

# Введение

Программа машинного анализа электрических схем PSPICE представляет собой универсальное средство машинного моделирования электронных схем, обладающее широкими функциональными возможностями. Она позволяет проводить анализ электронных схем по постоянному току, рассчитать переходные процессы, нелинейные искажения и шумы, исследовать линеаризованные модели устройств на переменном токе.

Анализируемая схема может содержать резисторы, конденсаторы, индуктивности, взаимные индуктивности, независимые и управляемые источники тока и напряжения, линии с распределенными параметрами, диоды, биполярные транзисторы, полевые транзисторы как с р-п-переходом, так и изготовленные по технологии металл-окисел-полупроводник (МОП-транзисторы).

## Часть 1

### Лабораторная работа №1

#### *ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ ЯВЛЕНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ*

Целью работы является изучение свойств, методов расчетов, моделирование и экспериментальное исследование частотных характеристик при резонансных явлениях в электрических цепях.

#### Основные теоретические положения

Резонансом называется процесс вынужденных колебаний с такой частотой, при которой интенсивность колебаний максимальна. В пассивной электрической цепи, содержащей катушки индуктивности и конденсаторы, резонансом называется такой режим, при котором ее входное реактивное сопротивление или ее входная реактивная проводимость равны нулю. При резонансе ток на входе цепи, если он отличен от нуля, совпадает по фазе с напряжением.

Резонанс при последовательном соединении R, L и C. Резонанс напряжений возможен в цепи или участке цепи, содержащей последовательно соединенные индуктивность и емкость.

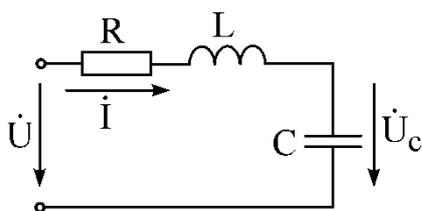


Рис.1.1

Цепь схемы (рис.1.1) называют последовательным колебательным контуром. Входное комплексное сопротивление последовательного контура:

$$Z(j\omega) = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = R + jX = Ze^{j\varphi}, \quad (1.1)$$

где  $X = \omega L - \frac{1}{\omega C}$  – реактивное сопротивление контура;

$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$  – полное сопротивление контура;

$\varphi = \arctg \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$  – сдвиг фаз между напряжением и током.

Условие резонанса напряжений:

$$X = 0 \text{ или } \omega L = \frac{1}{\omega C}. \quad (1.2)$$

Угловая резонансная частота:

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (1.3)$$

При резонансе напряжений применяются следующие соотношения и формулы:

характеристическое сопротивление контура – сопротивление каждого из реактивных элементов при резонансе

$$\rho = \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} = \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (1.4)$$

добротность контура

$$Q = \frac{\rho}{R}, \quad (1.5)$$

затухание контура

$$d = \frac{1}{Q}. \quad (1.6)$$

При резонансе напряжений ток в контуре:

$$I_0 = \frac{U}{R}, \quad (1.7)$$

а напряжение на индуктивности равно напряжению на емкости:

$$U_{L0} = U_{C0} = I_0 \rho = UQ = \frac{U}{d}. \quad (1.8)$$

Абсолютная расстройка:

$$\Delta\omega = \omega - \omega_0 \text{ или } \Delta f = f - f_0. \quad (1.9)$$

Относительная расстройка:

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{\Delta f}{f_0}. \quad (1.10)$$

Обобщенная расстройка:

$$\xi = \frac{X}{R} = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} = Q \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) = \operatorname{tg} \varphi. \quad (1.11)$$

Зависимость комплексного тока в контуре от обобщенной расстройки:

$$\dot{i} = \frac{\dot{U}}{Z(j\omega)} = \frac{\dot{U}}{R(1+j\xi)} = \frac{Ue^{-j\varphi}}{R\sqrt{1+\xi^2}} = \frac{Ue^{-j\varphi}}{Z}, \quad (1.12)$$

где  $Z(j\omega) = R + jX = R + j\xi R$  – комплексное полное сопротивление;

$$\left. \begin{aligned} Z &= R\sqrt{1+\xi^2} \text{ – модуль полного сопротивления;} \\ \varphi &= \operatorname{arctg} \xi \text{ – сдвиг фаз между напряжением и током.} \end{aligned} \right\} \quad (1.13)$$

Уравнение резонансной кривой тока есть отношение модуля тока при любой частоте к току при резонансной частоте (при неизменных значениях напряжения и параметров цепи):

$$k_I = \frac{I}{I_0} = \left| \frac{1}{1+j\xi} \right| = \frac{1}{\sqrt{1+\xi^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left[ Q \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) \right]^2}}. \quad (1.14)$$

Уравнение фазовой характеристики:

$$\varphi = \operatorname{arctg} \xi = \operatorname{arctg} \frac{X}{R} = \operatorname{arctg} Q \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right). \quad (1.15)$$

Комплексные коэффициенты передачи по напряжению:

$$\left. \begin{aligned} K_C(j\omega) &= \frac{\dot{U}_C}{\dot{U}} = j \frac{\omega_0}{\omega} \frac{Q}{1+j\xi}; \\ K_L(j\omega) &= \frac{\dot{U}_L}{\dot{U}} = j \frac{\omega}{\omega_0} \frac{Q}{1+j\xi}. \end{aligned} \right\} \quad (1.15,a)$$

При небольших расстройках формулы (1.11)–(1.15) имеют вид:

$$\xi = \frac{X}{R} \approx 2Q \frac{\Delta\omega}{\omega_0}; \quad X = 2\rho \frac{\Delta\omega}{\omega_0}; \quad (1.11,a)$$

$$\dot{i} \approx \frac{\dot{U}}{R \left( 1 + j2Q \frac{\Delta\omega}{\omega_0} \right)} = \frac{\dot{U}e^{j\varphi}}{R \sqrt{1 + \left( 2Q \frac{\Delta\omega}{\omega_0} \right)^2}}; \quad (1.12,a)$$

$$Z \approx R \sqrt{1 + \left(2Q \frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right)^2}; \quad \varphi \approx \arctg 2Q \frac{\Delta\omega}{\omega_0}; \quad (1.13, a)$$

$$k_I = \frac{I}{I_0} \approx \frac{1}{\sqrt{1 + \left(2Q \frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right)^2}}; \quad (1.14, a)$$

$$K_C(j\omega) = \frac{\dot{U}_C}{\dot{U}} \approx -j \frac{Q}{1 + j2Q \frac{\Delta\omega}{\omega_0}}; \quad K_L(j\omega) = \frac{\dot{U}_L}{\dot{U}} \approx j \frac{Q}{1 + j2Q \frac{\Delta\omega}{\omega_0}}. \quad (1.15, б)$$

При использовании приближенного равенства (1.11,а) расчеты по формулам (1.12,а)–(1.15,б) дают относительную ошибку, которая может быть определена по формуле

$$\delta = -\frac{\Delta\omega}{2\omega_0}. \quad (1.16)$$

Полоса пропускания определяется из условия, что ток на частотах  $f_1$  и  $f_2$ , соответствующих границе полосы пропускания, уменьшается в  $\sqrt{2}$ .

Абсолютное и относительные значения полосы пропускания определяются по формулам:

$$\left. \begin{aligned} S_a &= f_2 - f_1 = \frac{f_0}{Q} \\ S_o &= \frac{S_a}{f_0} = \frac{1}{Q} \end{aligned} \right\} \quad (1.17)$$

Резонанс токов может быть в цепи, содержащей параллельно соединенные индуктивности и емкости.

Резонанс токов для цепи с потерями энергии в обеих ветвях. Цепь (рис.1.2) называют простым параллельным колебательным контуром.

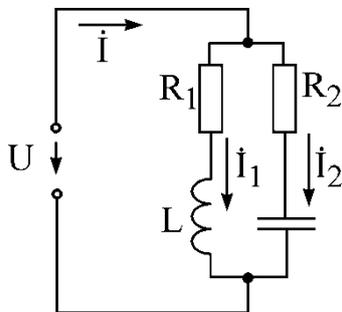


Рис.1.2

Условие резонанса:

$$b_1 = -b_2 \quad \text{или} \quad \frac{\omega L}{R_1^2 + (\omega L)^2} = \frac{1}{\omega C} \frac{1}{R_2^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}. \quad (1.18)$$

Угловая резонансная частота:

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{\rho^2 - R_1^2}{\rho^2 - R_2^2}}, \quad (1.19)$$

где характеристическое сопротивление

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (1.20)$$

Сопротивление параллельного контура при резонансе:

$$Z_P = R_P = \frac{R_1 R_2 + \rho^2}{R_1 + R_2}. \quad (1.21)$$

Добротность контура:

$$Q = \frac{\rho}{R_1 + R_2}. \quad (1.22)$$

Ток в неразветвленной части цепи при резонансе:

$$I_P = \frac{U}{R_P}. \quad (1.23)$$

Частные случаи резонанса токов в цепи (см. рис. 1.2).

Цепь не имеет потерь ( $R_1 = R_2 = 0$ ).

Условие резонанса:

$$\frac{1}{\omega_P L} = \omega_P C. \quad (1.18,a)$$

Угловая резонансная частота:

$$\omega_P = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (1.19,a)$$

Сопротивление контура при резонансе:

$$Z_P = \infty. \quad (1.21,a)$$

Для добротного контура  $Q \gg 1$  (рис. 1.2 и 1.3), т.е. при малых потерях, можно считать, что

$$\omega_P \approx \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (1.19,b)$$

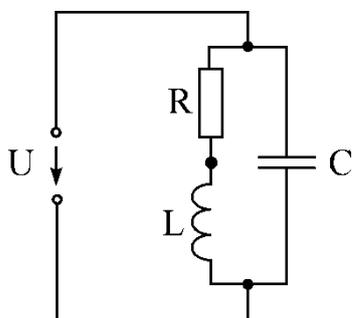


Рис.1.3

Сопротивление этого контура при резонансе:

$$R_P = \frac{\rho^2}{R_1 + R_2} = \frac{\rho^2}{R} = Q^2 R = \frac{L}{RC}, \quad (1.21,b)$$

где  $R = R_1 + R_2$ .

Токи в каждой из ветвей при резонансе примерно одинаковы ( $I_{1P} \approx I_{2P}$ ) и каждый из них больше тока в неразветвленной части цепи  $I_P$  в  $Q$  раз:

$$\frac{I_{1P}}{I_P} \approx \frac{I_{2P}}{I_P} \approx Q. \quad (1.24)$$

Мощность, выделяемая в параллельном контуре при резонансе:

$$P_P = I_P^2 R_P = I_{1P}^2 R_1 + I_{2P}^2 R_2. \quad (1.25)$$

Подключение простого параллельного контура к генератору напряжения с ЭДС

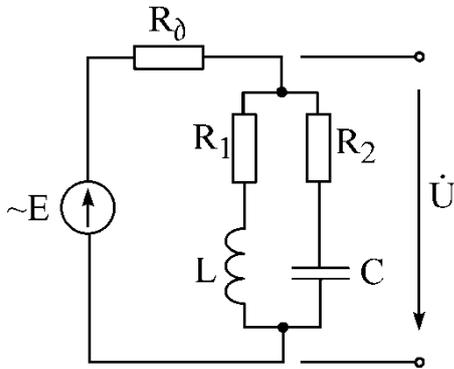


Рис.1.4

Э и внутренним сопротивлением  $R_\delta$  показано на рис. 1.4.

Ток в неразветвленной части цепи и напряжение на параллельном контуре  $\dot{U}$  при любой частоте определяются по формулам:

$$\dot{i} = \frac{\dot{E}}{R_\delta + Z}; \quad \dot{U} = \frac{\dot{E}Z}{R_\delta + Z}, \quad (1.26)$$

при резонансе

$$\dot{i}_P = \frac{\dot{E}}{R_\delta + R_P}; \quad \dot{U}_P = \frac{\dot{E}Z}{R_\delta + R_P}. \quad (1.27)$$

Отношение этих напряжений:

$$\frac{\dot{U}}{\dot{U}_P} = \frac{1}{1 + jQ \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left[ Q_\Delta \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) \right]^2}} e^{-j\varphi_\Delta}, \quad (1.28)$$

где эквивалентная (приведенная) добротность:

$$Q_\Delta = \frac{Q}{1 + \frac{R_P}{R_\delta}}, \quad (1.29)$$

а угол сдвига фаз напряжения на контуре при любой частоте к тому же напряжению при резонансе:

$$\varphi_\Delta = \arctg Q_\Delta \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right). \quad (1.30)$$

Полоса пропускания определяется из условия, что  $\frac{U}{U_P} = \frac{1}{\sqrt{2}}$ .

Абсолютная и относительная полосы пропускания:

$$S_{AU} = f_2 - f_1 = \frac{f_P}{Q_\Delta}; \quad (1.31)$$

$$S_{OU} = \frac{S_{AU}}{f_P} = \frac{1}{Q_\Delta}. \quad (1.32)$$

Комплексный коэффициент передачи по напряжению – отношение комплексного напряжения на параллельном контуре к ЭДС генератора на любой частоте:

$$K_U(j\omega) = \frac{\dot{U}}{\dot{E}} = \frac{Q_{\mathcal{E}} \frac{\rho}{R_{\mathcal{D}}}}{1 + jQ_{\mathcal{E}} \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)}, \quad (1.33)$$

при резонансе

$$K_{UP} = k_{UP} = Q_{\mathcal{E}} \frac{\rho}{R_{\mathcal{D}}}. \quad (1.34)$$

Их отношение

$$\frac{K_U}{K_{UP}} = \frac{1}{1 + jQ_{\mathcal{E}} \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)}. \quad (1.35)$$

Резонанс в сложном параллельном контуре (рис. 1.5). Для добротных контуров, у которых  $R_1 \ll |X_1| = \left| \omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} \right|$   $R_2 \ll |X_2| = \left| \omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2} \right|$ , полное сопротивление определяется по приближенной формуле

$$Z = \frac{-X_1 X_2}{R + jX} = -\frac{RX_1 X_2}{R^2 + X^2} + j \frac{XX_1 X_2}{R^2 + X^2} = R_{\mathcal{E}} + jX_{\mathcal{E}}, \quad (1.36)$$

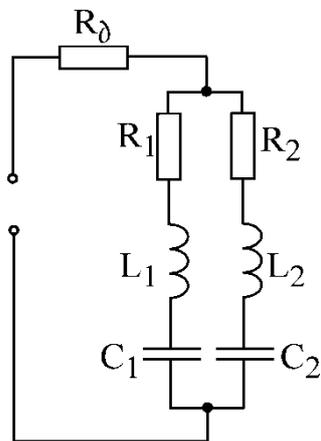


Рис.1.5

$$\text{где } R = R_1 + R_2; \quad X = X_1 + X_2; \quad R_{\mathcal{E}} = -\frac{RX_1 X_2}{R^2 + X^2};$$

$$X_{\mathcal{E}} = \frac{XX_1 X_2}{R^2 + X^2}.$$

Условие резонанса токов (приближенное):

$$X_1 \approx -X_2 \text{ или } \omega_P L_1 - \frac{1}{\omega_P C_1} \approx \frac{1}{\omega_P C_2} - \omega_P L_2, \quad (1.37)$$

отсюда угловая резонансная частота:

$$\omega_P \approx \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad (1.38)$$

где  $L = L_1 + L_2$  – полная индуктивность контура;

$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$  – полная емкость контура.

Добротность сложного контура:

$$Q = \frac{\rho}{R} = \frac{\omega_P L}{R_1 + R_2} = \frac{\omega_P L}{R} = \frac{1}{\omega_P C R}, \quad (1.39)$$

где  $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$ ,  $R = R_1 + R_2$ .

Полное сопротивление контура при резонансе определяется реактивным сопротивлением каждой из ветвей:

$$R_P = \frac{X_1^2}{R} = \frac{X_2^2}{R}, \quad (1.40)$$

где  $R = R_1 + R_2$ .

Если коэффициенты включения обозначить  $m_L = \frac{L_1}{L}$ ,  $m_C = \frac{C}{C_1}$ , то полное сопротивление контура при резонансе:

$$R_P = Q^2 R (m_L - m_C)^2. \quad (1.41)$$

Эта формула показывает возможность изменения величины  $R_P$  в широких пределах при данных  $L$  и  $C$  путем их перераспределения по ветвям при неизменной частоте резонанса токов.

Индуктивно связанные резонансные контуры (рис.1.6). Собственное комплексное сопротивление первого контура  $Z_1 = R_1 + jX_1$ , где

$$X_1 = \omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} \quad - \quad \text{реактивное}$$

сопротивление первого контура.

Собственное комплексное сопротивление

$$\text{второго контура} \quad X_2 = \omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}.$$

Комплексное сопротивление связи

$$Z_{12} = j\omega M = jX_{12}.$$

Степень индуктивной

связи двух элементов цепи характеризуется коэффициентом связи

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}},$$

где  $M$  – взаимная индуктивность элементов цепи;

$L_1, L_2$  – индуктивности элементов цепи.

Действующие значения токов в связанных контурах:

$$I_1 = \frac{E_1}{\sqrt{(R_1 + R_{\text{вн}1})^2 + (X_1 + X_{\text{вн}1})^2}} = \frac{E_1 \frac{Z_2}{Z_1}}{\sqrt{(R_2 + R_{\text{вн}2})^2 + (X_2 + X_{\text{вн}2})^2}}; \quad (1.42)$$

$$I_2 = \frac{E_1 \frac{X_{12}}{Z_2}}{\sqrt{(R_1 + R_{вн1})^2 + (X_1 + X_{вн1})^2}} = \frac{E_1 \frac{X_{12}}{Z_1}}{\sqrt{(R_2 + R_{вн2})^2 + (X_2 + X_{вн2})^2}}, \quad (1.43)$$

где  $R_{вн1} = \frac{X_{12}^2}{Z_2^2} R_2$  – вносимое активное сопротивление в первый контур;

$X_{вн1} = \frac{X_{12}^2}{Z_2^2} X_2$  – вносимое реактивное сопротивление в первый контур;

$R_{вн2} = \frac{X_{12}^2}{Z_1^2} R_1$  – вносимое активное сопротивление во второй контур;

$X_{вн2} = \frac{X_{12}^2}{Z_1^2} X_1$  – вносимое реактивное сопротивление во второй контур.

Резонансы в связанных контурах (см. рис. 1.6):

1. Первый частный резонанс достигается при изменении параметров первого контура при неизменных параметрах второго контура и постоянном коэффициенте связи  $k$ . Условие этого резонанса:

$$X_{1\varnothing} = X_1 + X_{вн1} = X_1 - \frac{X_{12}^2}{Z_2^2} X_2 = 0, \quad (1.44)$$

при этом вторичный ток достигает максимального значения:

$$I_{2 \text{ MAX}} = \frac{E_1 X_{12}}{Z_2 (R_1 + R_{вн1})}. \quad (1.45)$$

2. Второй частный резонанс получается подбором параметров второго контура при неизменных параметрах первого контура и постоянном  $k$ . Этот резонанс имеет место при

$$X_{2\varnothing} = X_2 + X_{вн2} = X_2 - \frac{X_{12}^2}{Z_1^2} X_1 = 0. \quad (1.46)$$

В этом случае ток во вторичном контуре достигает максимума, равного

$$I_{2 \text{ ПМАХ}} = \frac{E_1 X_{12}}{Z_1 (R_2 + R_{вн2})}. \quad (1.47)$$

3. Сложный резонанс достигается одновременным изменением параметров одного из контуров и подбором оптимального коэффициента связи  $k$ .

При настройке изменением элементов первого контура должно соблюдаться условие (1.44), оптимальное значение сопротивления связи

$$X_{12 \text{ ОПТ}}^I = Z_2 \sqrt{\frac{R_1}{R_2}}. \quad (1.48)$$

При настройке вариацией параметров второго контура должно соблюдаться условие (1.46), оптимальному коэффициенту связи соответствует сопротивление связи

$$X_{12 \text{ ОПТ}}^{\text{II}} = Z_1 \sqrt{\frac{R_2}{R_1}}. \quad (1.49)$$

В этих случаях ток во вторичном контуре достигает максимально возможного значения («максимум-максимум»), равного:

$$I_{2 \text{ МАХМАХ}} = \frac{E_1}{2\sqrt{R_1 R_2}}. \quad (1.50)$$

4. Полный резонанс имеет место при резонансной настройке порознь каждого из контуров:

$$X_1 = 0, \quad X_2 = 0 \quad (1.51)$$

и при подборе оптимальной связи между контурами  $k_{\text{ОПТ}} = \frac{1}{\sqrt{Q_1 Q_2}}$ , которой

соответствует сопротивление связи:

$$X_{12 \text{ ОПТ}} = \sqrt{R_1 R_2}. \quad (1.52)$$

При полном резонансе вторичный ток имеет такое же значение, как и при сложном резонансе.

Резонансные характеристики связанных контуров. Входное сопротивление системы связанных контуров (см. рис. 1.6) определяется формулой:

$$Z(j\omega) = R_1 + \frac{X_{12}^2}{Z_2^2} R_2 + j \left( X_1 - \frac{X_{12}^2}{Z_2^2} X_2 \right). \quad (1.53)$$

Если собственные резонансные частоты контуров  $\omega_{01}$  и  $\omega_{02}$  между собой близки и при их небольших расстройках относительно частоты источника  $\omega$  ( $\Delta\omega = \omega - \omega_{01} \ll \omega_{01}$  и  $\Delta\omega_2 = \omega - \omega_{02} \ll \omega_{02}$ ) входное сопротивление системы связанных контуров

$$Z(j\omega) = R_{1\text{Э}} + jX_{1\text{Э}} \approx R_1 \left( 1 + \frac{P_{\text{св}}^2}{1 + \xi_2^2} \right) + j\xi_1 R_1 \left( 1 - \frac{P_{\text{св}}^2}{1 + \xi_2^2} \frac{\xi_2^2}{\xi_1} \right), \quad (1.54)$$

где  $\xi_1 = \frac{X_1}{R_1} \approx 2Q_1 \frac{\Delta\omega_1}{\omega_{01}}$  – обобщенная расстройка первого контура;

$\xi_2 = \frac{X_2}{R_2} \approx 2Q_2 \frac{\Delta\omega_2}{\omega_{02}}$  – обобщенная расстройка второго контура;

$P_{св} = \frac{X_{12}}{\sqrt{R_1 R_2}}$  – фактор связи.

Действующее значение вторичного тока и модуль коэффициента передачи (амплитудно-частотная характеристика) при одинаковых резонансных частотах определяются выражениями:

$$I_2 = \frac{E_1 P_{св}}{\sqrt{R_1 R_2} \sqrt{(P_{св}^2 + 1 - \xi_1 \xi_2)^2 + (\xi_1 + \xi_2)^2}}; \quad (1.55)$$

$$K_U = \frac{U_2}{E_1} = \frac{P_{св}}{\omega C_2 \sqrt{R_1 R_2} \sqrt{(P_{св}^2 + 1 - \xi_1 \xi_2)^2 + (\xi_1 + \xi_2)^2}}. \quad (1.56)$$

При настройке порознь каждого из контуров на одну и ту же частоту, т.е.

когда 
$$\frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \omega_{01} = \omega_0 = \omega_{02} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}},$$

различают следующие случаи связи:

- а) сильную ( $k > k_{KP}$ );
- б) критическую ( $k = k_{KP}$ );
- в) слабую ( $k < k_{KP}$ ).

Критической связи соответствует значение

$$k = k_{KP} = \sqrt{\frac{d_1^2 + d_2^2}{2}}, \quad (1.57)$$

где  $d_1 = \frac{1}{Q_1}$  и  $d_2 = \frac{1}{Q_2}$  – затухания первого и второго контуров.

При слабой связи резонансная кривая тока  $I_2$  имеет один максимум. При сильной связи резонансная кривая тока  $I_2$  имеет два максимума, наступающих при частотах связи  $\omega_I$  и  $\omega_{II}$  ( $\omega_I < \omega < \omega_{II}$ ):

$$\omega_I = \frac{\omega_0}{\sqrt{1 + \sqrt{k^2 - k_{KP}^2}}}; \quad \omega_{II} = \frac{\omega_0}{\sqrt{1 - \sqrt{k^2 - k_{KP}^2}}}. \quad (1.58)$$

При небольших расстройках ( $\Delta\omega = \omega - \omega_0 \ll \omega_0$ ) системы одинаковых связанных контуров  $\xi_1 = \xi_2 = \xi$  действующее значение вторичного тока и модуль коэффициента передачи:

$$I_2 = \frac{E_1 P_{св}}{R \sqrt{(P_{св}^2 + 1 - \xi^2)^2 + 4\xi^2}}; \quad (1.59)$$

$$K_U = \frac{U_2}{E_1} = \frac{P_{св}}{\sqrt{(P_{св}^2 + 1 - \xi^2)^2 + 4\xi^2}}. \quad (1.60)$$

Полоса пропускания двух идентичных ( $\omega_{01} = \omega_{02} = \omega_0, d_1 = d_2 = d$ ) индуктивно связанных контуров на уровне  $\frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0,707$  зависит не только от затухания контуров  $d$ , но и от коэффициента связи  $k$ .

При слабой связи и при идентичных контурах относительная полоса пропускания:

$$S_0 = d \sqrt{\left(\frac{k}{d}\right)^2 - 1 + \sqrt{2 \left[1 + \left(\frac{k}{d}\right)^4\right]}}. \quad (1.61)$$

При критической связи и при идентичных контурах относительная полоса пропускания:

$$S_0 = \sqrt{2} d. \quad (1.62)$$

При сильной связи и при идентичных контурах относительная полоса пропускания:

$$S_0 = d \sqrt{\left(\frac{k}{d}\right)^2 - 1 + 2 \left(\frac{k}{d}\right)}. \quad (1.63)$$

Максимальная полоса пропускания имеет место при связи, обеспечивающей в точке нулевой расстройки ток, равный  $0,707 I_{2 \text{ МАХМАХ}}$ .

При этом  $k = 2,41 d$  и  $S_{0 \text{ МАХ}} = 3,1 d$ . (1.64)

### Последовательный колебательный контур

#### Домашнее задание

1. Начертить электрическую схему последовательного колебательного контура (рис. 1.7). Пронумеровать узлы.

2. На входном языке PSPICE написать программу для расчета частотных зависимостей тока  $I(f)$ , напряжения на емкости  $U_C(f)$  и напряжения на индуктивности  $U_L(f)$ . Параметры вариантов даны ниже:

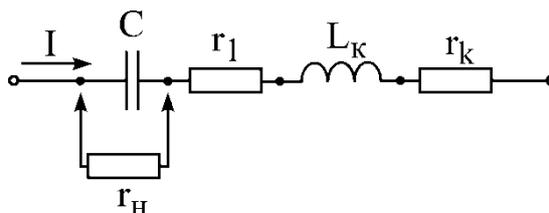


Рис.1.7

<b>№ варианта</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
$U, В$	3	3,5	4	3	3,5	4
$r_K, Ом$	35	50	35	50	35	50
$L_K, Гн$	0,25	0,44	0,25	0,44	0,25	0,44
$C, мкФ$	5	1	4	2	3	5
<b>№ варианта</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
$U, В$	6	7,5	8	4	5,5	7
$r_K, Ом$	25	40	25	20	45	30
$L_K, Гн$	0,25	0,44	0,25	0,44	0,25	0,44
$C, мкФ$	4	6	7	3	2	4
<b>№ варианта</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>
$U, В$	4	3,5	4	5	3,5	4
$r_K, Ом$	35	30	35	40	25	30
$L_K, Гн$	0,44	0,25	0,44	0,25	0,44	0,25
$C, мкФ$	5	3	4	2	6	5
<b>№ варианта</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>
$U, В$	5	6,5	6	5	4,5	6
$r_K, Ом$	25	20	25	30	45	20
$L_K, Гн$	0,25	0,44	0,25	0,44	0,25	0,44
$C, мкФ$	7	4	4	3	2	4
<b>№ варианта</b>	<b>25</b>	<b>26</b>	<b>27</b>	<b>28</b>	<b>29</b>	<b>30</b>
$U, В$	6	4,5	5	4	3,5	5
$r_K, Ом$	25	40	25	20	45	30
$L_K, Гн$	0,44	0,25	0,44	0,25	0,44	0,25
$C, мкФ$	5	1	4	2	3	5

### *Последовательность выполнения работы.*

1. Для значения  $r_1 = 0$  Ом рассчитать зависимости  $I(f)$ ,  $U_C(f)$  и  $U_L(f)$ . Частоту входного воздействия изменять от 30 Гц до 300 Гц.
2. Выполнить задание пункта 1 для  $r_1 = 50$  Ом. По результатам расчетов определить добротность  $Q$  и ширину полосы пропускания.

### **Параллельный колебательный контур**

#### *Домашнее задание*

1. Начертить электрическую схему параллельного колебательного контура (рис. 1.8). Пронумеровать узлы.

2. На входном языке PSPICE написать программу для расчета АЧХ и ФЧХ контура для заданного варианта при двух значениях добавочного сопротивления  $R_d : R_{d1}$  и  $R_{d2}$ . Параметры вариантов даны ниже:

<b>№ варианта</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
C, мкФ	4,5	5,5	6,5	7,5	8,5	3,5
U, В	20	30	30	30	30	30
$R_{\partial 1}$ , КОМ	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6
$R_{\partial 1}$ , КОМ	9	9	9	9	9	9
<b>№ варианта</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
C, мкФ	4,5	5,5	6,5	7,5	8,5	3,5
U, В	40	50	20	20	40	30
$R_{\partial 1}$ , КОМ	4	4	4	4	4	4
$R_{\partial 1}$ , КОМ	10	10	10	10	10	10
<b>№ варианта</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>
C, мкФ	5,5	6,5	5,5	6,5	7,5	4,5
U, В	20	30	30	30	30	30
$R_{\partial 1}$ , КОМ	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6
$R_{\partial 1}$ , КОМ	10	10	10	10	10	10
<b>№ варианта</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>
C, мкФ	5,5	4,5	5,5	6,5	7,5	4,5
U, В	40	50	40	50	40	50
$R_{\partial 1}$ , КОМ	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6
$R_{\partial 1}$ , КОМ	9	9	9	9	9	9
<b>№ варианта</b>	<b>25</b>	<b>26</b>	<b>27</b>	<b>28</b>	<b>29</b>	<b>30</b>
C, мкФ	4,5	5,5	6,5	7,5	8,5	3,5
U, В	50	30	40	50	30	40
$R_{\partial 1}$ , КОМ	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6
$R_{\partial 1}$ , КОМ	10	10	10	10	10	10

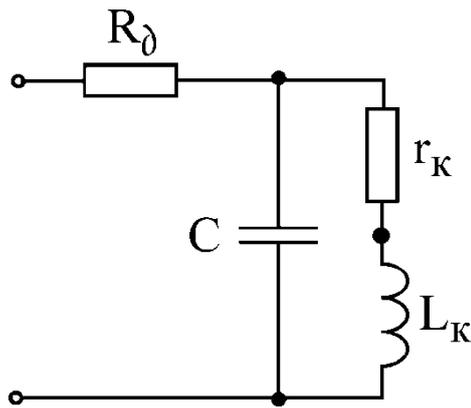


Рис.1.8

*Последовательность выполнения работы*

Для значений  $R_{01}$  и  $R_{02}$  рассчитать АЧХ и ФЧХ параллельного колебательного контура.

**Система индуктивно связанных контуров**

*Домашнее задание*

1. Начертить электрическую схему связанных контуров (рис.1.9). Пронумеровать узлы.
2. На входном языке PSPICE написать программу для расчета частотных характеристик. Параметры вариантов даны ниже:

<b>№ варианта</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
Резонансная частота, кГц		70	75	80	65	85	90
$L_1$ , мГн		3,27	2,78	3,0	3,0	2,6	3,9
$R_1$ , Ом		72	94	69,5	97,9	92	136
$L_2$ , мГн		2,57	2,5	2,55	3,0	2,7	2,9
$R_2$ , Ом		39	74	73	106	69	93
Резо нанс ы	1-й частн. $C_2$ , пФ	2000	1800	1500	2000	1420	1100
	2-й частн. $C_1$ , пФ	1580	1600	1300	2000	1780	1000
<b>№ варианта</b>		<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
Резонансная частота, кГц		80	65	70	75	65	80
$L_1$ , мГн		3,27	2,78	3,0	3,0	2,6	3,9
$R_1$ , Ом		72	94	69,5	97,9	92	136
$L_2$ , мГн		2,57	2,5	2,55	3,0	2,7	2,9
$R_2$ , Ом		39	74	73	106	69	93
Резо нанс ы	1-й частн. $C_2$ , пФ	2500	2000	1700	1800	1600	1500
	2-й частн. $C_1$ , пФ	1600	1700	2300	2100	2000	1100
<b>№ варианта</b>		<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>
Резонансная частота, кГц		70	75	80	65	85	90
$L_1$ , мГн		3,27	2,78	3,0	3,0	2,6	3,9
$R_1$ , Ом		82	84	70	100	92	120
$L_2$ , мГн		2,57	2,5	2,55	3,0	2,7	2,9
$R_2$ , Ом		39	74	73	106	69	93
Резо нанс ы	1-й частн. $C_2$ , пФ	2000	1800	1500	2000	1420	1100
	2-й частн. $C_1$ , пФ	1580	1600	1300	2000	1780	1000

*Последовательность выполнения работы*

1. Рассчитать частотные характеристики токов  $I_1$  и  $I_2$  при настройке системы в сложный резонанс первым способом.

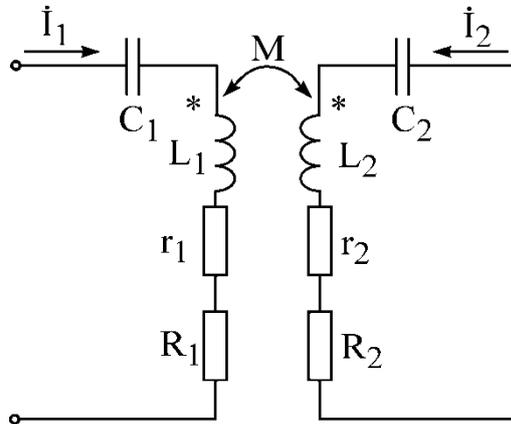


Рис.1.9

2. Рассчитать зависимость  $I_2(f)$  при настройке системы в полный резонанс.
3. Рассчитать АЧХ и ФЧХ системы связанных контуров для четырех значений параметра связи:  $P_{св} = 1$ ,  $P_{св} = 2,41$ ,  $P_{св} < 1$  и  $P_{св} > 2,41$ .

