

Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана

С.А. Васюков, О.И. Мисеюк, А.В. Ситников
ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Методические указания к выполнению лабораторной работы

Москва
ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ им. Н.Э. Баумана
2018

УДК 621.3

Рецензент

Васюков С.А., Мисеюк О.И., Ситников А.В.

Исследование частотных характеристик электрических цепей: методические указания к выполнению лабораторной работы по курсу «Электротехника»/ С.А. Васюков, О.И. Мисеюк, А.В. Ситников. – М.: Изд – во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2018 – ,[2] с.: ил.

Изложены основные теоретические сведения по расчету частотных характеристик пассивных электрических цепей, приведены примеры записи уравнений для расчета амплитудно-частотных и фазо-частотных характеристик. Представлены задание, порядок выполнения и методические указания к проведению работы, а также контрольные вопросы.

Для студентов 2 – 3 курсов, обучающихся по программам бакалавриата и специалитета и изучающих дисциплину «Электротехника» на кафедре «Электротехника и промышленная электроника».

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	4
1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ	5
2. ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ПОДГОТОВКА К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ	7
3. ЗАДАНИЯ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ	9
3.1. Изучите описание лабораторного стенда (Методические указания «Стенд и приборы для исследования электрических цепей»).	9
3.2. Исследование частотных характеристик цепи $R-L$	9
3.3. Исследование частотных характеристик цепи $L-R$	11
3.4 . Исследование частотных характеристик цепи $C-R$	12
3.5. Исследование частотных характеристик цепи $R-C$	13
ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ	15
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	16
ЛИТЕРАТУРА.....	17

ПРЕДИСЛОВИЕ

Современное высшее техническое образование, ориентированное на формирование профессиональных компетенций, уделяет большое внимание подготовке специалистов, владеющих как теоретическими знаниями, так и современными методами исследования. Особо выделяется способность проводить исследования физических процессов и свойств объектов с выбором технических средств, методов измерений, обработки и представления результатов. А эта способность во многом формируется в результате выполнения лабораторных практикумов.

При выполнении лабораторных работ по дисциплине «Электротехника» преследуются две основные цели. Первая цель – усиление практической направленности образовательного процесса – закрепление на практике основных положений курса при работе в коллективе. Вторая цель – приобретение студентами навыков самостоятельной работы с электроизмерительными приборами и изучение методик проведения эксперимента. Характеристики большинства электрических цепей и устройств зависят от частоты. Иногда эта зависимость нежелательна, и принимаются специальные меры по ее устранению. В других случаях электрическим цепям специально придают те или иные частотные свойства. Информация о частотных свойствах цепей необходима при проектировании фильтров, генераторов, корректирующих цепей автоматики и т.п. Именно поэтому лабораторная работа по изучению частотных свойств цепей, их частотных передаточных функций необходима для студентов приборостроительных специальностей.

Работа предназначена для студентов 2 и 3 курсов, обучающихся на приборостроительных направлениях и специальностях, изучающих курс «Электротехника» на кафедре «Электротехника и промышленная электроника».

Цель лабораторной работы – приобретение навыков экспериментального исследования частотных свойств пассивных электрических цепей (их комплексных передаточных функций); овладение техникой экспериментирования с использованием виртуальных электроизмерительных приборов

1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Одной из задач анализа электрической цепи является определение реакции цепи на заданное внешнее (входное) воздействие. Для решения этой задачи часто используют комплексный метод расчета и передаточные функции. Комплексную передаточную функцию определяют следующим образом:

$$K(j\omega) = \frac{A_2(j\omega)}{A_1(j\omega)} = \frac{A_2(\omega)}{A_1(\omega)} \frac{e^{j\varphi_2}}{e^{j\varphi_1}} = \frac{A_2(\omega)}{A_1(\omega)} \cdot e^{j(\varphi_2 - \varphi_1)} = A(\omega) \cdot e^{j\varphi(\omega)},$$

где $A_2(j\omega)$ - комплексная амплитуда (комплексное действующее значение) отклика цепи, имеющая размерность напряжения или тока; $A_1(j\omega)$ - комплексная амплитуда (комплексное действующее значение) входного воздействия (заданный ток, напряжение или ЭДС). Передаточная функция $K(j\omega)$ может быть либо безразмерной, либо иметь размерность сопротивления, либо проводимости. Модуль комплексной передаточной функции $A(\omega)$ характеризует отношение амплитуд (действующих значений) отклика и воздействия и носит название амплитудно-частотной характеристики (АЧХ). Аргумент комплексной передаточной функции определяется разностью фаз между откликом и воздействием $\varphi(\omega) = \varphi_2(\omega) - \varphi_1(\omega)$ и называется фазо-частотной характеристикой (ФЧХ).

Амплитудно-частотную и фазо-частотную характеристики представляют в виде графиков, по оси абсцисс откладывают угловую ω или линейную f частоту, а по оси ординат – модуль коэффициента передачи $A(\omega)$ или разность фаз $\varphi(\omega)$ между откликом и воздействием. Для больших частотных диапазонов удобно применять полулогарифмический масштаб, т.е. по оси абсцисс наносить значения логарифмов нормированной частоты $\lg \bar{f}$. В данной работе применяется нормирование на частоту 1 Гц (под знаком логарифма оказывается безразмерная величина).

Сопротивления реактивных элементов на переменном токе зависят от частоты входного воздействия ω . Индуктивный элемент имеет сопротивление $x_L = \omega L$ и на малых частотах этим сопротивлением можно пренебречь. Поэтому на малых частотах индуктивность можно заменить отрезком провода с нулевым сопротивлением. Наоборот, в области высоких частот x_L велико, и индуктивность можно рассматривать как разрыв цепи.

Емкостное сопротивление ведет себя иначе: на малых частотах сопротивление емкостного элемента $x_C = \frac{1}{\omega C}$ близко к бесконечности (разрыв), а на больших к нулю.

Эти свойства цепей позволяют качественно строить их амплитудно-частотные характеристики, не прибегая к расчетам.

Пример. Для схемы, изображенной на рис. 1 а, в области малых частот ($\omega \rightarrow 0 \Rightarrow x_L \rightarrow 0; x_C \rightarrow \infty$) схема замещения имеет вид, представленный на рис. 1 б. В этом случае модуль передаточной функции

$$K_U = \lim_{\omega \rightarrow 0} \frac{U_2(\omega)}{U_1(\omega)} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}.$$

Для больших частот ($\omega \rightarrow \infty \Rightarrow x_L \rightarrow \infty; x_C \rightarrow 0$) схема замещения имеет вид, представленный на рис. 1 в. Следовательно, $K_U = \lim_{\omega \rightarrow \infty} \frac{U_2(\omega)}{U_1(\omega)} = 0$.

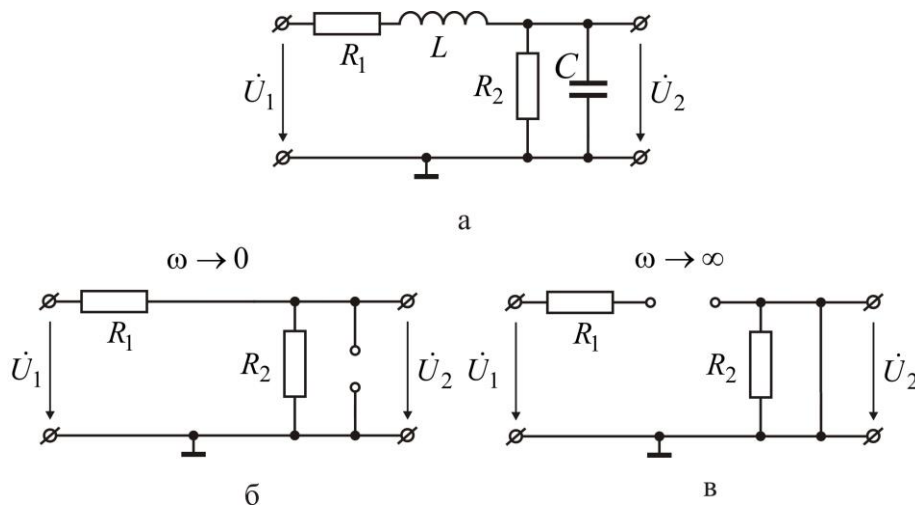


Рис. 1. Схема в области средних (а), малых (б) и высоких (в) частот.

В промежуточной области, если пренебречь резонансными эффектами, можно предположить, что характеристики плавно изменяются от одного крайнего значения до другого (рис. 2 а).

В области малых частот индуктивное сопротивление эквивалентно короткому замыканию, а, следовательно, входная цепь соединена с выходной только через сопротивление R_1 (цепь резистивная), поэтому фазы \dot{U}_1 и \dot{U}_2 совпадают (рис. 2 б),

$$\varphi(\omega)_{\omega \rightarrow 0} = \varphi_2(\omega) - \varphi_1(\omega) \approx 0.$$

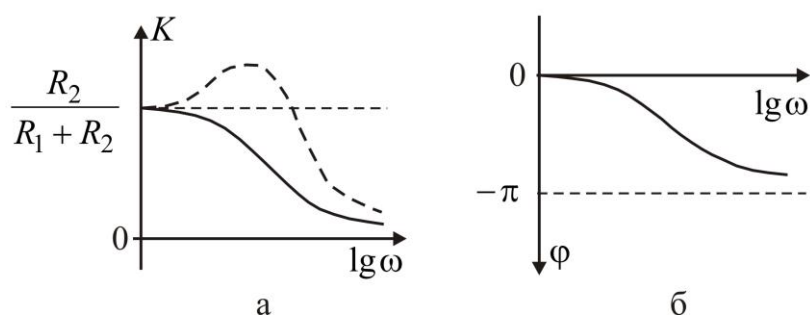


Рис. 2. Амплитудно-частотная (а) и фазо-частотная (б) характеристики (пример).

На больших частотах $x_L \rightarrow \infty$, входное сопротивление носит индуктивный характер, входной ток отстает от входного напряжения на угол $\pi/2$, далее этот ток разветвляется между ветвями с резистором R_2 и конденсатором, но в основном он проходит по ветви с емкостью, сопротивление которой много меньше сопротивления R_2 . Следовательно, фаза напряжения \dot{U}_2 определяется емкостной ветвью, и напряжение \dot{U}_2 отстает от тока на конденсаторе на угол $\pi/2$. В результате общий фазовый сдвиг равен $-\pi$ (рис. 2 б).

2. ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ПОДГОТОВКА К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Схемы, исследуемые в лабораторной работе, можно представить в виде Г-образных четырехполюсников (рис. 3).

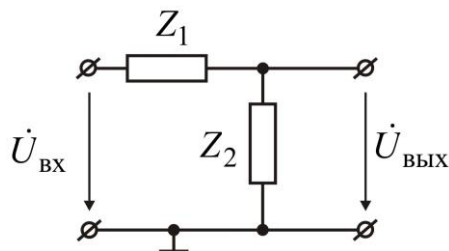


Рис. 3. Г-образный четырехполюсник.

Для R - L цепи рассчитать два варианта: Z_1 – активное сопротивление R_1 ($Z_1 = R_1$), Z_2 – катушка индуктивности с активным сопротивлением обмотки R_k ($Z_2 = R_k + j\omega L_k$), и наоборот. Значения R_1 , R_k и L_k берутся из таблицы 1.

Для R - C цепи рассчитать два варианта: Z_1 – активное сопротивление R_1 ($Z_1 = R_1$), Z_2 – емкость C $Z_2 = -j \frac{1}{\omega C}$ и наоборот. Значения R_1 и C берутся из таблицы 1.

Для каждого случая записать комплексную передаточную функцию (комплексный коэффициент передачи по напряжению): $K_U(j\omega) = \frac{U_{\text{ВЫХ}}(j\omega)}{U_{\text{ВХ}}(j\omega)} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}$.

Таблица 1

№ стенда	R_1 , Ом	L_k , мГн	R_k , Ом	C , мкФ
1 или 11	220	100	190	1,0
2 или 12	100	33	60	4,4
3 или 13	220	100	190	4,4
4 или 14	220	100	190	1,0
5 или 15	100	33	60	4,4
6 или 16	220	100	190	4,4
7 или 17	220	100	190	1,0
8 или 18	100	33	60	4,4
9 или 19	220	100	190	4,4
10 или 20	220	100	190	1,0

Перейти к показательной форме записи (без умножения числителя и знаменателя на комплексно-сопряженное выражение $C - jD$):

$$K_U(j\omega) = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{A + jB}{C + jD} = \frac{\sqrt{A^2 + B^2} \cdot e^{j \arctg B/A}}{\sqrt{C^2 + D^2} \cdot e^{j \arctg D/C}} =$$

$$= \frac{\sqrt{A^2 + B^2}}{\sqrt{C^2 + D^2}} \cdot e^{j(\arctg B/A - \arctg D/C)} = K_U(\omega) \cdot e^{j\varphi(\omega)}.$$

По найденным выражениям $K_U(\omega)$ и $\varphi(\omega)$, построить графики АЧХ и ФЧХ.

В отчете должны быть приведены расчетные выражения и графики АЧХ и ФЧХ.

Методические рекомендации.

1. При построении графиков желательно использовать пакеты MatLab или MatCad.

2. Вычисляя $K_U(\omega)$ и $\varphi(\omega)$, значения L_k , представленные в таблице 1, перевести в Генри, а C – в Фарады.

3. Частоту синусоидального сигнала изменять в диапазоне $100 \leq \omega \leq 100000$.

4. Для каждого из четырех случаев ($R-L$, $L-R$, $R-C$, $C-R$) АЧХ и ФЧХ строить на общей оси абсцисс в функции десятичного логарифма угловой частоты: $K_U(\omega) = f(\lg(\omega))$; $\varphi(\omega) = f(\lg(\omega))$. Каждый график должен быть подписан.

3. ЗАДАНИЯ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

3.1. Изучите описание лабораторного стенда (Методические указания «Стенд и приборы для исследования электрических цепей»).

Электрические схемы исследуемых цепей приведены на рис. 4 а.

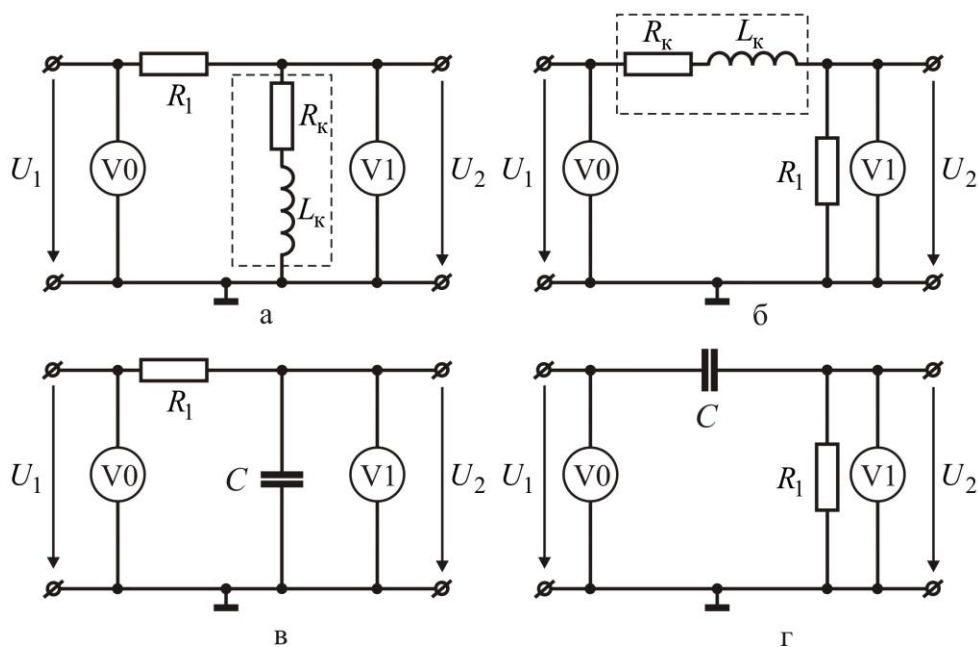


Рис. 4. Электрическая схема эксперимента: цепь R - L (а); цепь L - R (б); цепь R - C (в); цепь C - R (г).

3.2. Исследование частотных характеристик цепи R - L

На наборной панели смонтируйте схему в соответствии с рис. 5. Мини блок резистора R_1 и мини блок индуктивности L_k выбирайте в соответствии с номером стенда (таблица 1).

Активируйте левой кнопкой мыши иконку «ВП ТОЭ» на рабочем столе компьютера. В открывшейся вкладке **Приборы I**, рис. 6, установите приборы V0, V1 для измерения действующего значения. Нажмите указателем мыши на вкладку Меню, и в раскрывшемся списке последовательно активируйте **Приборы II**, **Осциллограф** и **Аналоговый прибор**. Во вкладке «Вход» Аналогового прибора установите значение 7.

Кнопкой «Форма» (рис. 5) установите синусоидальный выходной сигнал, ручкой регулировки частоты установите по индикатору частоту сигнала 100 Гц. Ручкой регулировки амплитуды установите по виртуальному вольтметру V0 напряжение $8 \pm 0,1$ В, и в дальнейшем поддерживайте это значение неизменным.

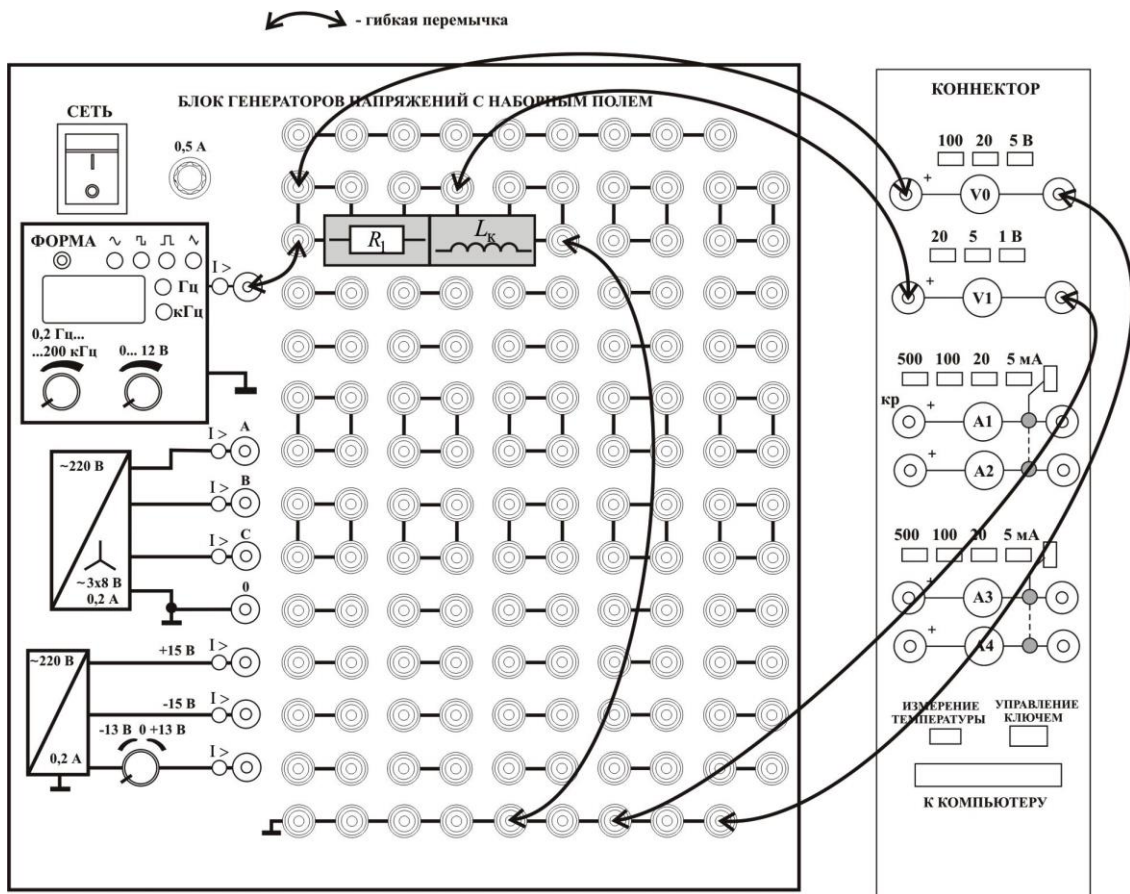


Рис. 5. Монтажная схема (цепь $R-L$).

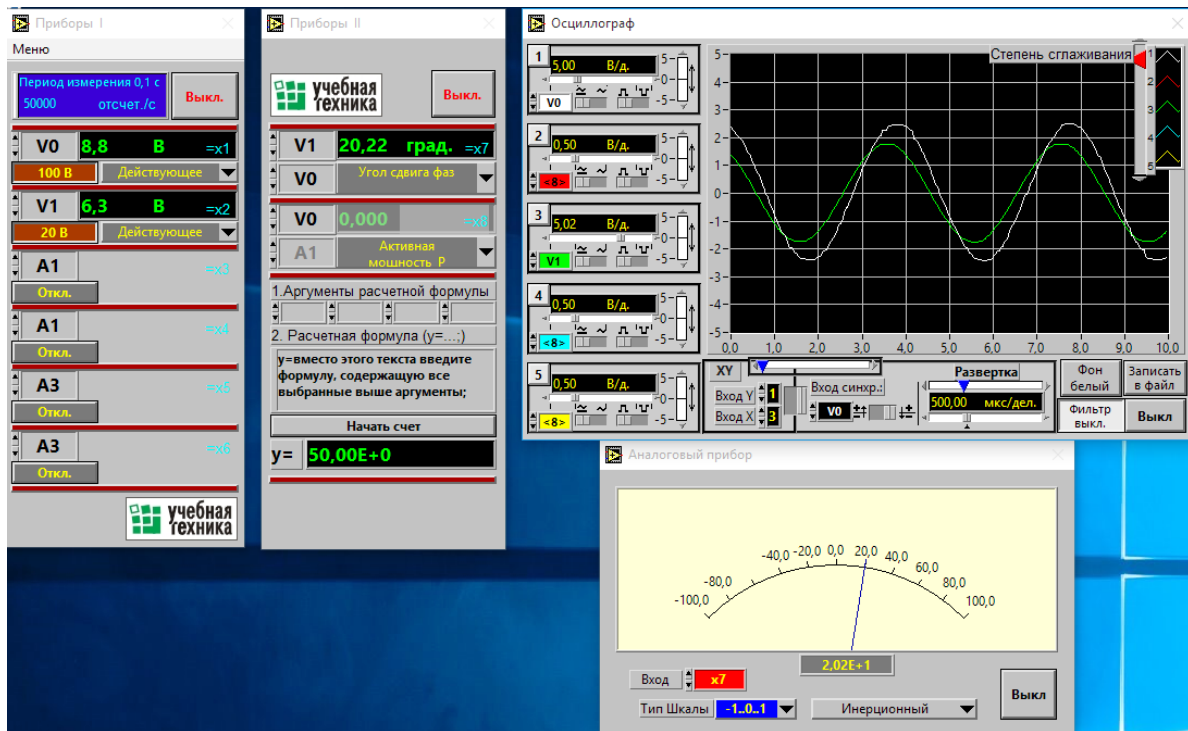


Рис. 6. Активация виртуальных приборов.

Для каждой рекомендованной частоты проведите измерения, занося их в таблицу 2.

Проведите вычисления для каждой строки: $K_U = \frac{U_2}{U_1}$.

Таблица 2 (цепь R - L)

$U_1 = 8 \pm 0,1 \text{ В}; R_1 = \quad \text{Ом}; L_k = \quad \text{мГн}; R_k = \quad \text{Ом.}$					
Измерено			Вычислено		
$f, \text{Гц}$	$U_2, \text{В}$	$\varphi, \text{град}$	$\omega, \text{рад/сек}$	$\lg \omega$	K_U
20			125,6	2,1	
40			251,2	2,4	
80			502,4	2,7	
160			1004,8	3,0	
320			2009,6	3,3	
640			4019,2	3,6	
1280			8038,4	3,9	
1600			10048	4,0	
2000			12560	4,1	

3.3. Исследование частотных характеристик цепи L - R

Электрическая схема эксперимента приведена на рис. 4 б. Поменяйте местами на монтажной панели мини блоки резистора R_1 и индуктивности L_k . Проведите измерения и вычисления для тех же частот, отображая результаты в таблице 3.

По результатам измерений (таблицы 2 – 3) построить графики АЧХ $K_U(\omega) = f(\lg(\omega))$ и ФЧХ $\varphi(\omega) = f(\lg(\omega))$, используя заготовку (рис. 7 а). Каждый график должен быть подписан.

Таблица 3 (цепь L - R)

$U_1 = 8 \pm 0,1 \text{ В}; R_1 = \quad \text{Ом}; L_k = \quad \text{мГн}; R_k = \quad \text{Ом}.$					
Измерено			Вычислено		
$f, \text{ Гц}$	$U_2, \text{ В}$	$\varphi, \text{ град}$	$\omega, \text{ рад/сек}$	$\lg \omega$	K_U
20			125,6	2,1	
40			251,2	2,4	
80			502,4	2,7	
160			1004,8	3,0	
320			2009,6	3,3	
640			4019,2	3,6	
1280			8038,4	3,9	
1600			10048	4,0	
2000			12560	4,1	

3.4 . Исследование частотных характеристик цепи C - R

Электрическая схема эксперимента приведена на рис. 4 г. Замените мини блок индуктивности L_k на мини блок конденсатора C . Для каждой рекомендованной частоты проведите измерения, занося их в таблицу 4.

Таблица 4 (цепь C - R)

$U_1 = 8 \pm 0,1 \text{ В}; R_1 = \quad \text{Ом}; C = \quad \text{мкФ}.$					
Измерено			Вычислено		
$f, \text{ Гц}$	$U_2, \text{ В}$	$\varphi, \text{ град}$	$\omega, \text{ рад/сек}$	$\lg \omega$	K_U
20			125,6	2,1	
40			251,2	2,4	
80			502,4	2,7	
160			1004,8	3,0	
320			2009,6	3,3	
640			4019,2	3,6	
1280			8038,4	3,9	
1600			10048	4,0	
2000			12560	4,1	

3.5. Исследование частотных характеристик цепи R - C

Электрическая схема эксперимента приведена на рис. 4 в. Поменяйте местами на монтажной панели мини блоки резистора R_1 и конденсатора C . Для каждой рекомендованной частоты проведите измерения, занося их в таблицу 5.

Таблица 5 (цепь R - C)

$U_1 = 8 \pm 0,1 \text{ В}; R_1 = \quad \text{Ом}; C = \quad \text{мкФ.}$					
Измерено			Вычислено		
$f, \text{Гц}$	$U_2, \text{В}$	$\varphi, \text{град}$	$\omega, \text{рад/сек}$	$\lg \omega$	K_U
20			125,6	2,1	
40			251,2	2,4	
80			502,4	2,7	
160			1004,8	3,0	
320			2009,6	3,3	
640			4019,2	3,6	
1280			8038,4	3,9	
1600			10048	4,0	
2000			12560	4,1	

По результатам измерений (таблицы 7.4 – 7.5) построить графики АЧХ $K_U(\omega) = f(\lg(\omega))$ и ФЧХ $\varphi(\omega) = f(\lg(\omega))$, используя заготовку (рис. 7 б). Каждый график должен быть подписан.

После выполнения всех расчетов результаты показать преподавателю и, получив его разрешение, выключить питание стенда.

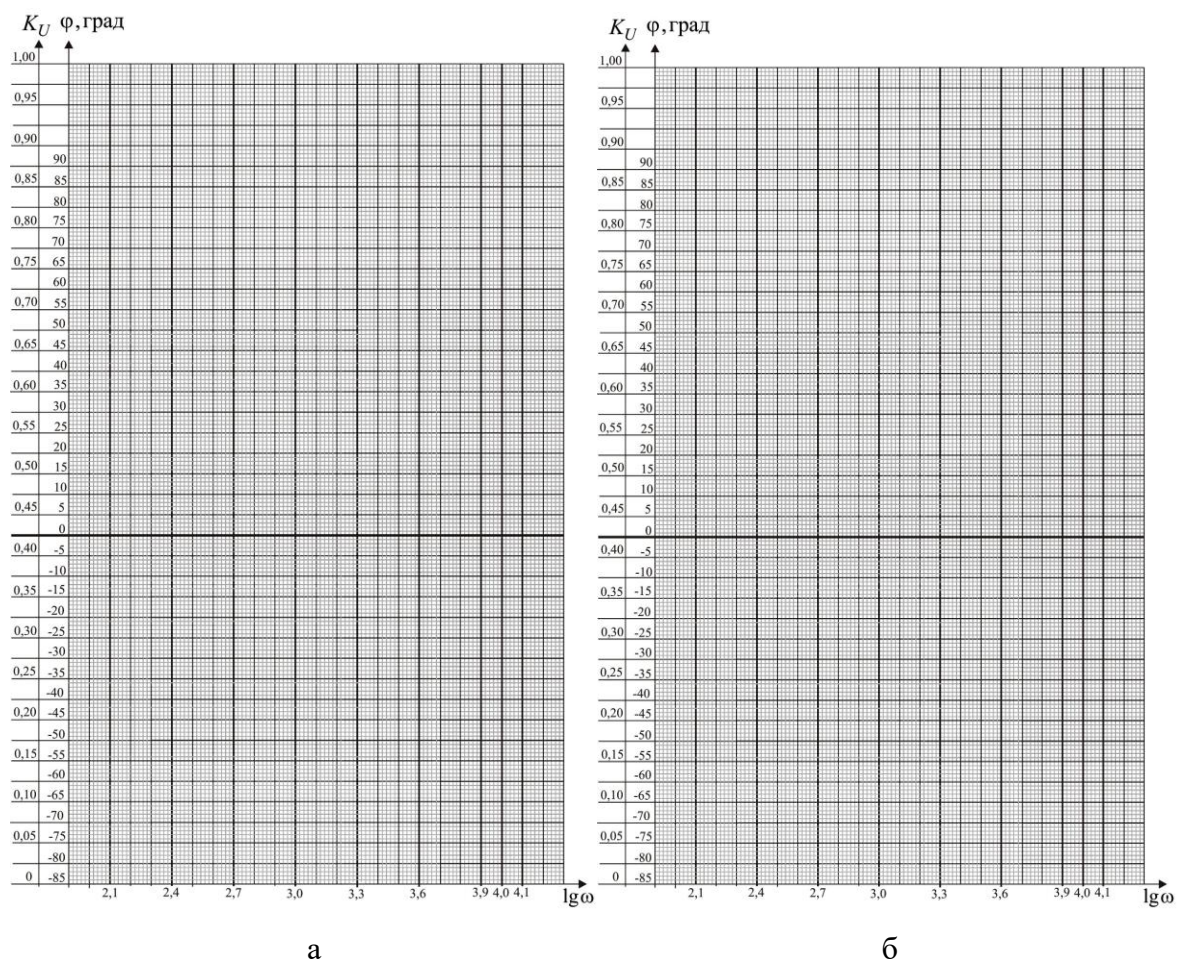


Рис. 7. Заготовки для графиков: $R-L$ и $L-R$ (а); $R-C$ и $C-R$ (б).

ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ

Форма отчета или предоставляется студентам в электронном виде лектором потока, или копируется и распечатывается с сайта кафедры <http://fn.bmstu.ru/learning-work-fs-7/laboratory-works-fs-7>.

Перед началом работы студенты должны представить преподавателю отчет с расчетными выражениями и графиками АЧХ и ФЧХ, подготовленными заранее в соответствии с номером стенда.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие напряжения (токи) называют гармоническими?
2. Как связаны частоты f , ω и период колебаний T ?
3. Дайте определение амплитудного и действующего значения напряжения? Как они связаны?
4. Как зависят от частоты ω активные и реактивные сопротивления цепи? В чем разница понятий активного и реактивного сопротивления?
5. Как рассчитать в комплексной форме полное сопротивление участка цепи? Какова связь между полным комплексным сопротивлением и полным сопротивлением?
6. Дайте определение комплексной передаточной функции, какой смысл имеют её модуль и аргумент?
7. Дайте определение амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристикам цепи?
8. Как строятся частотные характеристики цепи в декартовой системе координат?
9. Как строятся частотные характеристики в полярной системе координат?
10. Каков фазовый сдвиг между током и напряжением на пассивных элементах электрической цепи (r , L , C)?
11. Как качественно рассчитать передаточную характеристику цепи на малых частотах; что при этом понимают под понятием "малая" частота?
12. Как качественно рассчитать передаточную характеристику на больших частотах?

ЛИТЕРАТУРА

1. Борисов Ю. М., Липатов Д. Н., Зорин Ю. Н. Электротехника: учебник для вузов / Борисов Ю. М., Липатов Д. Н., Зорин Ю. Н. - 3-е изд. - СПб.: БХВ-Петербург, 2014. - 587 с.: ил. - ISBN 978-5-9775-0723-3.
2. Касаткин А. С., Немцов М. В. Электротехника: учебник для вузов - 12-е изд., стер. - М.: Академия, 2010. - 544 с.: ил. - ISBN 978-5-7695-5772-9.