

Лабораторна робота 5

Закон Ома. Активний та реактивний опір. Резонанс

Мета роботи: отримати уявлення про електричний опір, навчитися розрізняти активний та реактивний опір, а також вимірювати їх. Отримати уявлення про явище електричного резонансу.

Обладнання: NI Multisim ¹

5.1 Короткі теоретичні відомості

5.1.1 Фізичні величини

Для початку розглянемо коротко фізичні величини, з якими ми будемо мати справу в цій лабораторній роботі. Це електрична різниця потенціалів (напруга), електричний струм, електричний опір (активний та реактивний).

1. Електрична напруга. Напруга на ділянці електричного кола — це різниця потенціалів між двома точками електричного поля, яка чисельно дорівнює відношенню роботи, яку треба виконати для переміщення заряду з однієї точки поля в іншу точку, до величини цього заряду.

¹Дана лабораторна робота виконується за допомогою програмного симулятора електричних явищ.

Напруга в системі SI вимірюється у вольтах (В), у фізиці традиційно позначається літерою U (в електроніці також поряд з U часто використовується позначення V — особливо в англомовній літературі).

Потенціал електричного поля — енергетична характеристика електричного поля; це скалярна величина, що дорівнює відношенню потенціальної енергії заряду в полі до величини цього заряду. Сам по собі потенціал фізичного змісту не має, має фізичний зміст *різниця* потенціалів, або електрична напруга. Саме внаслідок наявності різниці потенціалів і виникає направлений рух носіїв заряду (електронів) — *електричний струм*.

2. Електричний струм. Одиницею вимірювання сили електричного струму в SI є *ампер* (А). Сила струму в 1 А — це коли через площу поперечного перерізу провідника за 1 с проходить сумарний заряд в 1 Кл.

У фізиці та електроніці сила електричного струму традиційно позначається літерою I . Крім того, варто відзначити, що позначення U та I історично закріпилися за *постійними* напругами і струмами, а *змінні* напруги і струми часто позначаються відповідно u та i .

3. Електричний опір — це фізична величина, що характеризує здатність провідника опиратися (*протидіяти*) перенесенню через нього носіїв заряду. Одиницею вимірювання опору в SI і Ом. Опір провідника в 1 Ом — це коли при різниці потенціалів 1 В через нього протікає струм 1 А.

Опір у фізиці традиційно позначається літерою R , хоча інколи використовується і позначення r (як правило, малою літерою позначається внутрішній опір джерела живлення — щоб підкреслити те, що такий опір є окремим елементом електричного кола).

Струм, напруга та опір нерозривно пов'язані між собою в *закон Ома* (для ділянки електричного кола):

$$\boxed{I = \frac{U}{R} \quad \text{або} \quad R = \frac{U}{I}} \quad (5.1)$$

Закон Ома справедливий як для постійного, так і для змінного струму. Проте у випадку змінного струму в нього підставляються *діючі* значення напруги і струму. Діючим (ефективним) значенням сили змінного струму називають величину постійного струму, дія якого виконує таку ж роботу (тепловий чи електродинамічний ефект), що і розглянутий змінний струм i за час одного періоду T :

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}.$$

Якщо струм або напруга є гармонічними (тобто змінюються по закону синуса або косинуса), то діюче значення струму дорівнює

$$I = \frac{1}{\sqrt{2}} I_m \approx 0,707 I_m, \quad (5.2)$$

а діюче значення напруги

$$U = \frac{1}{\sqrt{2}} U_m \approx 0,707 U_m, \quad (5.3)$$

де I_m та U_m — амплітудні значення відповідно струму та напруги. В цьому випадку *миттєві* значення струму і напруги дорівнюють відповідно

$$\begin{aligned} i(t) &= I_m \sin(\omega t + \phi_1), \\ u(t) &= U_m \sin(\omega t + \phi_2), \end{aligned} \quad (5.4)$$

де $\omega = 2\pi f$ — колова частота (а f — звичайна частота, в Гц), а ϕ — початкові фази.

Два основних види з'єднання активних опорів — послідовне та паралельне (рис. 5.1). При послідовному з'єднанні сумарний опір дорівнює сумі опорів:

$$R_\Sigma = \sum_{i=1}^N R_i.$$

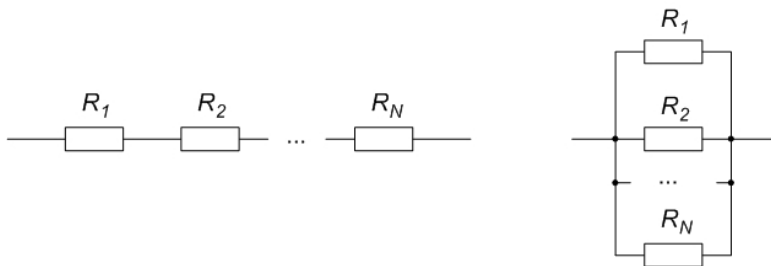


Рис. 5.1

При паралельному з'єднанні формула для сумарного опору дещо складніша:

$$\frac{1}{R_{\Sigma}} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{R_i} \quad \text{або} \quad R_{\Sigma} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{R_i}}.$$

При розрахунку сумарного опору можна перевіряти результат по мнемонічному правилу: при послідовному з'єднанні сумарний опір повинен бути більшим від найбільшого, а при паралельному з'єднанні — меншим від найменшого з опорів, що входять до складу з'єднання.

4. Реактивний опір. Електричний опір може бути *активним* і *реактивним*. Активний опір — це такий електричний опір, що при протіканні через нього електричного струму на ньому відбувається виділення тепла згідно *закону Джоуля–Ленца*:

$$Q = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t.$$

На активному електричному опорі фази ϕ_1 та ϕ_2 струму і напруги у виразах (5.4) співпадають (тобто $\phi_1 = \phi_2$). Значення активного опору не залежить від частоти струму чи напруги.

На противагу частотно-незалежному активному опору виділяють частотно-залежний *реактивний* опір (або *реактанс*). Такий опір є комплексним (точніше, чисто уявним) числом і проявляється при включенні в електричне

коло конденсатора або котушки індуктивності. Відповідно, виділяють *ємнісний* та *індуктивний* опори.

Ємнісний опір дорівнює

$$X_C = \frac{1}{j\omega C} = -j\frac{1}{\omega C}, \quad (5.5)$$

де $\omega = 2\pi f$ — колова частота, C — ємність конденсатора, $j = \sqrt{-1}$ — уявна одиниця (її в електротехніці прийнято позначати j , щоб не плутати із змінним струмом i).

Індуктивний опір дорівнює

$$X_L = j\omega L, \quad (5.6)$$

де L — індуктивність.

Як видно з виразів (5.5) та (5.6), при постійному струмі (тобто коли $f = 0$) ємнісний опір дорівнює нескінченності (тобто на постійному струмі конденсатор являє собою розрив електричного кола, що в принципі логічно, оскільки він складається з діелектрика між пластинами), а індуктивний опір — дорівнює нулю (тобто котушка індуктивності на постійному струмі являє собою коротке замикання, що в принципі теж логічно, оскільки котушка — це просто певна кількість витків дроту, який, як правило, має дуже малий активний електричний опір).

Якщо послідовно з'єднати резистор, конденсатор і котушку індуктивності, то їх сумарний опір змінному струму (або *імпеданс*) буде комплексним числом:

$$Z = R + \frac{1}{j\omega C} + j\omega L = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right). \quad (5.7)$$

В такому випадку дійсна частина цього числа (R) — це активний опір, а уявна ($\omega L - \frac{1}{\omega C}$) — реактивний опір. Вимірювальними приладами (які найчастіше показують *діюче* значення струму та напруги) вимірюється *модуль* цього повного опору:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}. \quad (5.8)$$

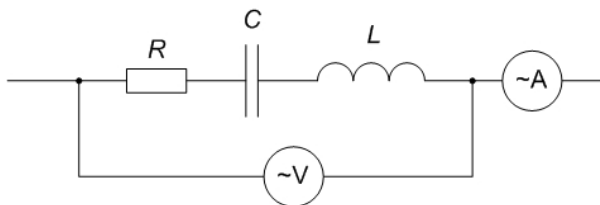


Рис. 5.2

Якщо до такої ланки електричного кола підключити амперметр і вольтметр, як показано на рисунку 5.2, то модуль повного опору можливо безпосередньо обчислити за законом Ома:

$$|Z| = \frac{U}{I}, \quad (5.9)$$

де u та i — діючі значення напруги та струму.

При наявності реактивного опору в ділянці електричного кола фази напруги та струму у виразі (5.4) не співпадають.

Реактивний опір не призводить до втрат електричної енергії.

5. Резонанс. Оскільки реактивний опір є частотно-залежним, то можна підібрати значення частоти ω у виразах (5.7) і (5.8) таким, що уявна частина перетвориться у нуль. Тоді опір такої ділянки кола стає повністю активним, а напруга і струм по виразам (5.4) стають такими, що різниця фаз стає π , або 180° (тобто $|\phi_1 - \phi_2| = \pi$).

Електрично з'єднані конденсатор та котушка при цьому утворюють *коливальний контур* — фізичну систему, в якій можуть утворюватися електричні коривання.

Тоді при послідовному з'єднанні конденсатора і котушки виникає *резонанс напруг* — явище, при якому напруги на конденсаторі та котушці по окремоті сильно перевищують напругу живлення коливального контуру, але, оскільки вони знаходяться у протифазі, вони взаємно компенсують одне одного. При паралельному з'єднанні конденсатора і котушки виникає *резонанс струмів* — в цьому випадку струми

через конденсатор і котушку по окремістї значно збільшуються, але через те, що вони знаходяться у протифазі, вони компенсують одне одного.

Незалежно від того, чи маємо послідовний, чи паралельний коливальний контур, та частота, на якій відбувається резонанс (яка так і називається — *резонансна частота*) визначається за *формулою Томсона*:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (5.10)$$

За формулою Томсона резонансна частота отримується в герцах (Гц), якщо ємність підставляється у фарадах (Ф), а індуктивність — в генрі (Гн). Проте на практиці ємності порядку фарад не зустрічаються — як правило, вони мають порядок величини мкФ (10^{-6} Ф), нФ (10^{-9} Ф) і пФ (10^{-12} Ф). Індуктивності трапляються різні - від одиниць нГн до кількох Гн. У реальних коливальних контурів резонансні частоти лежать в діапазоні від кількох кГц до кількох сотень МГц.

5.1.2 Основи роботи з NI Multisim

На рис. 5.3 показане головне вікно NI Multisim 12. Головна ідея при роботі з Multisim полягає в тому, що все повинно бути якомога більш натуральним: значення опорів/ємностей/індуктивностей по замовчуванню не які завгодно, а із стандартних, номінальних рядів значень; вхідні сигнали (струми, напруги) задаються спеціальними елементами (генераторами); вихідні сигнали вимірюються не де завгодно, а за допомогою віртуальних осцилографів, які треба попередньо підключити до певних точок схеми. З одного боку, інші S.P.I.C.E.-симулятори дають більшу свободу дій, але з іншого боку — в реальній практиці розробки та аналізу електронної схеми „в залізі“ все відбувається саме так, як реалізовано в Multisim. З цієї причини для виконання даної лабораторної роботи обрано саме Multisim.

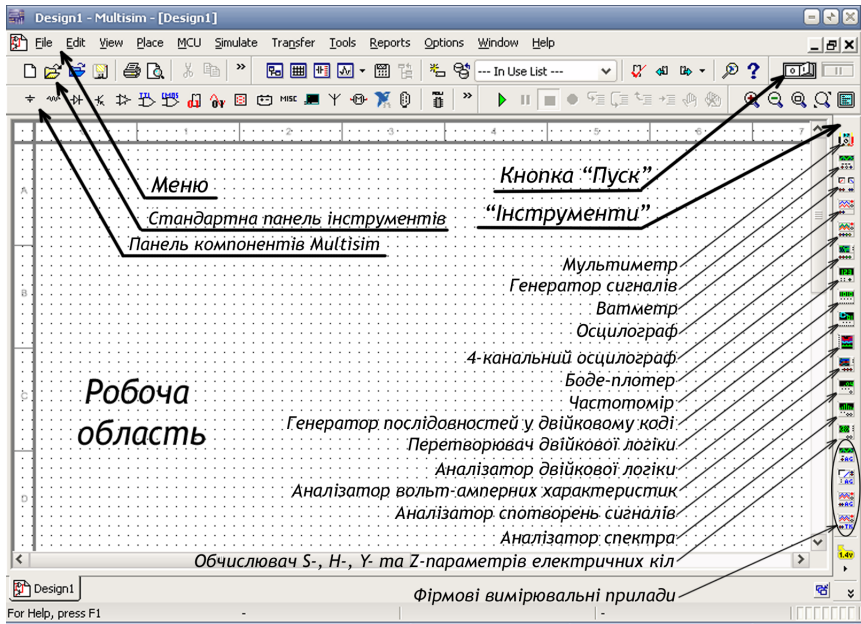


Рис. 5.3

Аналіз роботи електричної принципової схеми в Multisim починається з того, що спочатку схема збирається з *компонентів* (прототипів реальних деталей). Для деяких компонентів (зокрема резисторів, конденсаторів та котушок індуктивності) є можливість вручну виставити значення параметрів, а деякі (діоди, транзистори, операційні підсилювачі тощо) використовуються „як є“ з параметрами, заданими виробником.

Компоненти в Multisim знаходяться на панелі зверху екрана, а вимірювальні пристрої — на панелі праворуч. Основним компонентом Multisim є „земля“ (*Ground* — рис. 5.4) — точка, відносно якої відраховується значення всіх напруг у схемі. Таких „земель“ в схемі може бути скільки завгодно, але фізично всі вони є насправді однією і тією ж точкою з нульовим потенціалом. Без цього компонента схема в Multisim працювати не буде, при спробі запуску її симуляцію буде виведено повідомлення про помилку.

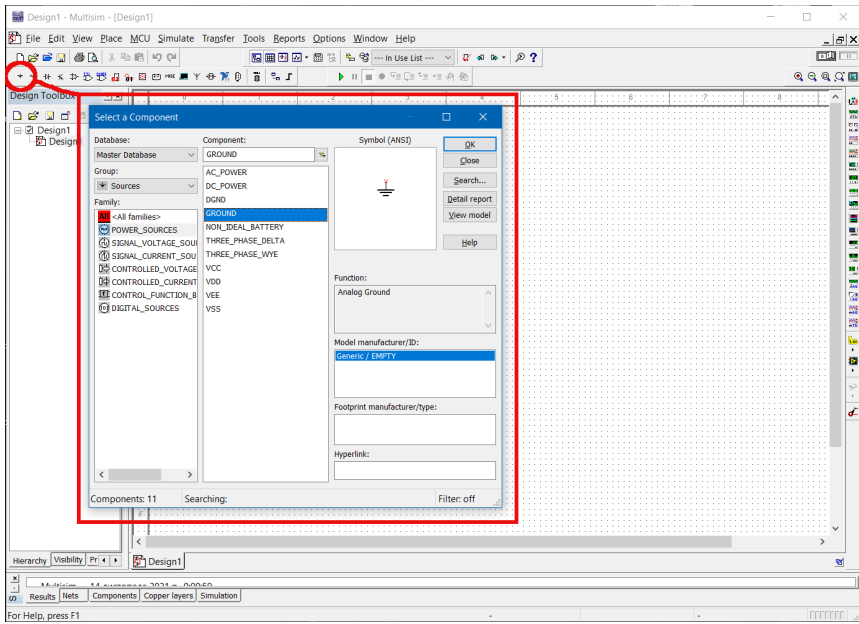


Рис. 5.4

На тому ж рис. 5.4 видно, що компоненти Multisim згруповані по іконкам, а потім по „родинам“ (*Family*). Наприклад, необхідні для даної лабораторної роботи резистори, конденсатори та котушки індуктивності знаходяться після кліку на іконці *Place Basic* у „родинах“ *RESISTOR*, *CAPACITOR* та *INDUCTOR* відповідно (рис. 5.5). Зі списку поруч можна шукати резистор/конденсатор/котушку із стандартним значенням опору/ємності/індуктивності, а можна вибрати для схеми будь-який, а потім вручну виставити потрібне значення параметра.

Для вибору компонента потрібно натиснути кнопку *Ok* у верхньому правому куті вікна. Після поміщення компонента на робоче поле Multisim знову відкриє те ж саме вікно вибору компонента. Якщо більше нічого ставити не потрібно, вікно закривається хрестиком або кнопкою *Close*.

Після того, як компонент поміщений на робоче поле, для того, щоб змінити значення його параметра, на компо-

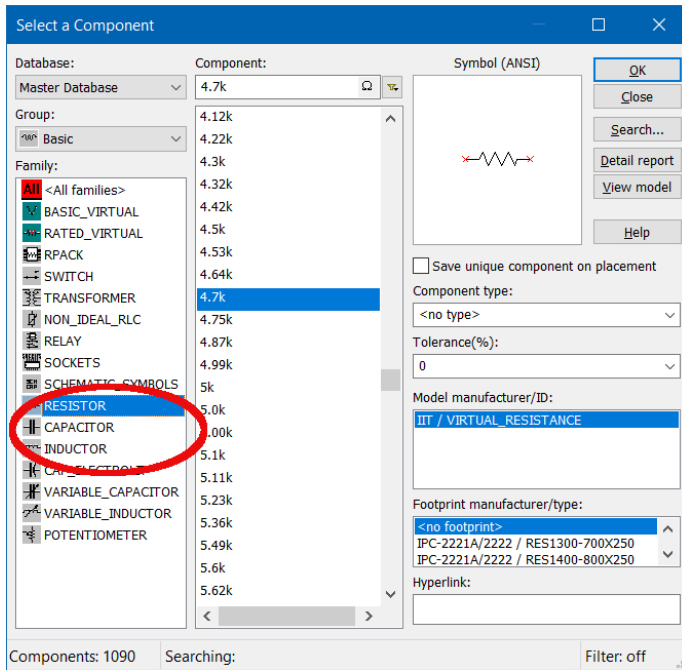


Рис. 5.5

менті можна двічі клікнути лівою кнопкою миші — відкриється вікно властивостей компонента (рис. 5.6), у вкладці *Value* якого можна вручну виставити значення відповідного параметра, після чого підтвердити зміну натисненням кнопки *Ok* внизу вікна. Це вікно також можна відкрити, натиснувши праву кнопку миші на зображенні компонента і вибравши у контекстному меню пункт *Properties*, або виділити компонент і натиснути комбінацію клавіш *Ctrl+M*.

Для того, щоб з'єднати два компоненти, достатньо навести вказівник миші на один з виводів одного компонента — вказівник миші із стрілочкою перетвориться на крапочку (електричне з'єднання) — і з натиснутою лівою кнопкою миші достатньо провести лінію до того компонента, з яким потрібно з'єднати перший — і утвориться з'єднання. З'єднані компоненти можна рухати по робочому полю, але

електричне з'єднання при цьому не розривається. Таким же чином відбувається приєднання компонента до провідника.

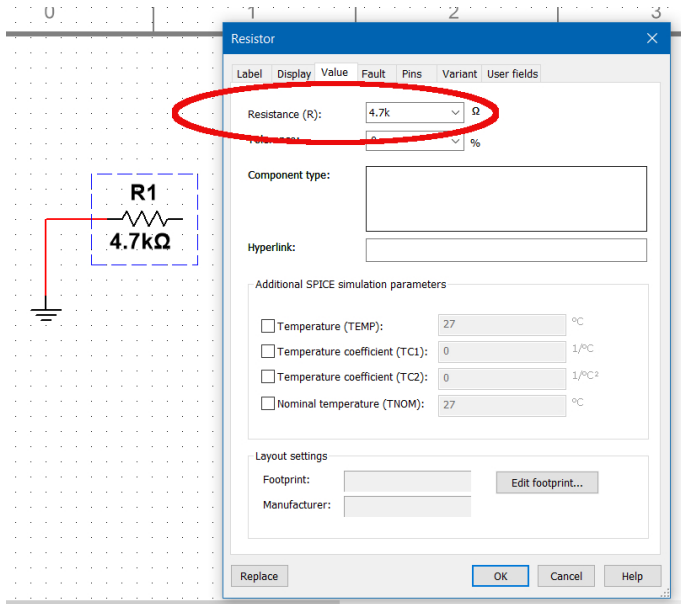


Рис. 5.6

За потреби компоненти можна віддзеркалювати горизонтально чи вертикально, а також обертати. Для цього потрібно виділити компонент, натиснути на ньому праву кнопку миші і вибрати у контекстному меню *Flip horizontally* (або скористатися комбінацією клавіш *Alt + X*), *Flip vertically* (*Alt + Y*), *Rotate 90° clockwise* (*Ctrl + R*), *Rotate 90° counter clockwise* (*Ctrl + Shift + R*).

В Multisim є багато віртуальних вимірювальних пристроїв для аналізу форми та параметрів сигналів, але в даній роботі ми будемо використовувати лише мультиметр і осцилограф. Всі віртуальні вимірювальні прилади згруповані на відповідну панель інструментів, яка розташована вертикально праворуч. Більш детально про використання цих вимірювальних засобів буде далі, по ходу виконання роботи.

5.2 Порядок виконання роботи

Оскільки дана лабораторна робота адаптована під дистанційне навчання, вона виконується за початковими даними згідно варіантів (Таблиця 5.1). Варіант — це порядковий номер студента у загальному списку групи. В таблиці задані значення опорів резисторів R_1 , R_2 та R_3 для виконання завдання 2; значення опору R , ємності C та індуктивності L для виконання завдань 3 і 4. Завдання 1 виконується з довільним значенням активного опору.

Для всіх завдань для спрощення розрахунків прийняти напругу $U = 100$ В, частоту $f = 1000$ Гц, форму зміни напруги — синусоїдальну.

5.2.1 Перевірка закону Ома на постійному та на змінному струмах

1. Зібрати схему, подібну до рис. 5.7. Значення опору резистора може будь-яким.

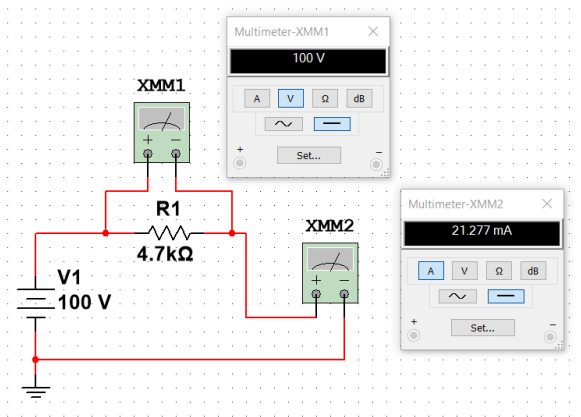


Рис. 5.7

2. Запустити симуляцію. Записати показники вольтметра і амперметра.

Таблица 5.1.

В-Г	R_1 , кОм	R_2 , кОм	R_3 , кОм	R , кОм	C , пФ	L , мГн
1	1,2	1,6	1,8	2,0	2000	100
2	1,0	2,2	1,6	4,7	1000	200
3	2,4	1,5	2,4	3,3	1200	150
4	2,7	1,0	2,2	3,6	1500	220
5	1,1	2,2	3,3	1,0	2000	100
6	1,3	2,4	3,6	2,0	1800	240
7	2,7	1,8	1,2	3,0	1200	200
8	2,0	3,0	1,5	2,2	1500	120
9	1,3	1,5	2,7	1,8	1200	100
10	1,0	2,0	3,0	4,7	1000	240
11	2,0	2,2	1,0	3,3	1000	100
12	2,2	3,3	1,0	2,0	1800	120
13	2,2	1,2	3,6	1,6	1200	270
14	1,8	1,2	2,7	3,0	1500	100
15	2,0	4,7	3,0	1,0	1200	240
16	1,2	1,3	1,6	2,2	1000	300
17	1,1	1,8	2,4	1,8	1800	100
18	1,5	1,5	1,5	1,6	1500	150
19	1,1	2,0	3,6	1,1	2000	200
20	2,4	3,6	1,2	2,2	1800	300
21	3,0	4,7	3,6	1,8	1200	180
22	3,3	4,7	2,4	1,5	1000	300
23	4,7	4,7	4,7	4,7	1200	200
24	1,6	3,0	2,7	2,4	1000	150
25	1,2	1,8	2,4	2,7	1200	220
26	1,5	2,0	1,8	2,2	1200	270
27	1,5	3,0	1,8	2,0	1800	100
28	2,7	2,4	2,2	3,0	2200	100
29	2,2	1,8	1,5	2,0	2000	200
30	2,4	3,6	3,3	3,0	2200	120

3. Розрахувати за законом Ома (5.1) значення опору, порівняти його із опором резистора, що використаний у схемі.
4. Зібрати схему, подібну до рис. 5.8.
5. Перевірити виконання закону Ома на змінному струмі.

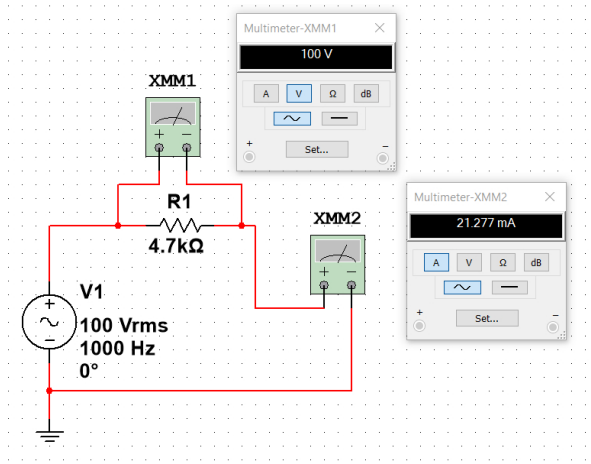


Рис. 5.8

5.2.2 Вимірювання сумарного активного опору послідовного та паралельного з'єднання резисторів

6. Зібрати схему, подібну до рис. 5.9. Значення опорів резисторів — відповідно до варіанту.
7. Запустити симуляцію. Перевірити правильність формули для визначення сумарного опору послідовно з'єднаних опорів.
8. Зібрати схему, подібну до рис. 5.10.
9. Запустити симуляцію. Перевірити правильність формули для визначення сумарного опору паралельно з'єднаних опорів.

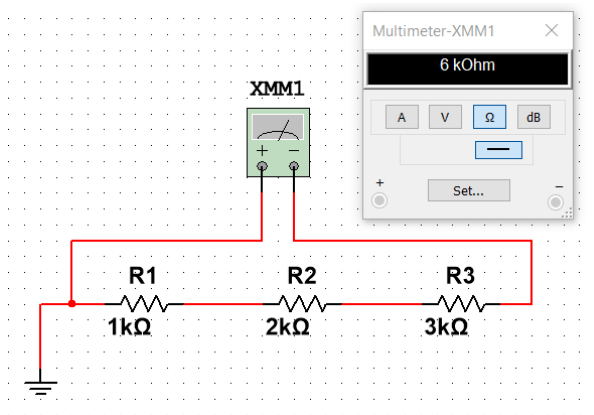


Рис. 5.9

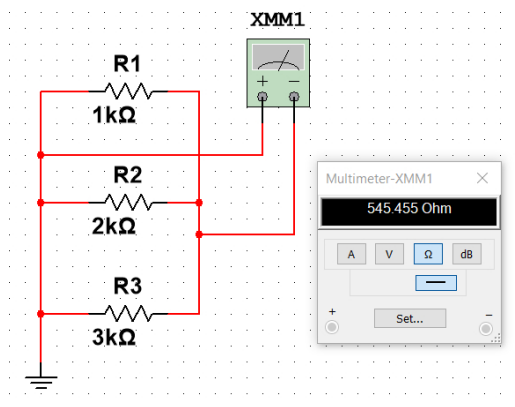


Рис. 5.10

5.2.3 Вимірювання реактивного опору

10. Зібрати схему, подібну до рис. 5.11. Значення R , C та L — відповідно до варіанту.
11. За показниками вольтметра та амперметра визначити модуль комплексного опору з'єдних компонентів.
12. Перевірити значення модуля комплексного опору за формулою (5.8).

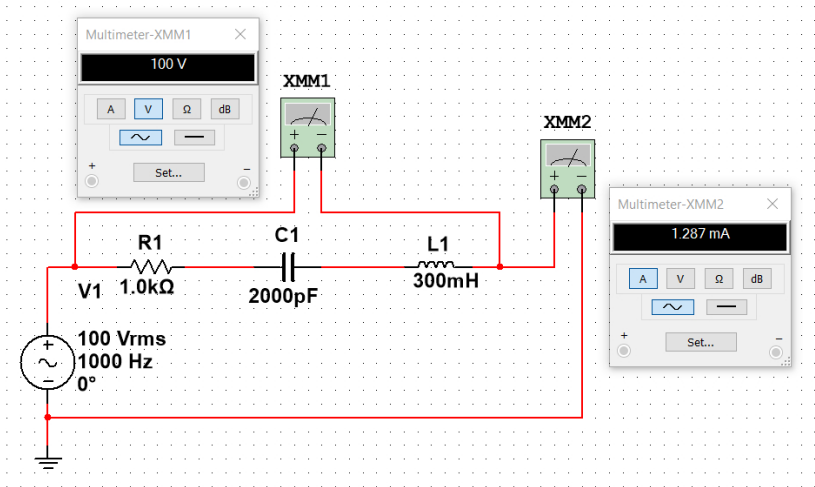


Рис. 5.11

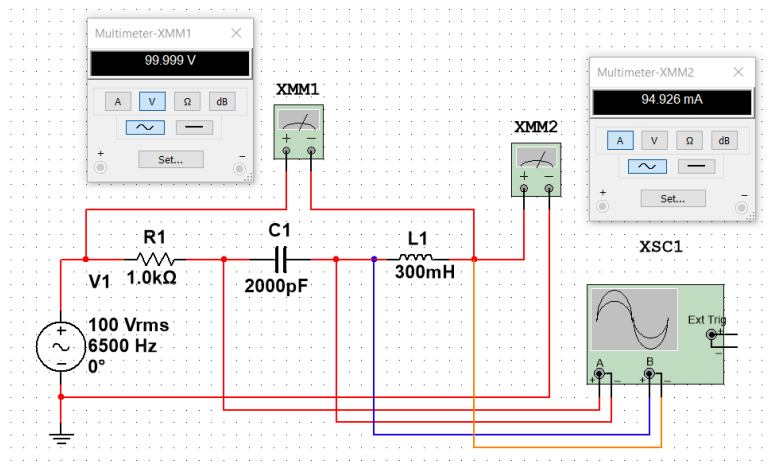


Рис. 5.12

5.2.4 Спостереження резонансу напруг в послідовному коливальному контурі

13. Для попередньої схеми за формулою Томсона (5.10) визначити резонансну частоту.

14. Замінити в схемі початкове значення частоти 1000 Гц на розраховане. Додати в схему осцилограф (як на рис. 5.12) і показати, що в ній відбувається резонанс напруг (рис. 5.13).

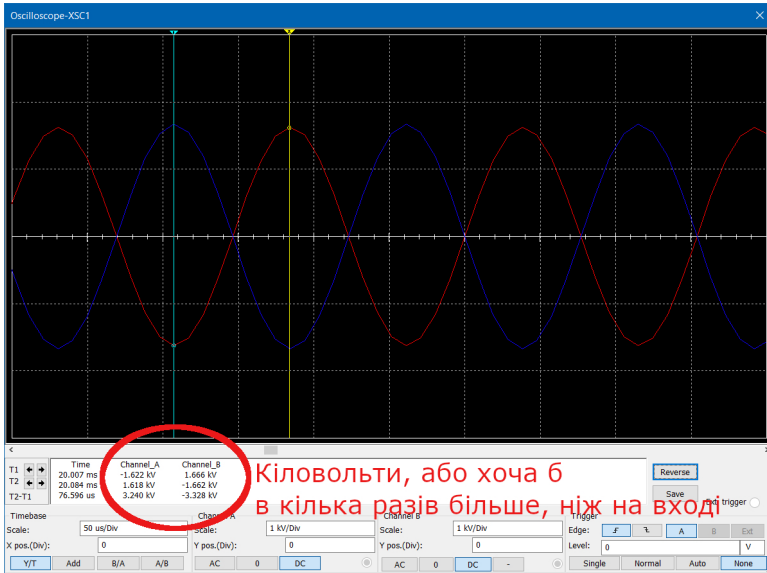


Рис. 5.13

5.3 Зміст звіту

Оформлювати звіт рекомендується в наступній послідовності.

1. Титульна сторінка.
2. Назва та мета роботи.
3. Варіант та початкові дані.
4. Скріншот зібраної схеми для вимірювання опору методом вольтметра/амперметра на постійному струмі. Результат розрахунку опору.
5. Скріншот зібраної схеми для вимірювання опору методом вольтметра/амперметра на змінному струмі. Результат розрахунку опору.

6. Скріншот зібраної схеми послідовного з'єднання резисторів. Результат розрахунку сумарного опору.
7. Скріншот зібраної схеми паралельного з'єднання резисторів. Результат розрахунку сумарного опору.
8. Скріншот схеми для вимірювання модуля комплексного опору методом вольтметра/амперметра. Результат розрахунку модуля комплексного опору за показниками приладів та за параметрами резистора/конденсатора/котушки індуктивності.
9. Результат розрахунку резонансної частоти. Осцилограма резонансних сигналів.
10. Висновки. Чи зійшлися розрахунки модуля комплексного опору двома різними методами? Наскільки резонансна частота відрізняється від початкових 1000 Гц?

5.4 Контрольні запитання

1. Що таке активний опір?
2. Що таке реактивний опір?
3. Які бувають реактивні опори? Який їх фізичний зміст?
4. Як визначити ємнісний та індуктивний реактивний опір?
5. Що таке резонанс?
6. Як визначити резонансну частоту?
7. Який характер має електричний опір при резонансі?
8. Чим небезпечний резонанс електричних сигналів?
9. Чим корисний резонанс електричних сигналів?
10. Який фізичний зміст комплексного опору?
11. Чому на конденсаторі та котушці в резонансі сигнали знаходяться у протифазі?
12. Як формулюється закон Ома?
13. В чому різниця між законом для ділянки кола та для повного електричного кола?