



Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

**Исследование частотных фильтров на основе катушек
индуктивности, резисторов и конденсаторов**

Методические указания
по выполнению лабораторной работы № 4 по курсу
“Проектирование средств измерений и контроля”

ТОМСК 2022

Цель работы

Изучить погрешности, характерные для катушек индуктивности. Получить навыки компьютерного моделирования измерительных схем и использования электроизмерительных приборов программы компьютерного моделирования Multisim для определения амплитудно-частотных и фазо- частотных характеристик электронных схем.

1. Катушки индуктивности

1.1. Основные понятия о катушках индуктивности

Устройство катушки индуктивности

Катушка индуктивности представляет собой обмотку из проводящего материала, как правило, медной проволоки, намотанной вокруг либо железосодержащего сердечника, либо вообще без сердечника.

Применение в качестве сердечника материалов с высокой магнитной проницаемостью, более высокой, чем воздух, способствует удержанию магнитного поля вблизи катушки, тем самым увеличивая ее индуктивность. Индуктивные катушки бывают разных форм и размеров.

Большинство изготавливаются путем намотки эмалированного медного провода поверх ферритового сердечника.

Некоторые индуктивные катушки имеют регулируемый сердечник, при помощи которого обеспечивается изменение индуктивности.



Миниатюрные катушки могут быть вытравлены непосредственно на печатной плате в виде спирали. Индуктивности с малым значением могут быть расположены в микросхемах с использованием тех же технологических процессов, которые используются при создании транзисторов.

Катушка индуктивности является пассивным компонентом электронных схем, основное предназначение которой является сохранение энергии в виде магнитного поля. Свойство катушки индуктивности чем-то схоже с конденсатором, который хранит энергию в виде электрического поля.

Индуктивность (измеряется в Генри) — это эффект возникновения магнитного поля вокруг проводника с током. Ток, протекающий через катушку индуктивности, создает магнитное поле, которое имеет связь с электродвижущей силой (ЭДС) оказывающее противодействие приложенному напряжению.

Возникающая противодействующая сила (ЭДС) противостоит изменению переменного напряжения и силе тока в катушке индуктивности. Это свойство индуктивной катушки называется индуктивным сопротивлением. Следует отметить, что индуктивное сопротивление находится в противофазе к емкостному реактивному сопротивлению конденсатора в цепи переменного тока. Путем увеличения числа витков можно повысить индуктивность самой катушки.

Накопленная энергия в индуктивности

Как известно магнитное поле обладает энергией. Аналогично тому, как в полностью заряженном конденсаторе существует запас электрической энергии, в индуктивной катушке, по обмотке которой течет ток, тоже существует запас — только уже магнитной энергии.



Рис. 1. Внешний вид катушек индуктивности

Энергия, запасенная в катушке индуктивности равна затраченной энергии необходимой для обеспечения протекания тока I в противодействии ЭДС. Величина запасенной энергии в индуктивности можно рассчитать по формуле:

$$E_{\text{stored}} = \frac{1}{2}LI^2 \quad (1)$$

где L — индуктивность, I — ток, протекающий через катушку индуктивности.

Индуктивность в электрических цепях

В то время как конденсатор оказывает сопротивление изменению переменного напряжения, индуктивность же сопротивляется переменному току. Идеальная индуктивность не будет оказывать сопротивление постоянному току, однако, в реальности все индуктивные катушки сами по себе обладают определенным сопротивлением.

Связь между изменяющимся во времени напряжением $v(t)$ проходящим через катушку с индуктивностью L и изменяющимся во времени током $i(t)$, проходящим через нее описывается дифференциальным уравнением вида:

$$v(t) = L \frac{di(t)}{dt} \quad (2)$$

Когда переменный синусоидальный ток протекает через катушку индуктивности, в ней возникает синусоидальное переменное напряжение (ЭДС). Амплитуда ЭДС зависит от амплитуды тока и частоты синусоиды. ЭДС можно выразить следующим уравнением:

$$V = I \times \omega L \quad (3)$$

где $\omega = 2\pi F$ является угловой частотой резонансной частоты F :

Причем, фаза тока отстает от напряжения на 90 градусов. В конденсаторе же все наоборот, там ток опережает напряжение на 90 градусов. Когда индуктивная катушка соединена с конденсатором (последовательно либо параллельно), то образуется LC цепь, работающая на определенной резонансной частоте.

Индуктивное сопротивление X_L определяется по формуле:

$$X_L = \omega L = 2\pi FL \quad (4)$$

где X_L — индуктивное сопротивление, ω — угловая частота, F — частота в герцах, и L индуктивность в генри.

Индуктивное сопротивление — это положительная составляющая импеданса. Оно измеряется в омах. Импеданс катушки индуктивности (индуктивное сопротивление) вычисляется по формуле:

$$Z = j\omega L = j2\pi FL = jX_L \quad (5)$$

1.2. Схемы соединения катушек индуктивностей

Параллельное соединение индуктивностей

Напряжение на каждой из представленных на рис.2 катушек индуктивностей, соединенных параллельно, одинаково. Эквивалентную (общую) индуктивность параллельно соединенных катушек можно определить по формуле:

$$\frac{1}{L_{\text{eq}}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots + \frac{1}{L_n} \quad (6)$$

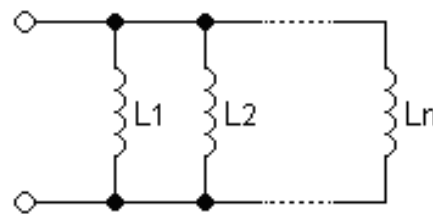


Рис. 2. Параллельное соединение катушек

Последовательное соединение индуктивностей

Ток, протекающий через показанные на рис.3 последовательно соединенные катушки индуктивности, одинаков, но напряжение на каждой катушке индуктивности отличается. Сумма разностей потенциалов (напряжений) равна общему

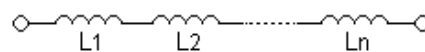


Рис. 3. Последовательное соединение катушек

напряжению. Общая индуктивность последовательно соединенных катушек можно высчитать по формуле:

$$L_{eq} = L_1 + L_2 + \dots + L_n \quad (7)$$

Уравнения 6 и 7 справедливы при условии, что магнитное поле каждой из катушек не оказывает влияние на соседние катушки.

Добротность катушки индуктивности

На практике катушка индуктивности имеет последовательное сопротивление, созданное медной обмоткой самой катушки. Это последовательное сопротивление преобразует протекающий через катушку электрический ток в тепло, что приводит к потере качества индукции, то есть добротности. Добротность является отношением индуктивного сопротивления катушки к активному.

Добротность катушки индуктивности может быть найдена через следующую формулу:

$$Q = \frac{\omega L}{R} \quad (8)$$

где R является собственным активным сопротивлением обмотки.

1.3. Основы расчета параметров катушек

Катушка индуктивности представляет собой цилиндрический сердечник длиной l с площадью основания A . На боковую сторону сердечника намотана катушка из N витков изолированного провода. Индуктивность L такой катушки вычисляется по формуле:

$$L = \frac{\mu_0 \mu_r N^2 A}{l}, \quad (9)$$

где:

- μ_0 = проницаемость свободного пространства = $4\pi \times 10^{-7}$ Гн / м;
- μ_r = относительная проницаемость материала сердечника;
- N = число витков;
- A = Площадь поперечного сечения катушки в квадратных метрах (m^2);
- l = длина катушки в метрах (м).

Индуктивность катушки с воздушным сердечником значительно ниже. Она определяется выражением:

$$L = \frac{r^2 N^2}{9r + 10l}, \quad \text{где:} \quad (10)$$

- L = индуктивность в мкГн;
- r = внешний радиус катушки;
- l = длина катушки.

Миниатюрные катушки могут быть вытравлены непосредственно на печатной плате в виде спирали. Индуктивность такой плоской катушки:

$$L = \frac{r^2 N^2}{6r + 11d}$$

- L = индуктивность в мкГн;
- r = средний радиус катушки;
- d = глубина катушки.

Выводы радиодеталей соединяются проводами или проводниками печатной платы. Эти соединители обладают активной и индуктивной составляющими сопротивления электрическому току, что приводит к появлению погрешностей. Индуктивность прямого проводника может быть оценена выражением:

$$L = 5.081 \left(\ln \frac{4l}{d} - 1 \right)$$



Рис. 4. Катушка индуктивности

- L = индуктивность в нГн;
- l = длина проводника;
- d = диаметр проводника в тех же единицах, что и l .

1.4. Маркировка катушек индуктивности

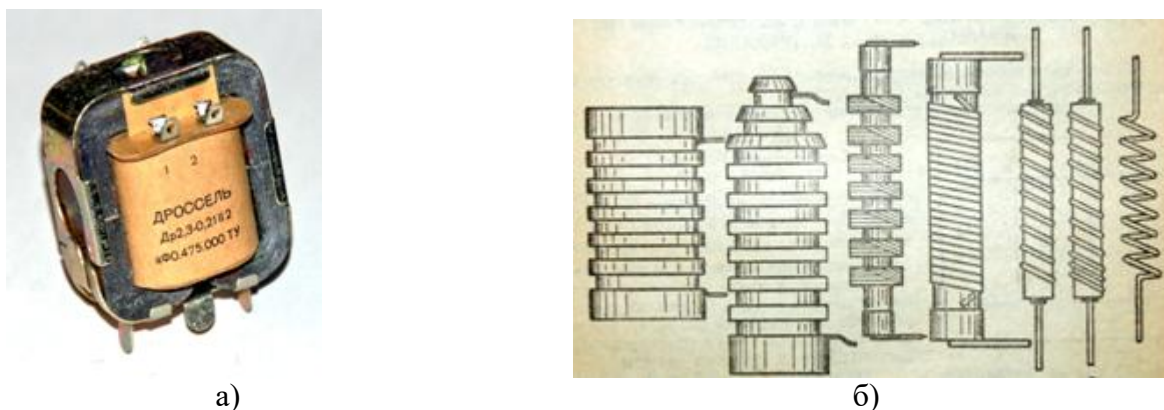


Рис. 5. Дроссели промышленного производства: а – низкочастотный; б – высокочастотные.

Катушку индуктивности, предназначенную для ограничения переменной составляющей электрического тока, называют **электрическим дросселем**. В зависимости от величины индуктивности выпускаются дроссели низкочастотные и высокочастотные. Высокочастотные дроссели бывают с постоянным значением индуктивности и с переменным значением индуктивности за счет подстраиваемого ферромагнитного сердечника.

Пример конструкции низкочастотного дросселя приведен на рис. 5а, а высокочастотных – на рис. 5б. На данных дросселях указана их марка. Параметры дросселей приведены в их паспортах.

Также для монтажа в печатные платы промышленностью выпускаются высокочастотные дроссели с цветовой маркировкой. Они имеют высокую добротность. Их внешний вид и расшифровка цветовой маркировки приведены на рис. 6.

1.5. Применение катушек индуктивности

Индуктивности широко используются в аналоговых схемах и схемах обработки сигналов. Они в сочетании с конденсаторами и другими радиокомпонентами образуют специальные схемы, которые могут усилить или отфильтровать сигналы определенной частоты.

Катушки индуктивности получили широкое применение начиная от больших катушек индуктивности, таких как дроссели в источниках питания, которые в сочетании с конденсаторами фильтра устраняют остаточные помехи и другие колебания на выходе источника питания, и до столь малых индуктивностей, которые располагаются внутри интегральных микросхем.

Две (или более) катушки индуктивности,

Дроссели. Цветовая маркировка				
Цвет	1-й элемент	2-й элемент	Множитель	Допуск
Золотой			0,01μН	±5%
Серебряный			0,1μН	±10%
Черный		0	1μН	±20%
Коричневый	1	1	10μН	
Красный	2	2	100μН	
Оранжевый	3	3	1mH	
Желтый	4	4		
Зеленый	5	5		
Голубой	6	6		
Фиолетовый	7	7		
Серый	8	8		
Белый	9	9		

Пример обозначения	
33 мкГ ±10%	
39 мкГ ±20%	
5,1 мГ ±5%	
1,5 мГ ±20%	

Рис. 6. Цветовая маркировка высокочастотных дросселей.

которые соединены единым магнитным потоком, образуют **трансформатор**. Он является основным компонентом схем электроснабжения. Эффективность трансформатора возрастает с увеличением частоты напряжения.

По этой причине, в самолетах используется переменное напряжение с частотой 400 герц вместо обычных 50 или 60 герц, что позволяет значительно сэкономить на массе используемых трансформаторов в электроснабжении самолета.

Катушка индуктивности, питаемая импульсным током от транзисторного ключа, иногда применяется в качестве источника высокого напряжения небольшой мощности в слаботочных схемах, когда создание отдельного высокого питающего напряжения в блоке питания невозможно или экономически нецелесообразно. В этом случае на катушке из-за самоиндукции возникают выбросы высокого напряжения, которые можно использовать в схеме выпрямив и сгладив.

Так же индуктивности используются в качестве устройства для хранения энергии в импульсных стабилизаторах напряжения, в высоковольтных электрических системах передачи электроэнергии для преднамеренного снижения системного напряжения или ограничения ток короткого замыкания.

2. Задание к лабораторной работе «Исследование частотных фильтров на основе катушек индуктивности, резисторов и конденсаторов»

Фильтр это частотно-избирательное устройство, которое пропускает сигналы определенных частот и задерживает или ослабляет сигналы других частот. При этом изменяются амплитуда и фаза гармоник составляющих входной сигнал. Зависимость амплитуды коэффициента преобразования сигнала от его частоты называют амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) фильтра. Зависимость фазы этого коэффициента от частоты называют фазо-частотной характеристикой (ФЧХ) фильтра.

По виду АЧХ выделяют: фильтры нижних частот (ФНЧ); фильтры верхних частот (ФВЧ); полосовые фильтры (ПФ); режекторные (заграждающие) фильтры (РЖ). Также существуют фазовые фильтры (ФФ) у которых коэффициент передачи остается постоянным, а фазовый сдвиг зависит от частоты.

Схемы частотных фильтров содержат резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности (дроссели). Схема предлагаемого Вам для исследования фильтра выбирается в соответствии с номером Вашего варианта, который равен Вашему номеру в списке группы. Схемы предлагаемых для исследования фильтров приведены на рис. 7.

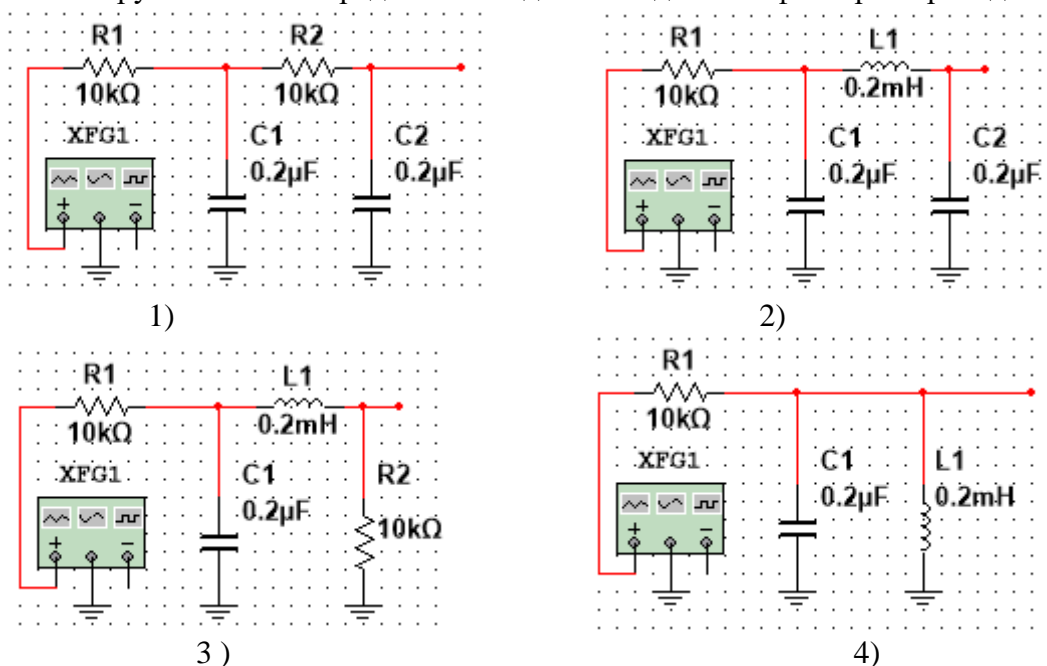
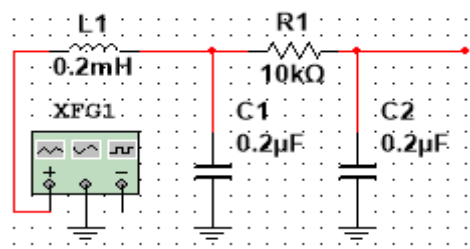
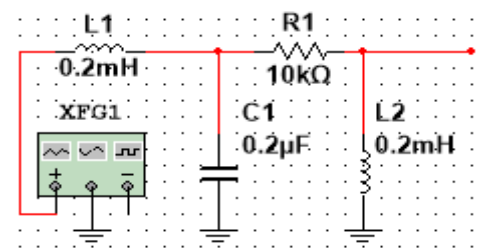


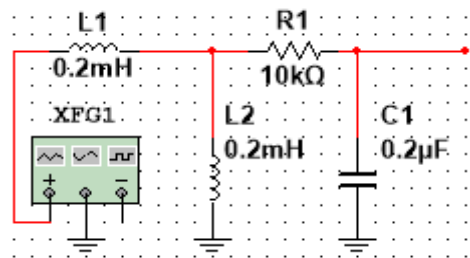
Рис. 7. Варианты схем для исследований.



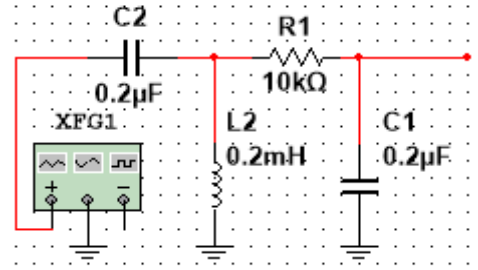
5)



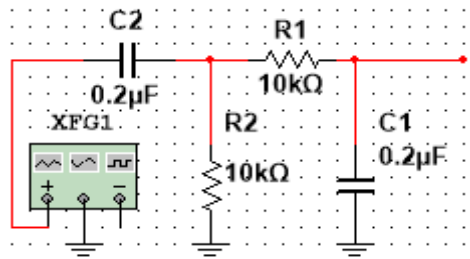
6)



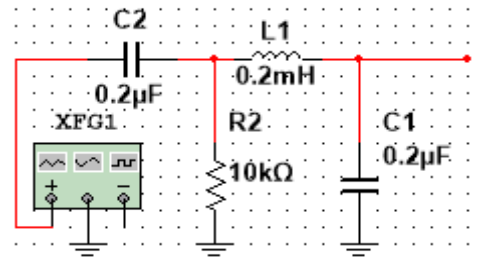
7)



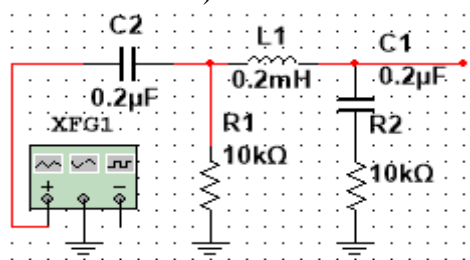
8)



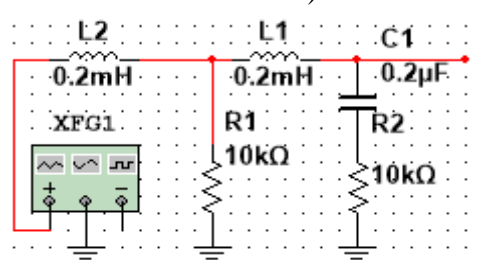
9)



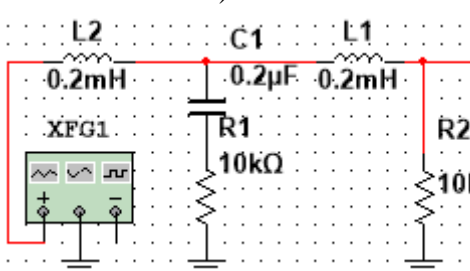
10)



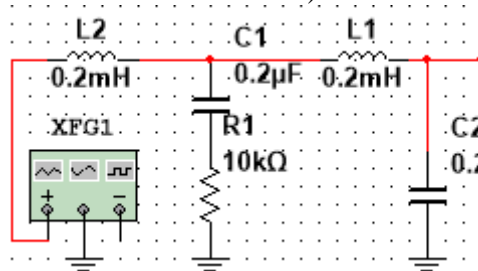
11)



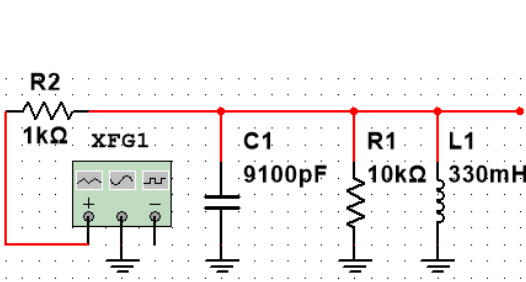
12)



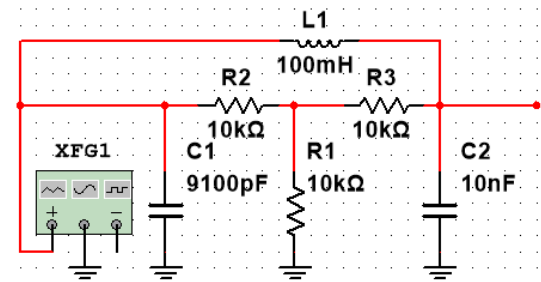
13)



14)

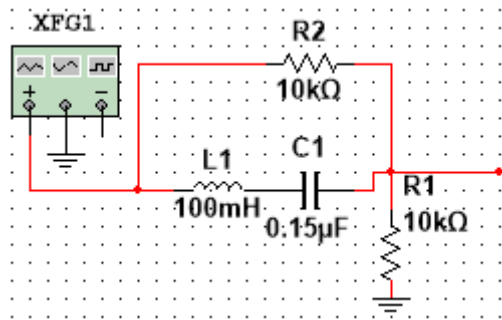


15)

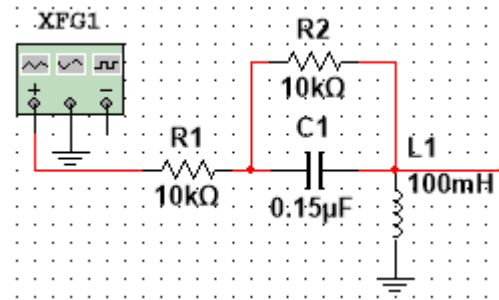


16)

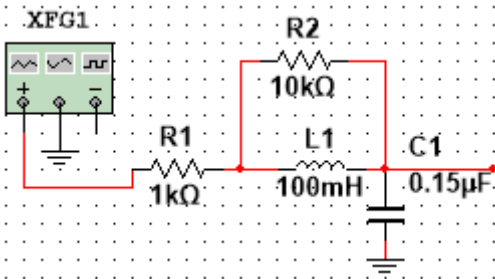
Рис. 7. (Продолжение). Варианты схем для исследований.



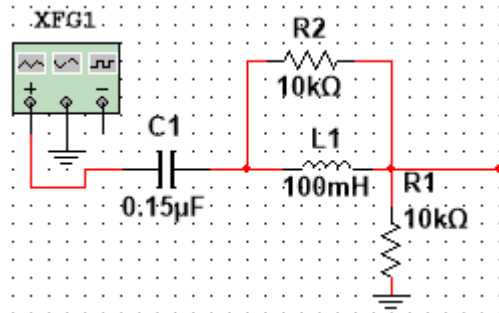
17)



18)



19)



20)

Рис. 7. (Окончание). Варианты схем для исследований.

Снять амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) заданной схемы. Для этого собрать на рабочем столе схему измерений рис. 8. Установить вольтметр в режим измерения переменного напряжения (AC).

Установить амплитуду входного сигнала 10В. Снимать в диапазоне 50 - 200000 Гц выходное напряжение.

Результаты измерений внести в таблицу 1.



Рис. 8. Общая схема включения исследуемой схемы

Результаты определения АЧХ вольтметром.

Таблица 1.

f , кГц	0.05	0.1	0.2	200
U_2								
K_U								

В схеме рис. 8 заменить мультиметр U_1 на двухканальный осциллограф. Один канал осциллографа подключить к выходу генератора XPG1, а второй – к выходу исследуемой схемы. АЧХ определяется как результат деления амплитуды выходного сигнала исследуемой схемы на амплитуду входного сигнала. Результаты измерений занести в таблицу 2.

Результаты определения АЧХ и ФЧХ осциллографом

Таблица 2.

f , кГц	0.2	1.0	5.0	10.0	250.0
U_2								
K_U								
(T2 – T1)								
$\varphi(f_k)$								

По результатам измерений построить АЧХ фильтров.

При снятии осциллографом ФЧХ нужно устанавливать значения выходного напряжения и частоты генератора сигнала, записанные в таблице 2. Это значит, что ФЧХ будет измеряться в тех же условиях, что и АЧХ.

Установить цвета проводников сигналов – входного красным, выходного – синим. Для этого щелкнуть ПКМ по проводнику, в открывшемся меню выбрать «Цвет сегмента». Затем, в появившемся окне выбрать нужный цвет.

Открыть переднюю панель осциллографа. Выставить параметры осциллографа в соответствии с рис. 9.

В блоке «Развертка» установить шкалу 500 $\mu\text{s}/\text{Div}$ и режим Y/T.

В каналах «А» и «В» установить одинаковую чувствительность 100 v/div в режиме переменного тока AC. В блоке «Синхронизация» включить режим Авто.

Произвести измерение сигналов включением режима моделирования кнопкой — Пуск. Это нужно делать при каждом изменении параметров сигнала или цепи.

Подвести красную и синюю визирные линии в точки максимальных значений соответственно входного и выходного сигналов (см. рис.9). В правом нижнем окне прочесть разность $(T_2 - T_1)$, равную смещению сигналов по оси времени. Фазовый сдвиг ϕ сигнала вычисляется как:

$$\phi(f_k) = - (T_2 - T_1) \cdot f_k \cdot 360^\circ \quad (11)$$

Результаты определения $\phi(f_k)$ занести в таблицу 2.

Проделать подобные операции для всех значений частот, записанных в таблице. При изменении частоты сигнала нужно менять скорость развертки, размер окна и чувствительность каналов так, чтобы в пределах экрана укладывался примерно один период сигнала.

По результатам измерений построить АЧХ и ФЧХ исследуемого фильтра.

Провести определение АЧХ и ФЧХ исследуемой схемы при помощи Плоттера Боде. Для этого необходимо вход исследуемой схемы соединить с входными цепями IN Плоттера Боде, выход схемы – с цепями OUT Плоттера Боде.

Открыть панель измерителя для измерения АЧХ (кнопка Magnitude), как показано на рис. 10. По вертикальной оси Y установить линейный масштаб, максимальное усиление $F = 1$, минимальное значение $I=0$. По оси X – логарифмический масштаб, $F = 100 \text{ GHz}$, $I = 1 \text{ Hz}$. При необходимости скорректировать значения F и I по осям.

Открыть панель измерителя для измерения

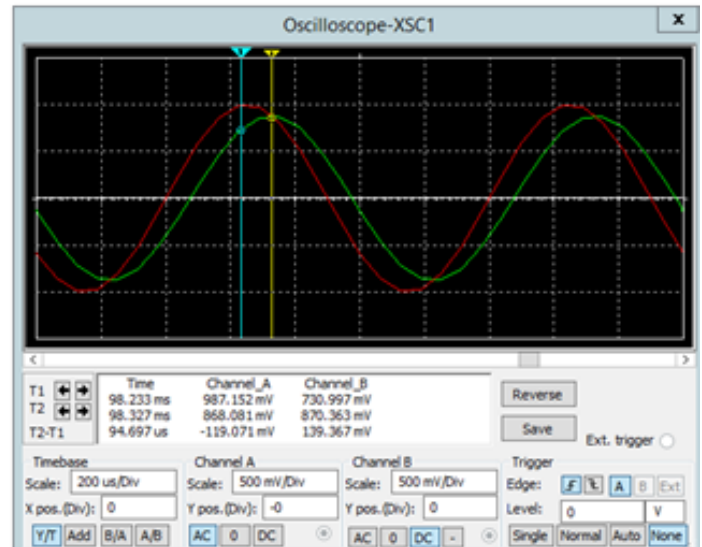


Рис. 9. Панель управления осциллографом.

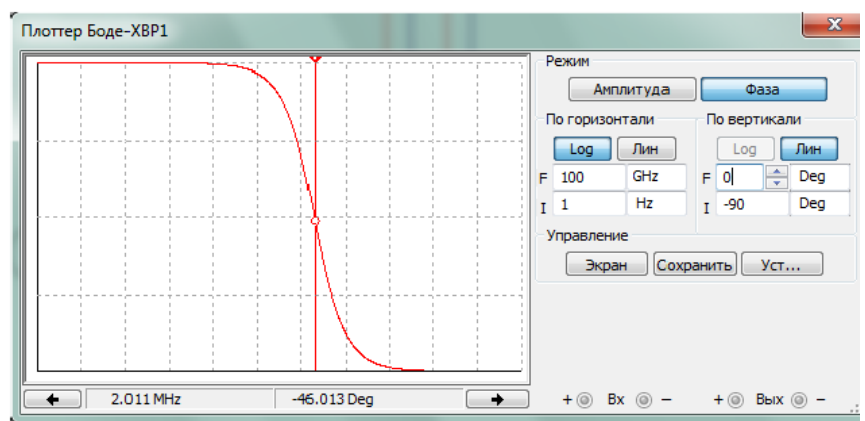


Рис. 10. Панель управления Плоттером Боде.

ФЧХ (кнопка Phase) и настроить параметры прибора так, как показано на рис. 10. По вертикальной оси Y установить линейный масштаб, максимальное усиление $F = 0^\circ$, минимальное значение $I = -90^\circ$. По оси X – логарифмический масштаб, $F = 20$ кГц, $I = 100$ Гц. При необходимости скорректировать значения F и I по осям.

Нарисовать Таблицу 3 для записи результатов измерений и заполнить ее.

Результаты определения АЧХ и ФЧХ Плоттером Бode

Таблица 3.

f , кГц	0.2	1.0	5.0	10.0	250.0
U_2								
K_U								
(T2 – T1)								
$\varphi(f_k)$								

По результатам измерений построить АЧХ фильтров, полученных разными приборами и методами. Сравнить результаты измерений и сделать выводы.

Составление отчета.

Оформить все полученные результаты в виде отчета. Отчет должен содержать:

1. Титульный лист с указанием названия работы, № группы, ФИО.
2. Цель работы.
3. Названия заданий к экспериментальным исследованиям.
4. Схемы исследуемых цепей.
5. Результаты экспериментальных измерений и теоретических расчетов. Временные диаграммы и графики, построенные по результатам измерений и расчетов.
6. Выводы и сопоставление результатов измерений и расчетов.

Образец оформления отчета приведен в ПРИЛОЖЕНИИ 1 описания первой лабораторной работы. Отчет сформировать в виде файла Word (.doc или .docx). К отчету приложить модель исследуемых схем в виде файла Multicim (.ms13 или .ms14). Эти два файла необходимо передать преподавателю, прикрепляя их на странице задания по кнопке «Загрузить файл».