



030901. Линейные цепи с индуктивно-связанными катушками.

Цель работы: Теоретические и экспериментальные исследования цепи с взаимной индуктивностью, определение взаимной индуктивности двух связанных магнитной связью катушек и исследование работы воздушного трансформатора в линейном режиме.

Требуемое оборудование: Модульный учебный комплекс МУК-ЭТ1(2)

Приборы:

Генератор звуковых частот ЗГ1	1 шт.
Измеритель многофункциональный ИМФ1	1 шт.
Стенд с объектами исследования СЗ-ЭМ01	1 шт.
Комплект проводников	1 шт.

Краткое теоретическое введение

Взаимная индуктивность, согласное и встречное включение катушек

Пусть по проводникам первой катушки индуктивности (рис 1, а) будет протекать переменный ток i_1 , тогда на её зажимах наводится ЭДС самоиндукции, которая обусловлена собственным магнитным потоком ϕ_1

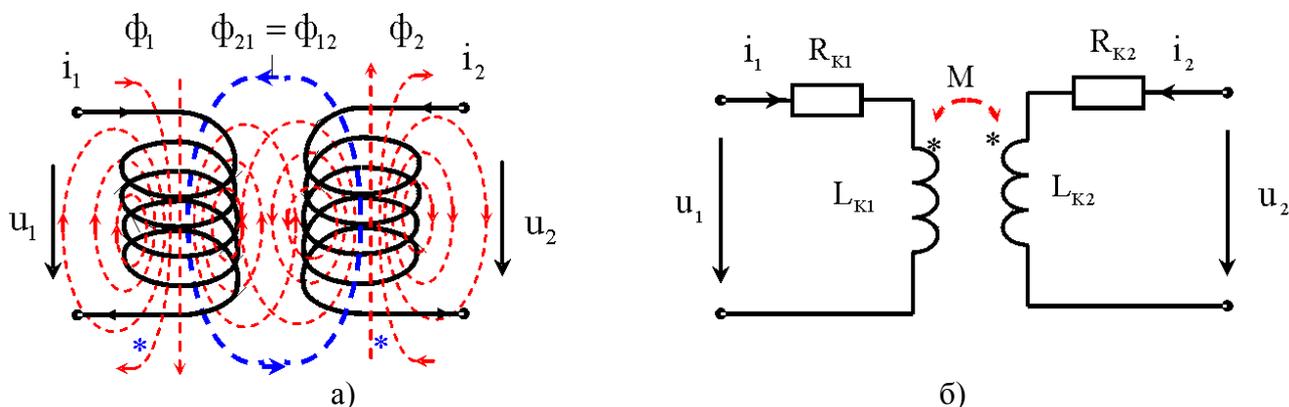


Рис. 1

$$e_{L1} = -w_1 \frac{d\phi_1}{dt} = -w_1 \frac{d\phi_1}{di_1} \cdot \frac{di_1}{dt} = -L_1 \frac{di_1}{dt}.$$

Если часть этого потока $\phi_{21} = \phi_{12}$ пересекает контур, образованный витками другой катушки индуктивности, то в последней наводится ЭДС взаимной индукции

$$e_{M12} = -w_2 \frac{d\phi_{12}}{dt} = -w_2 \frac{d\phi_{12}}{di_1} \cdot \frac{di_1}{dt} = -M_{12} \frac{di_1}{dt}.$$

Также находится ЭДС во второй катушке. В общем случае можно определить напряжение на зажимах каждой катушки

$$\begin{aligned} u_1 &= -e_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} \pm M_{21} \frac{di_2}{dt} \\ u_2 &= -e_2 = L_2 \frac{di_2}{dt} \pm M_{21} \frac{di_1}{dt} \end{aligned} \quad (1)$$

В линейной магнитной среде коэффициенты $M_{12} = M_{21} = M$ и называются *взаимной индуктивностью*. Выбор знака «+» или «-» в (1) зависит от ориентации токов относительно так называемых одноименных зажимов. *Одноименные зажимы* - это помеченные зажимы, которые обозначают начала намотки обмотки катушки. Для разметки катушек определяются направления магнитных потоков в обеих катушках (например, по правилу правой руки). Затем помечают зажимы обмотки катушки, например, звездочками. Если магнитные потоки обеих катушек складываются (рис. 1,а), то токи i_1 и i_2 одновременно должны входить или выходить из зажимов помеченных звездочками (рис. 1,б), а если магнитные потоки обеих катушек вычитаются, то один ток должен входить, а второй ток выходить из помеченного звездочкой зажима (рис. 3). Включение катушек по схеме (рис. 1 и 2) - получило название согласного, а по схеме (рис. 3) - встречного. В уравнениях (1) для согласного включения берется знак «+», а для встречного - знак «-».

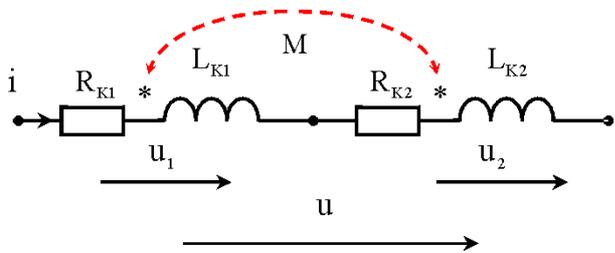


Рис. 2

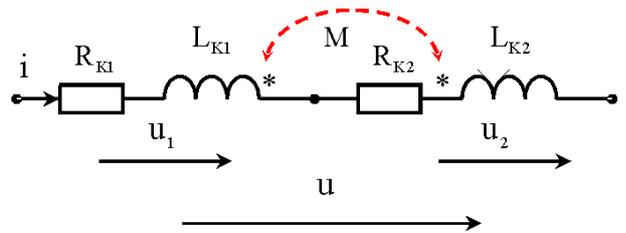


Рис.3

Если $u(t)$ меняется по синусоидальному закону, то, применяя символический метод, получим комплекс общего амплитудного напряжения при согласном включении

$$\begin{aligned} \dot{U}_m &= \dot{U}_{1m} + \dot{U}_{2m} = \dot{I}_m (R_{K1} + j\omega L_{K1} + j\omega M) + \dot{I}_m (R_{K2} + j\omega L_{K2} + j\omega M) = \\ &= \dot{I}_m [(R_{K1} + R_{K2}) + j\omega(L_{K1} + L_{K2} + 2M)] = \dot{I}_m (R_{12} + jX_{COГ}) \end{aligned}$$

и при встречном включении

$$\begin{aligned} \dot{U}_m &= \dot{U}_{1m} + \dot{U}_{2m} = \dot{I}_m (R_{K1} + j\omega L_{K1} - j\omega M) + \dot{I}_m (R_{K2} + j\omega L_{K2} - j\omega M) = \\ &= \dot{I}_m [(R_{K1} + R_{K2}) + j\omega(L_{K1} + L_{K2} - 2M)] = \dot{I}_m (R_{12} + jX_{BCT}) \end{aligned}$$

Если значения $X_{COГ} = \omega(L_{K1} + L_{K2} + 2M)$ и $X_{BCT} = \omega(L_{K1} + L_{K2} - 2M)$ измерены, то

$$M = \frac{X_{COГ} - X_{BCT}}{4\omega}. \quad (2)$$

Выражение (2) часто используется для экспериментального определения M .

Воздушный трансформатор

При соединении катушек по схеме (рис. 4,а) получают важный элемент электрических цепей - воздушный трансформатор. На рис. 4,б показана его расчетная схема.

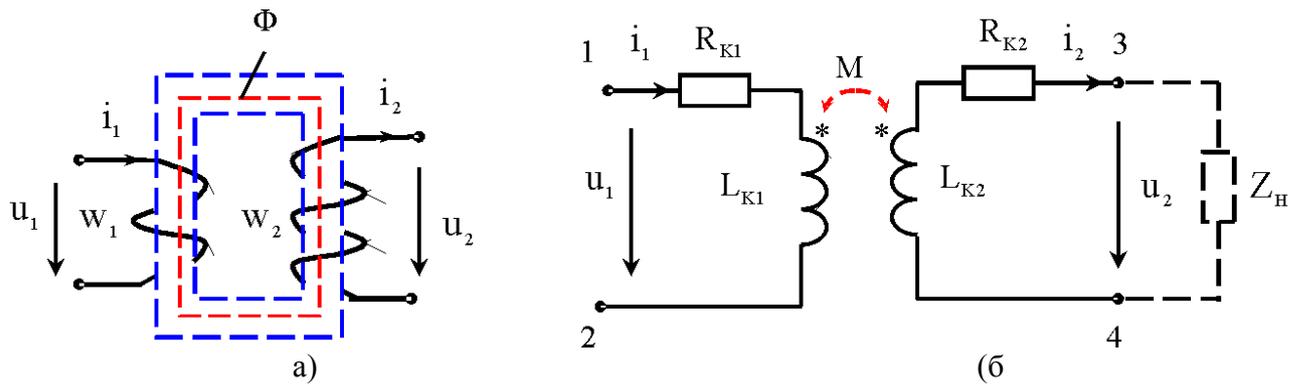


Рис. 4

Уравнения воздушного трансформатора (в символической форме) определяются двумя законами Кирхгофа:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{1m} &= \dot{I}_{1m}(R_{K1} + j\omega L_{K1}) - \dot{I}_{2m}j\omega M = \dot{I}_{1m}Z_{11} - \dot{I}_{2m}Z_{12} \\ \dot{U}_{2m} &= \dot{I}_{1m}j\omega M - \dot{I}_{2m}(R_{K2} + j\omega L_{K2}) = \dot{I}_{1m}Z_{21} + \dot{I}_{2m}Z_{22} \end{aligned} \quad (3)$$

По закону Ома напряжение на выходных зажимах трансформатора $\dot{U}_{2m} = \dot{I}_2 Z_H$. Выражения (3) является основой для анализа режимов работы трансформатора.

На рис. 5 показана качественная векторная диаграмма для режима, когда трансформатор нагружен на комплексное сопротивление (*нагрузочный режим*) $Z_H = R_H + jX_H = Z_H e^{j\psi_H}$. На диаграмме задаётся направление тока \dot{I}_{2m} и затем согласно соотношениям (5.3) откладываются вектора напряжений.

Если выходные зажимы трансформатора разомкнуть (*режим холостого хода* $Z_H = \infty$ и $\dot{I}_{2m} = 0$), то из (3) следует

$$\dot{U}_{1Xm} = \dot{I}_{1Xm}Z_{11} \text{ и } \dot{U}_{2Xm} = \dot{I}_{1Xm}j\omega M. \quad (4)$$

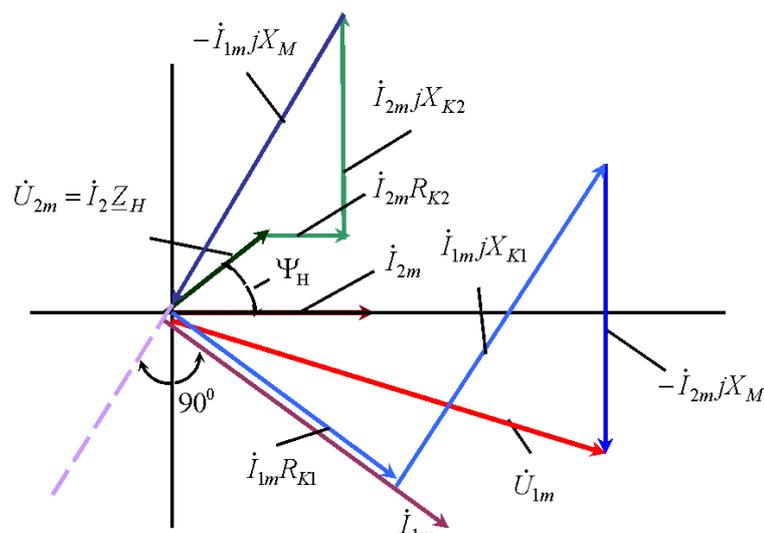


Рис. 5

Выражение (4) позволяет предложить еще один способ определения взаимной индуктивности

$$M = \frac{U_{2Xm}}{I_{1Xm}\omega}$$

Если выходные зажимы трансформатора замкнуть (режим короткого замыкания $\dot{U}_{2m} = \dot{I}_{2m}Z_H = 0$), то из (3) следует

$$\begin{aligned} \dot{U}_{1Km} &= \dot{I}_{K1m}Z_{11} - \dot{I}_{2Km}j\omega M \\ \dot{I}_{1Km}j\omega M - \dot{I}_{2Km}Z_{11} &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

Если $R_1 \ll \omega L_1$ и $R_2 \ll \omega L_2$, то коэффициент связи двух катушек

$$K_{CB} = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \rightarrow 1$$

Следовательно, из (4)

$$\frac{U_{1X}}{U_{2X}} \approx \frac{L_1}{M} \approx \frac{W_1}{W_2} \quad (6)$$

Из (5) можно определить *коэффициент трансформации*

$$\frac{I_{1K}}{I_{2K}} \approx \frac{L_2}{M} \approx \frac{W_2}{W_1} = K_T$$

При указанных допущениях вводят понятие *идеального трансформатора*, у которого

$$U_1 I_1 = U_2 I_2 \quad (7)$$

Трансформатор, как согласующий элемент цепи

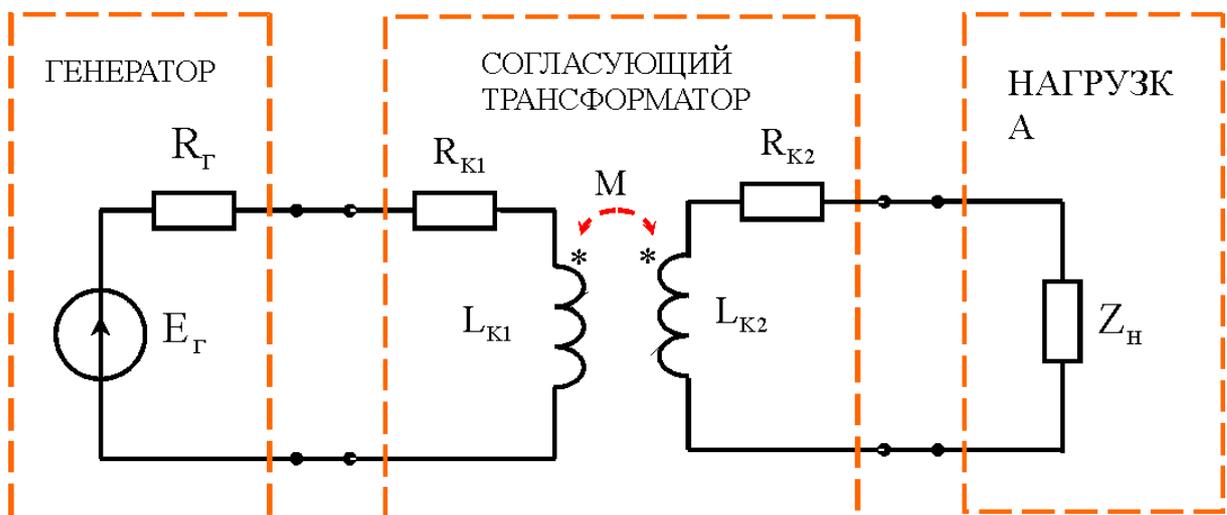


Рис. 6

Как известно, если имеется генератор с ЭДС - E_G и внутренним сопротивлением - $Z_G = R_G + jX_G$ (рис.6), то для передачи максимальной мощности в нагрузку $Z_H = R_H + jX_H$ необходимо, чтобы

$$R_G = R_H \text{ и } X_G = -X_H. \quad (8)$$

Если параметры генератора и нагрузки заданы, то для выполнения условия (5.8) используют воздушный трансформатор, как согласующий элемент. В простейшем случае, т.е. при использовании идеального трансформатора, из (5.7) получим

$$\frac{U_1 I_1}{I_1^2} = Z_1 = \frac{U_2 I_2}{I_1^2} = \frac{Z_H I_2 I_2}{I_1^2} = Z_H \left(\frac{W_1}{W_2} \right)^2, \quad (9)$$

т.е. подбором отношения чисел витков можно изменить значение нагрузки на зажимах генератора и тем самым провести согласование величины внутреннего сопротивления генератора с величиной сопротивления нагрузки.

Методика эксперимента



Рис. 7

Экспериментальные исследования производятся на модульном комплексе МУК-ЭТ2.

В качестве источника синусоидального напряжения используется генератор звуковых частот ЗГ1. Выходная частота – от 20 Гц до 30 кГц, а амплитуда синусоидального напряжения от 0 В до 15 В.

Для определения параметров катушки индуктивности необходимо воспользоваться измерителем многофункциональным (ИМФ1). Он позволяет проводить измерения амплитудных значений синусоидального тока и падения напряжения на участке исследуемой цепи, разность фаз между

током и напряжением, разность фаз между двумя напряжениями. Эти измерения позволяют рассчитать комплексное входное сопротивление - $\underline{Z} = \frac{\dot{U}_{1m}}{\dot{I}_m}$.

На рис. 8 показаны схемы включения прибора ИМФ1.

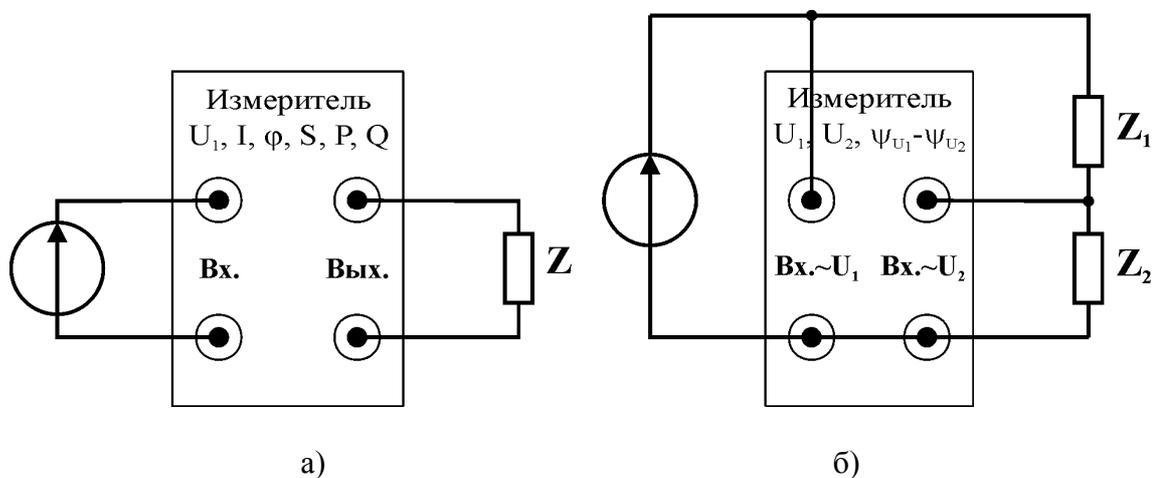


Рис. 8

Для исследования характеристик воздушного трансформатора необходимо воспользоваться комбинированным прибором измерителя мощности и фазы (ИМФ1). На рис. 8 представлена схема измерения входных характеристик.

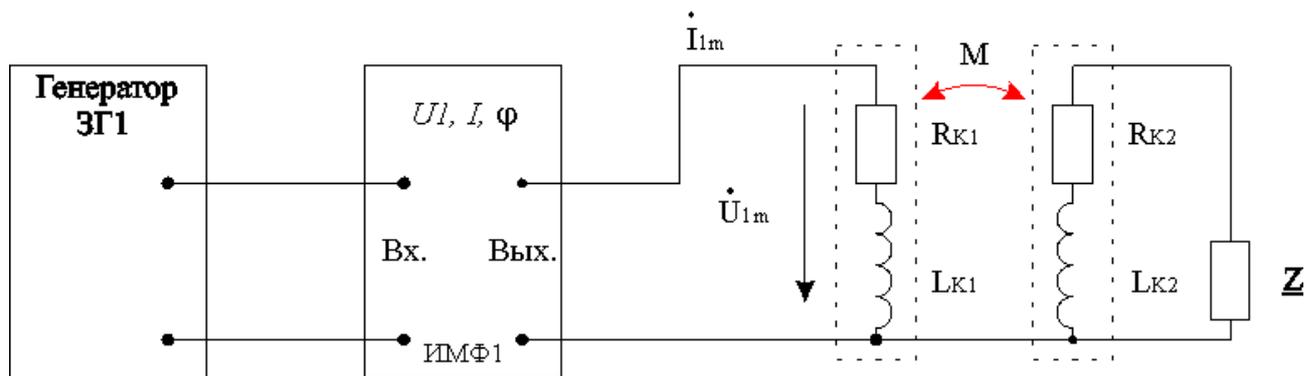


Рис. 9

На рис. 9 представлена схема измерения выходных характеристик.

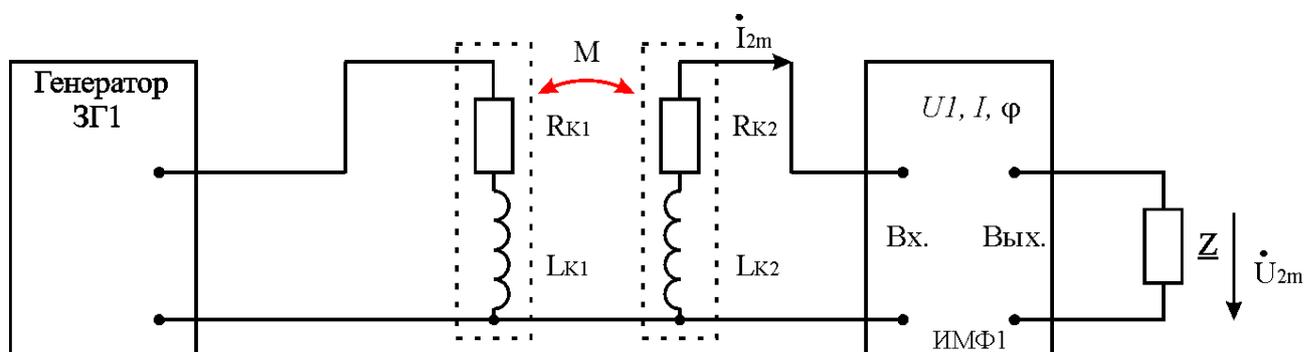


Рис. 10

На рис. 10 представлена схема измерения передаточной функции воздушного трансформатора.

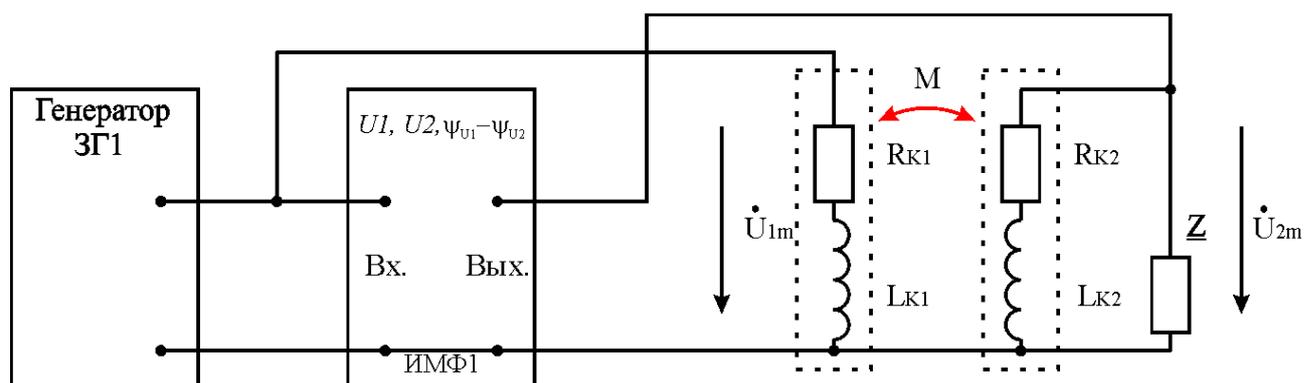


Рис. 11

Все объекты исследования расположены на стенде СЗ-ЭТ01. Между собой элементы соединяются с помощью коротких проводников (Ш1.6-Ш1.6), а с генератором звуковых частот и измерителем ИМФ1 с помощью длинных проводников (Ш4-Ш1.6)

Рекомендуемое задание к работе

1. Опытное определение параметров катушек индуктивности

Собрать схему по рис. 8а). К зажимам *Вых.* прибора ИМФ1 подключить первую катушку индуктивности L_1 , имеющую индуктивность - L_{K1} и активное сопротивление обмотки - R_{K1} . Регуляторы генератора установить в положения, которые обеспечивают на выходе гармонический сигнал напряжением $U_{1m} = 2$ В при частоте $f = 200$ Гц. Измерить значение тока и его фазу. Результаты измерений занести в табл. 1. Произвести измерения при включенной в цепь (между зажимами *Вых.*) второй катушки индуктивности - L_2 с параметрами L_{K2} и R_{K2} . Результаты занести в табл. 1.

Таблица 1

Элемент цепи	I	φ	Z	Определяемый параметр	
	мА	Град	Ом	Гн	Ом
Катушка индуктивности L_1				$L_{K1} =$	$R_{K1} =$
Катушка индуктивности L_2				$L_{K2} =$	$R_{K2} =$
Встречное включение катушек L_1 и L_2				$L_{вст} =$	$R_{вст} =$
Согласное включение катушек L_1 и L_2				$L_{сог} =$	$R_{сог} =$
Расчет по результатам измерений				M=	$K_C =$

2. Определение величины взаимной индуктивности и коэффициента связи

Соединить последовательно катушки L_1 и L_2 (рис. 2) и подключить их к зажимам *Вых.* по схеме рис. 7а. Измерителем мощности и фазы (ИМФ1) измерить значение тока и его фазу. Результаты измерения внести в табл. 1.

В исследуемой схеме поменять местами концы проводников, подключающих одну из катушек L_1 или L_2 (рис. 3), и провести аналогичные измерения. Результаты измерения внести в табл. 1.

По данным проведенного эксперимента рассчитать значения индуктивности, активного сопротивления катушек, взаимной индуктивности и коэффициента связи катушек.

3 Исследование режимов работы воздушного трансформатора

Провести измерения для трёх режимов работы трансформатора:

– *Режим холостого хода* (нагрузка отключена); в этом режиме измеряется измерителем ИМФ1 согласно рис. 9 входной ток и входное сопротивление. А согласно рис. 10 напряжение во вторичной цепи. Результаты изменения необходимо внести в табл. 2. По результатам этого опыта и используя второй закон Кирхгофа рассчитать величину взаимной индуктивности M и коэффициента трансформации K_T .

Таблица 2

f = 200 Гц Для схемы рис. 5.12		\dot{I}_{1m}	Z_{BX}	\dot{I}_{2m}	\dot{U}_{2m}
		<i>A</i>	<i>Ом</i>	<i>A</i>	<i>B</i>
Режим холостого хода $Z_H = \infty$	Расчет			0	
	опыт			0	
Режим короткого замыкания (к. з.) $Z_H = 0$	Расчет				0
	опыт				0
M =			K _T =		

– Режим короткого замыкания (зажимы, к которым подключена нагрузка соединить проводником); в этом режиме необходимо измерить прибором ИМФ1 токи в первичной и вторичной цепях. Результаты изменений необходимо внести в табл. 2

– Нагрузочный режим (конденсатор C_H (C1-C4 стенда СЗ-ЭМ01) включён в цепь); в этом режиме исследуются частотные свойства трансформатора нагруженного ёмкостной нагрузкой.

Для исследования нагрузочного режима, задаётся частота генератора 200 Гц и $U_1 = 2$ В. Измерителем мощности и фазы измеряется напряжение и его фаза на выходе трансформатора. А так же измеряются токи в первичной и вторичной цепях. Результаты заносятся в таблицу 3.

Таблица 3

f = 200 Гц	\dot{I}_1	Z_{BX}	\dot{U}_2	\dot{I}_2	<i>K</i>	<i>L</i>
Расчет						
Опыт						

Собрать схему по рис. 11. По опытными данным определить

$$\dot{U}_{2m}(\omega) = U_{2m} e^{j\varphi}, \quad \dot{I}_{2m}(\omega) = \frac{U_{2m}}{-jX_C} e^{j\varphi}, \quad Z_{BX}(\omega) = \frac{U_{1m}}{I_{1m}},$$

$$K(\omega) = \frac{|\dot{U}_{2m}|}{U_{1m}}, \quad \text{и} \quad L(\omega) = 20 \lg K(\omega),$$

Результаты измерений и расчетов по опытными данным внести в табл. 3

Для исследования частотных свойств нагрузочного режима, напряжение $U_1 = 1$ В и последовательно задаётся частота генератора $f = 200, 500, 1000, 1500$ и 2500 Гц и измеряется измерителем ИМФ1 измеряется напряжение и разность фаз ψ . Результаты измерений и расчетов по опытными данным внести в табл. 4.

Таблица 4

f(Гц)	200	500	1000	1500	2500
$K(\omega)$					
$\psi(\omega)$					
$20 \lg K(\omega)$					