

2. СВОЙСТВА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО И ПАРАЛЛЕЛЬНОГО СОЕДИНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ

Цель работы: амплитудно-фазовые соотношения между напряжениями и токами на основных элементах, построение временных и векторных диаграмм, расчет простой цепи при последовательном и параллельном соединении R, L, C элементов, определение мгновенной и комплексной мощности двухполюсника.

2.1. Законы Ома для комплексных амплитуд

Компонентные уравнения связывают напряжение и ток резистивного, индуктивного и емкостного элемента. Для R элемента эта связь выражается законом Ома:

$$u = Ri; \quad i = Gu; \quad G = 1/R \quad (2.1)$$

Напряжение и ток L элемента определяются законом электромагнитной индукции:

$$u = L \frac{di}{dt}; \quad i = \frac{1}{L} \int_0^t u(t) dt + i(0) \quad (2.2)$$

Для тока смещения C элемента имеем

$$i = C \frac{du}{dt}; \quad u = \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt + u(0); \quad i = C \frac{du}{dt} \quad (2.3)$$

Запишем компонентные уравнения для установившегося режима синусоидального тока, когда токи и напряжения изменяются по гармоническому закону:

$$i(t) = I_m \cos(\omega t + \psi_u) = \operatorname{Re}(j_m e^{j\omega t}) = \frac{j_m e^{j\omega t} + j_m^* e^{-j\omega t}}{2} \quad (2.4)$$

Подстановка формулы (2.4) в уравнения (2.1) - (2.3) и учет соотношений

16

$$\frac{d}{dt} e^{j\omega t} = j\omega e^{j\omega t}; \quad \int e^{j\omega t} dt = \frac{1}{j\omega} e^{j\omega t}, \quad (2.5)$$

приводит к законам Ома для комплексных амплитуд:

$$\dot{U}_{mR} = Z_R \dot{I}_m, \quad Z_R = R \quad (2.6)$$

$$\dot{U}_{mL} = Z_L \dot{I}_m, \quad Z_L = jX_L = X_L e^{j90^\circ}, \quad |Z_L| = X_L = \omega L \quad (2.6)$$

$$\dot{U}_{mC} = Z_C \dot{I}_m, \quad Z_C = -jX_C = X_C e^{-j90^\circ}, \quad |Z_C| = X_C = 1/\omega C \quad (2.7)$$

Величина Z носит название комплексного сопротивления. Модуль сопротивления равен отношению амплитуд или действующих значений напряжения и тока. Аргумент комплексного сопротивления $\arg(Z)$ равен углу сдвига фаз между напряжением и током $\varphi = \psi_u - \psi_i$.

Векторные диаграммы комплексных амплитуд токов и напряжений на резистивном, индуктивном и емкостном элементе показаны на рисунке 2.1. Положительное направление вращения векторов считается против часовой стрелки.

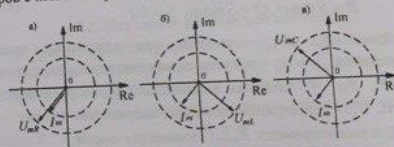


Рис. 2.1. Векторные диаграммы напряжения и ток для резистора - а), индуктивности - б), емкости - в)

На резисторе ток и напряжение совпадают по фазе, фазовый сдвиг отсутствует $\varphi_R = \psi_u - \psi_i = 0$. На индуктивности ток отстает от напряжения на четверть периода, фазовый сдвиг составляет $\varphi_L = 90^\circ$. На емкости ток опережает напряжение на четверть периода, фазовый сдвиг составляет $\varphi_C = -90^\circ$.

17

Амплитуда напряжения элементов пропорциональна амплитуде тока. Для резистивного элемента, как и в случае постоянного тока, коэффициентом пропорциональности является сопротивление R . Для L и C элементов коэффициентами пропорциональности являются индуктивное сопротивление X_L и емкостное сопротивление:

$$X_L = \omega L; \quad X_C = 1/\omega C \quad (2.9)$$

В отличие от резистора индуктивное и емкостное сопротивление является функцией частоты: на постоянном токе $\omega \rightarrow 0$ индуктивность можно заменить элементом КЗ, емкость - элементом ХХ; на высоких частотах $\omega \rightarrow \infty$ индуктивность эквивалентна разрыву цепи, емкость представляет собой элемент КЗ.

2.2. Энергетические соотношения

В методе комплексных амплитуд вводится понятие комплексной мощности

$$\begin{aligned} \dot{S} &= \dot{U} \cdot \dot{I}^* = S e^{j\varphi} = P + jQ, \\ P &= S \cos \varphi, \quad Q = S \sin \varphi, \quad S = UI \end{aligned} \quad (2.10)$$

Здесь S , VA - полная или кажущаяся мощность двухполюсника, $\varphi = \psi_u - \psi_i$ - угол сдвига фаз между напряжением и током, P , $Вт$ - активная мощность, Q , $вар$ - реактивная мощность, U, I - действующие значения напряжения и тока.

Для рассмотренных R, L, C элементов имеем:

$$\varphi_L = \pi/2 \rightarrow P_L = 0 \rightarrow \dot{S}_L = jQ_L, \quad Q_L = X_L I_L^2 = B_L \cdot U_L^2 \quad (2.11)$$

$$\varphi_R = 0 \rightarrow Q_R = 0 \rightarrow \dot{S}_R = P, \quad P = R I^2 = G U^2 \quad (2.18)$$

$$\varphi_C = -\pi/2 \rightarrow P_C = 0 \rightarrow \dot{S}_C = -jQ_C, \quad (2.13)$$

$$Q_C = X_C I_C^2 = B_C \cdot U_C^2$$

Для резистора комплексная мощность является чисто активной, для накопительных элементов - чисто реактивной. Если в

18

двухполюснике имеют место процессы, как поглощения, так и накопления энергии, тогда угол сдвига фаз находится в интервале $0 < |\varphi| < 90^\circ$, комплексная мощность содержит как активную, так и реактивную составляющую.

В электрической цепи должен соблюдаться баланс мощностей: комплексная мощность источников равна сумме комплексных мощностей приемников.

$$\sum_{k=1}^n \dot{S}_k = \sum_{l=1}^m \dot{S}_{lp} \quad (2.9)$$

где n - число источников, где m - число приемников.

Баланс комплексных мощностей выполняется, если одновременно выполняются балансы активных и реактивных мощностей

$$\sum_{k=1}^n P_k = \sum_{l=1}^m P_{lp}, \quad \sum_{k=1}^n \pm Q_k = \sum_{l=1}^m \pm Q_{lp} \quad (2.15)$$

2.3. Исходные данные для расчета

В работе рассматривается последовательное соединение R, L, C элементов и источника напряжения $e(t) = E_m \cos(\omega t + \psi_e)$ или параллельное соединение этих элементов и источника тока $j(t) = J_m \cos(\omega t + \psi_j)$. Исходные данные для расчета приведены в таблице 2.1.

По данным таблицы требуется определить:

- комплексные сопротивления элементов цепи, входное сопротивление и входную проводимость двухполюсника
- комплексную амплитуду, комплекс действующего значения и временные зависимости заданных и искомых токов и напряжений
- мгновенную, активную и реактивную мощность

19

– показания приборов, измеряющих действующие значения электрических величин, схема включения которых показана на рис. 2.2а, и рис. 2.2б.
 – построить графики временных зависимостей напряжения и тока, их векторные диаграммы и графики мгновенной мощности
 – найти частоту резонанса и определить параметры режима
 – для резонансного режима построить векторную диаграмму, найти показания приборов.

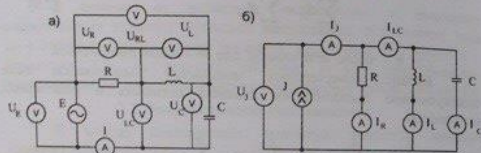


Рис. 2.2. Схема включения приборов при последовательном – а) и параллельном соединении элементов – б)

Таблица 2.1

№	Напряжение/ток источника, В/А	Частота, Гц	Параметры элементов		
			R, Ом	L, мГн	C, мкФ
1	$e(t) = 100 \cos(\omega t + 45^\circ)$	100	25	63.7	26.5
2	$e(t) = 200 \cos(\omega t - 30^\circ)$	50	30	254.6	63.7
3	$e(t) = 141 \cos(\omega t + 60^\circ)$	200	20	47.5	26.5
4	$e(t) = 150 \cos(\omega t - 60^\circ)$	100	25	63.7	22.7
5	$j(t) = \sqrt{2} \cos(\omega t - 45^\circ)$	250	100	31.83	7.96
6	$j(t) = 3 \cos(\omega t + 45^\circ)$	100	60	79.6	63.7
7	$j(t) = 2 \cos(\omega t - 135^\circ)$	200	80	47.8	26.5
8	$j(t) = 1.5 \cos(\omega t + 150^\circ)$	400	90	11.94	7.96
9	$j(t) = 2 \cos(\omega t + 60^\circ)$	250	80	38.2	15.9
10	$j(t) = 1 \cos(\omega t - 45^\circ)$	200	100	31.8	9.95
11	$e(t) = 100 \cos(\omega t - 60^\circ)$	100	25	63.7	22.7

Продолжение таблицы 2.1

№	Напряжение/ток источника, В/А	Частота, Гц	Параметры элементов		
			R, Ом	L, мГн	C, мкФ
12	$e(t) = 75 \cos(\omega t - 120^\circ)$	200	25	47.8	19.9
13	$e(t) = 60 \cos(\omega t + 30^\circ)$	50	15	79.6	63.7
14	$e(t) = 80 \cos(\omega t + 150^\circ)$	100	20	95.5	39.8
15	$e(t) = 90 \cos(\omega t - 60^\circ)$	200	30	31.8	11.4
16	$j(t) = 1 \cos(\omega t - 135^\circ)$	400	120	15.9	4.97
17	$j(t) = 2 \cos(\omega t + 30^\circ)$	100	100	127.3	53.1
18	$j(t) = 3 \cos(\omega t - 135^\circ)$	200	50	31.8	39.8
19	$j(t) = 2 \cos(\omega t + 90^\circ)$	250	120	50.9	12.7
20	$e(t) = 75 \cos(\omega t - 60^\circ)$	100	25	63.7	22.7
21	$e(t) = 90 \cos(\omega t + 120^\circ)$	400	30	15.9	5.68
22	$e(t) = 60 \cos(\omega t - 60^\circ)$	200	20	47.8	31.8
23	$e(t) = 90 \cos(\omega t - 60^\circ)$	250	30	25.46	7.96
24	$j(t) = 2 \cos(\omega t - 135^\circ)$	400	100	31.83	13.3
25	$j(t) = 2 \cos(\omega t - 135^\circ)$	200	120	39.8	9.95

2.4. Пример расчета

2.4.1. Расчет токов и напряжений

Заданы параметры элементов параллельного контура $R = 40 \text{ Ом}$, $L = 16 \text{ мГн}$, $C = 79.6 \text{ мкФ}$ и источник тока $j(t) = 4 \cos(\omega t - 60^\circ)$. Переходим к комплексным величинам: комплексному сопротивлению Z , комплексной проводимости Y и комплексной амплитуде тока источника J_m . При частоте источника $\omega = 200 \text{ рад/с}$, $f = 100 \text{ Гц}$ получим:

$$Z_R = 40, Z_L = j628 \cdot 0.016 = j10, \\ Z_C = (j628 \cdot 79.6 \cdot 10^{-6})^{-1} = -j20, \\ Y_G = 0.025, Y_L = -j0.1, Y_C = j0.05, \\ j(t) = \text{Re}(4e^{-j60^\circ} e^{j200\pi t}) \rightarrow J_m = 4e^{-j60^\circ}$$

Входной реакцией является напряжение источника $\dot{U}_{\text{вх}}$, выходными реакциями – токи параллельных ветвей $\dot{I}_{\text{мс}}$, $\dot{I}_{\text{мл}}$, $\dot{I}_{\text{мг}}$. Эти реакции находятся с помощью функций цепи: входного сопротивления $Z_{\text{вх}}$ и коэффициентов передачи тока источника в параллельные ветви $H_L^{(1)}$, $H_G^{(1)}$, $H_C^{(1)}$

$$\dot{U}_{\text{вх}} = Z_{\text{вх}} J_m, Z_{\text{вх}} = 1/Y_{\text{вх}}, Y_{\text{вх}} = Y_G + Y_C + Y_L \\ \dot{I}_{\text{мл}} = \dot{U}_{\text{вх}} Y_L = J_m H_L^{(1)}, H_L^{(1)} = Y_L/Y_{\text{вх}} \\ \dot{I}_{\text{мг}} = \dot{U}_{\text{вх}} Y_G = J_m H_G^{(1)}, H_G^{(1)} = Y_G/Y_{\text{вх}} \\ \dot{I}_{\text{мс}} = \dot{U}_{\text{вх}} Y_C = J_m H_C^{(1)}, H_C^{(1)} = Y_C/Y_{\text{вх}}$$

Вычисляем входную проводимость, входное сопротивление и напряжение источника

$$Y_{\text{вх}} = 0.025 + j(0.05 - 0.1) = 0.025 - j0.05 = 0.0554 e^{-j63^\circ} \\ Z_{\text{вх}} = 1/Y_{\text{вх}} = 18 e^{j63^\circ} = 8.14 + j16.1, \\ \dot{U}_{\text{вх}} = 18 e^{j63^\circ} 4 e^{-j60^\circ} = 72 e^{j3^\circ}$$

Аргумент комплексного сопротивления $Z_{\text{вх}}$ определяет угол сдвига фаз между напряжением и током на входе двухполюсника

$$\varphi = \psi_u - \psi_i \\ \varphi = \arg(Z_{\text{вх}}) = 63^\circ$$

При положительном угле φ расчетная схема двухполюсника содержит резистивный и индуктивный элементы. Эквивалентная индуктивность в параллельной схеме рассчитывается через реактивную проводимость B_L по формуле

$$B_L = \frac{1}{\omega L} = 0.05 \rightarrow L = \frac{1}{200\pi \cdot 0.05} = 0.032$$

Параметры последовательной схемы замещения двухполюсника находятся из выражения для входного сопротивления $Z_{\text{вх}}$

$$R_x = \text{Re}(Z_{\text{вх}}) = 8.14, X_x = \text{Im}(Z_{\text{вх}}) = 16.1, \\ L_x = X_x/\omega = 0.026$$

При параллельном соединении элементов характер входного сопротивления, индуктивный или емкостный, определяется реактивной ветвью с наименьшим сопротивлением.

Вычислим коэффициенты передачи и токи ветвей

$$H_L^{(1)} = \frac{0.1 e^{-j90^\circ}}{0.054 e^{-j63^\circ}} = 1.8 e^{-j27^\circ} \\ \dot{I}_{\text{мл}} = 4 e^{-j60^\circ} 1.8 e^{-j27^\circ} = 7.2 e^{-j87^\circ} \\ H_C^{(1)} = \frac{0.05 e^{j90^\circ}}{0.0054 e^{-j63^\circ}} = 9.26 e^{j153^\circ} \\ \dot{I}_{\text{мс}} = 4 e^{-j60^\circ} 9.26 e^{j153^\circ} = 37.04 e^{j93^\circ} \\ H_G^{(1)} = \frac{0.025}{0.0054 e^{-j63^\circ}} = 4.63 e^{j63^\circ} \\ \dot{I}_{\text{мг}} = 4 e^{-j60^\circ} 4.63 e^{j63^\circ} = 18.52 e^{j3^\circ}$$

Реактивный ток определяется как сумма токов ветвей с накопительными элементами

$$\dot{I}_{\text{мр}} = \dot{I}_{\text{мл}} + \dot{I}_{\text{мс}} = 7.2 e^{-j87^\circ} + 37.04 e^{j93^\circ} = 36.6 e^{-j87^\circ}$$

Записываем временные зависимости напряжения и токов

$$u_{\text{вх}}(t) = \text{Re}(\dot{U}_{\text{вх}} e^{j\omega t}) = 72 \cos(200\pi t + 3^\circ), \\ i_G(t) = 1.8 \cos(200\pi t + 3^\circ), \\ i_C(t) = 37.04 \cos(200\pi t + 93^\circ), \\ i_L(t) = 7.2 \cos(200\pi t - 87^\circ),$$

$i_r(t) = i_L(t) + i_C(t) = 3.6 \cos(200\pi t - 87^\circ)$
 Графики токов и векторные диаграммы представлены на рисунке 2.3.

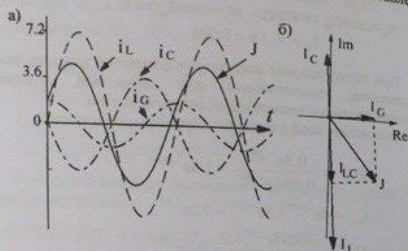


Рис. 2.3. Токи ветвей - а) и их векторные диаграммы - б)

Напряжение, совпадающее по фазе с током резистора, на диаграммах не показано. Из графиков видно, токи реактивных элементов находятся в противофазе, фазовый сдвиг между реактивными токами и активным током составляет $\pm 90^\circ$.

Комплексы действующих значений напряжения и токов:

$$\begin{aligned} \dot{U}_j &= \dot{U}_m / \sqrt{2} = 51e^{j3^\circ}, \quad \dot{I} = 2.8e^{-j60^\circ}, \\ \dot{I}_C &= 2.6e^{j93^\circ}, \quad \dot{I}_L = 5.1e^{-j87^\circ}, \\ \dot{I}_r &= \dot{I}_L + \dot{I}_C = 2.5e^{-j87^\circ}, \quad \dot{I}_a = \dot{I}_G = 1.3e^{j3^\circ} \end{aligned} \quad (2.10)$$

Здесь I_r и I_a - реактивная и активная составляющая тока.

Показания приборов соответствуют модулям комплексов действующих значений. В силу фазового сдвига между токами закон Кирхгофа для показаний амперметров не выполняется:

$$2.8 \neq 2.6 + 5.1 + 1.3$$

Законы Кирхгофа выполняются для мгновенных значений:

24

$$\begin{aligned} 4 \cos(200\pi t - 60^\circ) &= 3.6 \cos(200\pi t + 93^\circ) + \\ &+ 7.2 \cos(200\pi t - 87^\circ) + 1.8 \cos(200\pi t + 3^\circ) \end{aligned}$$

и изображающих векторов:

$$4e^{-j60^\circ} = 3.6e^{j93^\circ} + 7.2e^{-j87^\circ} + 1.8e^{j3^\circ}$$

2.4.2. Баланс энергии
 Составим баланс мощностей. Находим комплексную мощность источника

$$\begin{aligned} \dot{S}_j &= \dot{U}_j \dot{I}^* = 51e^{j3^\circ} \cdot 2.8e^{j60^\circ} = 142.8e^{j63^\circ} = 68 + j125 \\ S &= 142.8 \text{ ВА}, \quad P_j = 68 \text{ Вт}, \quad Q_j = 125 \text{ вар} \end{aligned}$$

Мощность приемников

$$\begin{aligned} P_{\text{пр}} &= P_R = I_R^2 R = 1.69 \cdot 40 = 68 \text{ Вт}, \\ Q_{\text{пр}} &= I_L^2 X_L - I_C^2 X_C = 5.1^2 \cdot 10 - 2.6^2 \cdot 20 = 125 \text{ вар}. \end{aligned}$$

Сравнение мощностей показывает, что баланс выполняется как по активной, так и реактивной составляющей комплексной мощности.

$$P_j = P_R = 68, \quad Q_j = Q_{\text{пр}} = 125$$

Угол сдвига фаз и коэффициент мощности двухполосника:

$$\begin{aligned} \varphi &= \arg(\dot{S}) = \arctg(Q/P) = 1.1, \quad \varphi_d = 63^\circ, \\ \chi &= \cos \varphi = P/S = I_a/I = 0.43 \end{aligned}$$

Из полученных данных следует, что только 43% полной мощности используется для преобразования электрической энергии в другой вид, например, тепловую энергию. Реактивная мощность $Q = \sqrt{S^2 - P^2}$ отражает скорость обмена энергией между эквивалентным реактивным элементом и источником. Обмен энергии осуществляется с помощью реактивного тока I_r .

25

2.4.3. Мгновенная мощность

При записи напряжения и тока через косинус мгновенная мощность k -ого двухполосника определяется по формуле

$$p_k(t) = u_k(t)i_k(t) = S_k \cos \omega t + S_k \cos[2(\omega t + \psi_k) + \varphi_k]$$

Индекс k может относиться к элементам R, L, C либо к эквивалентному двухполоснику, питаемого от источника J . Мощность реактивного двухполосника вычисляется по формуле $p_r(t) = p_L(t) + p_C(t)$

Графики изменения мгновенной мощности во времени показаны на рисунке 2.4 и 2.5.

Из рисунка 2.4-а видно, что мгновенная мощность резистивного элемента $p_G(t)$ колеблется относительно среднего значения $P = U^2 G = 68 \text{ Вт}$ с удвоенной частотой $f_p = 2f_a = 200 \text{ Гц}$. В любой момент времени t_k мгновенная мощность резистивного элемента $p_G(t_k)$ является положительной величиной.

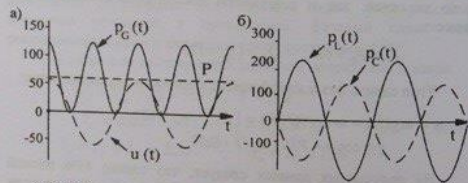


Рис. 2.4. Мгновенная мощность резистивного элемента - а) и накопительных элементов - б)

26

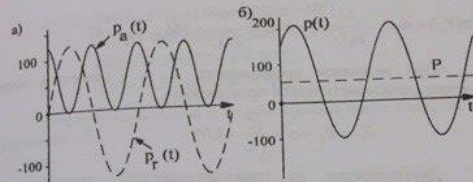


Рис. 2.5. Мгновенная мощность резистивного элемента и эквивалентного реактивного элемента - а) и результирующая мгновенная мощность двухполосника - б)

Мгновенные мощности индуктивности и емкости (рис. 2.4б) колеблются относительно нуля и находятся в противофазе. Амплитуды колебаний мгновенной мощности равны реактивной мощности элементов. Положительным значениям мгновенной мощности соответствует работа элементов в режиме потребителя, когда происходит запасание энергии, отрицательным значениям соответствует генераторный режим накопительных элементов.

На рисунке 2.5-а показаны графики мгновенной мощности активного элемента и эквивалентного реактивного элемента, на рисунке 2.5-б - результирующая мгновенная мощность и ее среднее значение. Из графиков следует, что амплитуда колебаний мгновенной мощности относительно среднего значения P равна полной мощности S . Интервал времени Δt , в течение которого мощность отрицательна, связан с углом сдвига фаз φ между напряжением и током на входе двухполосника соотношением

$$\varphi = \frac{2\pi}{T} \Delta t$$

2.4.4. Резонансный режим

При резонансе токов реактивная составляющая входной проводимости равна нулю. Используя это условие, находим резонансную частоту ω_0 .

27

$$\operatorname{Im}(Y_{\phi}) = \omega_0 C - \frac{1}{\omega_0 L} = 0 \rightarrow \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 886, \quad f_0 = 141$$

При резонансе проводимости L и C элементов носят название характеристической проводимости

$$B_C = B_L = \sigma = \sqrt{\frac{C}{L}} = 0.07$$

Двухполюсник из параллельных LC элементов на резонансной частоте эквивалентен элементу XX . Входное сопротивление при резонансе принимает максимальное значение, равное сопротивлению ветви с резистивным элементом

$$Z_{\phi}(\omega_0) = R = 40$$

Добротность параллельного контура определяется в резонансном режиме как отношение тока одного из накопительных элементов к току резистивного элемента.

$$Q_p = \frac{I_L}{I_C} = \frac{I_C}{I_G} = \frac{\sigma}{G} = \frac{0.07}{0.025} = 2.8$$

Напряжение источника

$$U_{\text{ист}} = Z_{\phi} J_m = 40 \cdot 4e^{-j60^\circ} = 160e^{-j60^\circ}$$

Токи ветвей

$$I_{\text{мл}} = U_{\text{ист}} Y_L = -jQ_p J_m = 2.8e^{-j90^\circ} 4e^{-j60^\circ} = 11.2e^{-j150^\circ}$$

$$I_{\text{мс}} = U_{\text{ист}} Y_C = jQ_p J_m = 2.8e^{j90^\circ} 4e^{-j60^\circ} = 11.2e^{j30^\circ}$$

$$I_{\text{мг}} = U_{\text{ист}} Y_G = J_m = 4e^{-j60^\circ}$$

Реактивный ток

$$I_{\text{вр}} = I_{\text{мл}} + I_{\text{мс}} = 11.2e^{-j150^\circ} + 11.2e^{j30^\circ} = 0$$

Перейдем к временным зависимостям

28

$$u(t) = \operatorname{Re}(U_{\text{ист}} e^{j\omega t}) = 160 \cos(200\pi t - 60^\circ),$$

$$i_C(t) = 4 \cos(200\pi t - 60^\circ),$$

$$i_L(t) = 11.2 \cos(200\pi t + 30^\circ),$$

$$i_G(t) = 11.2 \cos(200\pi t - 150^\circ)$$

Векторная диаграмма и осциллограммы токов представлены на рисунке 2.6.

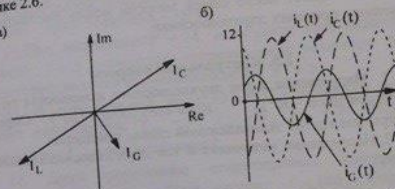


Рис.2.6. Векторная диаграмма - а) и осциллограммы токов параллельного контура при резонансе - б)

Показания приборов действующего значения совпадают с модулем соответствующих комплексных величин

$$U_V = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 113 \text{ В}, \quad I_{\text{А1}} = 2.8 \text{ А}, \quad I_{\text{А2}} = 7.9 \text{ А}, \quad I_{\text{А3}} = 7.9 \text{ А},$$

$$I_{\text{А4}} = 0, \quad I_{\text{А5}} = 2.8 \text{ А}$$

Показания приборов в исходном и резонансном режимах сведены в таблицу 2.2.

Таблица 2.2.

Угол сдвига фаз	$I_{\text{А1}}, \text{А}$	$U_V, \text{В}$	$I_{\text{А2}}, \text{А}$	$I_{\text{А3}}, \text{А}$	$I_{\text{А4}}, \text{А}$	$I_{\text{А5}}, \text{А}$
$\varphi = 63^\circ$	2.8	51	2.6	5.1	2.5	1.3
$\varphi = 0^\circ$	2.8	113	7.9	7.9	0	2.8

29

Из таблицы 2.2 видно, что перевод параллельного контура в резонансный режим за счет изменения частоты источника $f = 100 \text{ Гц} \rightarrow f_0 = 141 \text{ Гц}$ приводит к росту напряжения источника, увеличению токов в накопительных элементах, которые будучи в противофазе компенсируют друг друга.

Полная мощность равна активной мощности. Обмен энергией между накопительными элементами и источником отсутствует - имеет место обмен энергии между накопительными элементами в пределах двухполюсника.

2.5. Контрольные вопросы

1. Напряжение и ток двухполюсника изменяются по закону $u(t) = 200 \cos(100\pi t - 30^\circ)$; $i(t) = 4 \cos(100\pi t - 120^\circ)$. Определите параметры элементов эквивалентной схемы замещения
2. Напряжение источника и ток двухполюсника изменяются по закону:

$$u(t) = 100 \cos(200\pi t - \pi/4); \quad i(t) = 5 \cos(200\pi t - 45^\circ)$$

Определите параметры элементов эквивалентной схемы замещения двухполюсника. Как изменится ток, если частота источника увеличится вдвое.

3. Найти начальную фазу тока емкости по заданному напряжению $220 \sin(\omega t + 120^\circ)$.
4. Из каких элементов состоит эквивалентная схема двухполюсника, если угол сдвига фаз между напряжением и током равен $\varphi = \pi/6$.
5. Определите начальную фазу тока по известному напряжению на индуктивности $100 \sin(\omega t + 30^\circ)$
6. Определите активную мощность двухполюсника по заданному напряжению и току:

$$u = 100\sqrt{2} \sin(\omega t + 20^\circ), \quad i = 10\sqrt{2} \sin(\omega t - 40^\circ).$$

30

7. По показаниям вольтметров $V_E = 50$; $V_R = 40$ $V_C = 80$ в последовательном RLC - контуре определить напряжение на индуктивности V_L .
8. Определить ток I_A последовательной RL - цепи, если известно напряжение источника $V_E = 15$ и сопротивления $X_L = 4$, $R = 3$. Как изменится ток, если частота $\omega \rightarrow 0$.
9. Определите начальную фазу тока резистора, если известно напряжение $u(t) = 5 \cos(100\pi t - 35^\circ)$
10. При напряжении $V = 24$ и входном токе параллельной RL - ветви $I = 5$ определить сопротивление резистора R , если известно сопротивление индуктивной ветви $X_L = 8$
11. В параллельной цепи из RLC - элементов известны показания амперметров: $I_{\text{AR}} = 3$, $I_{\text{AL}} = 6$, $I_{\text{AC}} = 2$. Определить реактивный ток $I_{\text{вр}}$ и ток источника $I_{\text{ист}}$
12. Даны реактивные сопротивления накопительных элементов $X_L = 40$ и $X_C = 80$ на частоте $f = 100$. Определите резонансную частоту контура f_0