

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЁВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСА ТОКОВ

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве методических указаний к лабораторной работе № 6*

Самара
Издательство СГАУ
2012

УДК 621.3(075)
ББК 31.2

Рецензент В. А. Глазунов

Составитель *С.А. Борминский*

Исследование резонанса токов: метод. указания к лабораторной работе №6 / сост. *С.А. Борминский*. – Самара: Изд-во СГАУ, 2012. – 16 с.

Рассматривается явление резонанса токов в электрических цепях, студентам предлагается провести основные измерения и на их основании провести расчеты элементов и режимов работы электрической цепи.

Методические указания к лабораторной работе 6 являются составной частью цикла лабораторных работ по курсу "Электротехника".

Методические указания предназначены для студентов высших учебных заведений.

Цель работы: изучение условий возникновения резонанса токов в электрических цепях; исследование изменения величины токов и сдвига по фазе между током и напряжением на участках цепи в зависимости от их параметров; расчет компенсации сдвига фаз.

Основные теоретические положения

Резонансом токов в цепи с параллельно соединенными индуктивностью и ёмкостью называется режим, при котором ток в неразветвленном участке цепи и напряжение, приложенное к этой цепи, совпадают по фазе.

Следовательно, при резонансе токов в неразветвлённом участке цепи протекает только активный ток и $\cos \varphi$ равен 1.

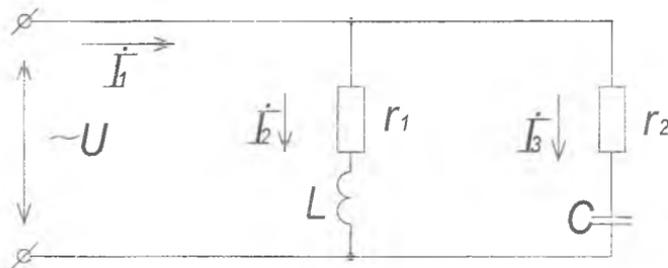


Рис. 1. Параллельная цепь

Рассмотрим общую схему параллельного соединения индуктивности и ёмкости (рис. 1). Как видно из рисунка, первая ветвь имеет активное сопротивление r_1 и индуктивность L , вторая – активное сопротивление r_2 и ёмкость C .

На основании правил преобразования схемы сопротивлений в эквивалентную цепь проводимостей можно рассчитать проводимости ветвей:

$$\text{активную } g = \frac{r}{z^2} = \frac{r}{r^2 + x^2};$$

реактивную $b = \frac{x}{z^2} = \frac{x}{r^2 + x^2}$.

Токи, протекающие в ветвях, будут иметь составляющие:

активные: $\dot{I}_{g1} = \dot{U} \cdot g_1 = \dot{U} \frac{r_1}{r_1^2 + x_L^2}$, $\dot{I}_{g2} = \dot{U} \cdot g_2 = \dot{U} \frac{r_2}{r_2^2 + x_C^2}$;

реактивные: $\dot{I}_L = \dot{U} \cdot j \cdot b_L = \dot{U} j \frac{x_L}{r_1^2 + x_L^2}$,

$\dot{I}_C = \dot{U} \cdot (-j \cdot b_C) = -\dot{U} j \frac{x_C}{r_2^2 + x_C^2}$.

Резонанс токов в параллельной цепи наступает при равенстве абсолютных значений индуктивной и ёмкостной реактивных составляющих, взаимно противоположных по фазе, обуславливающих колебательных процесс обмена во времени реактивной энергией между индуктивностью и ёмкостью.

При резонансе в неразветвлённой части цепи протекает минимальный ток, равный сумме только активных составляющих токов ветвей: $\dot{I}_1 = \dot{U}[(g_1 + g_2) + j(b_L - b_C)] = \dot{U}(g_1 + g_2)$.

Следовательно, условие наступления резонанса токов является равенство индуктивной и ёмкостной реактивных проводимостей: $b_C = b_L$, т.е. $\frac{x_L}{r_1^2 + x_L^2} = \frac{x_C}{r_2^2 + x_C^2}$ или

$$\frac{\omega_0 L}{r_1^2 + \omega_0^2 L^2} = \frac{1}{r_2^2 + \frac{1}{\omega_0^2 C^2}},$$

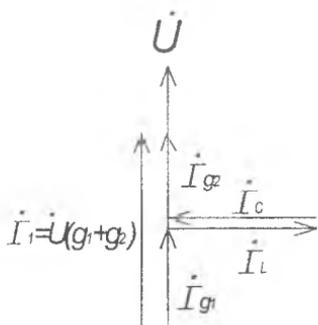
откуда может быть вычислена резонансная

частота, при которой устанавливается режим резонанс токов:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{r_1^2 - \frac{L}{C}}{r_2^2 - \frac{L}{C}}}.$$

Режим резонансов иллюстрируется векторной диаграммой (рис. 2). При построении диаграммы за исходный принимается вектор напряжения, который является общим для обеих параллельных ветвей. Ток первой ветви I_2 отстает от вектора напряжения на угол φ_1 , что обусловлено влиянием индуктивности этой ветви; ток второй ветви I_3 опережает вектор напряжения на угол φ_2 , что связано с наличием ёмкости, включенной в ветвь.

Сумма \dot{I}_{g1} и \dot{I}_{g2} векторов токов при резонансе показывает, что равные по величине, но противоположные по направлению реактивные составляющие токов \dot{I}_L и \dot{I}_C уравновешены, поэтому ток в цепи равен сумме активных составляющих и совпадает по направлению с напряжением, т.е. результирующий угол φ равен 0.



Если цепь состоит из идеальных индуктивности и ёмкости, не имеющих активных потерь энергии (рис. 3), то токи в ветвях будут смещены относительно напряжения точно на 90° . В контуре L, C возникнет колебательный процесс с собственной частотой колебаний $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$. Ток в неразветвлённой части цепи при этом будет равен 0.

Рис. 2. Векторная диаграмма параллельной цепи для режима резонанса токов

Контур с малыми активными потерями используются в технике для создания высокочастотных генераторов переменного тока.

Резонансный контур характеризуется не только резонансной частотой ω_0 , но и добротностью Q (или затуханием $d = \frac{1}{Q}$), волновым сопротивлением ρ . Добротность контура - это отношение $Q = \frac{\rho}{r}$, где r - активное сопротивление.

Волновое сопротивление представляет собой реактивное сопротивление индуктивности или ёмкости контура на резонансной частоте:

$$\rho = x_{0L} = x_{0C} = \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Компенсация сдвига фаз

Если параметры ветвей не соответствуют, условию резонанса, то результирующий угол φ не равен нулю и ток в неразветвлённой части цепи имеет реактивную составляющую, равную разности реактивных составляющих токов ветвей. Полное значение тока питающей сети будет больше, чем при резонансе, поэтому режим резонанса токов в нагрузке чрезвычайно выгоден для питающей энергосистемы, т.к. разгружает её от передачи реактивных токов.

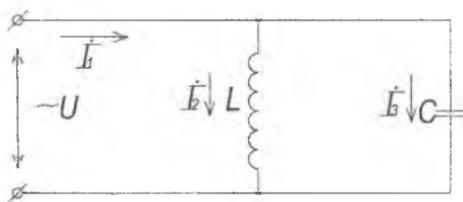


Рис. 3. Идеальный контур

Поскольку большинство распространённых в технике нагрузочных устройств (энергетические двигатели, индукционные нагреватели и прочее) имеют индуктивный характер и потребляют из питающей сети значительный реактивный (индуктивный) ток, то повысить коэффициент

мощности и улучшить условия работы энергосистемы можно путём подключения к сети конденсаторов параллельно устройствам потребителя (рис. 4). Для конденсаторов характерны сравнительно малые потери активной энергии, поэтому ток, протекавший через конденсатор, можно считать чисто реактивным, опережающим напряжение на угол 90° . Из векторной диаграммы (рис. 5) видно, что, рассчитывая соответствующим образом величину тока \dot{I}_C , проходящего через конденсаторы, можно значительно снизить величину результирующего угла φ и тока \dot{I}_1 , создав режим резонанса тока.

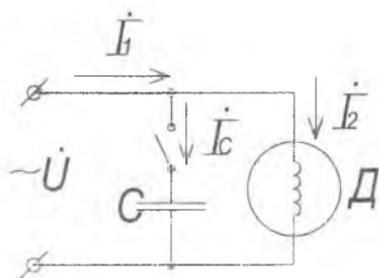


Рис. 4. Векторная диаграмма компенсации сдвига фаз

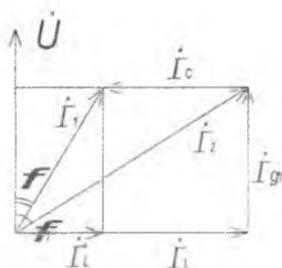


Рис. 5. Векторная диаграмма компенсации сдвига фаз

Векторная диаграмма позволяет рассчитать ёмкость C

компенсационных батарей:

$$I_C = U\omega C = I_L - I'_L = I_{g1} \operatorname{tg} \varphi_1 -$$

$$-I_{g1} \operatorname{tg} \varphi = \frac{P}{U} (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi);$$

$$C = \frac{P}{U^2 \omega} (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi).$$

Для энергосистемы наиболее выгодным является режим резонанса токов потребителя, т.е. работы сети с $\cos \varphi = 1$. Но с целью ограничения размеров и стоимости компенсационных батарей степень компенсации коэффициента мощности обычно

доводят только до 0,9-0,95 (для промышленных предприятий установлена норма коэффициента мощности, равная 0,9).

Реактивная мощность всей установки, потребляемая из сети

$$Q = UI_1 \sin \varphi = Q_L + Q_C,$$

$$\text{где } Q_L = UI_2 \sin \varphi_2 \text{ и } Q_C = UI_C \sin(-90^\circ) = -UI_C.$$

В результате $Q = UI_1 \sin \varphi = UI_2 \sin \varphi_2 - UI_C$, т.е. потребляемая от сети мощность равна разности абсолютных величин реактивных мощностей приёмника и конденсаторной компенсационной батареи.

Схема установки и порядок выполнения работы:

1. Исследовать схему по рисунку 6, записать технические данные приборов.

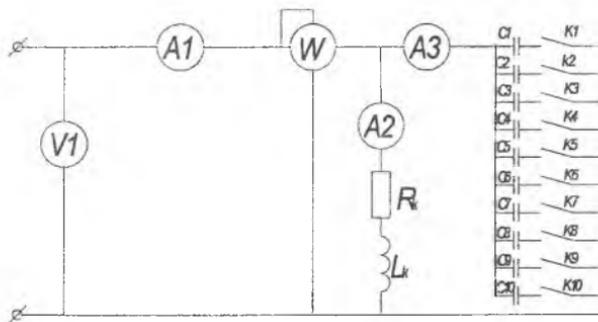


Рис. 6. Схема экспериментальной установки

2. Изменяя ёмкость, произвести не менее 5 отсчётов показаний приборов при уменьшении и увеличении тока в неразветвлённой части цепи.

Измерить величины, указанные в таблице 1: токов, мощности и напряжения. Резонанс токов определить по минимальному значению тока I_1 . Результаты измерений записать в табл. 1.

Таблица 1

| № | Измеряемые величины | I_1 | I_2 | I_3 | U | P | C |
|---|---------------------|-------|-------|-------|-------|----|-----|
| | Прибор | A_1 | A_2 | A_3 | V_1 | W | |
| | Размерность | mA | mA | mA | B | Bт | мкФ |
| 1 | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | |

3. Произвести измерения при полностью отключенных конденсаторах и вычислить коэффициент мощности активно – индуктивной ветви. Рассчитать ёмкости, необходимые для повышения коэффициента мощности до значения 0,9 и 0,95. Установив рассчитанные значения ёмкостей, выполнить поверочный расчёт $\cos \varphi$.

4. Рассчитать для активно - индуктивной цепи параметры катушки: активное сопротивление r_k , полное сопротивление Z_k , реактивное сопротивление x_k , активную проводимость g_k , полную проводимость y_k , реактивную проводимость b_k , $\cos \varphi_k$, добротность Q . Результаты вычислений записать в табл. 2.

Таблица 2

| № | Выч вел. | $r_k = \frac{P}{I_2^2}$ | $x_k = \frac{U}{I_2}$ | $x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}$ | $g_k = \frac{P}{U^2}$ | $y_k = \frac{I_2}{U}$ | $b_k = \sqrt{y_k^2 - g_k^2}$ | $\cos \varphi_1 = \frac{r_k}{z_k}$ | $Q = \frac{x_k}{r_k} = \frac{b_k}{g_k}$ |
|---|----------|-------------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------------|------------------------------------|---|
| | Разм | Ом | Ом | Ом | Сим | Сим | Сим | | |
| 1 | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | |

5. Рассчитать для параллельной цепи рис. 6: активную составляющую тока I_{ak} и реактивную составляющую тока катушки $I_{pk} = I_L$; ёмкостное сопротивление x_C на частоте $f = 50 \text{ Гц}$, проводимость b_C и реактивную составляющую тока $I_{pc} = I_C$ конденсаторной батареи; общую реактивную b , полную “ y ” проводимости цепи, $\cos \varphi$ всей цепи. Результаты вычислений записать в табл. 3.

Таблица 3

| № | Выч. вел. | $I_{ak} =$ $= Ug_k$ | $I_{pk} =$ $I_L =$ Ub_k | $x_C =$ $= \frac{1}{\omega C}$ | $b_C =$ $= \frac{1}{x_C}$ | $I_{pc} =$ $= I_C =$ $= Ub_C$ | $b = b_C$ $-b_L$ | $y = \frac{I}{U}$ | $\cos \varphi$ |
|---|-----------|------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|---------------------|-------------------|----------------|
| | Разм | мА | мА | Ом | Сим | мА | Сим | Сим | |
| 1 | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | |

Содержание отчёта:

1. Технические характеристики применяемы приборов и оборудования.
2. Схема соединений.
3. Результаты измерений (табл. 1).
4. Результаты расчётов (табл. 2, 3).
5. Совмещённые графики зависимости I , I_L , I_C , $\cos \varphi$, P от x_C или C .
6. Векторные диаграммы токов в масштабе для трёх случаев: $b_C < b_L$, $b_C = b_L$, $b_C > b_L$.
7. Выводы.

Выполнение работы в пакете Electronic Workbench

Для выполнения лабораторной работы в пакете Electronic Workbench необходимо:

1. Запустить пакет Electronic Workbench.

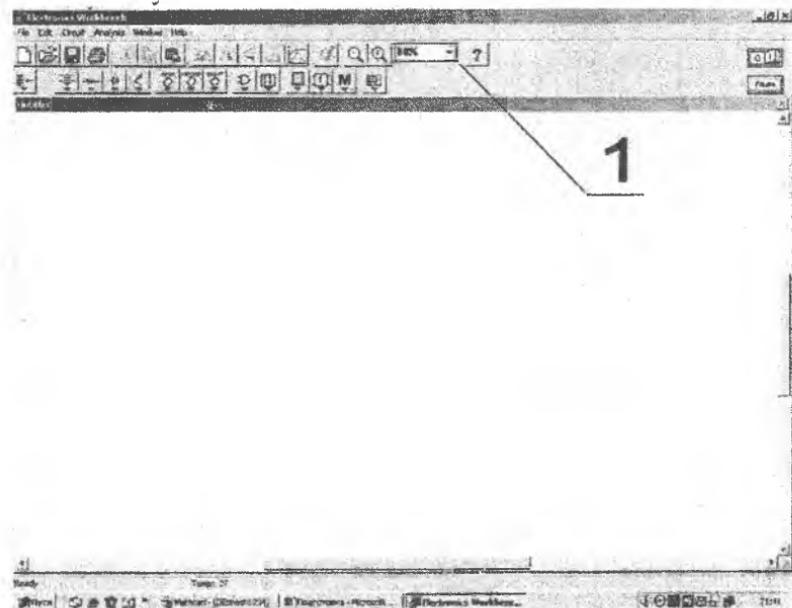


Рис. 7. Экран после запуска программы

2. В появившемся окне нажать File—Open (рис. 7) для открытия файлов.
3. Открыть (расположение файла укажет преподаватель) файл **Ir6_te.ewb**.
4. Выбрать удобный масштаб отображения схемы. Для разрешения 1024*768 наиболее удобным является масштаб 80%.
5. Кнопка запуска симуляции (рис. 8) включает схему.

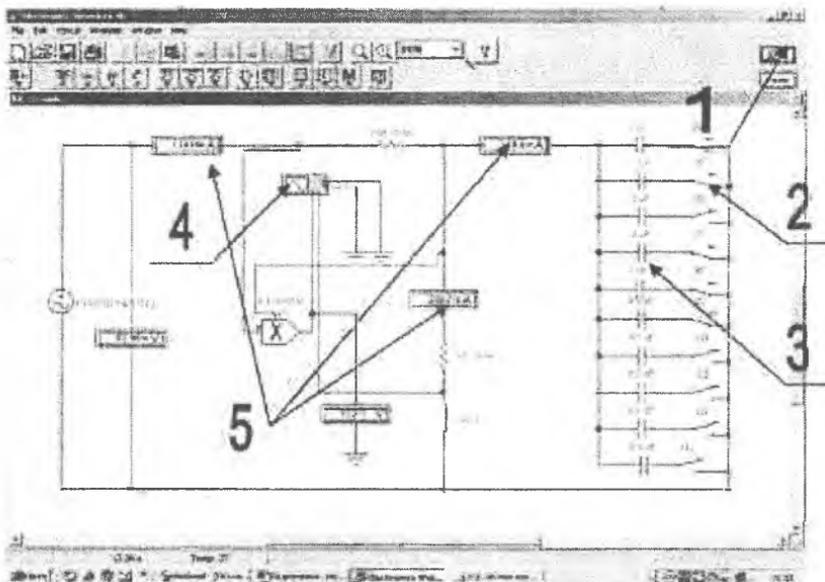


Рис. 8. Схема для исследования резонанса токов

6. Переключатели изменяют положение при нажатии кнопок 0-9 на клавиатуре, тем самым, включая/выключая конденсаторы (рис. 8).
7. Значения токов снимаются с соответствующих амперметров.
8. Для просмотра осциллограммы нужно два раза нажать на изображение осциллографа (рис. 9).

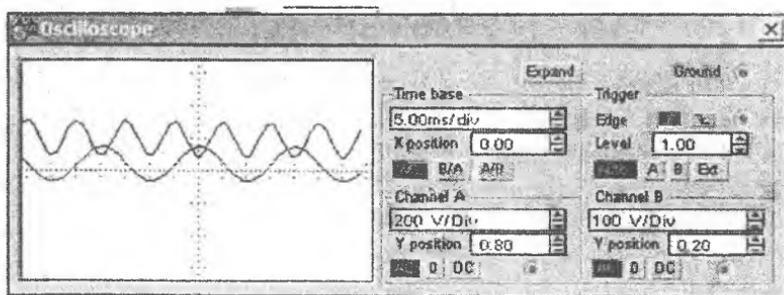


Рис. 9. Осциллограф в Workbench

9. Кнопкой Expand осциллограф переводится в расширенный режим. Чтобы зафиксировать лучи осциллографа необходимо остановить симуляцию.

10. После снятия показаний, закрыть программу.

Контрольные вопросы:

1. Что такое резонанс токов?
2. В какой цепи, и при каких условиях возникает резонанс токов?
3. По какой формуле можно вычислить резонансную частоту реального контура?
4. От каких параметров цепи зависит резонансная частота?
5. Что называется добротностью и волновым сопротивлением контура?
6. Постройте треугольник проводимостей и с его помощью получите формулы для определения следующих величин: а) полной проводимости; б) угла сдвига фаз тока в неразветвлённой части относительно напряжения на зажимах цепи.
7. При каком условии токи в параллельных ветвях с индуктивной и ёмкостной нагрузками превышают ток в неразветвленной части цепи?
8. Чему равна активная мощность параллельной цепи при резонансе?
9. Чему равна реактивная мощность при резонансе?
10. В идеальной параллельной LC цепи (см. рис. 3) при резонансе ток в неразветвлённой части отсутствует. Чем это объясняется?
11. Чему равна собственная частота идеального контура?
12. Как влияет коэффициент мощности на величину общего тока I ?

Учебное издание

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСА ТОКОВ

Методические указания к лабораторной работе № 6

Составитель *Борминский Сергей Анатольевич*

В авторской редакции
Доверстка А.В. Ярославцева

Подписано в печать 10.05.2012 г. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ. л. 1,0.

Тираж 50 экз. Заказ 72.

Самарский государственный аэрокосмический университет.
443086, Самара, Московское шоссе, 34.

Изд-во Самарского государственного аэрокосмического университета.
443086, Самара, Московское шоссе, 34.