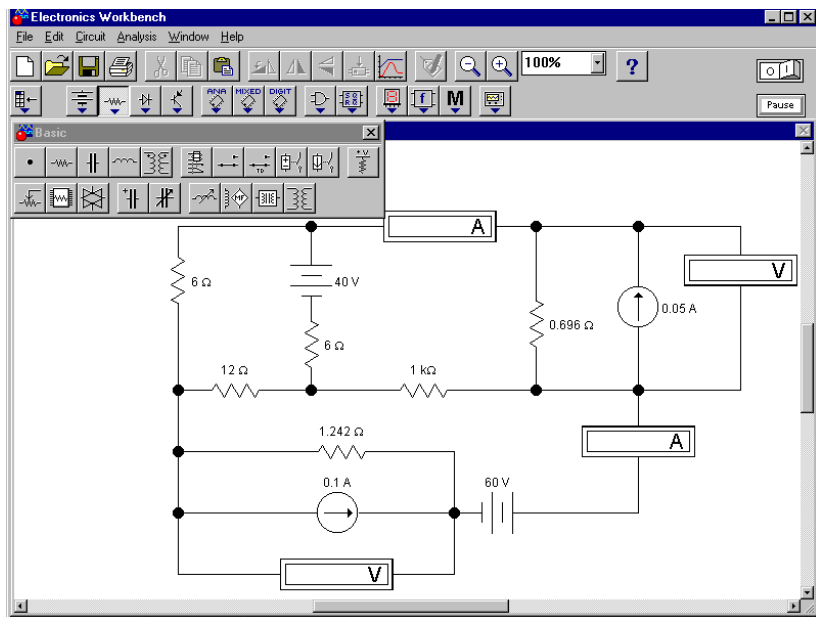


Рис. 23

8. Порівняти результати моделювання з результатами розрахунку за п.4.

Зміст звіту

Основна задача та порядок виконання роботи.

Схеми електричних кіл з підключеними вимірювальними приладами.

Схема та результат графічного розрахунку нелінійного кола, графіки характеристик.

Розрахунок заданого нелінійного кола.

Розрахунок параметрів схеми заміщення.

Результати математичного моделювання лінійної дискретної моделі нелінійного кола у вигляді електричних схем із вимірювальними приладами для кожного значення k .

Таблиця результатів моделювання та розрахунків.

Висновки до лабораторної роботи.

Запитання для самоперевірки

1. Які елементи називають нелінійними?
2. Як будується вольт-амперна характеристика нелінійного елемента? Навести приклади типових характеристик.
3. Дати характеристику графічного методу перетину вольт-амперних характеристик.
4. Які особливості застосування методу контурних струмів для розрахунку нелінійного електричного кола?
5. Як будується дискретна послідовна модель нелінійного елемента постійного струму?
6. Як будується дискретна паралельна модель нелінійного елемента постійного струму?

Література: [2, с. 97–102, 122–123]; [3, с. 85–89].

Робота 12 ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЛІНІЙНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ

Основна задача роботи: дослідження нелінійного електричного кола синусоїдного струму шляхом побудови вольт-амперних характеристик, розрахунку струму і напруги ферорезонансного контура графічним і аналітичним методами, експериментальна перевірка методу гармонічної лінеаризації.

Порядок виконання роботи

1. Накреслити схему послідовного ферорезонансного контура з параметрами $r = 0,5 \text{ Ом}$, $L_e = 20 \cdot 10^{-3} - 1,125 \cdot 10^{-3} I_m^2$, де I_m – амплітуда струму в контурі.
2. Побудувати вольт-амперну характеристику нелінійної індуктивності $L_e = f(I_m)$ у вигляді $U_L = f(I_m)$, якщо джерело синусоїдної напруги має частоту $\omega = 500 \text{ рад/сек}$.
3. Розрахувати значення ємності C конденсатора, при якому в контурі відбувається ферорезонанс.

4. Побудувати графіки вольт-амперних характеристик резистора $U_r(I_m)$, конденсатора $U_C(I_m)$ та нелінійної індуктивності $U_L(I_m)$ за виразами

$$U_L(I_m) = \omega \cdot 20 \cdot 10^{-3} - \omega \cdot 1,125 \cdot 10^{-3} I_m^2;$$

$$U_C(I_m) = \frac{I_m}{\omega C};$$

$$U_r(I_m) = r I_m.$$

5. Побудувати графіки вольт-амперних характеристик ферорезонансного контура

$$U(I_m) = \sqrt{U_r^2(I_m) + [U_L(I_m) - U_C(I_m)]^2}.$$

6. Провести аналітичний розрахунок струму ферорезонансного контура для різних значень амплітуди вхідної напруги U_m , використовуючи можливості MathCAD:

Given

$$I_m \cdot \sqrt{r^2 + \left[\omega \cdot \left(20 \cdot 10^{-3} - 1.125 \cdot 10^{-3} \cdot I_m^2 \right) - \frac{1}{\omega \cdot C} \right]^2} = U_m$$

Find(I_m) \rightarrow (.....)

Результати розрахунку занести до табл. 18.

Таблиця 18

Значення U_m , В	Значення I_m , А		
0	0	0	0
0,3			
...			

За результатами розрахунку побудувати графік вольт-амперної характеристики контуру $U(I_m)$, при яких відбувається резонанс.

8. Визначити за графіками значення стрибків струму ΔI_1 (при підвищенні вхідної напруги від нуля до деякого значення U_{m1} , після якого струм лінійно зростає) та ΔI_2 (при зменшенні вхідної напруги від U_{m1} до деякого значення U_{m2} , після якого струм зменшується до нуля).

9. Здійснити математичне моделювання ферорезонансного контуру у резонансному режимі, рис. 24. Порівняти результати моделювання з результатами розрахунку.

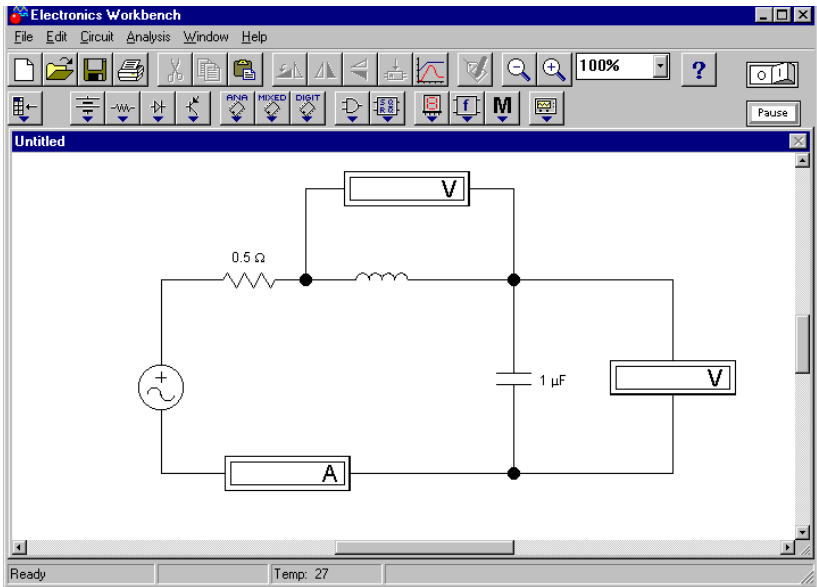


Рис. 24

Зміст звіту

Основна задача та порядок виконання роботи.

Схема ферорезонансного контуру та схема моделювання з підключеними вимірювальними приладами.

Графіки вольт–амперних характеристик елементів контуру та розрахунок значення ємності конденсатора.

Графік вольт–амперної характеристики ферорезонансного контуру.

Результати аналітичного розрахунку струму ферорезонансного контура та графік вольт–амперної характеристики за результатами розрахунку.

Результати розрахунку стрибків струму у ферорезонансному контурі.

Результати математичного моделювання резонансного явища у ферорезонансному контурі.

Висновки до лабораторної роботи.

Запитання для самоперевірки

1. Як розрахувати значення ємності конденсатора, при якому можливий резонанс у контурі?
2. Як будується графік вольт-амперної характеристики контура?
3. Дати характеристику методу гармонічної лінеаризації для розрахунку нелінійних електричних кіл синусоїдного струму.
4. Провести доказ формули для лінеаризованої індуктивності.
5. Чим відрізняються вольт-амперні характеристики ідеального та реального ферорезонансних контурів?

Література: [2, с. 158–162], [3, с. 92–96].

Робота 13

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ ПЕРШОГО ПОРЯДКУ

Основна задача роботи: дослідження перехідних процесів на реактивних елементах при підключенні електричного кола до джерела постійної напруги.

Порядок виконання роботи

1. Накреслити електричні схеми першого порядку (рис. 25) з параметрами $r = 5k$ Ом, $E = 10k$ В, $L = 0.01k$ Гн, $C = \frac{10}{k}$ мкФ, де k –номер варіанта.

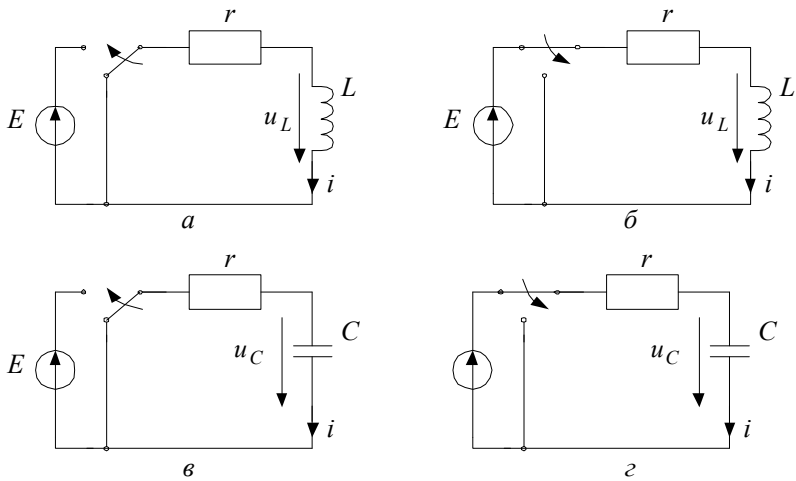


Рис. 25

2. Скласти диференціальні рівняння відносно струму та напруги на реактивному елементі і визначити початкові умови.

Диференціальне рівняння відносно напруги на індуктивності: $ir + u_L = E$ струм i та напруга індуктивного елемента визначаються із співвідношення

$$i = \frac{1}{L} \int u_L dt,$$

тобто

$$\frac{r}{L} \int u_L dt + u_L = E.$$

Щоб отримати напруги на індуктивності $u_L(t)$, треба продиференціювати рівняння

$$\frac{du_L}{dt} = E - \frac{r}{L} u_L.$$

Початкові умови визначаються для моменту комутації ($t = 0$).
Тоді

$$i(0)r + u_L(0) = E.$$

За першим законом комутації

$$i(0) = 0,$$

звідки

$$u_L(0) = E.$$

Таким чином,

$$\frac{du_L}{dt} = E - \frac{r}{L}u_L; u_L(0) = E.$$

Диференціальні рівняння скласти для обох режимів: режиму підключення до джерела постійної напруги (рис. 25 а, в) та режиму короткого замикання (рис. 25 б, з).

3. Визначити сталі часу τ_L і τ_C та практичну тривалість перехідного процесу

$$t_n = 5 \cdot \tau$$

4. Провести у середовищі MathCAD розрахунок диференціальних рівнянь:

`solve`

$$y := E \quad D(t1, y) := \left(E - \frac{r \cdot y}{L} \right)$$

$$z := \text{rfixed}(y, 0, 5 \cdot \tau, 100, D)$$

`z = ■`

Змінна y відповідає змінній $u_L(t)$, змінна t_1 відповідає змінній часу для режиму підключення.

Розв'язок z є матрицею, що має 100 рядків, нульовий стовпчик відповідає поточному часу, а перший стовпчик відповідає змінній $u_L(t)$.

5. Побудувати графіки струмів і напруг для всіх режимів для схем, визначених в п. 1.

Графіки можуть бути побудовані за співвідношеннями (наприклад, для $u_L(t)$):

$$t1 := z^{(0)} \quad uL1 := z^{(1)}$$

При побудові графіків сумістити режими підключення до джерела E та короткого замикання. Для цього необхідно використовувати іншу змінну t_2 , яка відповідає змінній часу для режиму

короткого замикання. Блок рішення диференціального рівняння має вигляд (для напруги на індуктивності $U_L(t)$)

$$y := \frac{E}{r} \quad t2 := 5 \cdot \tau \quad D(t1, y) := \left(\frac{r \cdot y}{L} \right)$$

$$z := \text{rkfixed}(y, 5 \cdot \tau, 10 \cdot \tau, 100, D)$$

$$z = \mathbf{z}$$

Приймаючи

$$t2 := z \langle 0 \rangle \quad uL2 := z \langle 1 \rangle$$

можна побудувати сумісний графік

6. Здійснити математичне моделювання заданих електричних кіл відповідно п.1, використовуючи джерело напруги прямокутної форми з амплітудою E і частотою $f = 1/10\tau$, що моделює періодичне підключення та коротке замикання заданого електричного кола, рис.26.

Зняти осцилограми перехідних струмів та напруг на реактивних елементах (рис.27). Порівняти результати моделювання та розрахунку.

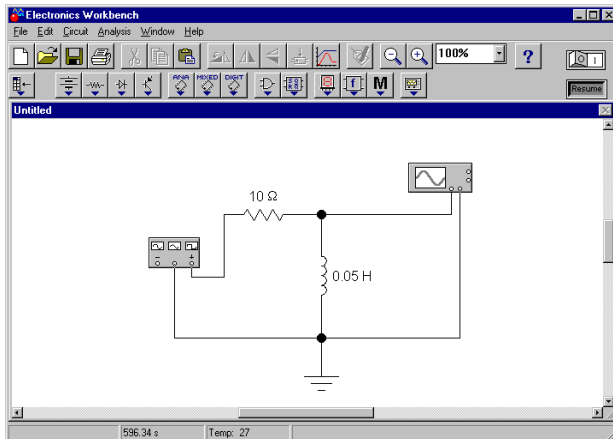


Рис. 26

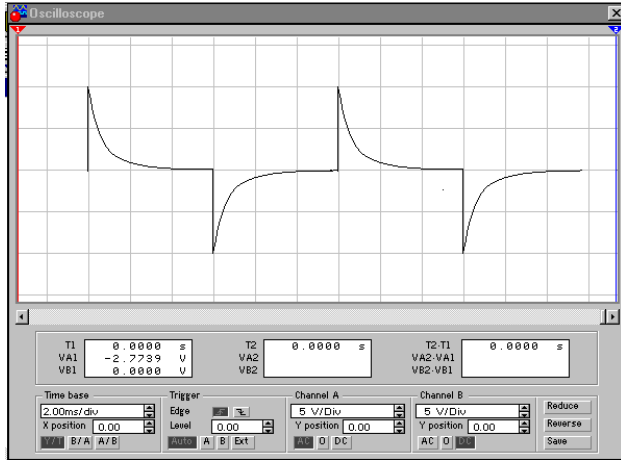


Рис. 27

Примітка. Осцилограма напруги на резисторі відповідає осцилограмі струму через резистор (тобто струму в заданому колі) у масштабі $\frac{1}{r}$.

7. Виконати п.6 для значень опору резистора $5r$ і $0,2r$.

Зміст звіту

Основна задача та порядок виконання роботи.

Схеми електричних кіл.

Диференціальні рівняння та їх розрахунок.

Графіки перехідних струмів і напруг за результатами розрахунку.

Осцилограми результатів моделювання.

Висновки до лабораторної роботи.

Запитання для самоперевірки

1. Чому струм в індуктивному елементі та напруга на конденсаторі не можуть змінюватися стрибком?
2. Сформулюйте перший та другий закони комутації.
3. Як визначається тривалість перехідного процесу?
4. Наведіть алгоритм розв'язання диференціального рівняння першого порядку.

5. Що таке вимушена та вільна складові перехідного процесу?
6. Як зміна сталої часу впливає на форму перехідних струмів і напруг? Наведіть приклади.
7. Як визначається стала часу складного електричного кола першого порядку?
8. Яким чином можна спростити розрахунок перехідних струму та напруги на реактивному елементі в розгалуженому електричному колі першого порядку?
9. Що таке баланс енергії і як він використовується в розрахунках перехідних процесів?

Література: [4, с.8-13, 52-70]

Робота 14

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ПОСЛІДОВНОМУ КОЛИВАЛЬНОМУ КОНТУРІ

Основна задача роботи : дослідження перехідних процесів на реактивних елементах контуру при підключенні його до джерела постійної та синусоїдальної напруги.

Порядок виконання роботи

1. Накреслити електричну схему коливального контуру (рис.28) з параметрами $E = 100 \text{ В}$, $r = 10k \text{ Ом}$, $L = 50 \cdot 10^{-3} k \text{ Гн}$, $C = 20 \cdot 10^{-6} k \text{ Ф}$, де k - номер варіанта.

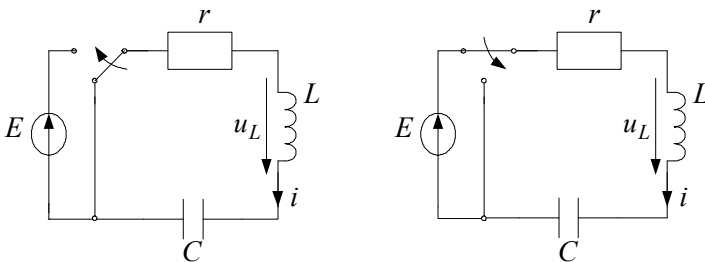


Рис.28

2. Скласти диференціальні рівняння відносно струму та напруги на конденсаторі і визначити початкові умови. Рівняння скласти як для режиму підключення, так і режиму короткого замикання.

Примітка. Диференціальні рівняння відносно струму та напруги на конденсаторі називають рівняннями стану коливального контура

$$\begin{cases} ri + L \frac{di}{dt} + u_C = E; \\ C \cdot \frac{duc}{dt} = i. \end{cases}$$

3. Визначити коефіцієнт згасання δ частот у вільних коливань ω_B та частоту власних коливань ω_0 , сталу часу τ коливального контура

$$\delta = \frac{r}{2 \cdot L}, \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}, \omega_B = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}, \tau = \left| \frac{1}{\delta} \right|.$$

4. Визначити час практичного існування перехідного процесу t_n

$$t_n = 5 \cdot \frac{1}{\delta}$$

і кількість періодів N вільної складової перехідного процесу, що укладається за час t_n :

$$N = \frac{t_n}{T_B} = \frac{t_n}{2p} = \frac{5 \frac{2L}{r}}{2p} = \frac{10Q}{2p} \approx 1,5Q$$

де Q – добротність коливального контуру

$$Q = \frac{\omega_B L}{r}.$$

5. Провести розрахунок диференціальних рівнянь за допомогою блока solve – z:=rkfixed(•).

Наприклад, для режиму підключення

$$\text{solve } y := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad D(t, y) := \begin{pmatrix} \frac{E}{L} - \frac{r}{L} \cdot y - \frac{1}{L} \cdot y1 \\ \frac{1}{C} \cdot y0 \end{pmatrix}$$

$$z := \text{rkfixed}(y, 0, 5 \cdot \tau, 250, D)$$

Змінні y_0 та y_1 відповідають струму та напрузі на конденсаторі коливального контура відповідно.

6. Побудувати графіки перехідного струму (один графік) та перехідних напруг на конденсаторі і індуктивності коливального контура (ще один графік) для схем, визначених в п.1.

Примітка. Графіки можуть бути побудовані за співвідношеннями:

$$t := z^{(0)} \quad i := z^{(1)} \quad uC := z^{(2)}$$

$$uL := E - i - uC$$

При побудові графіків сумістити режими підключення до джерела E та короткого замикання (більш докладніше див. п.5 роботи 13).

7. Здійснити математичне моделювання заданого електричного кола, використовуючи джерело напруги прямокутної форми з амплітудою E та частотою $f = \frac{1}{10\tau}$. Зняти осцилограми перехідних струмів та напруг на реактивних елементах. Порівняти результати моделювання та розрахунку.

8. Визначити добротність Q коливального контура за допомогою осцилограми. Визначити, яким чином впливає на форму перехідного процесу зміна значення опору резистора r коливального контура.

9. Накреслити схему послідовного коливального контура з параметрами:

$$r = 10 \text{ Ом}, L = 0.01 \cdot k \text{ Гн}, C = \frac{25}{k} \text{ мкФ},$$

що підключається до джерела синусоїдної напруги з параметрами $E_m = 10 \text{ В}$, $f = 400 \text{ Гц}$, де k -номер варіанта.

10. Визначити період коливань джерела напруги T , власну частоту коливань контура ω_0 та різницю частот Ω :

$$T = \frac{1}{f}, \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \Omega = \omega - \omega_0.$$

11. Розрахувати рівняння стану коливального контура

$$\begin{cases} \frac{d_i}{dt} = \frac{E_m \sin \omega t}{L} - \frac{r}{L} i - \frac{1}{L} U_C \\ \frac{dU_C}{dt} = \frac{1}{C} i \end{cases}$$

для випадку, коли частота коливань ω джерела напруги близька до частоти власних коливань контура ω_0 , з періодом інтегрування

$$t_{\Pi} = \frac{2\pi}{\omega} \cdot 10 = 10T$$

12. Розрахувати рівняння стану коливального контура для резонансного випадку, коли $\omega = \omega_0$.

Примітка. При підключенні високодобротного послідовного контура до джерела синусоїдної напруги перехідні процеси в контурі мають синусоїдну форму з обвідною частотою $(\omega - \omega_0)/2$.

Обвідною називають уявну криву, що показує закон зміни амплітуди синусоїдної напруги (рис.29).

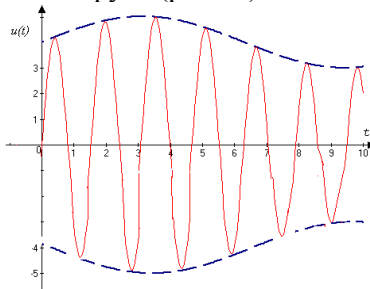


Рис.29

Закон зміни задається виразом

$$U(\Omega) = \frac{E_m Q}{\sqrt{1 + \zeta^2}} \sqrt{1 + e^{-2\delta t} - 2e^{-\delta t} \cos \frac{\Omega}{2} t},$$

де $\zeta = x/r$.

При резонансі ($x = 0, \Omega = 0$)

$$U(\Omega) = E_m Q \sqrt{1 - e^{-\delta t}}.$$

13. Побудувати графіки перехідного струму та перехідної напруги на конденсаторі в контурі (два графіки) для обох випадків.

14. Здійснити математичне моделювання заданого електричного кола, використовуючи джерело напруги синусоїдної форми. Зняти осцилограми перехідних струмів та напруг на конденсаторі для обох режимів. Визначити максимальну напругу на конденсаторі у резонансному випадку.

Зміст звіту

Основна задача та порядок виконання роботи.

Схеми електричних кіл.

Диференційні рівняння та їх розрахунок.

Графіки перехідних струмів та напруг за результатами розрахунків.

Осцилограми результатів моделювання.

Висновки до лабораторної роботи.

Запитання для самоперевірки

1. В якому випадку перехідний струм у контурі змінюється за синусоїдним законом при підключенні контура до джерела постійної напруги?

2. Скільки коливань практично зробить вільна складова за час перехідного процесу, якщо корені характеристичного рівняння $P = (-300 \pm j3000) \text{сек}^{-1}$?

3. При яких значеннях параметрів контура режим у контурі стає критичним?

4. Який характер мають перехідні процеси в коливальному контурі при підключенні до джерела синусоїдної напруги для випадків $\omega = \omega_0$ та $\omega \approx \omega_0$?

5. Довести, що кількість вільних коливань N близька до значення добротності контура Q .

6. Що станеться з практичним часом перехідного процесу, якщо вільну частоту контура ω_b зменшити?

Література: [4, с.8-13, 81-83].

Робота 15

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА З РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ

Основна задача роботи: дослідження розподілу напруг уздовж однорідної довгої лінії для різних значень опору навантаження шляхом моделювання її схеми заміщення.

Порядок виконання роботи

1. Накреслити схему ідеальної однорідної довгої лінії (в лінії відсутні втрати електроенергії) з параметрами відповідного варіанта (табл.19).

Таблиця 19

Номер варіанта	L_0 , мкГн	C_0 , пФ	Напруга генератора U , В	Кількість елементарних ланцюгів
1	200	1000	10	16
2	175	1250	10	16
3	150	1500	10	16
4	125	1800	10	16
5	100	2000	10	16
6	200	1000	20	20
7	175	1250	20	20
8	150	1500	20	20
9	125	1800	20	20
10	100	2000	20	20
11	200	1000	30	16
12	150	1500	30	16

Примітка. Час затримки штучної лінії $\tau_3 = n\sqrt{L_0C_0}$, де n – кількість елементарних ланцюгів, L_0 і C_0 – індуктивність і ємність кожного ланцюга штучної лінії. Таким чином, штучна лінія, яка складається із n елементарних ланцюгів, еквівалентна двопровідній лінії з погонними параметрами L_0, C_0 такої довжини, при якій час затримки τ_3 такий самий, як і у штучної лінії. Якщо час затримки τ_3 лінії дорівнює періоду коливань T , то відстань, яку проходить сигнал за цей час, дорівнює довжині хвилі λ . Таким чином, можна одержати основні співвідношення:

$$f = \frac{1}{n\sqrt{L_0C_0}}; \quad \lambda = c \cdot n\sqrt{L_0C_0}, \quad T = \frac{1}{f}$$

де c – швидкість розповсюдження світла.

2. Розрахувати довжину лінії l , якій еквівалентна штучна лінія, частоту f , при якій на лінії укладається одна довжина хвилі λ .

3. Розрахувати хвильовий опір Z_C , коефіцієнт фази β , який характеризує зміну фази коливань уздовж лінії:

$$Z_C = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}, \quad \beta = \frac{2\pi}{\lambda}.$$

4. Побудувати графіки розподілу діючих значень напруги і струму уздовж лінії:

режим холостого ходу

$$U(\zeta) = U_2 \cdot |\cos \beta \zeta|,$$

$$I(\zeta) = \frac{U_2}{Z_C} \cdot |\sin \beta \zeta|;$$

режим короткого замикання

$$U(\zeta) = U_2 \cdot |\sin \beta \zeta|,$$

$$I(\zeta) = \frac{U_2}{Z_C} \cdot |\cos \beta \zeta|;$$

режим узгодженого навантаження

$$U(\zeta) = U_2,$$

$$I(\zeta) = \frac{U_2}{Z_C}.$$

режим реактивного навантаження

$$U(\zeta) = U_2 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{X_H}\right)^2} \cdot |\sin(\beta\zeta + \Delta)|$$

$$I(\zeta) = \left| \frac{U_2}{X_H} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{X_H}\right)^2} \cdot \cos(\beta\zeta + \Delta) \right|$$

$$\Delta = \arctg \frac{X_H}{Z_{XB}}$$

для випадку $|X_H| = Z_C$ (розглянути випадки індуктивного ($X_H > 0$) та ємкісного ($X_H < 0$) навантаження);

режим довільного активного навантаження r_H

$$U(\zeta) = U_2 \cdot \sqrt{\cos^2 \beta\zeta + n^2 \sin^2 \beta\zeta}$$

$$I(\zeta) = \frac{U_2}{Z_C} \cdot \sqrt{n^2 \cos^2 \beta\zeta + \sin^2 \beta\zeta}$$

$$n = \frac{Z_C}{r_H}$$

для випадків $r_H = 2Z_C$, $r_H = 0,5Z_C$.

5. Побудувати графіки розподілу миттєвих значень напруги і струму уздовж лінії для режимів:

режим холостого ходу

$$U(t, \zeta) = U_{2m} \cdot \cos \beta\zeta \cdot \sin \omega t,$$

$$i(t, \zeta) = \frac{U_{2m}}{Z_C} \cdot \sin \beta\zeta \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right);$$

режим короткого замикання

$$U(t, \zeta) = U_{2m} \cdot \sin \beta\zeta \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right),$$

$$i(t, \zeta) = \frac{U_{2m}}{Z_C} \cdot \cos \beta\zeta \cdot \sin \omega t;$$

режим узгодженого навантаження

$$U(t, \zeta) = U_{2m} \cdot \sin(\omega t + \beta \zeta) \quad ,$$

$$i(t, \zeta) = \frac{U_{2m}}{Z_C} \cdot \sin(\omega t + \beta \zeta) ;$$

Примітка. Значення ζ та t повинні вибиратися з діапазону:

$$\zeta := 0,20 \cdot \lambda$$

$$t := 0,01T \dots T$$

6. Здійснити математичне моделювання заданого електричного кола з розподіленими параметрами і визначити показання вольтметра у різних точках лінії, рис.30 для режимів, визначених в п.4.

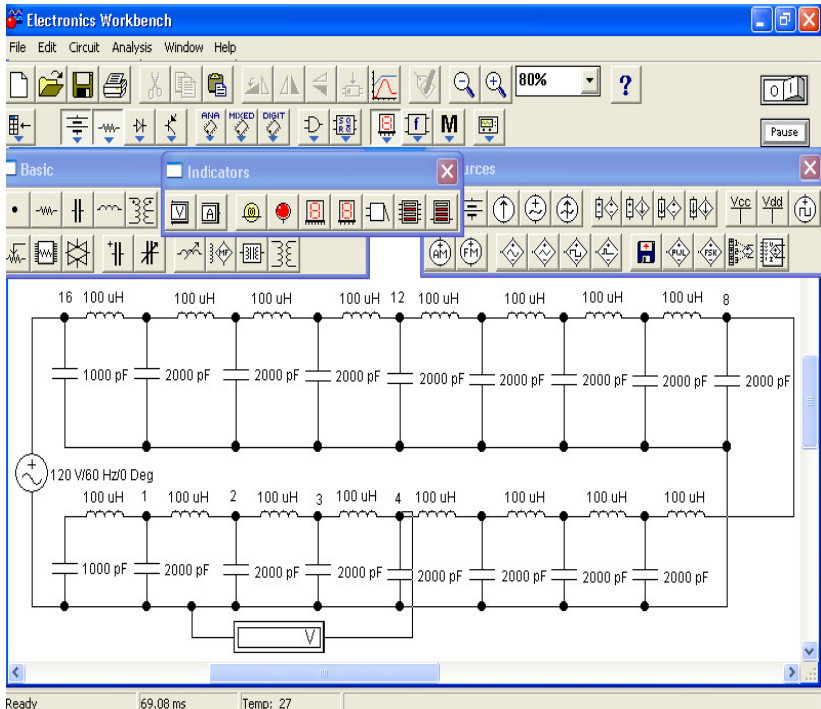


Рис.30

Результати занести до табл. 20.

Таблиця 20

$\frac{\zeta}{\lambda}$	Не-роб. режим	Ре-жим КЗ	Уз-годж. режим	Ре-жим jX_H	Ре-жим $-jX_H$	Режим $r_H = 0.5Z_C$	Режим $r_H = 2Z_C$
1/16							
2/16							
3/16							
1/4							
...							
λ							

7. Побудувати графіки розподілу діючих значень напруги за результатами моделювання для всіх режимів моделювання. Перевірити результати розрахунку і моделювання.

Зміст звіту

Основна задача та порядок виконання роботи.

Схема електричного кола.

Розрахунок параметрів однорідної довгої лінії.

Графіки розподілу діючих значень напруги і струму уздовж лінії для всіх режимів, визначених у п.4.

Графіки розподілу миттєвих значень напруги і струму для режимів, визначених у п.5.

Таблиця результатів моделювання.

Графіки розподілу діючих значень за результатами моделювання (осцилограми).

Висновки до лабораторної роботи.