

Министерство образования и науки Российской Федерации
Псковский государственный политехнический институт

И.И.Бандурин, Н.И.Солнышкин

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Анализ цепей с индуктивно связанными элементами

Методические указания к выполнению самостоятельной работы
(для студентов всех специальностей и всех форм обучения электромеханического факультета)

Рекомендовано к изданию Научно-методическим советом
Псковского государственного политехнического института

Псков
Издательство ППИ
2011

УДК 621.3
ББК 31.2
С 60

*Рекомендовано к изданию научно-методическим советом
Псковского государственного политехнического института*

Рецензент

- *Хитров А.И., к.т.н., доцент кафедры электропривода и систем автоматизации ППИ*

С 60

И.И.Бандурин, Н.И. Солнышкин

Теоретические основы электротехники: Анализ цепей с индуктивно связанными элементами. Методические указания к выполнению самостоятельной работы. Для студентов всех специальностей и всех форм обучения электромеханического факультета.- Псков.: Изд-во ППИ, 2011 –18с.

В пособии приведены задания и методические указания по расчету электрической цепи с индуктивно связанными элементами.

Пособие предназначено для студентов всех специальностей и всех форм обучения электромеханического факультета, изучающих «Теоретические основы электротехники».

УДК 621.3
ББК 31.2

© Бандурин И.И., Солнышкин Н.И., 2011

© Псковский государственный политехнический институт, 2011

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1. Задание.....	5
2. Методические указания.....	7
2.1. Правила оформления работы	7
2.2. Анализ цепей с индуктивно связанными элементами	8
2.2.1. Индуктивно связанные элементы	8
2.2.2. Составление уравнений по законам Кирхгофа.....	12
2.2.3. Составление уравнений по методу контурных токов	13
2.2.4. Определение напряжений и токов на элементах схемы	14
2.2.5. Составление баланса мощностей	15
2.2.6. Векторные и топографические диаграммы.....	15
Литература	18

Введение

Одним из основных видов занятий по курсу теоретические основы электротехники является выполнение студентами самостоятельной работы. Самостоятельная работа направлена на закрепление изучаемого материала и заключается в решении задач по пройденным темам курса. Самостоятельное решение задач помогает студентам проверить степень усвоения ими курса, получить необходимые знания о сравнительных достоинствах и недостатках основных методов расчета, а также о физических процессах, происходящих в электрических цепях, вырабатывает у них навык четко и кратко излагать свои мысли.

В расчетно-графической работе необходимо исследовать электрическую цепь с индуктивно связанными катушками.

1. Задание

Расчет электрической цепи с индуктивно связанными элементами

Для заданной схемы рис.1 электрической цепи с известными параметрами требуется:

1. Записать уравнения по законам Кирхгофа.
2. Рассчитать цепь методом контурных токов (определить комплексы действующего значения напряжений и токов).
3. Записать выражения мгновенных токов и напряжений на индуктивных элементах.
4. Составить баланс активных и реактивных мощностей.
5. Сделать анализ явления передачи энергии между индуктивно связанными элементами.
6. Построить векторную диаграмму токов и топографическую диаграмму для внешнего контура схемы. На топографической диаграмме показать векторы напряжений на всех элементах внешнего контура схемы. Напряжения на элементах, обладающих взаимной индуктивностью, должны быть разложены на составляющие.

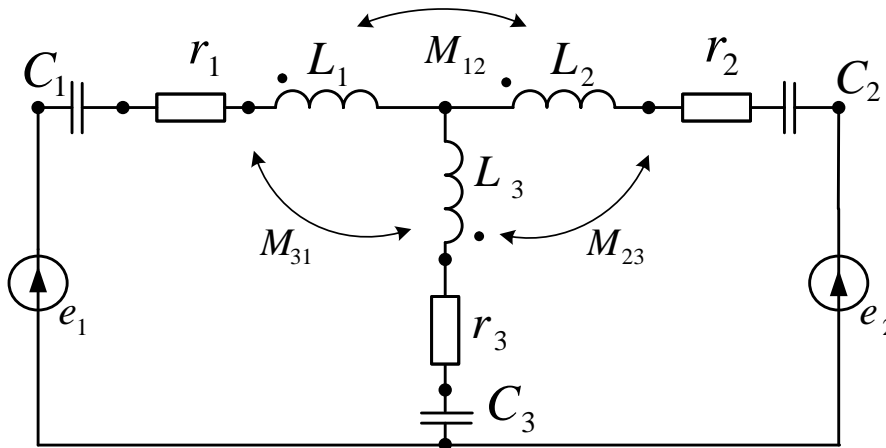


Рис.1

Выбор варианта

Номер индивидуального варианта определяется по формуле:
 $N = 20 \cdot m + n$,

где m - номер группы (1,2, 3...);

n - порядковый номер студента в групповом журнале.

Наличие резистивных и емкостных элементов в ветвях схемы и наличие индуктивных связей между катушками определяется по последней цифре индивидуального варианта студента из табл.1.

Таблица 1

Элемент Вариант схемы	r_1	r_2	r_3	C_1	C_2	C_3	k_{12}	k_{23}	k_{31}
0	+	+	+	+	-	-	+	+	-
1	+	-	+	+	+	-	-	+	+
2	+	+	-	+	+	-	+	-	+
3	+	+	-	-	+	+	+	+	-
4	+	+	-	+	-	+	-	+	+
5	+	-	+	+	+	-	+	-	+
6	-	+	-	+	+	-	+	+	-
7	-	+	-	+	+	+	-	+	+
8	+	+	+	-	-	+	+	-	+
9	-	+	-	+	-	+	+	+	-

Параметры элементов принять равными:

$$r_1 = r_2 = r_3 = N, \hat{h} \quad \hat{A}_1 = \hat{A}_2 = 100\hat{A}; \quad \psi_{e_1} = 45^0; \quad \psi_{e_2} = -45^0; \quad \omega = 314c^{-1}.$$

$$L_1 = L_2 = L_3 = 3,18 \cdot N, i\tilde{A}i$$

$$\tilde{N}_1 = \tilde{N}_2 = \tilde{N}_3 = 3180/N, i\hat{e}\hat{O}; \quad k_{12} = k_{23} = k_{31} = 0,6$$

Для указанной разметки зажимов катушек (рис.1): $M_{12} > 0$, $M_{23} > 0$, $M_{31} > 0$.

2. Методические указания

2.1. Правила оформления работы

1. Расчетная работа выполняется на отдельных листах, используя только одну сторону листа. На листах следует оставлять поля шириной не менее 4 см для замечаний преподавателей. Работа сшивается по большей (левой) стороне листа.

2. Задание должно быть полностью внесено в работу. Работа должна содержать все пункты задания.

3. Рисунки, графики, схемы, в том числе и заданные условием задачи, должны быть выполнены аккуратно и в удобочитаемом масштабе, в соответствии с действующими стандартами.

4. При построении кривых выбирать такой масштаб, чтобы на 1 см оси координат приходилось $1 \cdot 10^{\pm n}$ или $2 \cdot 10^{\pm n}$ единиц измерения физической величины, где n - целое число. Градуировку осей выполнять, начиная с нуля, равномерно через один или два сантиметра. Числовые значения координат точек, по которым строятся кривые, не приводить. Весь график в целом и отдельные кривые на нем должны иметь названия.

5. Общий план решения и все математические действия должны иметь достаточно полные пояснения.

6. Исходные формулы, промежуточные и окончательные результаты должны быть четко выделены из общего текста. В окончательных результатах для каждой величины должна быть указана размерность в соответствии с международной системой единиц СИ.

7. Работа должна быть датирована и подписана студентом.

8. Работа засчитывается, если решения не содержат ошибок и выполнены перечисленные требования.

9. Если работа выполнена неверно, она должна быть выполнена заново. Если неправильно выполнена часть задания, то все необходимые поправки делают на отдельных листах (сохраняя первоначальный вариант без изменения!).

2.2. Анализ цепей с индуктивно связанными элементами

2.2.1. Индуктивно связанные элементы

В том случае, когда изменение тока в одном из элементов цепи приводит к появлению электродвижущей силы (ЭДС) в другом элементе цепи, говорят, что эти два элемента **индуктивно связаны**, а возникающую ЭДС называют ЭДС **взаимной индукции**.

Рассмотрим электрическую цепь, изображенную на рис. 2. На рисунке схематично показана картина магнитного тока при наличии тока i_1 в первой катушке (направление силовых линий определяется по правилу буравчика). Витки первой катушки сцеплены с магнитным потоком самоиндукции \hat{O}_{L1} , а витки второй катушки – с магнитным потоком взаимной индукции \hat{O}_{M21} , который отличается от \hat{O}_{L1} ($\hat{O}_{M21} < \hat{O}_{L1}$).

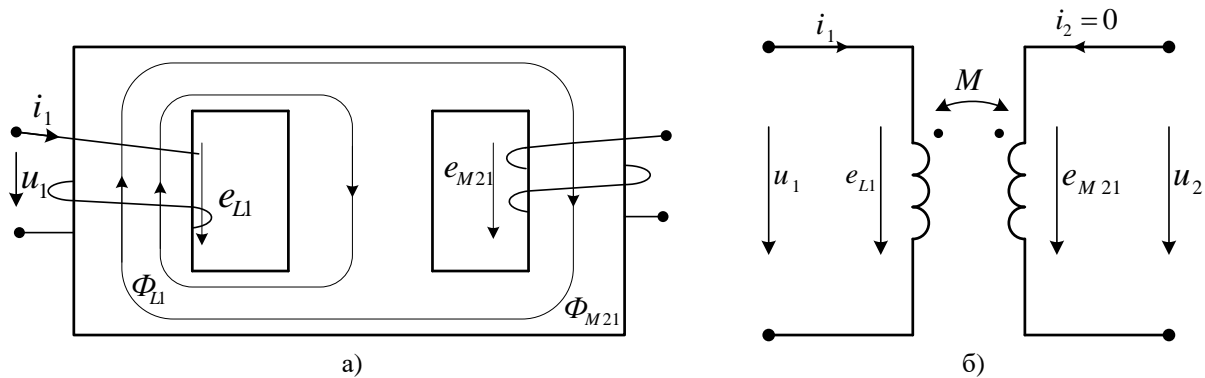


Рис. 2

Поток самоиндукции \hat{O}_{L1} образует потокосцепление самоиндукции $\psi_{L1} = L_1 \cdot i_1$, где L_1 - индуктивность первой катушки.

Поток взаимной индукции \hat{O}_{M21} образует потокосцепление взаимной индукции $\psi_{i_1 21} = \dot{I}_{21} \cdot i_1$, где \dot{I}_{21} - взаимная индуктивность катушек. При синусоидальном токе потокосцепление самоиндукции (ψ_{L1}) в соответствии с законом электромагнитной индукции индуцирует в первой катушке электродвижущую силу (ЭДС) самоиндукции $e_{L1} = -\frac{d\psi_{L1}}{dt}$. Напряжение на этой катушке (u_1) численно равно этой ЭДС, но имеет противоположный знак $u_1 = -e_{L1} = \frac{d\psi_{L1}}{dt} = L_1 \frac{di_1}{dt}$.

Потокосцепление взаимной индукции второй катушки, вызванное током первой катушки (ψ_{M21}), индуцирует во второй катушке ЭДС взаимной индукции

$$e_{M21} = -\frac{d\psi_{M21}}{dt} = -M_{21} \frac{di_1}{dt}.$$

Напряжение на этой катушке равно

$$u_1 = u_{M21} = -e_{M21} = M_{21} \frac{di_1}{dt}.$$

Аналогичные рассуждения можно привести и для случая, когда синусоидальный ток i_2 протекает только по второй катушке (рис.3).

Потокосцепление самоиндукции ψ_{L_2} второй катушки индуцирует в ней ЭДС самоиндукции $e_{L_2} = -\frac{d\psi_{L_2}}{dt} = L_2 \frac{di_2}{dt}$, где L_2 - индуктивность второй катушки. Напряжение на зажимах второй катушки равно $u_2 = L_2 \frac{di_2}{dt}$.

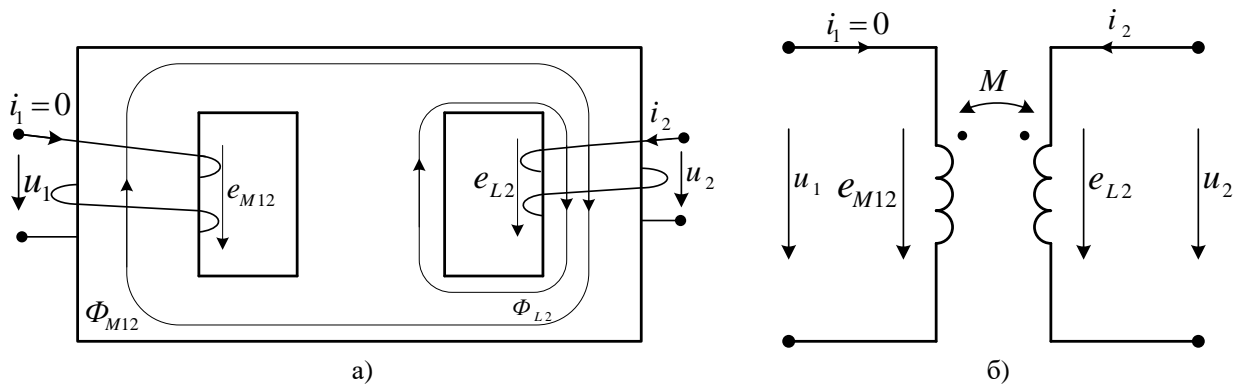


Рис.3

Потокосцепление взаимной индукции первой катушки, вызванное током второй катушки (ψ_{M12}), индуцирует в первой катушке ЭДС взаимной индукции

$$e_{M12} = -\frac{d\psi_{M12}}{dt} = -M_{12} \frac{di_2}{dt}.$$

Напряжение на зажимах первой катушки равно

$$u_1 = u_{M12} = -e_{M12} = M_{12} \frac{di_2}{dt}.$$

Согласно принципу взаимности

$$M_{21} = M_{12} = M.$$

Взаимная индуктивность является общим параметром катушек и не зависит от значений потоковсцеплений и токов, а определяется конфигурацией катушек их взаимным расположением и магнитными свойствами среды.

Пусть оба тока отличны от нуля (рис.4)

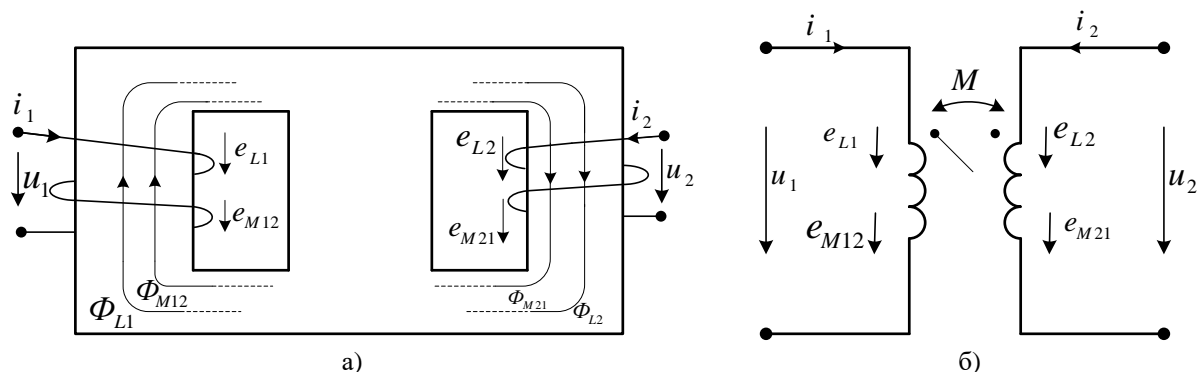


Рис.4

Потокасцепления индуктивно связанных катушек образуются магнитными потоками самоиндукции ($\hat{\phi}_L$) и взаимоиндукции ($\hat{\phi}_M$). В зависимости от направления токов в обмотке и пространственной

ориентации обмоток потоки само- и взаимной индукции \hat{O}_L и \hat{O}_M в каждой обмотке могут либо складываться, либо вычитаться. В магнитной цепи рис.4 эти потоки складываются, и для суммарных ЭДС, индуцированных в обеих обмотках, имеем

$$e_1 = -L_1 \frac{di_1}{dt} - M_{12} \frac{di_2}{dt}; \quad e_2 = -L_2 \frac{di_2}{dt} - M_{21} \frac{di_1}{dt}.$$

Для преодоления этих ЭДС необходимо приложить напряжения

$$u_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt}, \quad u_2 = L_2 \frac{di_2}{dt} + M_{21} \frac{di_1}{dt}.$$

При выборе другого направления тока в одной из катушек (рис.5)

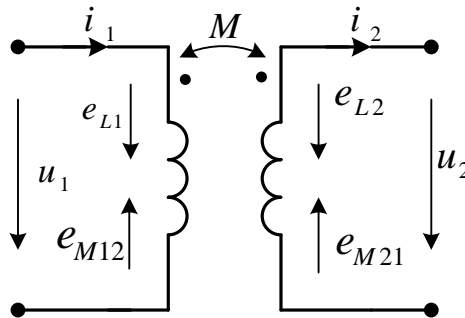


Рис.5

магнитные потоки самоиндукции и взаимной индукции будут вычитаться и для индуцированных в обмотках ЭДС, получаем:

$$e_1 = -L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt}; \quad e_2 = -L_2 \frac{di_2}{dt} + M_{21} \frac{di_1}{dt}.$$

Для преодоления этих ЭДС необходимо приложить напряжения

$$u_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} - M_{12} \frac{di_2}{dt}; \quad u_2 = L_2 \frac{di_2}{dt} - M_{12} \frac{di_1}{dt}.$$

Используемое на схемах электрических цепей условное графическое изображение катушек не отражает их пространственной ориентации. Поэтому информацию об относительном направлении потоков само- и взаимной индукции приходится задавать дополнительно.

При расчете электрических цепей маркируют один из зажимов каждой катушки жирной точкой (\bullet) (рис.1 – 5). Это означает, что если положительное направление тока в обмотке одной из катушек принято от точки, то и положительное направление и напряжения на преодолении этой ЭДС на зажимах другой катушки и ЭДС взаимной индукции также принимается от точки.

Маркировка зажимов катушек точками не предопределяет выбора положительных направлений токов в тех же катушках. Положительные направления токов можно выбирать произвольно.

Положительное направление напряжения на зажимах катушки принимается совпадающим с положительным направлением тока в данной катушке.

В отличие от собственной индуктивности L , которая всегда положительна, взаимная индуктивность M может быть положительной, отрицательной либо равной нулю.

Для двух связанных катушек маркировку зажимов точками всегда можно выполнить так, чтобы она соответствовала положительному значению M . Однако при трех и большем числе индуктивно связанных катушек потоки взаимной индукции, обусловленные отдельными катушками, могут иметь неодинаковые направления (рис.6а).

В этом случае нужно присвоить знак «минус» взаимным индуктивностям, обусловленным потоками взаимной индукции, направление которых противоположно направлению потока самоиндукции. Для схемы, изображенной на рис.6б для выбранных направлений токов имеем $M_{12} = M_{21} > 0$; $M_{23} = M_{32} > 0$; $M_{31} = M_{13} < 0$.

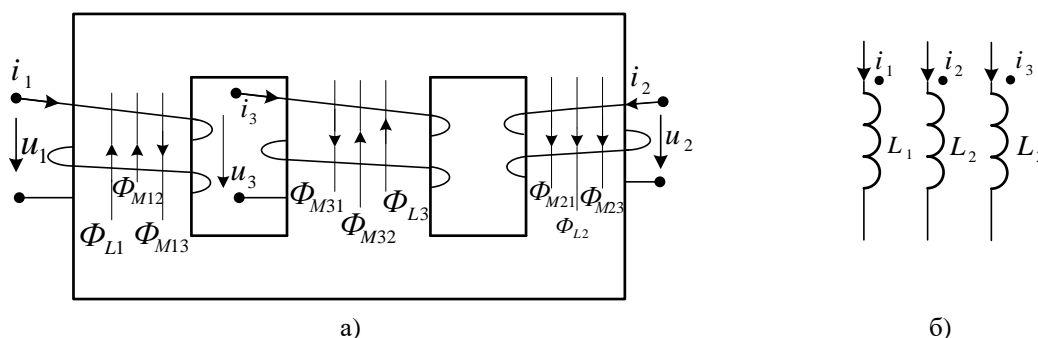


Рис.6

При записи уравнений электрического состояния (по законам Кирхгофа, контурных токов) будем пользоваться понятиями согласного и встречного включения катушек относительно токов. При этом действует правило: если токи ориентированы одинаково относительно помеченных точкой зажимов в одну сторону, то катушки включены согласным, а если в разные стороны – встречным.

При определении фактического «согласного» или «встречного» включения катушек нужно учитывать и знак взаимной индуктивности.

Практические вопросы расчета цепей с индуктивно связанными катушками рассмотрим на примере анализа схемы рис.7.

Параметры схемы:

$$e_1 = 100 \sin(\omega t + 45^\circ) \text{ В}; \quad e_2 = 100 \sin \omega t, \text{ В};$$

$$r_1 = 10 \hat{\Omega} \quad ; \quad r_2 = 5 \hat{\Omega} \quad ; \quad \tilde{N}_2 = 212 i \hat{e} \hat{O} \quad ;$$

$$L_1 = L_2 = 48 i \tilde{A} i \quad ; \quad L_3 = 31,8 i \tilde{A} i \quad ; \quad \dot{I}_{12} = 36 i \tilde{A} i \quad ; \quad \dot{I}_{13} = 24,4 i \tilde{A} i \quad .$$

Далее рассматриваются примеры составления уравнений для схемы рис.7. Катушки L_1 , L_2 и L_3 индуктивно связаны. Причем для данной системы точек: $M_{12} > 0, M_{13} > 0, M_{23} = 0$.

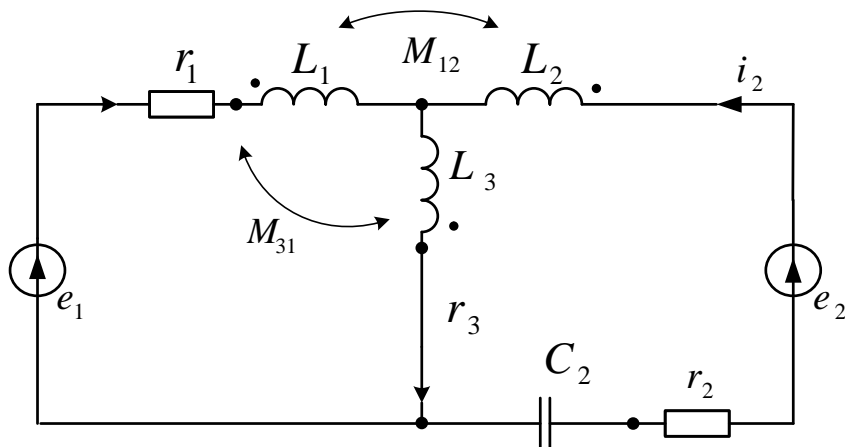


Рис.7

2.2.2. Составление уравнений по законам Кирхгофа

Комплексная схема замещения цепи представлена на рис.8

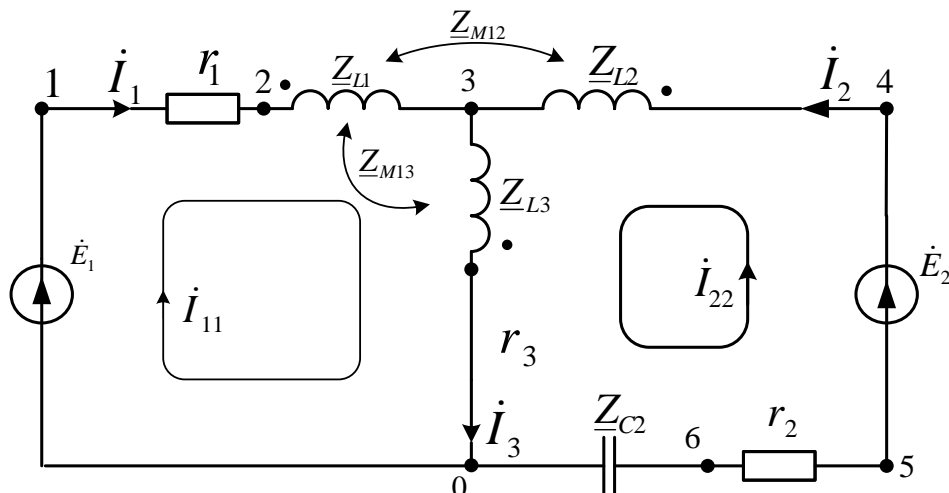


Рис.8

На схеме комплексные взаимноиндуктивные сопротивления равны:

$$\underline{Z}_{M12} = j\omega M_{12} \text{ и } \underline{Z}_{M23} = j\omega M_{13},$$

где M_{12} и M_{13} заданы с их знаками для системы точек, которые указаны на катушках.

Уравнения по законам Кирхгофа:

для узла 3:
$$-i_1 - i_2 + i_3 = 0;$$

для контура 12301:
$$\underline{Z}_1 i_1 + \underline{Z}_{M12} i_2 - \underline{Z}_{M13} i_3 + \underline{Z}_3 i_3 - \underline{Z}_{M31} i_1 = \dot{E}_1;$$

для контура 43054:
$$\underline{Z}_2 i_2 + \underline{Z}_{M21} i_1 + \underline{Z}_3 i_3 - \underline{Z}_{M31} i_1 = E_2.$$

Здесь $\underline{Z}_1 = r_1 + \underline{Z}_{L1}$; $\underline{Z}_2 = r_2 + \underline{Z}_{L2} + \underline{Z}_{C2}$; $\underline{Z}_3 = \underline{Z}_{L3}$.

В индуктивных катушках L_1 и L_2 , где имеет место явление взаимной индукции, токи направлены от точек, поэтому направление ЭДС самоиндукции и взаимной индукции на этих катушках совпадают, а следовательно, совпадают и направления соответствующих этим ЭДС падений напряжений. В индуктивно связанных катушках L_1 и L_3 токи направлены различно по отношению помеченных точкой зажимов, поэтому

направления ЭДС самоиндукции и взаимной индукции направлены встречно, а следовательно, направлены различно и направления соответствующих этим ЭДС напряжения.

Итак, при записи напряжений на катушках имеем, если токи на индуктивно связанных катушках ориентированы одинаково относительно зажимов, помеченных токами, то напряжение за счет взаимной индукции берется со знаком «плюс» и, если токи ориентированы различно относительно зажимов, помеченных точками, то напряжение за счет взаимной индукции нужно учесть со знаком «минус».

2.2.3. Составление уравнений по методу контурных токов

По методу контурных токов в общем виде уравнения записываются в аналогичной форме, как и при отсутствии взаимной индукции, но в выражения для собственных и общих сопротивлений контуров войдут добавочные члены, учитывающие явление взаимной индукции.

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{11} \dot{I}_{11} + \underline{Z}_{12} \dot{I}_{22} &= \dot{E}_{11} = \dot{E}_1, \\ \underline{Z}_{21} \dot{I}_{11} + \underline{Z}_{22} \dot{I}_{22} &= \dot{E}_{22} = \dot{E}_2. \end{aligned}$$

Для рассматриваемой цепи рис.8 имеем выражение собственных сопротивлений контуров:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{11} &= r_1 + j\omega L_1 + j\omega L_3 - 2j\omega M_{13}; \\ \underline{Z}_{22} &= r_2 - j\frac{1}{\omega C_2} + j\omega L_2 + j\omega L_3. \end{aligned}$$

В выражение \underline{Z}_{11} два раза входит член $-j\omega M_{13}$, так как контурный ток \dot{I}_{11} , проходя по катушке L_1 от точки, индуцирует ЭДС взаимной индукции в катушке L_3 , также направленную от точки и, следовательно, против направления обхода контура 1. Тот же ток \dot{I}_{11} , проходя по катушке L_3 к точке, индуцирует ЭДС взаимной индукции в катушке L_1 , направленную к точке катушки L_1 , а следовательно, опять против направления обхода контура. По этой причине напряжения, уравнивающие ЭДС самоиндукции, противоположны по знаку напряжению уравнивающему ЭДС взаимной индукции, что учитывается знаками членов $j\omega L_1$, $j\omega L_3$, $-2j\omega M_{13}$ в выражении для \underline{Z}_{11} .

Итак, если контуру схемы по которому проходит контурный ток, принадлежат индуктивно – связанные катушки, то в собственное сопротивление контура войдет дополнительное слагаемое, равное удвоенному значению взаимоиндуктивного сопротивления ($\pm 2j\omega M$). Дополнительное слагаемое берется со знаком «плюс», если контурный ток одинаково ориентирован относительно зажимов катушек, помеченных точками, и со знаком «минус», если контурный ток ориентирован различно относительно зажимов, помеченных точками.

Во втором контуре нет индуктивно связанных друг с другом катушек. Поэтому собственное сопротивление второго контура содержит только сопротивления ветвей этого контура.

Общее сопротивление контуров равно $Z_{12} = r_3 + j\omega L_3 + j\omega M_{12} - j\omega M_{13}$.

Слагаемое $j\omega M_{12}$ входит в общее сопротивление контуров Z_{12} со знаком «плюс», так как ЭДС взаимной индукции в катушке L_1 от тока \dot{I}_{22} , направленного от точки в катушке L_2 , направлена от точки в катушке L_1 , а следовательно согласно с направлением контурного тока \dot{I}_{11} (направление обхода контура 1).

Слагаемое $j\omega M_{13}$ входит в общее сопротивление контуров Z_{12} со знаком «минус», так как ЭДС взаимной индукции в катушке L_1 от тока \dot{I}_{22} , направленного к точке в катушке L_3 , направлена также к точке в катушке L_1 , а следовательно и против направления обхода контура 1.

Итак, если контурам с различными контурными токами принадлежат индуктивно-связанные катушки, то в общее сопротивление контуров войдет дополнительное слагаемое, равное взаимоиндуктивному сопротивлению ($\pm j\omega M$). Дополнительное слагаемое берется со знаком «плюс», если контурные токи ориентированы одинаково относительно зажимов катушек, помеченных точкой, и со знаком «минус», если контурные токи ориентированы различно относительно зажимов катушек, помеченных точками.

Для заданных параметров схемы уравнения относительно контурных токов имеют вид:

$$\begin{aligned}(10 + j4,7)\dot{I}_{11} + j13,6\dot{I}_{22} &= 50,7 + j50,7; \\ j13,6\dot{I}_{11} + (5 + j5)\dot{I}_{22} &= 100,\end{aligned}$$

а контурные токи: $\dot{I}_{11} = -1,9 + j2,3A$; $\dot{I}_{22} = 4,2 - j7,3A$.

2.2.4. Определение напряжений и токов на элементах схемы

Токи в ветвях определяются через контурные токи: $\dot{I}_1 = \dot{I}_{11}$; $\dot{I}_2 = \dot{I}_{22}$; $\dot{I}_3 = \dot{I}_{11} + \dot{I}_{22}$.

Напряжение на активных сопротивлениях и емкостях определяются по закону Ома в комплексной форме.

При определении напряжений на катушках, индуктивно связанных с другими катушками, нужно учесть и падение напряжения за счет взаимоиндукции. Например, комплекс напряжения на первой катушке схемы рис.8 равен

$$\dot{U}_{23} = j\omega L_1 \dot{I}_1 + j\omega M_{12} \dot{I}_2 - j\omega M_{13} \dot{I}_3.$$

Подставив значения величин, получим:

$$\dot{U}_{23} = j_{10}(-1,9 + j2,3) + j11,3(4,2 - j7,3) - j7,6(2,3 - j5,1) = 21,5 + j10,8$$

$$\dot{U}_{23} = 24e^{j26,7^\circ}, B; U_{23} = 24B.$$

$$u_{23}(t) = 33,9 \sin(\omega t + 26,7^0) \text{ В.}$$

2.2.5. Составление баланса мощностей

При составлении баланса рассчитывают активные и реактивные мощности источников $\Sigma \bar{S}_{uk} = \Sigma \dot{A}_k I_k^* = \Sigma P_{uk} + j \Sigma Q_{uk}$.

Рассчитывают активные и реактивные мощности отдельных ветвей и цепи в целом:

$$\tilde{S}_k = \dot{U}_k I_k^* = \dot{D}_k + j Q_k; \quad \dot{D} = \Sigma \dot{D}_k; \quad Q = \Sigma Q_k.$$

Должен выполняться баланс мощностей, то есть

$$\Sigma P_{uk} = \Sigma P_k \text{ и } \Sigma Q_{uk} = \Sigma Q_k.$$

Для исследования явления передачи энергии между катушками необходимо рассчитать активные мощности катушек, обусловленные взаимной индукцией. Например, для первой катушки:

$$P_{M12} = \text{Re}[\dot{U}_{M12} I_1^*] = \text{Re}[j \omega M_{12} \dot{I}_2 I_1^*] = \omega M_{12} I_1 \sin(\psi_{i1} - \psi_{i2});$$

$$P_{M13} = \text{Re}[\dot{U}_{M13} I_1^*] = \text{Re}[-j \omega M_{13} \dot{I}_3 I_1^*] = \omega M_{13} I_1 \sin(\psi_{i3} - \psi_{i1}).$$

По результатам расчета активных мощностей необходимо сделать анализ явления передачи активной мощности между индуктивно связанными элементами.

Например, для первой ветви имеем:

$$P_{r1} = r_1 I_1^2 = 10 \cdot 2,95^2 = 87 \hat{A} \hat{\Delta};$$

$$P_1 = \text{Re}[\dot{U}_{13} \cdot I_1^*] = \text{Re}[(21,5 + j10,8)(-1,9 - j2,3)] = 70,8 \hat{A} \hat{\Delta};$$

$$P_{M12} = \text{Re}[j \omega M_{12} \dot{I}_2 \cdot I_1^*] = \text{Re}[j11,3(4,2 - j7,3)(-1,9 - j2,3)] = -50,2 \hat{A} \hat{\Delta};$$

$$P_{M13} = \text{Re}[-j \omega M_{13} \dot{I}_3 \cdot I_1^*] = \text{Re}[-j7,6(2,3 - j5,0)(-1,9 - j2,3)] = 34 \hat{A} \hat{\Delta}.$$

На активном сопротивлении r_1 мощность равна $87 \hat{A} \hat{\Delta}$. В первую ветвь за счет электромагнитной индукции поступает из второй катушки $50,2 \hat{A} \hat{\Delta}$ и дается из первой ветви в третью ветвь $34 \hat{A} \hat{\Delta}$. Активная мощность первой ветви равна $70,8 \hat{A} \hat{\Delta}$.

2.2.6. Векторные и топографические диаграммы

Совокупность радиус-векторов, изображающих синусоидально изменяющиеся ЭДС, напряжения, токи и т.д., называется **векторной диаграммой**.

Для наглядного определения величины и фазы напряжения между различными узлами электрической цепи удобно использовать **топографические диаграммы**. Они представляют собой соединенные соответственно схеме электрической цепи точки на комплексной плоскости,

отображающие их потенциалы. На топографической диаграмме, представляющей собой в принципе **векторную диаграмму напряжений**, порядок расположения векторов напряжений строго соответствует порядку расположения элементов в схеме, а вектор падения напряжения на каждом последующем элементе примыкает к концу вектора напряжения на каждом предыдущем элементе.

При построении векторной диаграммы нужно задаться масштабами токов и напряжений.

Построение векторной диаграммы токов осуществляется непосредственно на основании известных значений их комплексов.

При построении топографической диаграммы рассчитывают комплексные потенциалы (узловые напряжения) узлов схемы относительно базисного узла. Расчет заключается в последовательном суммировании комплексов напряжений на элементах цепи вдоль рассматриваемого контура. Обход контуров можно производить в любом направлении.

Следует помнить, что векторы напряжений ориентированы относительно точек топографической диаграммы противоположно положительным направлениям напряжений относительно соответствующих точек электрической цепи.

Все векторы напряжений на топографической диаграмме должны быть подписаны. Напряжения на индуктивно связанных катушках должны быть представлены суммой всех составляющих, т.е., напряжений на преодолении как ЭДС самоиндукции, так и ЭДС взаимной индукции.

Векторная диаграмма токов и топографическая диаграмма для внешнего контура (обход против часовой стрелки) схемы рис.8 представлены на рис.9.

Пример расчета потенциалов.

...

$$\dot{U}_3 = \dot{U}_a - \underline{Z}_{M21} \cdot \dot{I}_1 = 68 + j37,3B$$

$$\dot{U}_b = \dot{U}_3 + \underline{Z}_{M12} \cdot \dot{I}_2 = 68 + j37,3 + j11,3(4,2 - j7,3) = 151,2 + j84B$$

$$\dot{U}_c = \dot{U}_b - \underline{Z}_{M13} \cdot \dot{I}_3 = 151,2 + j84 - j7,6(2,3 - j5,1) = 112 + j67B$$

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_c + \underline{Z}_{L1} \dot{I}_1 = 112 + j67 + j10(-1,9 + j2,3) = 89,6 + j48,1B$$

...

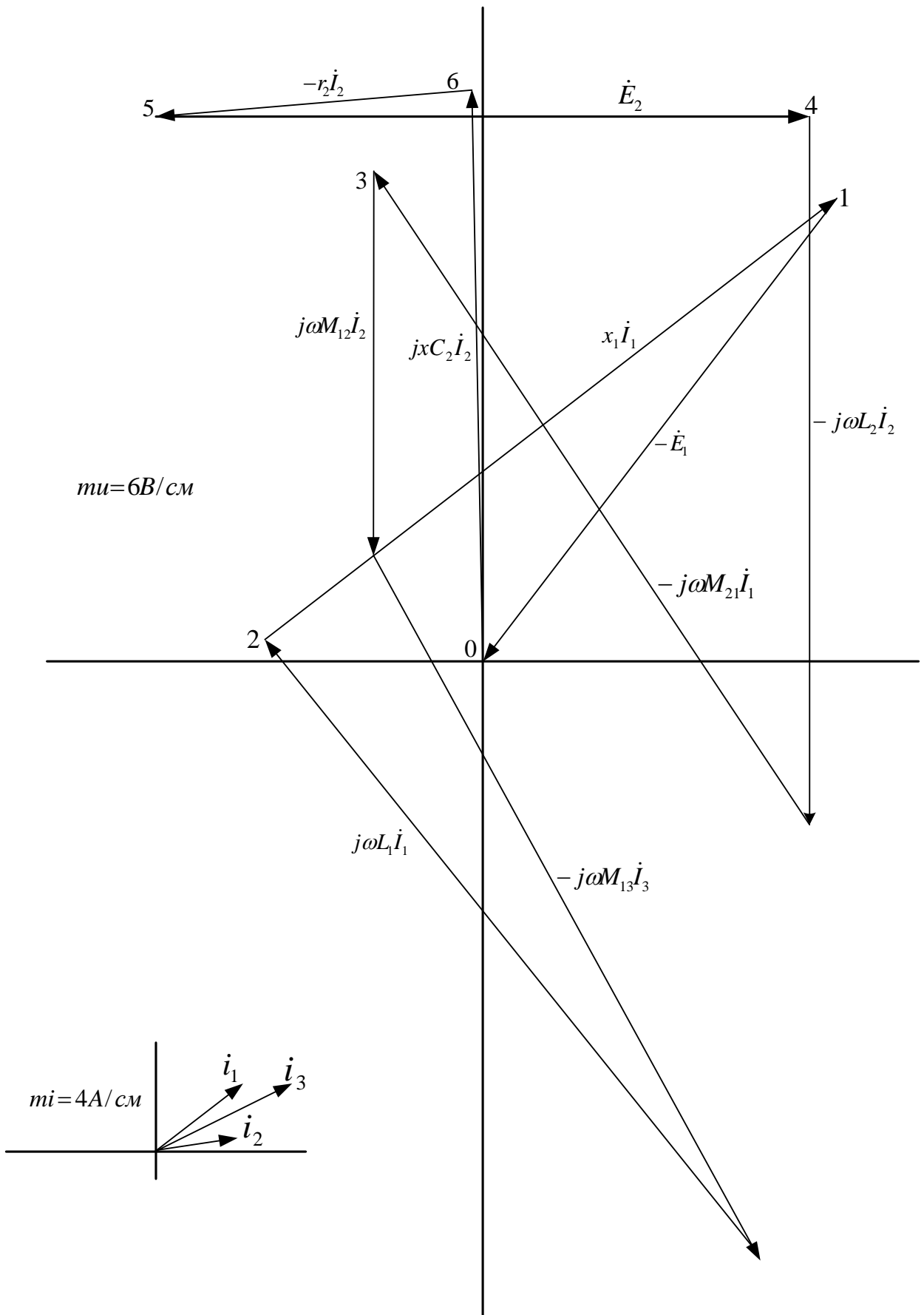


Рис.9

Литература

1. Теоретические основы электротехники: в 3-х томах. Учебник для ВУЗов. Том 1.-4-е изд./К.С. Демирчян, Л.Р.Нейман, Н.В.Коровкин, В.Л.Чечурин. –СПб:Питер, 2003.

Бандурин Иван Иванович
Солнышкин Николай Иванович

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Анализ цепей с индуктивно связанными элементами
методические указания к выполнению самостоятельной работы
(для студентов всех специальностей и всех форм обучения
электромеханического факультета)

Редакторы: Бандурин И.И., Солнышкин Н.И.

Компьютерная верстка: А.Б.Шпакова