

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна  
Должность: проректор по учебной работе  
Дата подписания: 31.12.2020 13:36:44  
Уникальный программный ключ:  
0b817ca911e6668abb13a5d426d39e5f1e11eabb73e945d14a48514da36d089

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра биомедицинской инженерии



Воздействие детерминированных сигналов на линейные первичные  
радиоэлектронные цепи

Методические рекомендации по выполнению практических работ для  
студентов направления 12.03.04 - Биотехнические системы и технологии  
по дисциплине

«ПЕРВИЧНЫЕ ЦЕПИ И СИГНАЛЫ БИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ»

Курск 2017

УДК 504.064.38

Составитель Бурмака А.А., Говорухина Т.Н.

Рецензент

Цыплаков Ю.В., начальник отдела НИИЦ(г.Курск)ФГУП«18 ЦНИИ» МО РФ

Воздействие детерминированных сигналов на линейные первичные радиоэлектронные цепи: методические рекомендации по выполнению практических работ / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: А.А. Бурмака, Т.Н. Говорухина, Курск, 2017. 15 с. с ил.

Целью разработки данных методических указаний (методического пособия) для студентов направления подготовки 12.03.04 «Биотехнические системы и технологии» (бакалавриат) является их использование как учебно-методического-пособия при овладении практическими навыками в расчёте и проектировании активных и пассивных линейных входных цепей, применяемых в радиоэлектронных приборах биомедицинского назначения.

Пособие содержит методический материал теоретического и практического характера, в том числе и примеры решения типовых задач в соответствии с лекциями, читаемыми по данному курсу. Изложение материала построено по принципу «от простого к сложному», а теория является необходимым дополнением к лекционному курсу с примерами в алгебраической интерпретации.

Предназначены для студентов направления подготовки 12.03.04 - Биотехнические системы и технологии.

*Текст печатается в авторской редакции*

Подписано в печать 5.05.17. Формат 60x84 1/16  
Усо.печ.л. 1,51. Уч.-изд.л. 1,37. Тираж 50 экз. Заказ: 860. Бесплатно.  
Юго-Западный государственный университет.  
305040. г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

## Практическое занятие №1.

### Расчёт элементов RLC-двухполюсников

1.1 В качестве «активных» элементов используются сопротивления (резисторы) с обозначением «г» или «R», единицы измерения – Ом (В/А), килоОм –  $10^3$  Ом, мегаОм –  $10^6$  Ом.

1.2 В качестве реактивных элементов используются:

— катушки индуктивности с обозначением «L», единицы измерения «Генри», размерность «Ом\*Сек»;  $10^{-3}$  – миллиГенри,  $10^{-6}$  – микроГенри;

— конденсаторы (ёмкости) с обозначением «С», единицы измерения «Фарада»,  $10^{-6}$  – микроФарада,  $10^{-9}$  – наноФарада,  $10^{-12}$  – пикоФарада, размерность «Сек/Ом».

1.3 Все возможные соединения элементов R,L,C представляют собой пассивные цепи в виде двухполюсников, четырёхполюсников и многополюсников.

1.4 Физически:

— цепи с реактивными элементами сосредоточенного типа (катушки индуктивности и конденсаторы)

— цепи распределительного типа - физерные линии и волноводы (свыше 300 МГц)

— в виде ПАВ структур (на поверхностных акустических волнах).

1.5 Четырёхполюсники активного типа формируются с добавлением к «пассивным» соединением операционных усилителей (ОУ) с неравным соответствующим характеристиками и обратной связью.

1.6 Комплексные сопротивления для элементов и соединения R,L,C приведены в таблице 1, а примеры их расчётов в материалах занятия 2. Технология расчётов используется в дальнейшем для расчёта характеристик двухполюсников и четырёхполюсников с активными и реактивными элементами.

Таблица 1

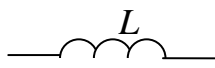
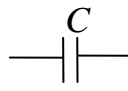
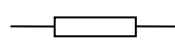
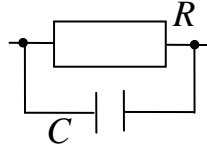
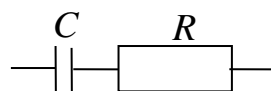
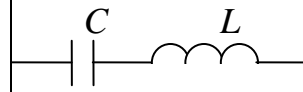
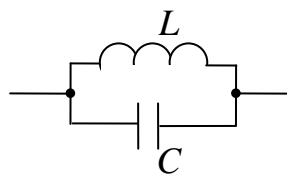
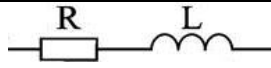
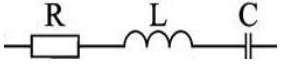
№ п/п	Наименование, соединение	Комплексная величина	Модуль $ Z $	Примечание
1	2	3	4	5
1	Индуктивность, $L$ 	$j\omega L$	$\omega L$	$\omega$ - круговая частота рад/сек
2	Емкость, $C$ 	$\frac{1}{j\omega C}$	$\frac{1}{\omega C}$	$j = \sqrt{-1}$
3	Сопротивление, $R$ 	--	$R$	$L$ - Генри, $C$ - Фарада, $R$ - Ом
4		$\frac{R}{1 + j\omega\tau}$	$\frac{R}{\sqrt{1 + \omega^2\tau^2}}$	$\tau = RC$ , размерность - сек
5		$R + \frac{1}{j\omega C}$	$\frac{\sqrt{1 + \omega^2\tau^2}}{\omega C}$	$\tau = RC$
6		$\frac{1}{j\omega C} + j\omega L = \frac{1 - \omega^2\tau^2}{j\omega C}$	$\frac{1 - \omega^2\tau^2}{\omega C}$	$\tau = \sqrt{LC}$ , размерность - сек
7		$\frac{j\omega L}{1 - \omega^2\tau^2}$	$\frac{\omega L}{1 - \omega^2\tau^2}$	$\tau = \sqrt{LC}$
8		$R + j\omega L$	$R \cdot \sqrt{1 + \omega^2\tau^2}$	$\tau = \frac{L}{R}$ размерность - сек

Таблица 1 (окончание)

1	2	3	4	5
9		$R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} =$ $= \frac{j\omega\tau_1 - \omega^2\tau_2^2 + 1}{j\omega C}$	1) $\sqrt{\frac{(1 - \omega^2\tau_2^2)^2 + \omega^2\tau_1^2}{\omega^2 c^2}}$ 2) $\sqrt{X_L^2 + X_C^2 + (R^2 - 2\rho^2)}$	$\tau_1 = RC$ $\tau_2 = \sqrt{LC}$ $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$ $X_L = \omega L$ $X_C = \frac{1}{\omega C}$

Таким образом, гармонические сигналы данной частоты и реактивные сопротивления на плоскости можно представить векторами: модули (длины) перемножаются, а фазовые углы складываются.

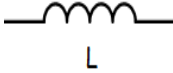
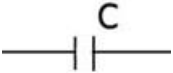
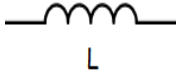
$$\text{Так, } Z_C = \frac{1}{j\omega C} = -\frac{j}{\omega C}; \quad Z_L = j\omega L.$$

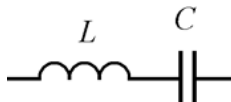
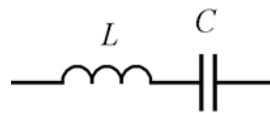
Для получения модуля  $|Z|$  необходимо домножить реактивную составляющую на комплексно сопряженную составляющую (по правилу  $(A + jB)(A - jB) = A^2 + B^2$ ).

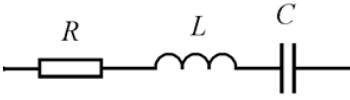
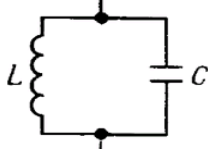
$$\text{Далее } |Z| = \sqrt{A^2 + B^2}.$$

АЧХ цепи (коэффициент передачи по частоте) будет равен отношению

$$K(\omega) = \frac{|Z_{B_{\text{вых}}}|}{|Z_{B_{\text{вх}}}|}.$$

Задачи, примеры, варианты	Вспомогательные сведения, данные
№1	
<p>Найти реактивное сопротивление:</p> <p>- индуктивности <math>X_L</math> если:</p> $L_1 = 100(\text{мкГн})$ $L_2 = 1500(\text{мкГн})$ $L_3 = 6,5(\text{мкГн})$ <p>- на частотах:</p> $f_1 = 100(\text{кГц})$ $f_2 = 1,5(\text{МГц})$ $f_3 = 5,6(\text{МГц})$ <p>- конденсатора ( емкости, <math>X_C</math> ), если:</p> $C_1 = 1200(\text{нФ})$ $C_2 = 600(\text{нФ})$ $C_3 = 1,5(\text{мкФ})$ <p>- на частотах:</p> $f_1 = 50(\text{кГц})$ $f_2 = 1200(\text{кГц})$ $f_3 = 1,5(\text{МГц})$	<p>Вспомогательные данные:</p> <p>1)</p>  $X_L = \omega L$ <p>L-индуктивность в генри;  МГн = <math>10^{-3}</math> Гн;  МКГн = <math>10^{-6}</math> Гц;  <math>\omega</math>-кривая частота;  <math>\omega = 2\pi f</math>, f-Гц;  кГц-<math>10^3</math> Гц;  МГц-<math>10^6</math> Гц</p> <p>2)</p>  $X_C = \frac{1}{\omega C}$ <p><math>\omega = 2\pi \cdot f</math>, f – Гц;  С - фарадах;  1 мкф = <math>10^{-6}</math> ф  1 пф = <math>10^{-12}</math> ф  1 нф = <math>10^{-9}</math> ф</p>
Задачи, примеры, варианты	Вспомогательные сведения, данные
№2	
<p>1) Определить добротность катушки индуктивности, если:</p>	<p>Вспомогательные данные:</p> 

$L_1 = 64(\text{мкГн})$ $R_{L_1} = 0,5(\text{Ом})$ $L_2 = 1,5(\text{мГн})$ $R_{L_2} = 1,6(\text{Ом})$ $L_3 = 120(\text{мкГн})$ $R_{L_3} = 0,05(\text{Ом})$ <p>Соответственно для частот синусоидального тока:</p> $f_1 = 150(\text{кГц})$ $f_2 = 52(\text{кГц})$ $f_3 = 1.6(\text{МГц})$ <p>2) Определить величину характеристического сопротивления цепи LC:</p>  $L = 640(\text{мкГн})$ $C = 1200(\text{нФ})$	<p>Добротность – это характеристика качества катушки индуктивности, т.е.</p> $Q = \frac{X_L}{R_L} = \frac{\omega L}{R_L};$ $\omega = 2\pi f, f - \text{Гц};$ $L = \text{Гн}$ $1\text{мкГн} = 10^{-6} \text{Гн}$ $1\text{мГн} = 10^{-3} \text{Гн}$ $R - \text{Ом}$ <p>Характеристическое сопротивление цепи (контура):</p> $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}};$ $L - \text{Гн};$ $C - \text{Ф};$ $\rho - \text{Ом};$
Задачи, примеры, варианты	Вспомогательные сведения, данные
№3	
<p>1) Вычислить импеданс <math>Z</math> цепей, если:</p> <p>1.1</p>  <p>1.1 <math>\left\{ \begin{array}{l} L = 640 \text{ мкГн}; \\ C = 1200 \text{ пФ}; \\ f = 200 \text{ кГц}; \end{array} \right.</math></p>	$\left. \begin{array}{l} \text{EMBED Equation. 3} \\ \text{EMBED Equation. 3} \end{array} \right\}$ <p>Ом</p> $\omega = 2\pi \cdot f;$ $Z = \sqrt{X_L^2 + X_C^2};$

<p>1.2 <math>\begin{cases} L = 2,2 \text{ мГн;} \\ C = 0,68 \text{ мкФ;} \\ f = 12 \text{ кГц;} \end{cases}</math></p> <p>1.3 <math>\begin{cases} L = 200 \text{ мГн;} \\ C = 10 \text{ мкФ;} \\ f = 120 \text{ Гц;} \end{cases}</math></p>	
<p>2) Вычислить импеданс <math>Z</math> цепи:</p>  <p>2.1 <math>\begin{cases} R = 120 \text{ Ом;} \\ L = 1 \text{ мГн;} \\ C = 0,5 \text{ мкФ;} \\ f = 25 \text{ кГц;} \end{cases}</math></p>	$Z = \sqrt{R^2 + (X_C + X_L)^2};$ <p><math>[R] - \text{Ом};</math></p> $X_C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C};$ $X_L = 2\pi \cdot f \cdot L;$ <p><math>[f] - \text{Гц};</math></p>
<p>Задачи, примеры, варианты</p>	<p>Вспомогательные сведения, данные</p>
<p>№4</p>	
<p>1) Рассчитать параметры параллельного LC-контура: исходные данные (пример)</p>  <p><math>\begin{cases} L_1 = 200 \text{ мкГн;} \\ Q = 150; \\ R_{L_1} = 0,5 \text{ Ом;} \end{cases}</math></p>	<p>1) <math>Q = \frac{\rho}{R_L}; \rho = Q \cdot R_L</math>, с другой стороны, <math>\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}; \rho^2 = \frac{L}{C}</math>.</p> <p>2) <math>C = \frac{R}{\rho^2};</math></p> <p>3) <math>f_{\text{рез}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}</math></p> <p><math>L - \text{Генр};</math>  <math>C - \text{Фарады}.</math></p>



$\text{II} \begin{cases} L_2 = 1,65 \text{ МГГ}; \\ Q = 420; \\ R_{L_2} = 2,5 \text{ Ом}; \end{cases}$ $\text{III} \begin{cases} L_3 = 12 \text{ мкГн}; \\ Q = 105; \\ R_{L_3} = 20,05 \text{ Ом}. \end{cases}$	
<p>Найти:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- характеристическое сопротивление <math>\rho_{1,2,3}</math></li> <li>- определить величину ёмкости <math>C_1, C_2, C_3</math>.</li> </ul> <p>Частоту резонанса контура <math>f_{\text{рез}}</math>.</p>	
<p>Задачи, примеры, варианты</p>	<p>Вспомогательные сведения, данные</p>
<p>№5</p>	

4) Нарисовать фильтр верхних частот:

- используя цепь RC;
- используя цепь RL;

Нарисовать графики для  $U_R, U_C$  в первом случае и  $U_L, U_R$  во втором.

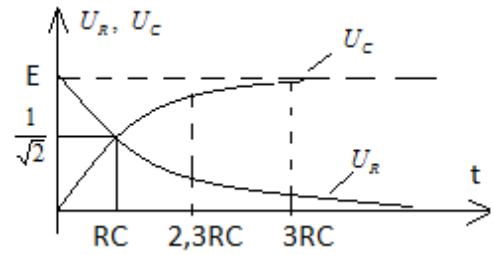
5) Для параллельной цепи RC построить графики  $U_{\text{вых}}$ .

6) Для RL цепи верхних частот построить графики.

7) Построить фильтр нижних частот, используя цепь RL

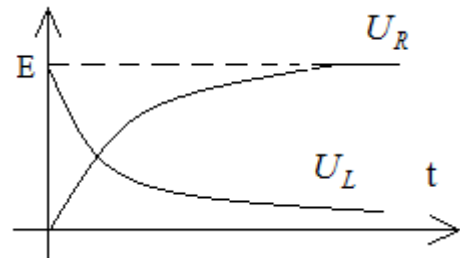
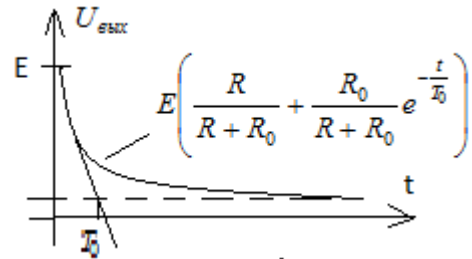
$$T_0 = \frac{L}{R};$$

Определить номиналы для частоты среза 50 кГц;



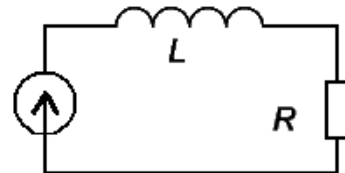
$$U_R = E \cdot e^{-\frac{t}{T_0}}$$

$$U_C = E(1 - e^{-\frac{t}{T_0}})$$



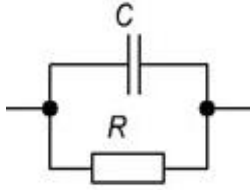
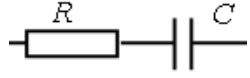
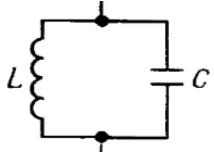
$$U_L = E \cdot e^{-t \cdot \frac{R}{L}};$$

$$U_R = E(1 - e^{-t \cdot \frac{R}{L}})$$



Задачи, примеры, варианты

Вспомогательные сведения, данные

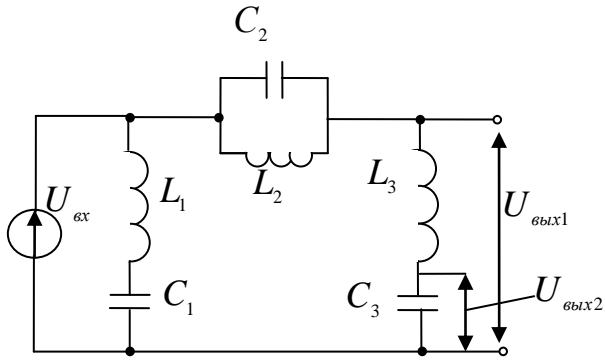
<p>1) Дано звено (ускоряющее):</p>  <p>Найти:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- модуль полного сопротивления <math> Z </math>;</li> <li>- постоянную времени цепи.</li> </ul> <p>Исходные данные:</p> <p><math>R = 1\text{кОм}; C = 1200\text{нФ}; f = 12\text{кГц}</math></p>	$ Z  = \frac{R}{\sqrt{1 + (\omega T_0)^2}};$ $T_0 = RC$
<p>2) Вычислить аналогично для звена данные по п.1. (интегрирующее звено).</p> 	$ Z  = \frac{\sqrt{1 + (\omega T_0)^2}}{\omega C};$ $T_0 = RC$
<p>3) Вычислить для параллельной цепи: <math> Z </math>, <math>T_0</math> (рез., колебания второго порядка)</p> 	$ Z  = \frac{\omega L}{1 - \omega^2 T_0^2};$ $T_0 = \sqrt{LC}$

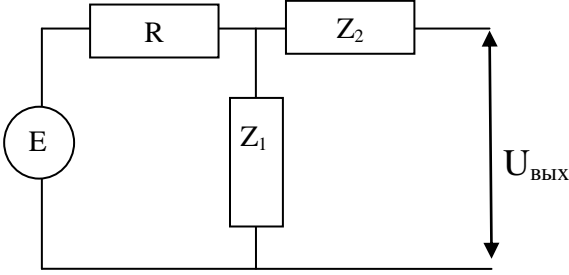
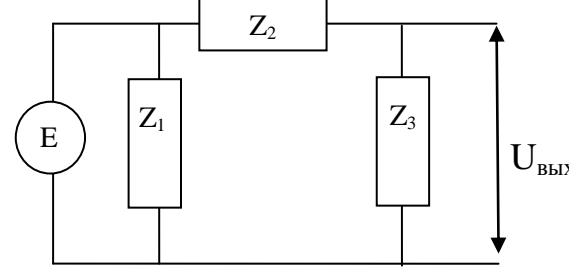
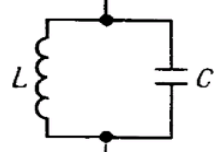
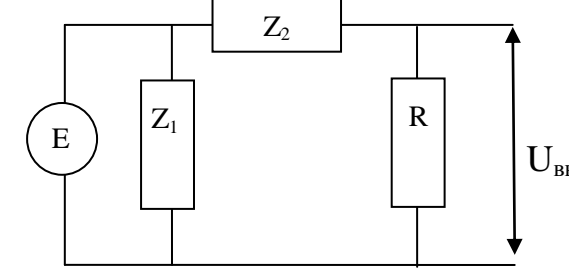

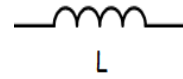
Контрольные вопросы:

1. Как зависят параметры резистора, идеальной катушки и идеального конденсатора от частоты?
2. Дайте определение индуктивного и емкостного сопротивления катушки и конденсатора.
3. Как определить характер двухполюсника методом трех вольтметров? Необходим ли дополнительный опыт?

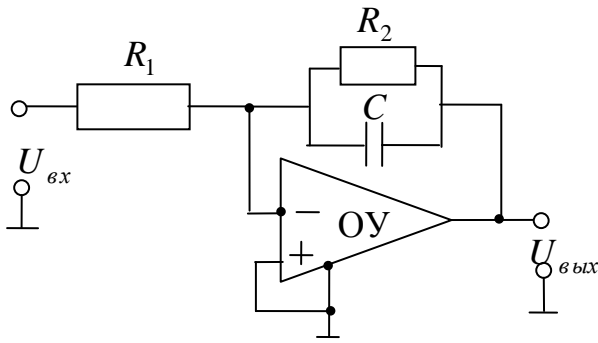
4. Как определить характер двухполюсника методом трех амперметров? Необходим ли дополнительный опыт?

**Расчёт элементов RLC-четырёхполюсников**

Задачи, примеры, варианты	Вспомогательные сведения, данные
№1	
<p>1) Имеется 4-полюсник-фильтр, как показано на рисунке</p>  <p>2) Исходные данные:</p> <p><math>L_1 = 250 \text{ мкГн}; R_{L1} = 1,2 \text{ Ом};</math>  <math>L_2 = 120 \text{ мкГн}; R_{L2} = 0,5 \text{ Ом};</math>  <math>L_3 = 50 \text{ мкГн}; R_{L3} = 0,05 \text{ Ом};</math>  <math>Q_1 = 300; Q_2 = 400; Q_3 = 600;</math></p>	$Q = \frac{\rho}{R_L}; R_{oc} = \frac{\rho^2}{R_L};$ $\rho = Q \cdot R_L = \sqrt{\frac{L}{C}};$ $\rho^2 = \frac{L}{C}; C = \frac{L}{\rho^2};$ <p>Резонансные частоты</p> $f_{рез} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}};$ <p><math>L</math> - Генри;  <math>C</math> - Фарады;  <math>f</math> - Герцы;</p> <p>В общем виде частота среза <math>f_{срез}</math> из условия</p>
<p>3) Определить:</p> <p>а) резонансные частоты <math>f_{рез1,2,3}</math> всех контуров аналогового фильтра ;</p> <p>б) полосы пропускания контуров на уровне <math>\frac{1}{\sqrt{2}} K_{макс}</math>.</p> <p>в) сопротивление <math>R_{oc}</math> параллельного контура <math>L_2C_2</math> в состоянии резонанса и на частотах среза <math>\omega_{C1}, \omega_{C2}</math></p>	$\omega\tau_{cp} = 1; \omega = 2\pi f_{cp};$ $f_{cp} = \frac{1}{2\pi\tau_{cp}};$ $\tau_{cp1} = RC;$ $\tau_{cp2} = \sqrt{LC}; \tau_{cp3} = \frac{L}{R};$
Задачи, примеры, варианты	Вспомогательные сведения,

	данные
№2	
	<p> <math>Z_1: C=0,25\text{мкФ};</math>  <math>Z_2: L=15\text{мГн};</math>  <math>R=120\text{Ом};</math>            Найти:         </p>
	<p> <math>Z_1: L_1=20\text{мГн};</math>  <math>Z_2:</math>  </p> <p> <math>L_2=10\text{мГн}; C_2=0,5\text{мкФ};</math>  <math>Z_3: C_3=0,25\text{мкФ};</math>            Найти:         </p>
	<p> <math>Z_1:</math>  </p> <p> <math>L_1=15\text{мкГн}; R=75\text{Ом};</math> </p> <p> <math>Z_2:</math>  </p> <p> <math>L_1=10\text{мкГн}; R=75\text{Ом};</math>            Найти:         </p>
$K(j\omega) = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{Z_{\text{вых}}}{Z_{\text{вх}}}; K(j\omega) = \frac{Z_2}{Z_1}$	
Задачи, примеры, варианты	Вспомогательные сведения, данные
№3	

1) Активный ФНЧ (интегрирующая)



$$K(j\omega) = -\frac{Z_2}{Z_1};$$

Например:

$$Z_1 = R_1$$

$$Z_2 = \frac{R_2}{1 + j\omega\tau}, \tau = R_2 C$$

Тогда

$$K(j\omega) = \frac{R + R_2}{1 + j\omega\tau}$$

$$|K(j\omega)|$$

$$\frac{R_1 * R_2}{(1 + j\omega\tau)} * \frac{R_1 * R_2}{(1 - j\omega\tau)} = \frac{R_1^2 * R_2^2}{1 + \omega^2 \tau^2};$$

$$|K(j\omega)| = \frac{R_1 * R_2}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}};$$

$$f_{cp} = \frac{1}{2\pi\tau};$$

$$\tau_0 = RC.$$

2) Дано:

$$R_1 = 10 \text{ кОм};$$

$$R_2 = 360 \text{ кОм};$$

$$C = 0,15 \text{ мкФ};$$

3) Найти:

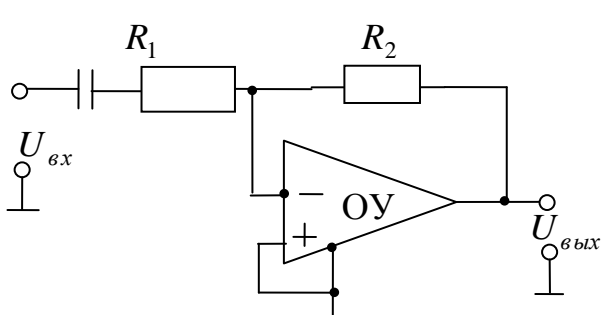
$$K(j\omega); |K(j\omega)|,$$

частоту среза  $f_{cp}$ .

4) Длительность  $\tau_u$  импульса, для которого данный 4-полюсник интегрирующий

Задачи, примеры, варианты

Вспомогательные сведения, данные

<p>1) Активный ФВЧ (интегрирующая)</p> 	$K(j\omega) = -\frac{Z_2}{Z_1};$ <p>Например:</p> $Z_2 = R_2$ $Z_1 = R_1 + \frac{1}{j\omega C}$ <p>(по таблице 1).</p>
<p>2) Дано:</p> <p><math>R_1 = 5,1 \text{ кОм};</math>  <math>R_2 = 51 \text{ кОм};</math>  <math>C = 1200 \text{ нФ};</math></p>	$K(j\omega) = -\frac{R_2}{X_C + R_1} = -\frac{R_2 * j\omega C}{1 + j\omega\tau};$ $\tau = R_1 C$ $ K(j\omega) ;$
<p>3) Найти:</p> <p><math>K(j\omega);  K(j\omega) ,</math>  частоту среза <math>f_{cp}.</math></p>	$\frac{R_2 * j\omega C}{1 + j\omega\tau} * \frac{R_2 * (-j\omega C)}{1 - j\omega\tau} = \frac{R_2^2 * \omega^2 C^2}{1 + \omega^2 \tau^2};$ $ K(j\omega)  = \frac{\omega^2 CR^2}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}};$
<p>4) Длительность <math>\tau_u</math> импульса, для которого данный 4-полюсник дифференцирующий.</p>	$f_{cp} = \frac{1}{2\pi\tau_0};$ $\tau_0 = R_1 C.$

### Контрольные вопросы

1. Объяснить, в каких случаях следует включать цепи согласованно?
2. Чем отличается рабочее ослабление четырехполюсника от собственного (характеристического)?
3. Что такое комплексная передаточная функция?
4. Какие виды комплексных передаточных функций четырехполюсника известны?
5. Что такое операторная передаточная функция? Как она связана с комплексной передаточной функцией.
6. Как определить нули и полюсы операторной передаточной функции?
7. Перечислить основные свойства операторных передаточных функций пассивных цепей.