

## РАБОТА 3

### ИЗУЧЕНИЕ РЕЗОНАНСА В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ КОЛЕБАТЕЛЬНОМ КОНТУРЕ

**Цель работы:** Определение резонансной частоты электрического колебательного контура методом снятия резонансных кривых силы тока и напряжений на реактивных элементах; измерение добротности контура.

#### Введение

Электрический колебательный контур представляет собой последовательно соединенные резистор с сопротивлением  $R$ , катушку с индуктивностью  $L$  и конденсатор емкостью  $C$  (Рис. 3.1). Если в контур включить источник переменного напряжения, электродвижущая сила (ЭДС) которого меняется по гармоническому закону

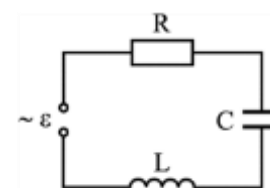


Рис. 3.1

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_A \cos \omega t, \quad (3.1)$$

то в контуре установятся вынужденные электрические колебания силы тока и напряжений на всех элементах с круговой частотой  $\omega$  (с частотой ЭДС):

$$I(t) = I_A \cos(\omega t + \Delta\varphi). \quad (3.2)$$

Амплитуда колебаний силы тока и сдвиг фаз между током и внешней ЭДС зависят от частоты колебаний, что и является предметом исследования в данной работе.

Так как элементы в контуре соединены последовательно, закон Ома для такой цепи состоит в том, что в любой момент времени сумма падений напряжения на всех элементах равна ЭДС:

$$U_C(t) + U_R(t) + U_L(t) = \varepsilon(t). \quad (3.3)$$

Колебания напряжений на элементах связаны с колебаниями силы тока следующим

образом:  $U_C(t) = \frac{\int I(t) dt}{C}$ ;  $U_R(t) = R \cdot I(t)$ ;  $U_L(t) = L \frac{dI(t)}{dt}$ .

Подстановка зависимости (3.2) в эти выражения приводит к выводу, что колебания напряжений на всех элементах сдвинуты по фазе друг относительно друга на  $\pi/2$  и имеют

следующие амплитудные значения:  $U_{AC} = \frac{I_A}{\omega C}$ ;  $U_{AR} = R \cdot I_A$ ;

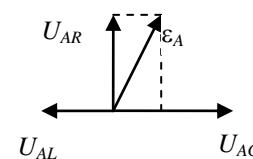


Рис. 3.2

$U_{AL} = \omega L \cdot I_A$ . Уравнение (3.3) при произвольной частоте можно представить в виде векторной диаграммы, изображенной на рис. 3.2. Из неё можно получить, что амплитуда силы тока в контуре  $I_A$  связана с амплитудой переменной ЭДС  $\varepsilon_A$  соотношением:

$$I_A = \varepsilon_A / Z, \quad (3.4)$$

где величина  $Z$  является сопротивлением контура, зависящим от частоты переменного тока:

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}. \quad (3.5)$$

Из (3.5) и (3.4) следует, что при выполнении условия  $\omega L - 1/\omega C = 0$  амплитуда силы тока  $I_A$  достигает своего максимального значения, поскольку  $Z$  уменьшается до минимума, равного активному сопротивлению  $R$ . При этом возникает резонанс, и соответствующее значение частоты внешней ЭДС называется резонансной частотой

$$\omega_{\text{д\acute{a}ц}} = 1/\sqrt{LC} \quad ; \quad \nu_{\text{д\acute{a}ц}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (3.6)$$

Из векторной диаграммы следует, что при этом же условии амплитуды колебаний напряжений на катушке индуктивности и на конденсаторе совпадают:  $U_{AC} = U_{AL}$ . Кроме того, при резонансной частоте для амплитудных или действующих значений силы тока и входного напряжения выполняется соотношение

$$I = \frac{\varepsilon}{R}. \quad (3.7)$$

Кривую зависимости амплитуды силы тока от частоты внешней ЭДС называют резонансной кривой или резонансной характеристикой данного контура. На рис. 3.3 приведены резонансные кривые для заданных значений  $L, C, \varepsilon_A$  и для различных значений активных сопротивлений контура  $R$ . Чем меньше  $R$ , тем больше амплитуда тока при резонансе и тем острее выражен максимум на резонансной кривой. Однако само положение резонанса на оси частот не зависит от  $R$ . Для характеристики ширины резонансной кривой

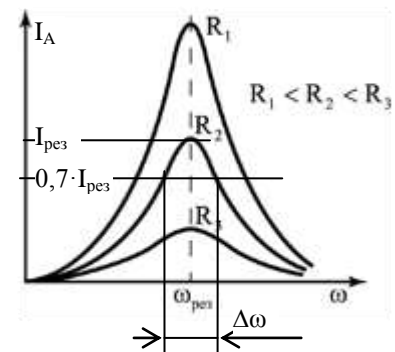


Рис. 3.3

резонанса на оси частот не зависит от  $R$ . Для характеристики ширины резонансной кривой вводится параметр «ширина  $\Delta\omega$  на уровне  $0,7$  максимальной высоты  $I_{\text{рез}}$ ». На рис. 3.3 этот параметр изображен для второй (средней) резонансной кривой. Этот параметр позволяет экспериментально определить добротность контура:  $Q_{\text{эксп}} = \omega_{\text{рез}}/\Delta\omega$ . В теории колебаний добротностью колебательной системы называют произведение логарифмического

декремента затухания на период колебаний. Для колебательного контура он определяется по формуле

$$Q_{\text{д\ddot{a}г \delta}} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} . \quad (3.8)$$

### Методика выполнения работы

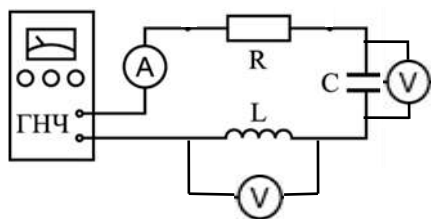


Рис. 3.4

Исследование явления резонанса в электрическом колебательном контуре производится с помощью схемы, изображенной на рис. 3.4. Источником переменной ЭДС, меняющейся по гармоническому закону, является генератор низкочастотных электрических колебаний (ГНЧ). Амперметр А служит для измерения действующего значения силы тока в

цепи, а вольтметры V определяют действующие значения падений напряжения на катушке и конденсаторе. Частота генератора  $\nu$  связана с круговой частотой  $\omega$  соотношением  $\omega = 2\pi\nu$ .

Изменяя частоту сигнала, подаваемого с генератора колебаний, измеряют действующую силу тока в цепи  $I(\nu)$  и действующие падения напряжений  $U_C(\nu)$  и  $U_L(\nu)$  (для заданных значений  $L$ ,  $C$  и  $R$ ). Строят график зависимости  $I(\nu)$  и по его максимуму определяют  $\nu_{\text{д\ddot{a}г}}$  для выбранного значения  $R$ . Затем на одном чертеже строят графики  $U_C(\nu)$ ,  $U_L(\nu)$  и по пересечению графиков определяют  $\nu_{\text{д\ddot{a}г}}$  еще раз, сравнивая его с предыдущим в пределах погрешности, равной шагу изменения частоты  $\nu_{\text{ед}}$ . По графику  $I(\nu)$  определяют «ширину резонанса»  $\Delta\nu$  (аналогично рис.3.3). По нему оценивают добротность контура по формуле

$$Q_{\text{эксп}} = \nu_{\text{рез}} / \Delta\nu \quad (3.9)$$

и её погрешность  $\delta Q_{\text{эксп}}$ , принимая во внимание относительные погрешности измерения силы тока, частоты резонанса, нижней и верхней границы промежутка «ширины резонанса». Полученное значение сравнивают с теоретическим значением, вычисленным по формуле (3.8), в погрешность которого вносят вклад неопределенности в значениях  $L$ ,  $C$  и  $R$ .

Затем качественно проверяют влияние величины активного сопротивления на положение и резкость резонанса.

### Порядок выполнения работы

1. Рассчитайте теоретическое значение резонансной частоты по формуле (3.6). Значения  $L$  и  $C$  написаны на макете.  $L = 2,74$  мГн;  $C = 14,6$  нФ.

2. Соберите схему по рис. 3.4. Полное активное сопротивление цепи складывается из активного сопротивления катушки индуктивности, внутренних сопротивлений генератора и амперметра, и сопротивления магазина, которое следует подобрать так, чтобы общее сопротивление  $R_{\text{общ}}$  соответствовало добротности контура не меньше 4. Исходя из заданных значений  $L$  и  $C$ , рекомендуется установить на магазине сопротивление  $R_1 = 50$  Ом. В работе используется один вольтметр. Предусмотрите возможность его переключения с катушки на конденсатор или на вход системы.

3. Снимите зависимости  $I = f_1(\nu)$ ,  $U_C = f_2(\nu)$  и  $U_L = f_3(\nu)$ . Для этого на передней панели генератора установите переключатель уровня выходного напряжения в положение 500 мВ и плавной регулировкой доведите стрелку до конца шкалы; переключатель «множитель частоты» – в положение « $10^3$ ». Установите с помощью лимба расчетное значение резонансной частоты и плавным вращением лимба найдите то ее значение, при котором наблюдается максимальный ток амперметра. Затем, изменяя частоту в большую и меньшую сторону, проведите не менее 5 измерений токов  $I$  и напряжений  $U_C$  и  $U_L$  в зависимости от частоты с шагом  $\nu_{\text{ед}} = 1$  кГц (в каждую сторону). Результаты запишите в первую часть табл. 3.1. Затем проведите измерения на еще нескольких частотах с шагом 2–5 кГц так, чтобы охватить диапазон от  $0,5 \nu_{\text{рез}}$  до  $1,5 \nu_{\text{рез}}$ . Контролируйте постоянство амплитуды выхода генератора на всем протяжении эксперимента.

Таблица 3.1

$R_1=50$ Ом, $\varepsilon =$ ...	$\nu$ , кГц																		
	$I$ , мА																		
	$U_C$ , В																		
	$U_L$ , В																		
$R_2=10$ 0 Ом	$\nu$ , кГц																		
	$I$ , мА																		

Выделите в таблице те клеточки, в которых величины достигают своих максимальных значений. Убедитесь в том, что максимумы  $U_C$ ,  $I$  и  $U_L$  достигаются последовательно с ростом частоты, а не одновременно. Убедитесь также в том что при частоте,

соответствующей максимальному току, напряжения  $U_C$  и  $U_L$  равны между собой и значительно превосходят амплитуду сигнала с генератора. Для этого при резонансной частоте переключите один из вольтметров на входные клеммы контура и полученное значение запишите в таблицу в виде  $\varepsilon = \dots$

4. Постройте график зависимости  $I = f_1(\nu)$ . По графику определите значение резонансной частоты и её погрешности  $[\nu_{рез} \pm \delta\nu_{рез}]_1$ . Сравните экспериментальное и теоретическое значения. По графику определите ширину  $\Delta\nu$  на высоте  $0,7 I_{max}$ . Найдите добротность и её погрешность  $[Q_{эксп} \pm \delta Q_{эксп}]_1$  по формуле (3.9).

5. Постройте на одном чертеже графики зависимости  $U_C = f_2(\nu)$  и  $U_L = f_3(\nu)$ . Сравните обе кривые. По пересечению графиков определите значение  $[\nu_{рез} \pm \delta\nu_{рез}]'_1$ . Сравните экспериментальное значение резонансной частоты, полученное вторым способом, с теоретическим и со значением, полученным в пункте 4.

6. Найдите полное активное сопротивление цепи  $R_{1общ}$  по формуле (3.7). С помощью него по формуле (3.8) рассчитайте добротность  $Q_{теор}$  и сравните её с экспериментальным значением, полученным в пункте 4.

7. Установите на магазине сопротивлений значение  $R_2 = 100 \text{ Ом}$ , и повторите измерения п.3, касающиеся только силы тока. Результаты запишите во вторую часть табл. 3.1. Проверьте качественно тот факт, что положение резонанса не изменилось, а его форма уширилась.

8. По результатам измерений п. 7 выполните п. 4 на том же чертеже. Определите значение  $[\nu_{рез} \pm \delta\nu_{рез}]_2$ . Сделайте расчет добротности  $[Q_{эксп} \pm \delta Q_{эксп}]_2$ . Сравните величины, полученные при разных сопротивлениях, между собой.

9. В заключении сделайте выводы относительно экспериментального подтверждения формул (3.6) – (3.8) всеми используемыми в работе методами.

### Контрольные вопросы

1. При каком условии наступает резонанс в электрическом колебательном контуре?
2. Изобразите векторную диаграмму токов и напряжений в колебательном контуре при резонансной частоте.
3. От чего зависит амплитуда силы тока в контуре при резонансе? Чему равно при резонансе напряжение на резисторе?
4. Чему равно полное сопротивление  $Z$  при резонансе? Каков в этом случае сдвиг фаз между током и напряжением?

5. Что такое резонансная кривая? Как меняется резонансная кривая при различных активных сопротивлениях контура?

6. Что такое добротность контура? Как можно её повысить? Как повышение добротности сказывается на затухающих колебаниях?

7. Почему резонансные частоты для напряжений на катушке и на конденсаторе не совпадают с собственной частотой контура? При каком активном сопротивлении (большом или маленьком) это отличие сильнее проявляется?

8. Чем можно объяснить тот факт, что в условиях резонанса напряжения  $U_C$  и  $U_L$  равны между собой и значительно превосходят амплитуду сигнала с генератора?

9. Как с помощью данной установки можно определить индуктивность неизвестной катушки?