

Данные методические указания составили:
доц. В. Н. Мелешкин (работа № 9), доц.
С. П. Власов (работа № 10), доц. В. Ф. Кли-
мов (работа № 11) и и. о. доц. А. В. Фролов
(работа № 12).

Рис. 9.1

Работа № 9

ПЕРЕДАЧА И ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ В ЦЕПЯХ С ВЗАИМОИНДУКЦИЕЙ

Объект и цель исследования

Электрическая энергия, поступающая в одиночную катуш-
ку индуктивности от источника, накапливается в ее магнит-
ном поле и частично преобразуется в тепло. Однако этот ба-
ланс «нарушается», если рассматривать одну из нескольких
индуктивно связанных катушек — наряду с накоплением и
преобразованием энергии здесь обнаруживается еще и обмен
энергией с другими катушками.

Передача электроэнергии посредством взаимной индукции
широко используется в трансформаторах, применяемых, в ча-
стности, на тяговых подстанциях и электровозах переменного
тока. Среди нежелательных последствий этого явления отме-
тим так называемое мешающее влияние тяговых сетей и ли-
ний электропередачи на смежные линии проводной связи.

Цель данной работы состоит в экспериментальной про-
верке возможности обмена энергией между индуктивно свя-
занными элементами электрической цепи и количественной
оценке мощности и направления передачи энергии посред-
ством взаимной индукции.

Электрическая схема опытной установки изображена на
рис. 9.1. Она содержит две индуктивно связанные ветви, под-

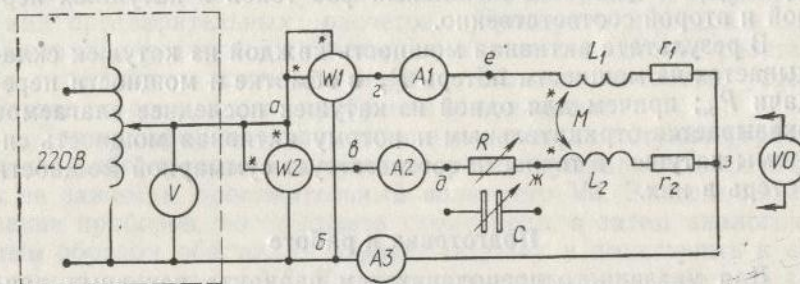


Рис. 9.1

ключенные параллельно и согласованно к источнику энергии промышленной частоты 50 Гц с регулируемым выходным напряжением. В одну из ветвей цепи введен реостат R , который по ходу работы может быть заменен конденсатором C . Ваттметры $W1$ и $W2$ в цепи измеряют активные мощности ветвей, амперметры $A1$, $A2$ и $A3$ — токи ветвей и источника соответственно, а вольтметры V и $V0$ — напряжения на зажимах источника и отдельных элементов цепи.

Основные расчетные соотношения

Напряжение U , ток I и активная мощность P одиночной катушки индуктивности связаны с ее параметрами следующими формулами:

$$U = zI, P = rI^2,$$

где z и r — полное и активное сопротивления, причем

$$z^2 - r^2 = x^2,$$

где x — индуктивное сопротивление катушки.

Две индуктивно связанные катушки характеризуются, кроме того, сопротивлением взаимной индукции x_m , которое можно определить, например, по току I_1 одной из катушек и напряжению U_2 на разомкнутой другой катушке

$$x_m = \frac{U_2}{I_1}.$$

Если же токи I_1 и I_2 обеих катушек отличны от нуля, то обмен энергии между ними можно оценить по формуле:

$$P_m = x_m I_1 I_2 \sin(\varphi_1 - \varphi_2),$$

где P_m — мощность передачи от первой катушки ко второй; $(\varphi_1 - \varphi_2)$ — разность начальных фаз токов в катушках первой и второй соответственно.

В результате активная мощность каждой из катушек складывается из мощности потерь P_r в обмотке и мощности передачи P_m ; причем для одной из катушек последнее слагаемое оказывается отрицательным и потому активная мощность системы катушек в точности соответствует суммарной мощности потерь в них.

Подготовка к работе

Для указанного преподавателем варианта исходных данных, приведенных в табл. 9.1, рассчитать токи, напряжения и

активные мощности катушек при подключении к источнику энергии каждой из них в отдельности и при параллельном согласном включении обеих катушек. На основании полученных результатов оценить пределы измерения амперметров, вольтметров и ваттметров, необходимых для использования в опытной установке.

Таблица 9.1

Параметры установки	Варианты исходных данных							
	1	2	3	4	5	6	7	8
U , В	60	70	80	90	100	110	120	130
L_1 , мГн	140	140	140	140	190	190	190	190
r_1 , Ом	11	11	11	11	14	14	14	14
L_2 , мГн	90	90	90	90	140	140	140	140
r_2 , Ом	9	9	9	9	11	11	11	11
M , мГн	60	60	60	60	100	100	100	100

Порядок проведения эксперимента

Собрать опытную установку на лабораторном стенде, используя имеющееся на нем оборудование в соответствии с предложенной схемой, указанными параметрами и результатами предварительных расчетов. Проверить правильность монтажа и установить в исходное положение движок реостата и регулятор источника энергии. Включив источник, установить на его зажимах требуемое напряжение.

Для экспериментальной оценки параметров катушек убрать какой-либо проводник в ветви второй катушки и подключить к ее зажимам дополнительный вольтметр $V0$. Записав показания приборов, восстановить схему цепи, а затем аналогичным образом обесточить первую катушку и подключить к ее зажимам вольтметр $V0$. Уменьшив сопротивление реостата до нуля, записать показания приборов и восстановить схему це-

пи. Результаты измерений в обоих опытах представить в виде табл. 9.2.

Таблица 9.2

Объект измерения	Показания приборов							Расчет			
	V	V0	A1	A2	A3	W1	W2	z	r	x	x _м
	В		А			Вт		Ом			
Катушка 1				0			0				
Катушка 2			0			0					

Для экспериментального исследования процессов передачи и преобразования энергии в цепях со взаимной индукцией подключить дополнительный вольтметр V0 параллельно реостату и включить источник энергии. Записать показания приборов при минимальном сопротивлении реостата, а затем, изменяя его, установить в цепи такой режим, при котором показание ваттметра W1 равно нулю, и записать показания приборов. Наконец, заменить реостат конденсатором и, изменяя его емкость, добиться аналогичного эффекта. Результаты измерений в перечисленных опытах представить в виде табл. 9.3.

Таблица 9.3

№ п/п	Показания приборов						Расчет				
	V	V0	A1	A2	A3	W1	W2	P _{r1}	P _{r2}	P _м	P ₁ P ₂
	В		А			Вт		Вт			
1			0								
2							0				
3						~ 0					

Обработка результатов эксперимента

По результатам измерений, зафиксированных в табл. 9.2, вычислить полные z , активные r и индуктивные x сопротивления катушек, а также сопротивление x_m взаимной индукции между ними, используя приведенные выше расчетные соотношения. Результаты вычислений записать в табл. 9.2 и сопоставить их с параметрами катушек, указанными в исходных данных.

По результатам измерений, приведенных в табл. 9.3, построить векторные диаграммы токов для всех трех опытов и определить по ним разности $|\varphi_1 - \varphi_2|$ начальных фаз токов в параллельных ветвях. Затем вычислить мощности P_m передачи энергии между этими ветвями и мощности P_{r1} и P_{r2} потерь в ветвях, учитывая во втором опыте и потери энергии в реостате, которые можно оценить по показаниям амперметра A2 и вольтметра V0. По полученным данным рассчитать активные мощности P_1 и P_2 ветвей и сравнить их с показаниями ваттметров. Результаты вычислений привести в табл. 9.3.

По известным токам в цепи для всех трех опытов построить векторные диаграммы напряжений, используя вычисленные параметры катушек, и сопоставить найденные таким образом значения напряжения на зажимах источника с измеренным экспериментально. Сопротивления реостата и конденсатора во втором и третьем опытах рассчитать по показаниям амперметра A2 и вольтметра V0.

Содержание отчета

В отчете по выполненной работе следует указать цель исследования, изобразить электрическую схему опытной установки, привести исходные данные и результаты предварительных расчетов, таблицы с опытными данными и результатами их обработки, векторные диаграммы токов и напряжений, перечень измерительных приборов и содержательные выводы по итогам работы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое взаимная индукция? Как и в чем она проявляется? Каковы практические применения этого явления?
2. Что такое взаимная индуктивность и сопротивление взаимной индукции? Какова связь между этими величинами? В каких единицах они измеряются?
3. Каким должно быть соотношение между сопротивлениями взаимной индукции x_m , вычисленными по результатам измерений для катушек 1 и 2 в табл. 9.2? В какой мере это соотношение подтверждено опытами?

4. Каково соотношение между активными мощностями индуктивно связанных ветвей, мощностями потерь в них и суммарной активной мощностью этих ветвей?

5. Каким образом в электрической цепи происходит обмен энергией между индуктивно связанными ветвями? От чего зависит мощность и направление передачи энергии посредством взаимной индукции?

6. Как объяснить зависимость показаний ваттметра W1 в опытной установке от сопротивления реостата R, если внутренним сопротивлением источника энергии можно пренебречь? При каких условиях показание упомянутого ваттметра оказывается равным нулю?

7. К каким последствиям приводит замена реостата в опытной установке конденсатором? Можно ли изменением его емкости добиться того, чтобы показание ваттметра W1 было в точности равно нулю?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атабеков Г. И. Теоретические основы электротехники. Ч. 1. Линейные электрические цепи. — М.: Энергия, 1978, § 8—6, с. 219—220.
2. Теоретические основы электротехники. Т. 1. Основы теории линейных цепей/Под ред. П. А. Ионкина. — М.: Высшая школа, 1976, § 9.1, с. 263—267.
3. Основы теории цепей/Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов. — М.: Энергия, 1975, § 6—4, 6—7, с. 191—192, 197—199.

Работа № 10

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДУШНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Объект и цель исследования

Трансформатор представляет собой аппарат, передающий энергию из одной цепи в другую посредством электромагнитной индукции. Он используется чаще всего для преобразования величин переменных напряжений и токов.

Воздушные трансформаторы, т. е. трансформаторы без ферромагнитного сердечника, широко применяются в устройствах автоматики, измерительной техники и связи. В то же время воздушный трансформатор является упрощенной моделью трансформатора с ферромагнитным сердечником; такие трансформаторы выполняются на большие мощности и применяются в устройствах электроэнергетики, электрифицированного ж.-д. транспорта и в других отраслях народного хозяйства.

Целью работы является исследование соотношений между токами и напряжениями обмоток трансформатора в различных режимах его работы, включая режим передачи максимума энергии из первичной обмотки во вторичную.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 10.1.

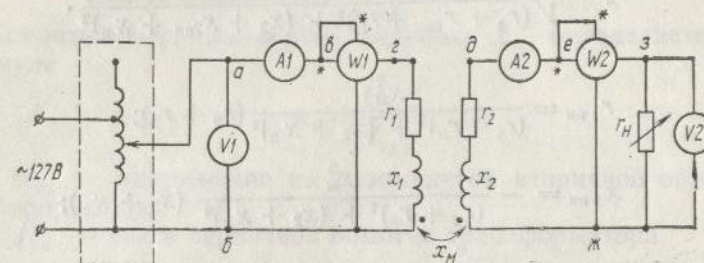


Рис. 10.1

В качестве обмоток трансформатора используются две из трех индуктивно связанных катушек, имеющихся на стенде. Питание установки осуществляется от регулируемого источника синусоидального напряжения промышленной частоты. Для измерения действующих значений токов и напряжений используются амперметры A1, A2 и вольтметры V1, V2 электромагнитной системы. Активные мощности источника и нагрузки измеряются ваттметрами W1, W2 электродинамической системы.

Основные расчетные соотношения

Уравнения состояния воздушного трансформатора, составленные по второму закону Кирхгофа, имеют вид

$$r_1 \dot{I}_1 + jx_1 \dot{I}_1 - jx_m \dot{I}_2 = \dot{U}_1;$$

$$(r_2 + r_n) \cdot \dot{I}_2 + j(x_2 + x_n) \cdot \dot{I}_2 - jx_m \dot{I}_1 = 0.$$

Отметим, что согласно закону электромагнитной инерции (правило Ленца) «включение» обмоток трансформатора при передаче энергии всегда является встречным.

Решив приведенные уравнения относительно токов $\dot{I}_1$ и $\dot{I}_2$ и перейдя к модулям действующих значений, получим соотношения:

$$I_1 = \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + r_{1вн})^2 + (x_1 + x_{1вн})^2}};$$

$$I_2 = \frac{U_1 \cdot \frac{x_m}{\sqrt{r_1^2 + x_1^2}}}{\sqrt{(r_2 + r_{2\text{вн}} + r_n)^2 + (x_2 + x_{2\text{вн}} + x_n)^2}},$$

где

$$r_{1\text{вн}} = \frac{x_m^2}{(r_2 + r_n)^2 + (x_2 + x_n)^2} (r_2 + r_n);$$

$$x_{1\text{вн}} = - \frac{x_m^2}{(r_2 + r_n)^2 + (x_2 + x_n)^2} (x_2 + x_n);$$

$$r_{2\text{вн}} = \frac{x_m^2}{r_1^2 + x_1^2} r_1;$$

$$x_{2\text{вн}} = - \frac{x_m^2}{r_1^2 + x_1^2} x_1.$$

В вышеприведенных формулах:

r_1, x_1 и r_2, x_2 — активное и реактивное сопротивления первичной и вторичной обмоток трансформатора;

x_m — сопротивление взаимной индукции обмоток трансформатора;

r_n и x_n — активное и реактивное сопротивления нагрузки трансформатора;

$r_{1\text{вн}}$ и $x_{1\text{вн}}$ — активное и реактивное сопротивления, вносимые в первичную обмотку трансформатора;

$r_{2\text{вн}}$ и $x_{2\text{вн}}$ — активное и реактивное сопротивления, вносимые во вторичную обмотку трансформатора.

Если реактивная составляющая сопротивления нагрузки отсутствует, то с изменением ее активного сопротивления активная мощность нагрузки достигает максимума при

$$r_n = \sqrt{(r_2 + r_{2\text{вн}})^2 + (x_2 + x_{2\text{вн}})^2},$$

который можно определить по формуле

$$P_{\text{н п.н.б.}} = r_n \cdot I_2^2.$$

Параметры каждой из обмоток трансформатора определяются поочередно методом амперметра-вольтметра-ваттметра путем соответствующих измерений в схеме, приведенной на рис. 10.1, при условии, что «измеряемая» обмотка трансформатора включается в первичный контур, а вторичный контур разомкнут (или даже отсутствует). При этом

$$r = \frac{P}{I^2}, \quad z = \frac{U}{I}, \quad x = \sqrt{z^2 - r^2}.$$

Сопротивление взаимной индукции x_m определяется по формуле

$$x_m = \frac{U_{2x}}{I_{1x}},$$

где U_{2x} — напряжение на разомкнутой вторичной обмотке трансформатора;

I_{1x} — ток в первичной обмотке трансформатора.

Подготовка к работе

1. Начертить в рабочей тетради схему измерений согласно рис. 10.1. Подготовить табл. 10.2 и 10.3.

2. Для заданного варианта параметров трансформатора при входном напряжении U_1 (по указанию преподавателя — см. табл. 10.1) рассчитать ожидаемые величины токов в обмотках трансформатора и напряжение на вторичной обмотке для режимов холостого хода и короткого замыкания вторичной обмотки.

Таблица 10.1

Параметры установки	Варианты исходных данных											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
r_1 , Ом	9	9	11	11	11	11	5	5	5	9	5	9
L_1 , мГн	90	90	140	140	140	140	40	40	40	90	40	90
r_2 , Ом	11	11	5	5	9	9	11	11	9	5	9	5
L_2 , мГн	140	140	40	40	90	90	140	140	90	40	90	40
M , мГн	60	60	40	40	60	60	40	40	30	30	30	30
U_1 , В	60	50	100	80	100	80	30	25	30	70	25	60

3. Исходя из условия получения нагрузкой максимальной активной мощности вычислить соответствующее ему активное сопротивление нагрузки, а также токи обмоток трансформатора и активные мощности источника и нагрузки.

4. На основании выполненных в пп. 2 и 3 расчетов сформулировать требования к измерительным приборам — амперметрам, вольтметрам и ваттметрам.

Порядок проведения эксперимента

1. Подобрать оборудование и измерительные приборы, необходимые для выполнения работы в соответствии с результатами предварительного расчета для заданного варианта исходных данных.

2. Собрать электрическую цепь по схеме рис. 10.1. После проверки правильности монтажа схемы разомкнуть вторичную ветвь трансформатора и, включив цепь под напряжение, записать показания приборов. Затем, поменяв местами первичную и вторичную обмотки трансформатора, повторить измерения тока, мощности и напряжений. Результаты измерений записать в табл. 10.2.

Таблица 10.2

В первичный контур включены	Показания приборов					Расчет			
	U_1 , В	I_1 , А	P_1 , Вт	U_2 , В	I_2 , А	z , Ом	r , Ом	x_2 , Ом	x_m , Ом
1-я обмотка					0				
2-я обмотка					0				

3. Восстановить схему воздушного трансформатора согласно рис. 10.1. При неизменном напряжении на первичной обмотке трансформатора U_1 измерить токи I_1 и I_2 , а также напряжение на нагрузке U_2 , активную мощность нагрузки P_n и мощность P_1 для следующих трех режимов работы трансформатора: холостого хода, короткого замыкания и режима, при котором активная мощность нагрузки наибольшая. Результаты измерений записать в табл. 10.3.

Таблица 10.3

Опыт	Показания приборов						Расчет					
	U_1 , В	I_1 , А	P_1 , Вт	U_2 , В	I_2 , А	P_n , Вт	r_{10} , Ом	$r_{1вн}$, Ом	$x_{1вн}$, Ом	$r_{2вн}$, Ом	$x_{2вн}$, Ом	I_1 , А
х. х.					0	0	8	0	0	—	—	0
P_n , наиб.												
к. з.				0		0	0					

Обработка результатов эксперимента

1. По опытным данным, приведенным в табл. 10.2, рассчитать параметры обмоток трансформатора, а также сопротивление взаимной индукции и взаимоиндуктивность. Сопоставить полученные параметры трансформатора с исходными данными.

2. По опытным данным, приведенным в табл. 10.3, вычислить сопротивление нагрузки r_n , вносимые сопротивления $r_{1вн}$, $x_{1вн}$, $r_{2вн}$, $x_{2вн}$ и, используя полученные величины, рассчитать токи I_1 и I_2 . Сравнить рассчитанные значения токов с измеренными.

3. На основании опытных данных для режима получения нагрузкой наибольшей активной мощности построить векторную диаграмму токов и топографическую диаграмму напряжений.

Содержание отчета

В отчете необходимо привести электрическую схему экспериментальной установки согласно рис. 10.1, основные расчетные соотношения, табл. 10.2 и 10.3 с результатами опытов и расчетов, векторную диаграмму токов и топографическую диаграмму напряжений для режима получения нагрузкой наибольшей активной мощности, построенные на основе опытных данных.

Необходимо привести перечень измерительных приборов, использованных при проведении измерений.

В заключение отчета необходимо сделать содержательные выводы по работе, отражающие ее основные итоги и степень соответствия расчетных и опытных данных.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается сущность явления взаимной индукции? Дать определение взаимной индуктивности.

2. Какие зажимы индуктивно связанных катушек называются одноименными? Какое включение обмоток имеет место в трансформаторе при передаче энергии из первичной обмотки во вторичную и при обратном направлении передачи энергии?

3. Каков физический смысл активного и реактивного сопротивлений, вносимых в первичную обмотку трансформатора со стороны вторичной обмотки?

4. Каковы условия передачи максимальной активной мощности из первичной обмотки трансформатора во вторичную?

5. Пояснить физический смысл активного и реактивного сопротивлений, вносимых во вторичную обмотку трансформатора со стороны первичной обмотки.

6. Сформулировать и обосновать условия получения регулируемой нагрузкой максимальной активной мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атабеков Г. И. Теоретические основы электротехники. Ч. 1. Линейные электрические цепи. — М.: Энергия, 1978. — § 8—1, 8—2, 8—4, 8—5, 8—7, 8—9, 8—10, с. 198—204, 209—218, 220—222, 224—229.
2. Основы теории цепей/Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов. — М.: Энергия, 1975. — § 6—1, 6—2, 6—8, с. 184—189, 199—202.
3. Теоретические основы электротехники. Т. 1. Основы теории линейных цепей/Под ред. П. А. Ионкина. — М.: Высшая школа, 1976. — § 9—1, 9—2, с. 263—264, 267—269, 273—274.

Работа № 11

РЕЖИМЫ РАБОТЫ ПАСИВНОГО ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКА

Объект и цель исследования

Четырехполусником называется электрическая цепь с четырьмя зажимами, к двум из которых, называемым входными или первичными, подключают источник энергии, к двум остальным, называемым выходными или вторичными зажимами — нагрузку.

Четырехполусники широко распространены в электротехнической практике. В виде примеров можно назвать двухпроводную линию, однофазный трансформатор, радиоприемник, где к входным зажимам подключают антенну и заземление, к выходным — громкоговоритель, и т. п.

Пассивным называют четырехполусник, у которого при отключенных внешнем источнике и нагрузке напряжение между любой парой зажимов равно нулю.

Входные комплексные напряжение $\dot{U}_1$ и ток $\dot{I}_1$ и выходные комплексные напряжение $\dot{U}_2$ и ток $\dot{I}_2$ можно связать, например, уравнениями формы А

$$\dot{U}_1 = A_{11}\dot{U}_2 + A_{12}\dot{I}_2; \quad \dot{I}_1 = A_{21}\dot{U}_2 + A_{22}\dot{I}_2,$$

где $A_{11}, \dots, A_{22}$ — комплексные постоянные или коэффициенты формы А четырехполусника.

Целью работы является экспериментально-расчетное определение коэффициентов формы А по данным опытов холостого хода и короткого замыкания и проверка правильности найденных коэффициентов применением уравнений формы А четырехполусника.

Работа выполняется на лабораторном стенде переменного тока при питании от источника промышленной частоты с регулируемым напряжением.

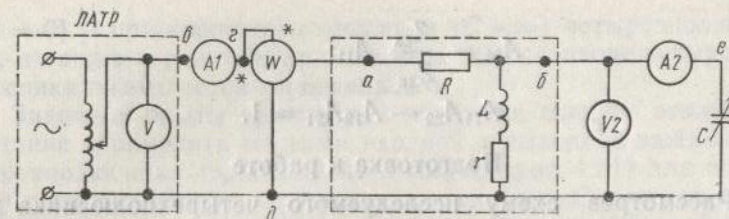


Рис. 11.1

Исследованию подлежит пассивный четырехполусник, имеющий схему обратного «Г» (рис. 11.1). Продольным элементом служит реостат с сопротивлением R , а поперечным элементом — катушка с индуктивностью L и активным сопротивлением r . Нагрузкой четырехполусника является конденсатор переменной емкости. Регулирование питающего напряжения осуществляется лабораторным автотрансформатором (ЛАТР).

Основные расчетные соотношения

Сопротивление холостого хода Z_{1x} и короткого замыкания Z_{1k} при прямой передаче и сопротивление Z_{2k} холостого хода при обратной передаче определяются по данным, полученным из соответствующих опытов:

$$Z_{1x} = \frac{U_{1x}}{I_{1x}}, \quad \varphi_{1x} = \arccos \frac{P_{1x}}{U_{1x} I_{1x}} > 0;$$

$$Z_{1k} = \frac{U_{1k}}{I_{1k}}, \quad \varphi_{1k} = 0 \text{ (см. рис. 11.1);}$$

$$Z_{2x} = \frac{U_{2(x)}}{I_{2(x)}}, \quad \varphi_{2x} = \arccos \frac{P_{2(x)}}{U_{2(x)} I_{2(x)}} > 0.$$

Коэффициенты формы А четырехполусника:

$$A_{11} = \frac{Z_{1x}}{\sqrt{Z_{2x}(Z_{1x} - Z_{1k})}};$$

$$A_{12} = \frac{Z_{1k} Z_{2x}}{Z_{1x}} A_{11};$$

$$A_{21} = \frac{1}{Z_{1x}} A_{11};$$

$$A_{22} = \frac{Z_{2x}}{Z_{1k}} A_{11};$$

$$A_{11}A_{22} - A_{12}A_{21} = 1.$$

Подготовка к работе

Рассмотрев схему исследуемого четырехполюсника для трех предельных режимов (холостой ход и короткое замыкание при прямой передаче и холостой ход при обратной), решить, какие из них могут дать наибольшие значения токов I_1 и I_2 , чтобы при последующем выполнении работы осторожно подходить к этим режимам во избежание перегрузки амперметров $A1$ и $A2$.

В табл. 11.1 приведены варианты значений напряжения U_1 питания, продольного сопротивления R и индуктивности L поперечного элемента.

Вариант напряжения U_1 питания и значения параметров четырехполюсника следует принять по указанию преподавателя.

Таблица 11.1

Параметры установки	Варианты исходных данных								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R , Ом	45	45	60	60	45	60	45	60	75
L , мГн	90	90	90	90	140	140	190	190	190
U_1 , В	70	80	80	90	100	110	100	110	120

Порядок проведения эксперимента

Руководствуясь рис. 11.1 и в соответствии с вариантом параметров, указанным преподавателем, собрать на пульте стенда исследуемую схему четырехполюсника с необходимыми измерительными приборами и аппаратурой для прямой передачи. В качестве нагрузки подключить к вторичным зажимам четырехполюсника конденсатор переменной емкости. При помощи ЛАТР установить нужное напряжение U_1 .

Изменяя емкость нагрузочного конденсатора от нуля до бесконечности, записать в табл. 11.2 показания всех измерительных приборов в трех режимах — при холостом ходе

($C = 0$) и при коротком замыкании ($C \rightarrow \infty$) четырехполюсника, а также в режиме, при котором ток на входе четырехполюсника оказывается минимальным.

Закончив опыты при прямой передаче, следует отключить питание и поменять местами входной и выходной зажимы четырехполюсника (зажимы «а» и «б», см. рис. 11.1) для обратной передачи. Затем, отключив конденсатор C и подав снова питание, выполнить опыт холостого хода при обратной передаче. Показания всех приборов занести в табл. 11.2.

Таблица 11.2

№ опытов	Показания приборов					Расчет		
	V	A1	W	V2	A2	$\cos \varphi_{вх}$	$\varphi_{вх}$	$Z_{вх}$
	В	А	Вт	В	А	—	гр	Ом
1					0			
2		min						
3				0		1	0	
4					0			

Обработка результатов эксперимента

Используя данные, полученные из опытов, рассчитать комплексные сопротивления Z_{1x} холостого хода и Z_{1k} короткого замыкания при прямой передаче и сопротивления Z_{2x} холостого хода при обратной передаче. Затем, вычислить комплексные коэффициенты формы A .

Найденные значения коэффициентов проверить соотношением, выражающим свойства обратимости четырехполюсника.

Введя комплексные коэффициенты в уравнение формы A четырехполюсника для прямой передачи, по измеренным в опыте 2 напряжению U_2 и току I_2 рассчитать входные напряжение U_1 и ток I_1 . Сопоставить расчетные значения U_1 и I_1 с данными опыта 2.

Содержание отчета

В отчет по выполненной работе включить:

- 1) схему исследуемого четырехполюсника;
- 2) расчетные формулы и уравнения;
- 3) указать заданные преподавателем параметры элементов четырехполюсника и напряжение питания U_1 ;

- 4) перечень используемых приборов с указанием завода-изготовителя, номера прибора и пределов измерений;
- 5) таблицу опытных и расчетных данных;
- 6) содержательные выводы по работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Приведите примеры практического применения четырехполюсников.
2. Как математически связаны между собой четыре сопротивления холостого хода и короткого замыкания четырехполюсника?
3. Почему говорят, что соотношение $A_{11}A_{22} - A_{12}A_{21} = 1$ выражает свойство обратимости четырехполюсника?
4. Можно ли в данной лабораторной работе обойтись без ваттметра, применив фазометр?
5. Чем вы объясните возможное появление минимума тока I_1 ?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атабеков Г. И. Теоретические основы электротехники. Ч. 1. Линейные электрические цепи. М., Энергия, 1978, § 9.1—9.4, с. 233—243.
2. Зевеке Г. В. и др. Основы теории цепей. М., Энергия, 1975, § 8.1—8.3, с. 218—219.
3. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. М., Высшая школа, 1978, § 4.1—4.4, с. 108—113.

Работа № 12

ПАРАМЕТРЫ СЛОЖНЫХ СОСТАВНЫХ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ

Объект и цель исследования

Сложную электрическую цепь, имеющую входные и выходные зажимы, можно рассматривать как совокупность элементарных четырехполюсников. При определенных условиях (регулярность) это позволяет вычислить параметры составного четырехполюсника по параметрам элементарных четырехполюсников и, таким образом, получить аналитическую зависимость между токами и напряжениями на входе и выходе сложного составного четырехполюсника, не производя расчетов токов и напряжений в исходной цепи.

На практике теория определения параметров составных четырехполюсников через параметры элементарных четырехполюсников применяется при расчете электромагнитных процессов в тяговых сетях постоянного и переменного тока, при анализе условий работы рельсовых цепей, при расчете цепей проводной связи.

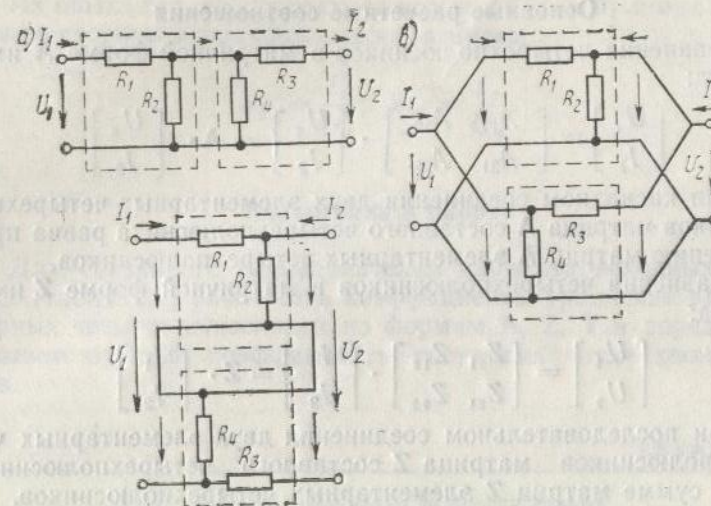


Рис. 12.1

Целью работы является исследование схем соединения пассивных четырехполюсников и экспериментальное определение коэффициентов уравнений четырехполюсников различных форм.

Работа выполняется на стенде, имеющем два источника постоянного напряжения и четыре резистора. С указанным оборудованием могут быть собраны две Г-образные схемы четырехполюсников, а также их каскадное, параллельное и последовательное соединения (рис. 12.1). Для измерения токов и напряжений используются приборы магнитоэлектрической системы (рис. 12.2).



Рис. 12.2

Основные расчетные соотношения

Уравнения четырехполюсников в матричной форме **A** имеют вид:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix} = \mathbf{A} \cdot \begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

При каскадном соединении двух элементарных четырехполюсников матрица **A** составного четырехполюсника равна произведению матриц **A** элементарных четырехполюсников.

Уравнения четырехполюсников в матричной форме **Z** имеют вид:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \mathbf{Z} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

При последовательном соединении двух элементарных четырехполюсников матрица **Z** составного четырехполюсника равна сумме матриц **Z** элементарных четырехполюсников.

Уравнения четырехполюсников в матричной форме **Y** имеют вид:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \mathbf{Y} \cdot \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix}$$

При параллельном соединении двух элементарных четырехполюсников матрица **Y** составного четырехполюсника равна сумме матриц **Y** элементарных четырехполюсников.

Коэффициенты уравнений четырехполюсника можно определить экспериментальным путем, измеряя токи и напряжения на его зажимах в режимах холостого хода (х. х.) и короткого замыкания (к. з.).

Из опыта х. х. на выходных зажимах ($I_2 = 0$) имеем

$$A_{11} = \frac{U_1}{U_2}; A_{21} = \frac{I_1}{U_2}; Z_{11} = \frac{U_1}{I_1}; Z_{21} = \frac{U_2}{I_1}.$$

Из опыта к. з. на выходных зажимах ($U_2 = 0$) имеем

$$A_{12} = \frac{U_1}{I_2}; A_{22} = \frac{I_1}{I_2}; Y_{11} = \frac{I_1}{U_1}; Y_{21} = \frac{I_2}{U_1}.$$

Из опыта х. х. на входных зажимах ($I_1 = 0$) и при питании со стороны вторичных зажимов имеем

$$Z_{12} = \frac{U_1}{I_2}; Z_{22} = \frac{U_2}{I_2}.$$

Из опыта к. з. на входных зажимах ($U_1 = 0$) и при питании со стороны вторичных зажимов имеем

$$Y_{12} = \frac{I_1}{U_2}; Y_{22} = \frac{I_2}{U_2}.$$

Подготовка к работе

Для указанного преподавателем варианта исходных данных (табл. 12.1) рассчитать коэффициенты уравнений элементарных четырехполюсников по формам **A**, **Z**, **Y** и определить соответствующие коэффициенты составных четырехполюсников.

Таблица 12.1

Параметры элементов	Варианты исходных данных								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$R_1 = R_3$, Ом	10	10	10	10	10	10	20	20	20
$R_2 = R_4$, Ом	10	10	10	20	20	20	10	10	10
Соединения	каскадное		—			—			—
	последовательное	—			—			—	
	параллельное	—		—			—		

Порядок проведения эксперимента

1. Установить согласно указанному преподавателем варианту (см. табл. 12.1) значения сопротивлений $R_1 \div R_4$. При регулировке сопротивлений воспользоваться методом вольтметра и амперметра.

2. Собрать электрическую цепь по схеме рис. 12.2. Электрические схемы исследуемых четырехполюсников, указанных в варианте исходных данных, приведены на рис. 12.1, а, б, в.

3. Провести измерения, необходимые для определения коэффициентов элементарных и составных четырехполюсников. При проведении опытов переключки в схеме рис. 12.2 устанавливаются согласно рекомендациям табл. 12.2—12.4.

Таблица 12.2

Вид четырёхполюсника	Опыт				Расчет			
	$U_1, В$	$U_2, В$	$I_1, А$	$I_2, А$	A_{11}	A_{12}	A_{21}	A_{22}
1-й элементарный четырёхполюсник	E_1 E_1	0		0	—	—	—	—
2-й элементарный четырёхполюсник	E_1 E_1	0		0	—	—	—	—
Составной четырёхполюсник при каскадном соединении	E_1 E_1	0		0	—	—	—	—

Таблица 12.3

Вид четырёхполюсника	Опыт				Расчет			
	$U_1, В$	$U_2, В$	$I_1, А$	$I_2, А$	Y_{11}	Y_{12}	Y_{21}	Y_{22}
1-й элементарный четырёхполюсник	E_1 0	0 E_2			—	—	—	—
2-й элементарный четырёхполюсник	E_1 0	0 E_2			—	—	—	—
Составной четырёхполюсник при параллельном соединении	E_1 0	0 E_2			—	—	—	—

Таблица 12.4

Вид четырёхполюсника	Опыт				Расчет			
	$U_1, В$	$U_2, В$	$I_1, А$	$I_2, А$	Z_{11}	Z_{12}	Z_{21}	Z_{22}
1-й элементарный четырёхполюсник	E_1	E_2	0	0	—	—	—	—
2-й элементарный четырёхполюсник	E_1	E_2	0	0	—	—	—	—
Составной четырёхполюсник при последовательном соединении	E_1	E_2	0	0	—	—	—	—

Обработка результатов эксперимента

Рассчитать коэффициенты уравнений элементарных и составных четырехполюсников по опытным данным. Результаты расчета занести в табл. 12.2—12.4. Проверить соотношения между коэффициентами составных и элементарных четырехполюсников. Сопоставить коэффициенты элементарных и составных четырехполюсников, полученные в результате предварительного расчета и по опытным данным.

Содержание отчета

В отчете следует привести рабочие схемы, номер варианта, предварительные расчеты, таблицы наблюдений и расчетов. Также требуется привести расчет коэффициентов составных четырехполюсников через соответствующие коэффициенты элементарных четырехполюсников. Необходимо привести перечень измерительных приборов, использованных при проведении эксперимента и сделать содержательные выводы по работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. По каким признакам принято классифицировать четырехполюсники?
2. Какой четырехполюсник называется обратимым? Каково соотношение между коэффициентами уравнений обратимого четырехполюсника?
3. Какой четырехполюсник называется симметричным? Каково соотношение между коэффициентами уравнений симметричного четырехполюсника?
4. Какое количество независимых параметров у обратимых и симметричных четырехполюсников?

5. Какое соединение четырехполюсников называется регулярным?
6. Докажите, что при каскадном соединении двух четырехполюсников матрица A составного четырехполюсника равна произведению матриц A элементарных четырехполюсников.
7. Определите параметры формы A составного четырехполюсника при каскадном соединении двух элементарных четырехполюсников с известными параметрами формы A .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теоретические основы электротехники. Т. 1. Основы теории линейных цепей/Под ред. П. А. Ионкина. М.: Высшая школа, 1976, § 11.1—11.4, 11.8, с. 324—334, 342—345.
2. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. — М.: Высшая школа, 1978, § 4.1—4.8, с. 108—118.
3. Атабеков Г. И. Теоретические основы электротехники. Ч. 1. Линейные электрические цепи. — М.: Энергия, 1978, § 9.1—9.4, 9.11—9.14, с. 233—243, 259—265.

СОДЕРЖАНИЕ

Работа № 9. Передача и преобразование энергии в цепях с взаимной индукцией	3
Работа № 10. Исследование воздушного трансформатора . . .	8
Работа № 11. Режимы работы пассивного четырехполюсника .	14
Работа № 12. Параметры сложных составных четырехполюсников	18

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

по дисциплине

«Теоретические основы электротехники»

Раздел III

Редактор И. С. Громыкина
Техн. редактор Н. Н. Васильева
Корректор И. Н. Терешкина

Сдано в набор 13/XII 1985 г. Подписано в печать 3/III 1986 г.
Формат 60×90/16. Печ. л. 1,5. Уч.-изд. л. 1,3. Зак. 2020. Тир. 1000.
Бесплатно.

Редакционно-издательский отдел МИИТа

Типография МИИТа, Москва, ул. Образцова, 15.