

Лабораторная работа № 7

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕПИ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ И КОНДЕНСАТОРА

Цель работы: изучение резонанса напряжений при последовательном соединении rL и C ; определение резонансной частоты, волнового сопротивления и добротности контура; изучение методов построения векторных диаграмм напряжений и токов.

Краткие сведения из теории

Переменные токи и напряжения изменяются по синусоидальному закону

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i); \quad u = U_m \sin(\omega t + \psi_u),$$

где I_m, U_m – амплитудные значения;

ω – угловая частота, $\omega = 2\pi f$; f – частота;

ψ_i, ψ_u – значения начальной фазы.

Синусоидальные функции (рисунок 1,а) удобно представлять как проекции вращающихся векторов (рисунок 1,б) на вертикальную ось.

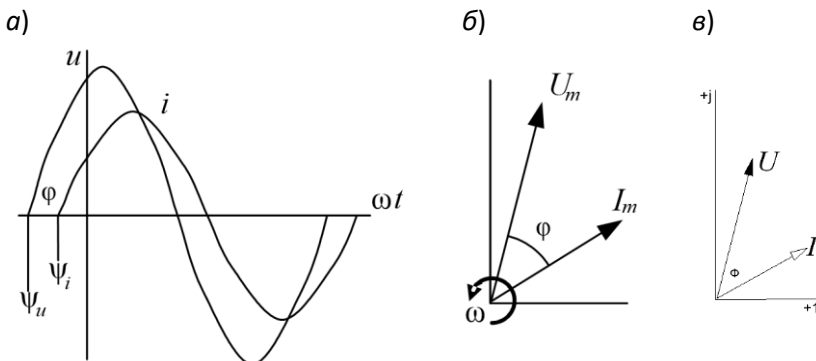


Рисунок 1 – Изображение переменных токов и напряжений синусоидами (а), проекциями вращающихся векторов (б) и векторами на комплексной плоскости (в)

Здесь φ – угол сдвига фаз между током и напряжением.

В расчётах и на векторных диаграммах используют действующие значения переменного тока и напряжения, которые меньше амплитудных в $\sqrt{2}$ раз

$$I = I_m / \sqrt{2}; \quad U = U_m / \sqrt{2}.$$

В *резисторе* r ток и напряжение совпадают по фазе. Их значения связаны законом Ома:

$$U_r = r \cdot I.$$

Мощность, потребляемая резистором

$$P = r \cdot I^2.$$

Напряжение на идеальной катушке *индуктивности* L пропорционально производной от тока

$$u_L = L \frac{di}{dt} = L \frac{d(I_m \sin \omega t)}{dt} = \omega L I_m \sin(\omega t + 90^\circ),$$

Напряжение на идеальной катушке индуктивности опережает ток по фазе на 90° (электрических), то есть на четверть периода. Соответственно ток через катушку отстаёт от напряжения на 90° . Значения напряжения и силы тока в катушке связаны через индуктивное сопротивление X_L :

$$U_L = X_L \cdot I, \text{ где } X_L = \omega L = 2\pi f L. \text{ В комплексном виде } \underline{U} = j X_L \cdot \underline{I} = j \omega L \cdot \underline{I}.$$

Идеальная индуктивность не потребляет энергию, она запасает её в магнитном поле при нарастании тока и отдаёт при его убывании, то есть осуществляет обмен энергией с питающей сетью. Поэтому она называется реактивным элементом цепи, а её сопротивление – реактивным сопротивлением. При расчётах в комплексном виде оно умножается на мнимую единицу j . Мощность Q_L обмена энергией между катушкой индуктивности и питающей цепью тоже реактивная.

$$Q_L = x_L I^2 = \omega L I^2 = 2\pi f L I^2. \text{ В комплексном виде } j\omega \cdot L \cdot I^2.$$

Напряжение на *конденсаторе* C пропорционально интегралу от протекающего через него тока

$$u_C = \frac{1}{C} \int i dt = \frac{1}{C} \int I_m \sin \omega t = \frac{I_m}{\omega C} \sin(\omega t - 90^\circ),$$

Напряжение на идеальном конденсаторе отстаёт от тока по фазе на 90° (электрических). Соответственно ток через конденсатор опережает на 90° приложенное напряжение. Значения напряжения и силы тока в конденсаторе связаны через емкостное сопротивление

$$U_C = x_C I, \text{ где } x_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}, \text{ в комплексном виде } \underline{U} = -j X_C \underline{I}.$$

Конденсатор не потребляет энергию. Заряжаясь, он её запасает, а разряжаясь – отдаёт, поэтому он называется реактивным элементом. Емкостное сопротивление является реактивным, при расчётах в комплексном виде оно умножается на $-j$. Мощность Q_C обмена энергией между конденсатором и питающей цепью также реактивная

$$Q_C = x_C I^2 = \frac{U^2}{x_C} = \omega C U^2 = 2\pi f C U^2, \text{ в комплексном виде } -j\omega C U^2.$$

Реальная катушка индуктивности характеризуется мощностью активной P или полной S , а также коэффициентом мощности $\cos \varphi$:

$$S = UI; \cos \varphi = \frac{P}{S}.$$

Она может быть представлена схемой замещения, содержащей последовательно соединённые идеальную катушку индуктивности L и резистор r . Включим последовательно катушку индуктивности rL и конденсатор (рисунок 2,а)

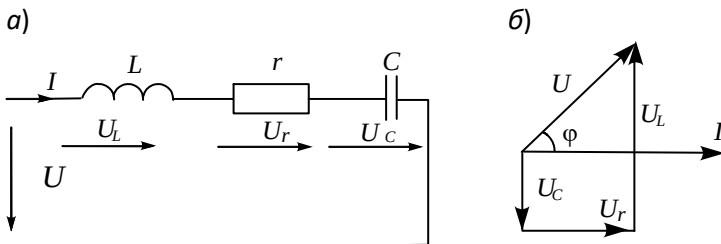


Рисунок 2 – Последовательное соединение L, r, C , (а) и векторная диаграмма тока и напряжений (б)

По всем элементам течёт один и тот же ток I , считаем его действительным и откладываем по горизонтальной оси (рисунок 3,б). При последовательном соединении элементов электрической цепи их напряжения складываются, однако сумма напряжений не арифметическая и не алгебраическая, а геометрическая – это сумма векторов:

- напряжение на конденсаторе U_C отстаёт по фазе от тока на 90° , вектор направлен вертикально вниз;

- напряжение на резисторе U_r совпадает по фазе с током, вектор направлен горизонтально.

- напряжение на индуктивности U_L опережает по фазе ток на 90° , вектор направлен вертикально вверх.

Вектор напряжения U равен сумме векторов напряжений U_C , U_r и U_L . В общем случае он сдвинут по фазе относительно тока на угол φ . Сдвиг против часовой стрелки считается положительным, при этом ток отстаёт от напряжения, цепь имеет индуктивный характер. Сдвиг по часовой стрелке считается отрицательным, при нём напряжение отстаёт от тока, цепь имеет ёмкостной характер.

Если ток и напряжение совпадают по фазе, наступает резонанс, который в последовательной цепи характеризуется резким нарастанием тока до максимума и перенапряжениями на ёмкости и индуктивности.

Объясняется это тем, что индуктивное сопротивление катушки и ёмкостное сопротивление конденсатора взаимно компенсируют друг друга. Полное сопротивление цепи, содержащей последовательно соединённые катушку индуктивности, резистор и конденсатор

$$z = \sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2}. \text{ В комплексном виде } \underline{Z} = r + j X_L - j X_C.$$

Если $x_C = x_L$, то полное сопротивление минимально и равно активному r , а сила тока I максимальна. Обмен энергией между катушкой индуктивности и конденсатором также достигает максимума, на этих элементах наблюдаются перенапряжения. Такой режим называют резонансом напряжений.

Из условия равенства индуктивного и ёмкостного сопротивления

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \text{ определим резонансную частоту } \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}; f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}.$$

Условие возникновения перенапряжений $r < x_C = x_L$ можно записать в виде $r < \sqrt{\frac{L}{C}} = \rho$, где ρ – характеристическое или волновое сопротивление колебательного контура, размерность Ом.

Отношение волнового сопротивления к активному сопротивлению колебательного контура характеризует его резонансные свойства и называется добротностью контура $Q = \rho / r$.

Добротность контура показывает, во сколько раз резонансные индуктивные и емкостные напряжения больше входного напряжения.

При резонансе напряжений сверхтоки могут вызвать перегорание проводов или контактов, а перенапряжения – пробой изоляции, поэтому в электроснабжении резонанс напряжений считается вредным. Однако он широко применяется в технике связи.

В общем случае резонанс напряжений можно получить, изменяя значения индуктивности катушки, ёмкости конденсатора или частоты. В данной лабораторной работе резонанс получают путём подбора ёмкости конденсатора из условия равенства его емкостного сопротивления индуктивному сопротивлению катушки.

$$x_C = x_L; C = \frac{1}{\omega x_C} = \frac{1}{2\pi f x_C}.$$

Порядок выполнения работы

1 Открыть программу **Multisim**. Из группы элементов **[Источники]** (в левом верхнем углу, щёлкнуть два раза левой клавишей мыши, откроется окно [Выбор компонента]) из базы данных **[POWER_SOURCES]** в рабочую зону перенести источник переменного тока **[AC_POWER]**, ОК, и элемент заземления **GROUND**. Из группы **[Пассивные компоненты]** выбрать **[INDUCTOR]**, **[RESISTOR]**, и конденсатор переменной ёмкости **[VARIABLE_CAPASITOR]**. Из группы **[Индикаторы]** выбрать амперметр **[AMPERMETER_H]**, вольтметры **[VOLTMETER_H]** и **[VOLTMETER_V]**.

С панели **[Измерительные приборы]** (справа) в рабочую зону перенести ваттметр (двойной щелчок, он появится в верхнем правом углу), осциллограф и датчик тока (снизу панели).

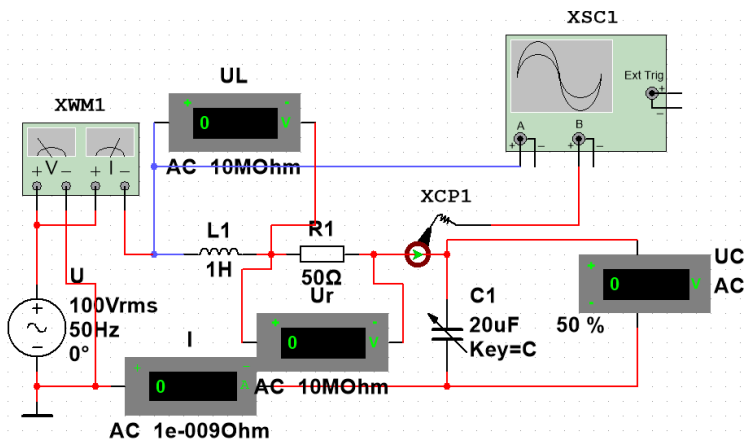


Рисунок 3 – Схема исследования резонанса напряжений

2 Расположить элементы в соответствии с рисунком 3. Нажать правой клавишей переменный конденсатор $C1$ и повернуть его вертикально. Собрать схему электрической цепи, соединяя выводы элементов курсором, щёлкнув левой клавишей мыши на одном выводе, довести до второго или до линии и щёлкнуть (если после соединения выводов линия продолжает тянуться за курсором, отсечь её нажатием правой клавиши мыши).

3 Двойным щелчком левой клавиши мыши открыть окно источника, и установить напряжение 100 В, частоту 50 Гц, назвать U (смотри символ в левом верхнем углу окошка). ОК. Открыть индуктор и установить индуктивность 1 Гн (Н), Открыть резистор, установить сопротивление 50 Ом. Конденсатор установить 20 мкФ (набрать 20u, английская буква u вместо греческой μ), переименовать в **Key=C**. Амперметр сделать переменного тока **AC**, назвать I верхний вольтметр сделать **AC**, назвать U_L , средний – **AC** и U_R , правый – **AC**, назвать U_C .

4 Открыть лицевую панель осциллографа **XSC1** двойным нажатием левой кнопки мыши по его рисунку. Расположить её в удобном месте экрана. В окне [Развёртка] установить длительность развёртки $5^{ms}/Div$. В окне [Синхронизация] нажать кнопку [Одн.]. Проверить состояние кнопок [Y/T] и [DC], находящихся в нижней части панели осциллографа. Они должны быть активированы. Установить чувствительность канала **A** 50 V/div, канала **B** – 1 kV/div. Нажать правой клавишей мыши на провод к каналу **A** выбрать **Цвет** и

сделать его синим – осциллограмма напряжения будет синего цвета. Открыть панель ваттметра, расположить в удобном месте.

5 Исследовать резонанс напряжений. Установить ёмкость конденсатора 40% (нажатие клавиши **C**, язык **EN** увеличивает ёмкость, **Shift** + **C** – уменьшает). Нажать [**►**]. На ваттметре, амперметре и вольтметрах появятся показания. На экране осциллографа появятся синусоиды напряжения и тока, при желании, нажатием на кнопку [**Экран**] можно сделать окно графического дисплея осциллографа белым, видно, что ток (красный) опережает по фазе синее напряжение. Результаты измерений внести в таблицу 1.

6 Повторить измерения для указанных значений ёмкости. По мере увеличения ёмкости наблюдать по осциллограмме как увеличивается амплитуда тока и его максимум смещается вправо по направлению максимума напряжения, проходит мимо него и начинает уменьшаться. Теперь ток отстаёт по фазе от напряжения.

Таблица 1 – Исследование резонанса напряжений

C, %	40	45	50	55	65
P, Вт					
I, А					
U_L, В					
U_r, В					
U_c, В					
Z, Ом					

7 Рассчитать полное сопротивление по формуле $Z = U/I$, занести в таблицу 1; убедиться что для момента резонанса оно минимально и равно r . Увидеть, что при резонансе ваттметр показывает максимальную мощность, а коэффициент мощности $\cos\varphi = 1$.

8 Построить график зависимости тока от ёмкости конденсатора.

9 На том же рисунке построить график зависимости полного сопротивления от ёмкости (масштаб сопротивления указать справа).

10 По графикам определить значение резонансной ёмкости и для неё определить резонансную частоту $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ и $f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}$.

11 Определить волновое сопротивление контура $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$.

12 Определить добротность контура $Q = \rho / r$.

13 Для опытов с C 40; 50 и 65 % построить три векторные диаграммы тока и напряжений в одинаковых масштабах.

Содержание отчета

1 Наименование и цель работы.

2 Схема исследования; ваттметр, амперметр и вольтметры – кружочками.

3 Таблица результатов измерений и вычислений.

4 Расчёт полного сопротивления цепи при резонансе.

5 Графики зависимости тока и полного сопротивления цепи от ёмкости конденсатора.

6 Расчёты резонансной частоты, волнового сопротивления и добротности контура.

7 Три векторные диаграммы в одинаковых масштабах.

8 Заключение по работе.

Контрольные вопросы

1 Как связаны между собой амплитудные и действующие значения переменных токов и напряжений?

2 Чему равны индуктивное и емкостное сопротивления?

3 Чему равны индуктивная мощность катушки и емкостная мощность конденсатора?

4 Если вектор тока отложен горизонтально, как следует откладывать вектора:

– напряжения на резисторе?

– напряжения на идеальной катушке индуктивности?

– напряжения на конденсаторе?

5 Сформулируйте условие резонанса.

6 Как рассчитать резонансную ёмкость, зная индуктивное сопротивление и частоту?

7 Как рассчитать резонансную частоту контура, зная индуктивность и ёмкость?

- 8 Как рассчитать волновое сопротивление контура?
- 9 Как рассчитать добротность контура? Что она показывает?
- 10 Почему в электроснабжении резонанс напряжений считается неприемлемым фактором?
- 11 Охарактеризуйте построенные графики.
- 12 Охарактеризуйте векторные диаграммы.