ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №11

ІНДУКТИВНО ЗВ’ЯЗАНІ КОЛА

Мета роботи Експериментальне визначення параметрів двох індуктивно зв’язаних котушок у вигляді обмоток повітряного трансформатора та перевірка основних співвідношень у послідовному з’єднанні котушок.

11.1. Теоретичні відомості і розрахункові формули

11.1.1. Загальні положення

Індуктивний зв’язок котушок обумовлюється зв’язком їхніх магнітних потоків. Взаємний індуктивний зв’язок проявляється у наведенні ЕРС e_{M2} (названої ЕРС взаємоіндукції), наприклад, у котушці L_2 зі зміною струму i_1 в іншій близько розташованій котушці L_1 (рис. 11.1). Кола, у яких наводяться ЕРС взаємоіндукції, називають індуктивно зв’язаними колами.

На схемі рис. 11.1 позначено: L_1, R_1 та L_2, R_2 – індуктивності та активні опори першої та другої котушок; M – взаємна індуктивність у генрі (Гн); точками позначені однойменні затискачі пари індуктивно зв’язаних котушок.

При цьому з’єднання (включення) котушок називають *узгодженим*, якщо струми в них однаково орієнтовані відносно однойменних затискачів, що призводить до посилення загальних магнітних потоків котушок за рахунок потоків взаємоіндукції; при *зустрічному* включенні котушок напрям струмів в них такий, що при їх протіканні сумарні магнітні потоки котушок зменшуються.

При складанні рівнянь за другим законом Кірхгофа для котушок ЕРС взаємоіндукції зазвичай з лівої частини рівнянь, що містять суми ЕРС джерел енергії, переносять (зі зміною знаку) в праві частини, що містять суми комплексів напруг. Так, при підключенні обох котушок до джерел напруги u_1 та u_2 (див. рис. 11.1) в комплексний формі маємо:

$$\underline{U}_1 = (R_1 + j\omega L_1)\underline{I}_1 \pm j\omega M\,\underline{I}_2 = (R_1 + jX_{L1})\underline{I}_1 \pm jX_M I_2;$$

$$\underline{U}_2 = (R_2 + j\omega L_2)\underline{I}_2 \pm j\omega M\,\underline{I}_1 = (R_2 + jX_{L2})\underline{I}_2 \pm jX_M I_1, \qquad (11.1)$$

де $\pm jX_M = \pm j\omega M$ – комплекс опору взаємоіндукції; знак плюс ($+M$) відповідає узгодженому включенню котушок; знак мінус ($-M$) – зустрічному включенню.

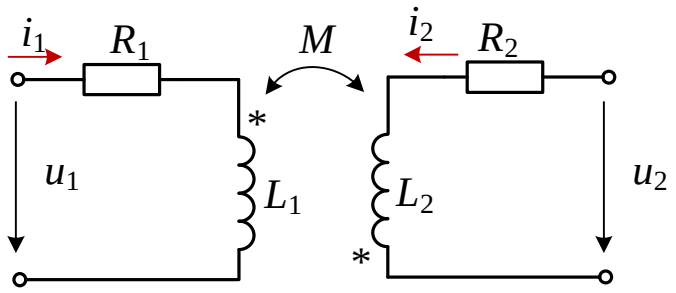


Рисунок 11.1 – Схема підключення обох котушок повітряного трансформатора до джерел напруги u_1 та u_2

Ступінь індуктивного зв'язку двох котушок визначають коефіцієнтом зв'язку

$$k_M = \frac{X_M}{\sqrt{X_{L1}X_{L2}}} = \frac{M}{\sqrt{L_1L_2}} \le 1,$$

де X_{L1} і X_{L2} – індуктивні опори котушок.

Явище взаємоіндукції використовується у трансформаторах – пристроях для передачі енергії з однієї частини електричного кола в іншу без електричного зв'язку через взаємні магнітні потоки. Трансформатори складаються з двох або декількох індуктивно зв'язаних котушок чи обмоток. Повітряний трансформатор не містить феромагнітного осердя, отже є лінійним електричним пристроєм.

11.1.2. Визначення параметрів котушок і коефіцієнта зв'язку між ними

На практиці коефіцієнт індуктивного зв'язку котушок з параметрами $R_1 << X_{L1}$ та $R_2 << X_{L2}$ визначають відношенням ЕРС взаємної індукції $E_{2M} = U_{2X}$ другої котушки в режимі холостого ходу до напруги живлення U_1 першої котушки (рис. 11.2 *а*), тобто $k_{M1} \approx \frac{E_{2M}}{U_1} = \frac{U_{2X}}{U_1} = \frac{M}{L_1}$, або, при живленні з боку другої котушки (рис. 11.2, *б*), відношенням $k_{M2} \approx \frac{E_{1X}}{U_2} = \frac{U_{1X}}{U_2} = \frac{M}{L_2}$, а коефіцієнт зв'язку котушок k_M – за формулою $k_M = \sqrt{k_{M1}k_{M2}}$.

При цьому взаємна індуктивність

$$M = \frac{U_{2X}}{\omega I_1}, \text{ або } M = \frac{U_{1X}}{\omega I_2},$$

де $\omega = 2\pi f$ – кутова частота напруг u_1 та u_2.

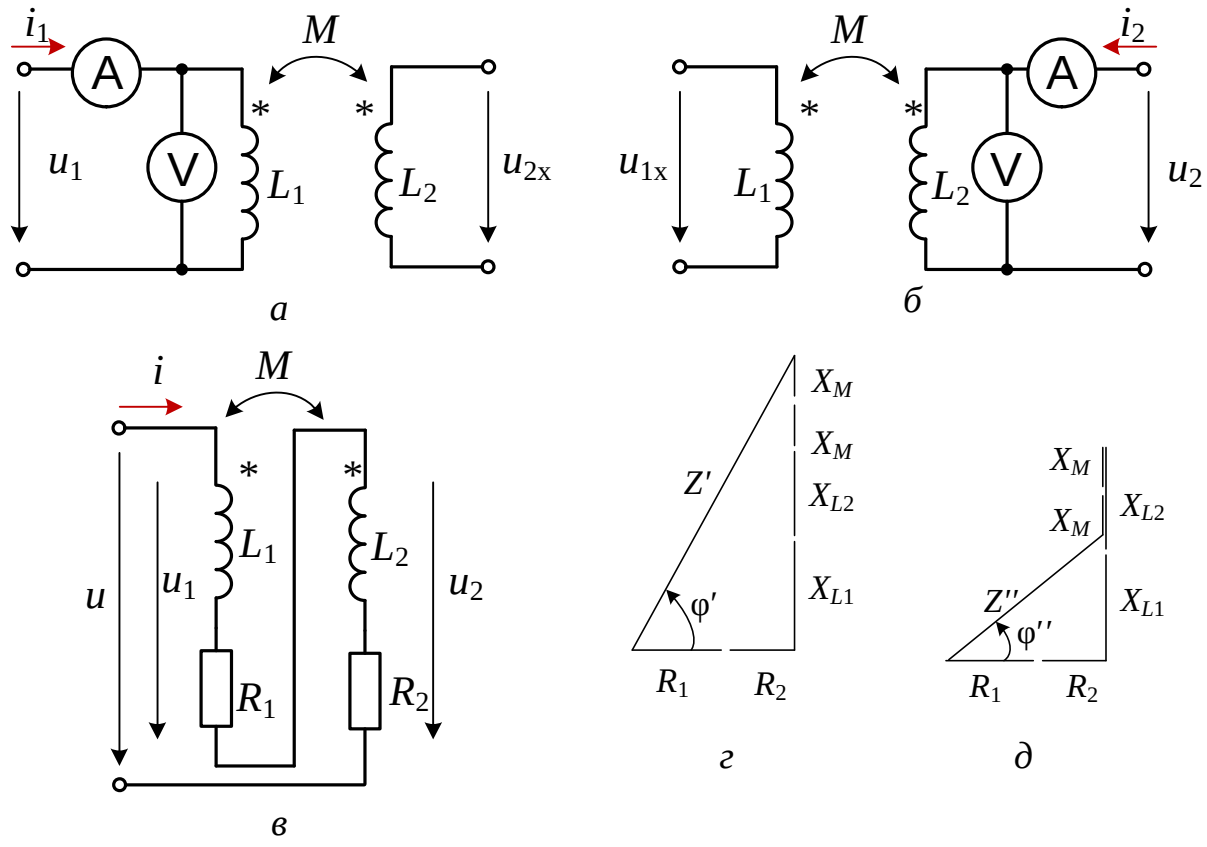


Рисунок 11.2 – Схеми для експериментального визначення параметрів індуктивно зв’язаних котушок (*а*, *б*), схема послідовного з’єднання обмоток трансформатора (*в*), трикутники опорів (*г*, *д*)

Для наближеного визначення параметрів (індуктивних опорів та індуктивностей) обмоток повітряного трансформатора (вважаючи $R_1 \approx 0$ і $R_2 \approx 0$) збирають схему кола (рис. 11.2, *а*) з живленням з боку первинної обмотки, а потім схему з живленням з боку вторинної обмотки (11.2, *б*). Знімають показання вольтметра та амперметра і знаходять індуктивні опори та індуктивності обмоток:

$$X_{L1} \approx U_1/I_1;\ L_1 = X_{L1}/\omega \ \text{ та } X_{L2} \approx U_2/I_2;\ L_2 = X_{L2}/\omega.$$

Для визначення взаємної індуктивності обмоток M (реальних котушок) з параметрами R_1, L_1 і R_2, L_2 повітряного трансформатора обмотки з’єднують послідовно одна за одною та з джерелом напруги u спочатку, наприклад, узгоджено (рис. 11.2, *в*), а потім зустрічно. При цьому комплекс вхідного опору зібраного кола:

$$\underline{Z} = (R_1 + jX_{L1}) + (R_2 + jX_{L2}) \pm jX_M,$$

де $Z = |\underline{Z}| = U/I;\ jX_M = j\omega M.$

Якщо відомі активні опори обмоток R_1 та R_2, то вхідні індуктивні опори X' та X'' схеми рис. 11.2, в узгодженому та зустрічному включеннях послідовно з’єднаних котушок (див. трикутники опорів на рис. 11.2, *г* і на рис. 11.2, *д*) відповідно дорівнюють:

$$X' = \sqrt{(Z')^2 - (R_1 + R_2)^2} \text{ і } X'' = \sqrt{(Z'')^2 - (R_1 + R_2)^2}, \qquad (11.2)$$

де $Z' = U/I_у$ и $Z'' = U/I_з$ – модулі вхідних опорів кола за узгодженого та зустрічного включення котушок.

Якщо активні опори котушок R_1 і R_2 невідомі, то для визначення вхідних індуктивних опорів необхідно до входу кола підключити осцилограф для знаходження (за допомогою осцилограм) кута зсуву фаз φ між вхідною напругою і струмом, або ватметр ($\varphi = \arccos(P/UI)$), де P – показання ватметра.

Тоді (див. рис. 11.2, *г* і *д*)

$$X' = Z'\sin\varphi' = \omega L' = \omega(L_1 + L_2 + 2M),$$

$$X'' = Z''\sin\varphi'' = \omega L'' = \omega(L_1 + L_2 - 2M).$$

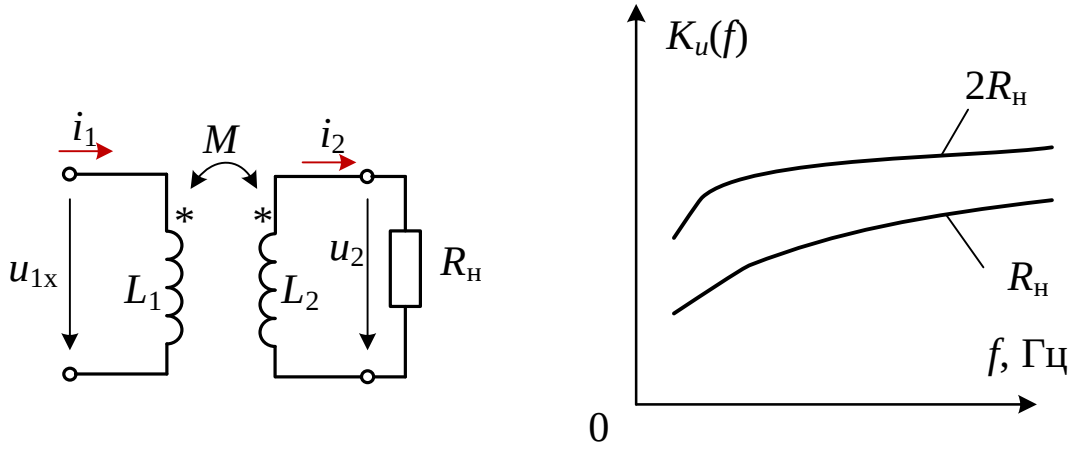
Визначивши $\Delta X = X' - X'' = 4\omega M$, знаходять взаємну індуктивність

$$M = \Delta X/4\omega. \qquad (11.3)$$

Трикутники напруг схеми (рис. 11.2, *в*) за узгодженого та зустрічного включень послідовно з'єднаних котушок подібні до фігур, представлених на рис. 11.2, *г* і *д*.

Оскільки модуль вхідного опору $Z' > Z''$, то струм $I_у$ при узгодженому включенні котушок менше струму $I_з$ їх зустрічного включення.

Якщо підключити навантаження $R_н$ до затискачів вторинної обмотки повітряного трансформатора (рис. 11.3, *а*), то передача енергії в навантаження від джерела електричної енергії здійснюється за допомогою змінного у часі магнітного потоку взаємоіндукції, тобто без електричного зв'язку між обмотками.



а *б*

Рисунок 11.3 – Схема повітряного трансформатора з навантаженням (*а*), графік передавальної характеристики $K_u(f)$

Передавальна характеристика напруги трансформатора

$$K_u(f) = U_2(f)/U_1(f)$$

залежить як від частоти *f* напруги джерела, так і від величини опору навантаження (рис. 11.3, *б*). Зі збільшенням частоти напруги живлення u_1 індуктивні опори котушок зростають пропорційно частоті, а вихідна напруга u_2 стабілізується, тому що при досягненні опору $Z_2 > (5…10)R_н$ трансформатора вплив зміни опору навантаження на процеси трансформатора незначний.

11.2. Навчальні завдання та методичні рекомендації до виконання

11.2.1. Запустити Multisim та на набірному полі зібрати схему кола (рис. 11.4) для визначення коефіцієнта зв'язку k_M двох котушок та їх взаємної індуктивності *M*, індуктивностей L_1 та L_2 обмоток повітряного трансформатора **T1**, наявного в бібліотеці Multisim: **Basic\RATED_VIRTUAL\ TRANSFORMER_RATED**.

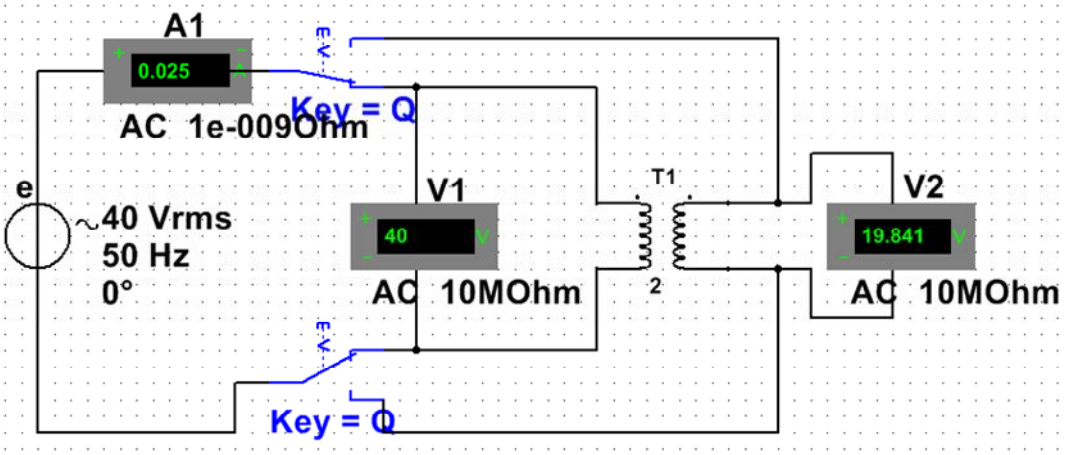


Рисунок 11.4 – Модель кола в Multisim для дослідження параметрів повітряного трансформатора **T1**

З цією метою:

– **встановити** значення ЕРС $E = E_m/\sqrt{2}$ джерела синусоїдальної напруги $e = E_m \sin(2\pi \cdot 50t)$; $E_m = 5 + N$ В; $f = 50$ Гц; $\psi_e = 0$, де *N* – номер запису прізвища студента у навчальному журналі групи;

– **залишити** без зміни (задані за замовчуванням) внутрішній опір $R_A = 1$ нОм амперметра **A1** та $R_V = 10$ МОм вольтметрів **V1** та **V2**, задати режим **AC** роботи вимірювальних приладів. **Скопіювати** схему на сторінку звіту;

– **підключити** за допомогою ключа **Q** спочатку до затискачів 1 – 1' (до первинної обмотки) трансформатора, а потім до затискачів 2 – 2' (до вторинної обмотки) джерело ***e*** (рис. 11.4); зняти показання приладів та занести їх у табл. 11.1;

– **обчислити** коефіцієнт зв'язку k_M двох котушок, індуктивності L_1 та L_2 обмоток та взаємну індуктивність *M* трансформатора.

Таблиця 11.1.

Номер котушки	Виміряно			Розраховано				
	I, мА	U_1, В	U_2, В	X_L, Ом	$k_M = \sqrt{k_{M1}k_{M2}} = 1$	L, Гн	X_M, Ом	M, Гн
1				X_{L1} =	k_{M1} =	L_1 =		
2				X_{L2} =	k_{M2} =	L_2 =		

11.2.2. На набірному полі Multisim зібрати схему кола (рис. 11.5) для дослідження повітряного трансформатора з послідовно з'єднаними обмотками.

У схемі кола:

– **встановити** значення ЕРС $E = E_m/\sqrt{2}$, обчислене у завданні п.11.2.1;

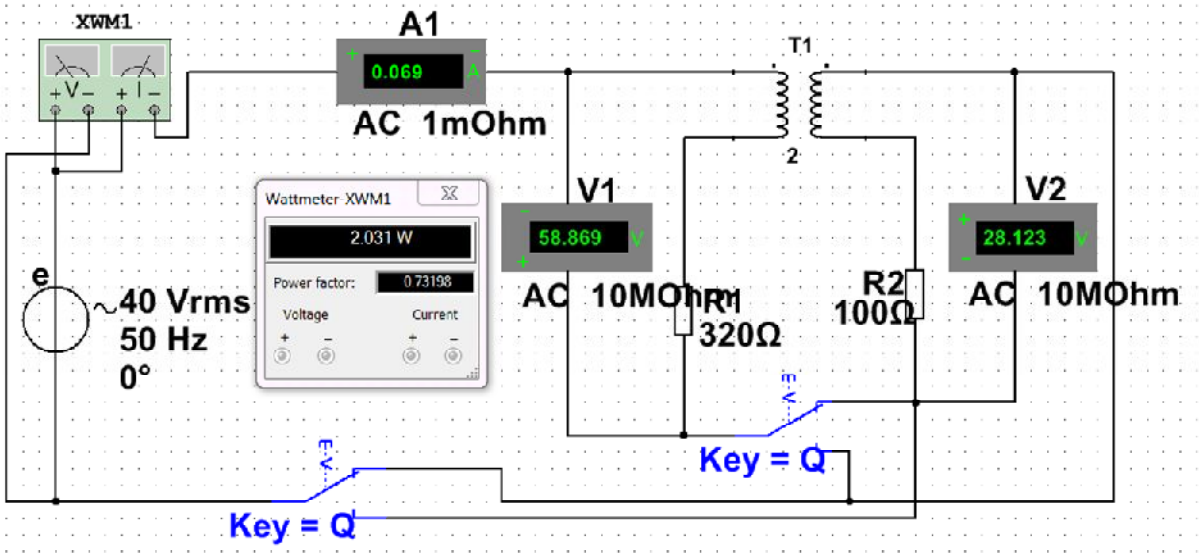


Рисунок 11.5 – Модель кола в Multisim для дослідження повітряного трансформатора з послідовно з'єднаними обмотками

– **задати** на схемі опори резисторів $R_1 \approx 0{,}2X_{L1}$ Ом та $R_2 \approx 0{,}2X_{L2}$ Ом, де X_{L1} і X_{L2} – розраховані значення індуктивних опорів обмоток трансформатора (див. табл. 11.1);

– **скопіювати** схему (рис. 11.5) на сторінку звіту;

– **встановити** ключі **Q** і **S** спочатку в нижні положення (узгоджене включення обмоток трансформатора), а потім у верхні (зустрічне їх включення);

– **включити** програму моделювання Multisim та занести показання приладів у табл. 11.2. Кут зсуву фаз φ між напругою та струмом на вході кола знайти за формулою $\varphi = \arccos(\text{PowerFactor})$, де Power Factor = cosφ – коефіцієнт потужності кола (див. інтерфейс ватметра **XWM1**);

– **розрахувати** кути зсуву фаз $\varphi_1 = \text{arctg}(X_{L1}/R_1)$ і $\varphi_2 = \text{arctg}(X_{L2}/R_2)$ обмоток трансформатора та їх взаємну індуктивність M. Для обчислення взаємної індуктивності M використовувати співвідношення (11.2) та (11.3);

– **порівняти** обчислене значення взаємної індуктивності M із значенням M, знайденим у п.11.2.1 (див. табл. 11.1);

– за даними вимірювань та розрахунків побудувати векторні діаграми напруги та струму схеми рис. 11.2, *в* для узгодженого та для зустрічного з'єднання обмоток трансформатора, скориставшись співвідношеннями (11.1) при $I_1 = I_2$, $\underline{U} = \underline{U}_1 + \underline{U}_2$.

Таблиця 11.2

Включення обмоток	Виміряно					Розраховано		
	I, мА	U, В	U_1, В	U_2, В	φ, град	φ_1, град	φ_2, град	M, Гн
Узгоджене								
Зустрічне								

11.2.3. На набірному полі Multisim зібрати схему кола рис. 11.6 для зняття та побудови амплітудно-частотної характеристики $K_u(f) = U_2(f)/U_1(f)$ за напругою повітряного трансформатора з навантаженням: $R_н = R_{н1} = 10R_2$ і $R_н = R_{н2} = 5R_2$ при зміні частоти від 10 до 400 Гц.

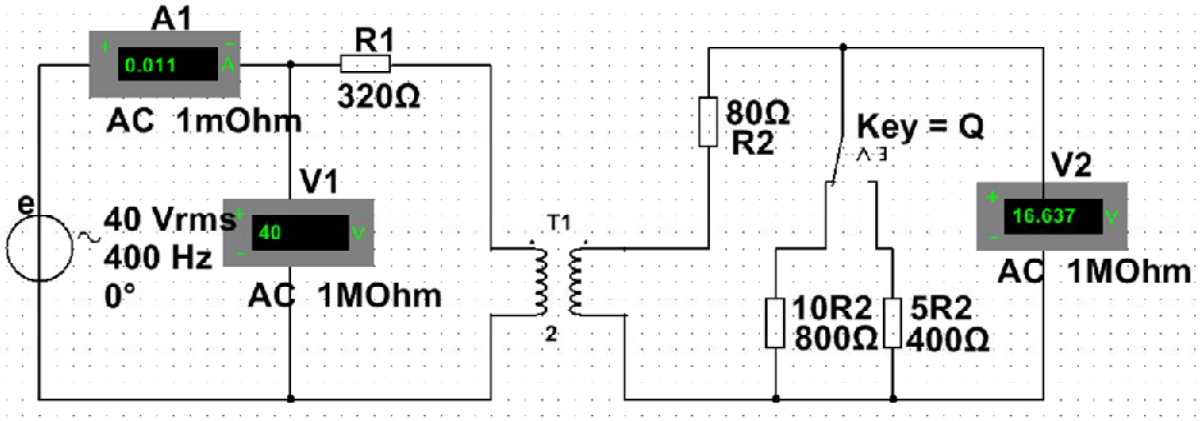


Рисунок 11.6 – Модель кола в Multisim для зняття та побудови амплітудно-частотної характеристики $K_u(f)$

Для цього:

– згідно з варіантом **встановити** параметри елементів, зокрема, значення ЕРС джерела ***e***, обчислене у п. 11.2.1, та скопіювати схему (рис. 11.6) на сторінку звіту;

– за допомогою ключа **Q змінювати** значення навантаження через зміну частоти напруги живлення кола і заносити показання вольтметрів **V1** і **V2** в табл. 11.3;

– **побудувати** характеристики $K_u(f)$ для двох значень опору навантаження: $R_н = 10R_2$ та $R_н = 5R_2$;

– **пояснити**, чому при зменшенні $R_н$ коефіцієнт передачі трансформатора за напругою $K_u(f)$ зменшується.

Таблиця 11.3.

Частота f, Гц	Виміряно				Розраховано $K_u(f) = U_2(f)/U_1(f)$	
	U_1, В		U_2, В			
	$10R_2$, Ом	$5R_2$, Ом	$10R_2$, Ом	$5R_2$, Ом	$10R_2$, Ом	$5R_2$, Ом
10						
20						
50						
75						
100						
200						
400						

ЗМІСТ ЗВІТУ

1. Найменування та мета роботи.
2. Копії схем кіл, змодельованих на набірному полі Multisim.
3. Розрахункові формули визначення параметрів індуктивно зв’язаних котушок повітряного трансформатора, векторні діаграми напруг і струмів при узгодженому та зустрічному включенні котушок.
4. Таблиці з розрахунковими та експериментальними даними.
5. Графіки передавальної характеристики напруги повітряного трансформатора при різних навантаженнях.
6. Висновки щодо роботи.

Контрольні питання

1. Які електричні кола називаються індуктивно зв’язаними?
2. В чому полягає явище взаємної індукції?
3. Який індуктивний зв’язок називається узгодженим?
4. Як позначається тип індуктивного зв’язку на електричній схемі?
5. Як визначити по показаннях приладів спосіб включення котушок при їхньому послідовному з’єднанні?
6. Як впливає зустрічний індуктивний зв’язок послідовно з’єднаних котушок на їхній повний опір?
7. Як по отриманих значеннях повного опору Z та активного опору R обчислити реактивні опори та еквівалентні індуктивності усього кола та еквівалентні індуктивності кожної з котушок?
8. Як визначається коефіцієнт індуктивного зв’язку двох котушок?
9. Яке призначення та принцип дії повітряного трансформатора?
10. Як записуються рівняння повітряного трансформатора в комплексній формі? Який фізичний сенс складових цих рівнянь?
11. Який порядок побудови векторної діаграми повітряного трансформатора у навантаженому режимі?

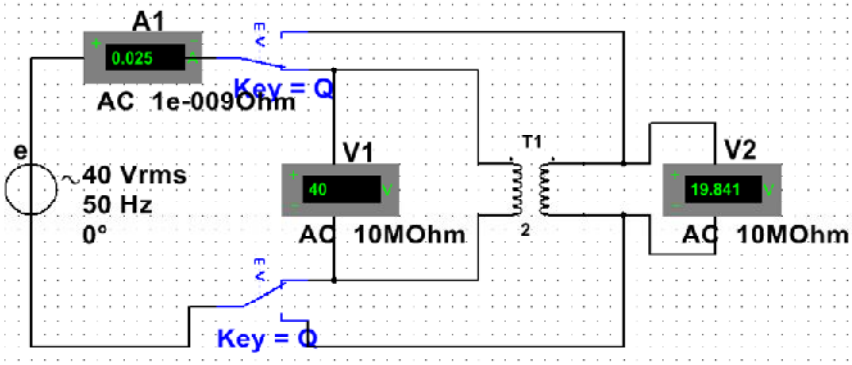
ДОДАТОК 11

Група _____
Студент _____
П.І.пБ.
Викладач_____
П.І.пБ

ПРОТОКОЛ
виконання лабораторної роботи №11

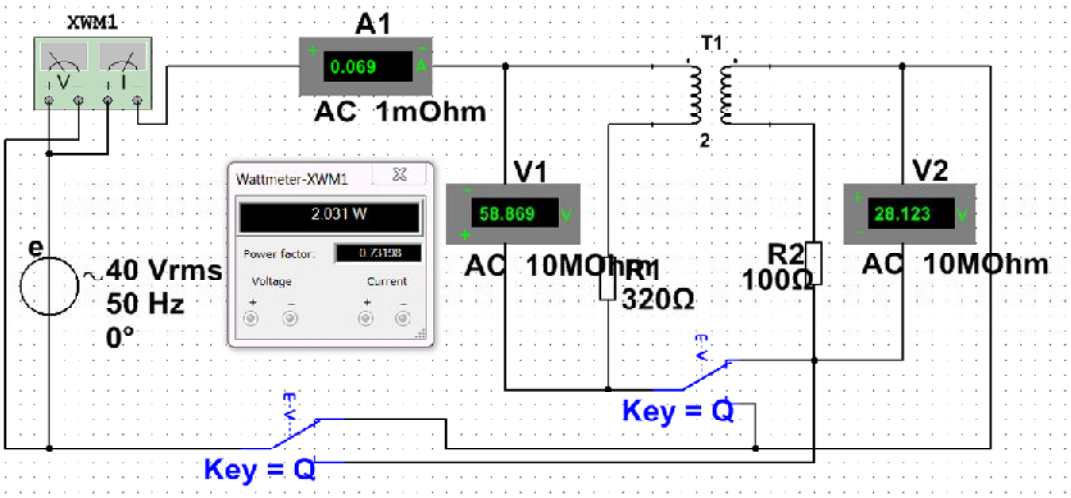
ІНДУКТИВНО ЗВ’ЯЗАНІ КОЛА

Мета роботи Експериментальне визначення параметрів двох індуктивно зв’язаних котушок у вигляді обмоток повітряного трансформатора та перевірка основних співвідношень у послідовному з’єднанні котушок.



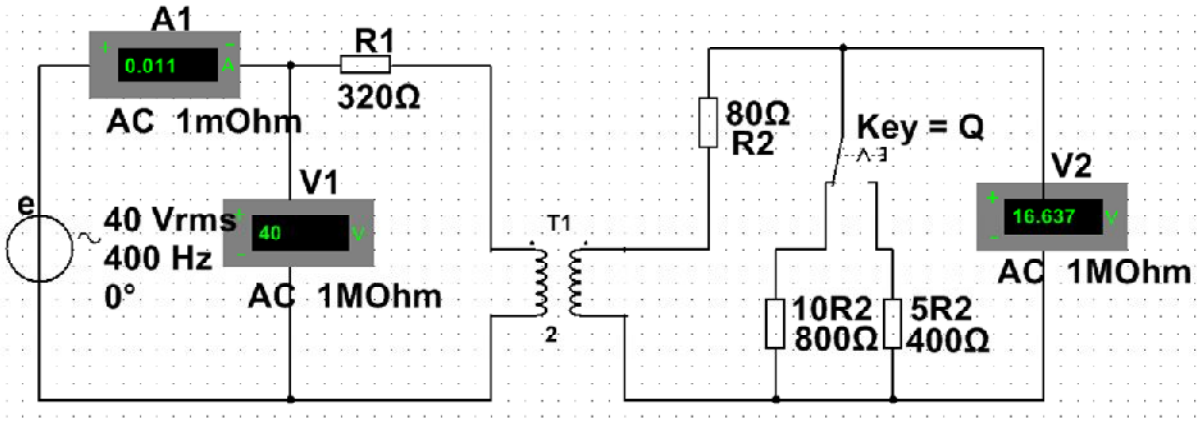
(приклад)

Рисунок 11.4 – Модель кола в Multisim для дослідження параметрів повітряного трансформатора **T1**



(приклад)

Рисунок 11.5 – Модель кола в Multisim для дослідження повітряного трансформатора з послідовно з’єднаними обмотками



(приклад)

Рисунок 11.6 – Модель кола в Multisim для зняття та побудови амплітудно-частотної характеристики $K_u(f)$

Таблиця 11.1.

Номер котушки	Виміряно			Розраховано				
	I, мА	U_1, В	U_2, В	X_L, Ом	$k_M = \sqrt{k_{M1}k_{M2}} = 1$	L, Гн	X_M, Ом	M, Гн
1				X_{L1} =	k_{M1} =	L_1 =		
2				X_{L2} =	k_{M2} =	L_2 =		

Таблиця 11.2

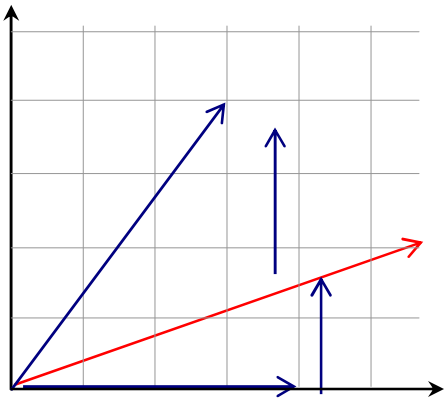
Включення обмоток	Виміряно					Розраховано		
	I, мА	U, В	U_1, В	U_2, В	φ, град	φ_1, град	φ_2, град	M, Гн
Узгоджене								
Зустрічне								

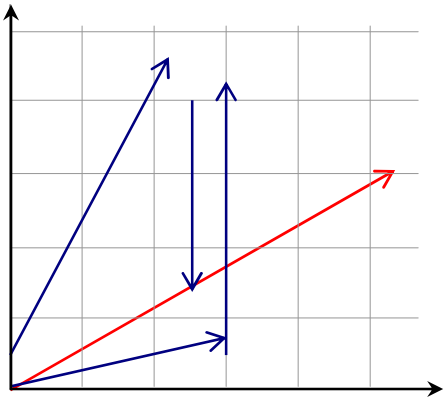
Таблиця 11.3.

Частота f, Гц	Виміряно				Розраховано $K_u(f) = U_2(f)/U_1(f)$	
	U_1, В		U_2, В			
	$10R_2$, Ом	$5R_2$, Ом	$10R_2$, Ом	$5R_2$, Ом	$10R_2$, Ом	$5R_2$, Ом
10						
20						
50						
75						
100						
200						
400						

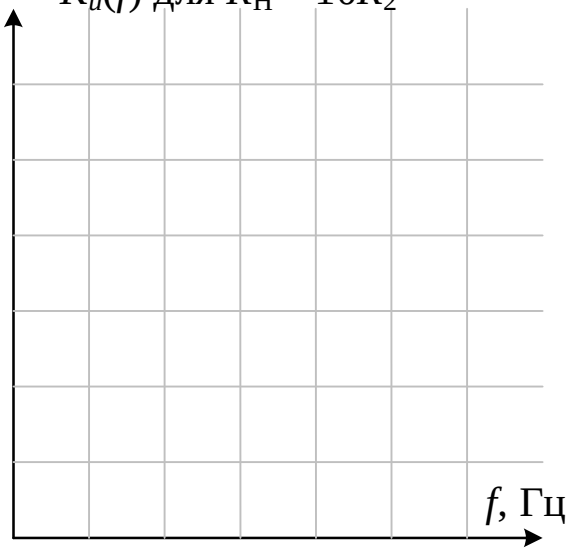
Векторні діаграми напруг та струмів для:

узгодженого з'єднання котушок *для зустрічного з'єднання котушок*





$K_u(f)$ для $R_Н = 10R_2$



$K_u(f)$ для $R_Н = 5R_2$