

НЕРАЗВЕТВЛЕННАЯ ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Цель работы

Исследование неразветвленной цепи переменного тока и наблюдение резонанса напряжений.

Подготовка к работе

Ток в активном сопротивлении совпадает по фазе с приложенным к этому сопротивлению напряжением (рис. 4-Ia), угол сдвига фаз между векторами тока и напряжением равен нулю. Согласно закону Ома,

$$I = \frac{U}{Z}.$$

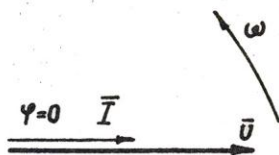
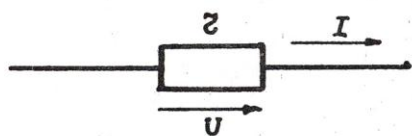
Ток в индуктивной катушке, активное сопротивление которой ничтожно мало ($r = 0$), отстает от напряжения на четверть периода (рис. 4-Iб), угол $\varphi = +\frac{\pi}{2}$ и в этом случае

$$I = \frac{U}{x_L},$$

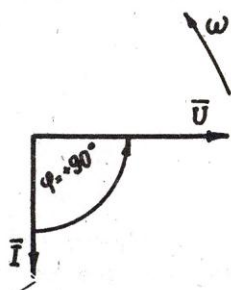
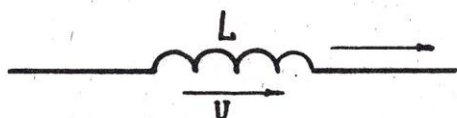
где x_L — индуктивное сопротивление, зависящее от индуктивности катушки L и частоты переменного тока f

$$x_L = \omega L = 2\pi fL.$$

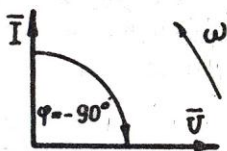
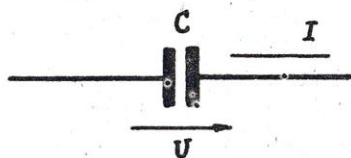
Ток в конденсаторе опережает приложенное напряжение на четверть периода (рис. 4-Iв), угол $\varphi = -90^\circ$, и по закону Ома



a)



б)



в)

Рис. 4-1

$$I = \frac{U}{x_c},$$

где x_c — емкостное сопротивление, зависящее от емкости конденсатора и частоты переменного тока f ,

$$x_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}.$$

Если последовательная электрическая цепь содержит сопротивления всех трех видов (рис. 4-2), то закон Ома для цепи переменного тока в общей форме имеет вид

$$I = \frac{U}{Z},$$

где Z — полное сопротивление цепи переменного тока,

$$Z = \sqrt{(\sum z)^2 + x^2}.$$

Здесь $x = \sum x_L - \sum x_C$ — реактивное сопротивление цепи, причем в случае преобладания емкостного сопротивления, т.е. когда

$\sum x_C > \sum x_L$ реактивное сопротивление имеет знак (-)
 $\sum z = z_k + z_l$ — алгебраическая сумма активных сопротивлений.

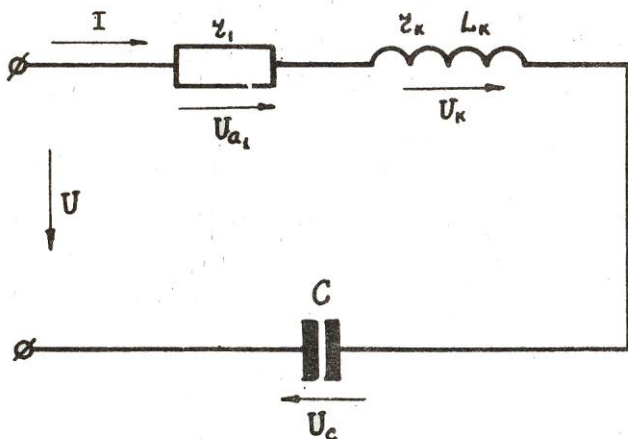
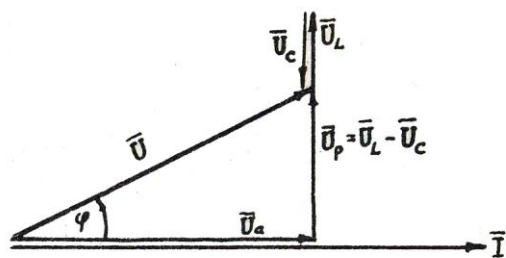
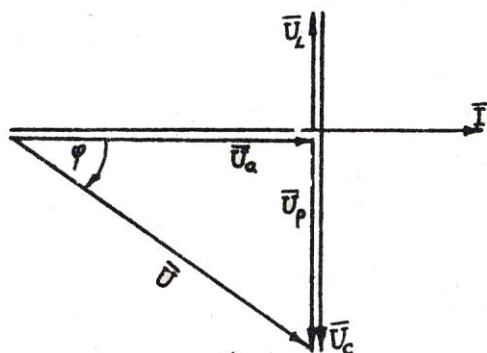


Рис. 4-2

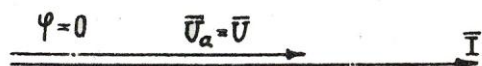
На рис. 4-3а приведена векторная диаграмма для схемы рис. 4-2 в случае преобладания индуктивного сопротивления ($x_L > x_C$); на рис. 4-3б — в случае преобладания емкостного сопротивления ($x_C > x_L$) и на рис. 4-3в — в случае равенства индуктивного и емкостного сопротивлений ($x_L = x_C$).



a)



b)



b)

Рис. 4-3

Напряжение $U_a = \sum zI = (z_1 + z_k) \cdot I$ представляет собой активную составляющую напряжения U , приложенного ко всей неразветвленной цепи.

Напряжение $U_k = x_k I$ представляет собой индуктивную, а напряжение $U_c = x_c I$ — емкостную составляющую напряжения U .
Напряжение $U_p = U_k - U_c$ представляет собой разность индуктивной и емкостной составляющих:

$$U_p = (x_k - x_c) \cdot I = xI.$$

Напряжение U , приложенное ко всей неразветвленной цепи, равно геометрической сумме составляющих напряжений U_a, U_k и U_c .

Из треугольника, образованного векторами напряжений (рис. 4-3а), может быть получен треугольник сопротивлений (рис. 4-4), если стороны U, U_a и U_p разделить на величину тока I . Гипотенуза треугольника сопротивлений в определенном масштабе равна полному сопротивлению Z , а катеты — активному сопротивлению z и реактивному сопротивлению x .

В общем случае косинус φ сдвига фаз между векторами тока и напряжения может быть найден по формуле

$$\cos \varphi = \frac{\sum z}{Z} = \frac{\sum z}{\sqrt{(\sum z^2) + x^2}}.$$

Поскольку в выражение для x входит частота f , то угол сдвига фаз зависит не только от параметров z, k и C электрической цепи, но и от частоты переменного тока.

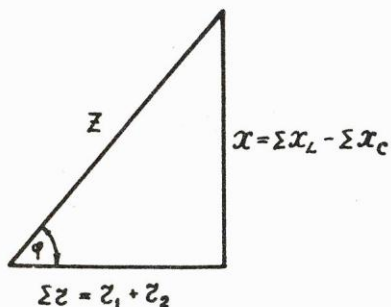


Рис. 4-4

Построение векторной диаграммы для неразветвленной цепи обычно начинают с вектора тока I , так как ток является общим для всех элементов (сопротивлений), а затем откладывают векторы напряжений, ориентируя их по направлению относительно вектора тока.

Подбирая индуктивности L катушек и емкости C конденсаторов или изменяя частоту f переменного тока, можно добиться численного равенства результирующих индуктивного $\sum x_L$ и емкостного $\sum x_C$ сопротивлений электрической цепи; при этом реактивное сопротивление x окажется равным нулю, полное сопротивление Z будет минимальным и равным активному сопротивлению $\sum z$, а ток I

достигает своего максимального значения. Угол φ в этом случае будет равен нулю, а ток I и напряжение U на входе схемы будут совпадать по фазе. Такой режим работы электрической цепи, содержащей все три вида приемников электрической энергии r, L, C , когда вектор тока и напряжения совпадают по фазе ($\varphi = 0$), называется резонансом. При последовательном соединении r, L, C резонанс наступает при $x_L = x_C$, т.е. $U_L = U_C$ ($U_r = 0$), поэтому такой режим называется резонансом напряжений.

Поскольку $x_L = x_C$ могут превышать во много раз активное сопротивление r цепи, то напряжение на реактивных элементах L и C может в неограниченное число раз превышать напряжение U , приложенное к схеме. Из этого следует, что резонансный режим может быть опасным как для изоляции электроустановок, так и для обслуживающего персонала.

Описание установки

Испытательная установка (рис. 4-5) состоит из резистора r , с активным сопротивлением, индуктивной катушки L , x_L и конденсатора C , соединенных последовательно. Источник электрической энергии — сеть однофазного переменного тока напряжением 127 В.

Положение стального сердечника в индуктивной катушке может плавно изменяться, он может быть полностью вставлен или же вовсе удален; при этом изменяется индуктивность L соответственно от L_{\max} до L_{\min} и, следовательно, изменяется индуктивное сопротивление x_L катушки. При отсутствии сердечника имеем $x_{L_{\min}}$, а при полностью вставленном сердечнике — $x_{L_{\max}}$. Изменение положения сердечника в катушке влечет за собой также изменение и величины r_k — эквивалентного активного сопротивления катушки, поскольку оно определяется не только сопротивлением проводов, из которого сделана сама катушка, но также и активной мощностью (количество тепла), расходуемой на нагрев стального сердечника.

Пределы изменения индуктивности катушки ($L_{\max} \div L_{\min}$) в сочетании с емкостью C конденсатора подобраны так, что условие резонанса напряжений ($x_L = x_C$) наступает при некотором среднем положении сердечника в катушке. При отсутствии сердечника в цепи преобладает емкостное сопротивление, при полностью вставленном сердечнике — индуктивное.

Порядок выполнения работы

1. Собрать рабочую схему согласно рис. 4-5 и включить автомат.
2. Определить по амперметру положение сердечника катушки, соответствующее резонансу напряжений (по максимальному значению тока).

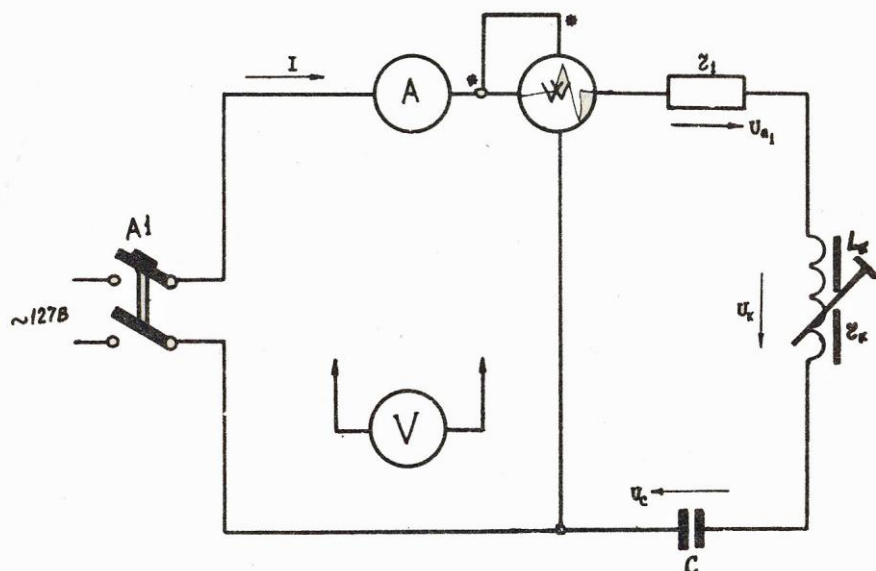


Рис. 4-5

3. Вынуть сердечник и записать показания приборов (опыт № 1), далее, постепенно вводя сердечник, записать показания еще для двух опытов до резонанса; сделать опыт при резонансе и, продолжая вдвигать сердечник - 3 опыта после резонанса.

Три опыта после резонанса следует проводить при дальнейшем введении сердечника и значениях тока, соответствующих опытам до резонанса. (Пример: до резонанса - 1,2А, 1,4А, 1,6А, резонанс; после резонанса - 1,6А, 1,4А, 1,2А). Показания приборов при каждом опыте записывать в табл. 6, в которой U_{a1} - падение напряжения на резисторе r , U_k - падение напряжения на индуктивной катушке, U_c - падение напряжения на конденсаторе, U - напряжение сети.

Составление отчета

I. По результатам наблюдений вычислить все величины, входящие в табл. 4-I, по формулам:

Таблица 4-1

№ опыта	Измерено							Вычислено												
	U, В	P, Вт	I, А	U _a , В	U _к , В	U _c , В	f, Гц	вся цепь					резистор	индуктивная катушка			конденсатор			
								Z, Ом	ΣZ, Ом	X, Ом	Cos φ	U _a , В		U _к , В	U _c , В	Z _L , Ом	X _L , Ом	X _C , Ом	L, мГн	X _C , Ом

$$\begin{aligned}
 Z &= \frac{U}{I}; \quad \Sigma Z = \frac{P}{I^2}; & z_1 &= \frac{U_a}{I}; \\
 z_k &= \Sigma Z - z_1; \quad Z_k = \frac{U_k}{I}; & x_c &= \frac{U_c}{I}; \\
 x_k &= \sqrt{Z_k^2 - z_k^2}; \quad x = x_k - x_c; \\
 U_a &= \Sigma Z \cdot I; \quad U_k = x_k \cdot I; \quad U_p = xI; \\
 \cos \varphi &= \frac{P}{UI}; \quad L = \frac{x_k \cdot 10^3}{2\pi f}; \\
 C &= \frac{10^6}{2\pi f x_c}.
 \end{aligned}$$

2. Построить на одном графике кривые зависимости тока I , полного сопротивления Z , емкостной составляющей U_c напряжения и коэффициента мощности $\cos \varphi$ цепи, от величины реактивного сопротивления x . На абсциссе отметить точку, соответствующую опыту резонанса напряжений (рис. 4-6).

3. Построить три векторные диаграммы: для одного из трех опытов до резонанса, для опыта при резонансе и для одного из трех опытов после резонанса. Указать номер опытов.

На каждой из трех диаграмм должны быть изображены: ток, напряжения на каждом элементе схемы и напряжение, приложенное к схеме, которое следует разложить на составляющие - активную и реактивную; показать емкостную и индуктивную составляющие.

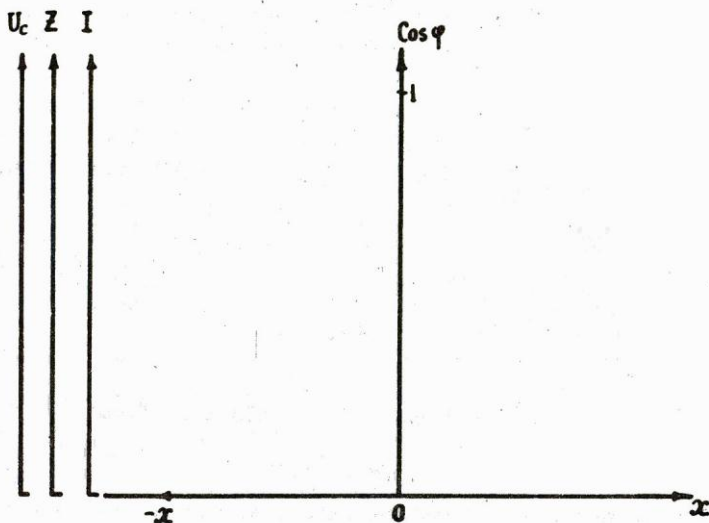


Рис. 4-6

4. Указать, как было установлено наличие резонанса напряжений при исследовании неразветвленной цепи.

5. Оценить сходимость определения напряжения сети двумя способами: измеренное вольтметром и графически, по векторным диаграммам. Вычислить относительную погрешность, принимая напряжение, измеренное вольтметром, за точное.

Контрольные вопросы

1. Какое явление в электротехнике называют резонансом?
2. В каких цепях и при каком условии возникает резонанс напряжений?
3. Какими методами можно получить резонанс напряжений в неразветвленной цепи, содержащей три вида приемников электрической энергии (r , L , C)? Ответ, иллюстрируйте математическими зависимостями.
4. Как зависят величины реактивных сопротивлений от частоты сети?
5. Почему в момент резонанса напряжение на реактивных сопротивлениях может превышать напряжение сети?

6. По какому признаку была найдена точка резонанса в испытательной установке? Докажите правильность такого метода.

7. Что произойдет при включении испытательной установки в цепь постоянного тока?

8. Построить векторные диаграммы для различных режимов работы испытательной установки ($x_L > x_c$; $x_L = x_c$; $x_L < x_c$).

9. Как определяются предел измерения и цена деления ваттметра?