

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
**Государственное образовательное учреждение высшего профес-**  
**сионального образования**  
**“Санкт-Петербургский государственный электротехнический**  
**университет “ЛЭТИ”**  
**им. В.И. Ульянова (Ленина)” (СПбГЭТУ)**

**Кафедра теоретических основ радиотехники**

---

**А.А. ДАНИЛИН В.А. СОСНОВСКИЙ**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

**к выполнению лабораторной работы по дисциплине**  
**“Приборы и техника радиоизмерений”**

**ИССЛЕДОВАНИЕ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ**  
**ХАРАКТЕРИСТИК АКТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ**

**Санкт-Петербург**

**2022 г.**

## ОГЛАВЛЕНИЕ

4. ИССЛЕДОВАНИЕ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ.....	2
ХАРАКТЕРИСТИК АКТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ .....	2
4.1. Частотные характеристики радиотехнических устройств и их параметры... 2	
4.2. Компьютерные измерители АЧХ.....	10
4.3. Состав лабораторной установки.....	11
4.4. Задание и указания к выполнению лабораторной работы .....	15
4.4.1. Подготовка лабораторной установки к работе	15
4.4.2. Измерение АЧХ фильтров и их параметров.	16
4.4.3. Исследование динамических искажений АЧХ узкополосного резонансного контура	18
4.4.4. Исследование влияния уровня входного сигнала на вид АЧХ активных фильтров	19
4.5. Содержание отчета .....	20
4.6. Контрольные вопросы .....	20

### 4. ИССЛЕДОВАНИЕ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АКТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ

В лабораторной работе изучаются основные методы измерений амплитудно-частотных характеристик активных фильтров различного вида. Определяются их основные параметры - полоса пропускания, коэффициент прямоугольности и пр.

#### 4.1. Частотные характеристики радиотехнических устройств и их параметры

Важной характеристикой радиотехнических устройств является *комплексный коэффициент передачи*, который связывает комплексные амплитуды гармонического воздействия на входе и реакции цепи на выходе. Для четырехполюсного устройства это коэффициент передачи по напряжению, равный отношению комплексных амплитуд напряжений на выходе  $\dot{U}_2 = U_{m2} \cdot \exp(j\varphi_2)$  и на входе  $\dot{U}_1 = U_{m1} \cdot \exp(j\varphi_1)$  при заданном сопротивлении нагрузки  $Z_n$ .

Амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) линейной цепи называют зависимость модуля его комплексной коэффициента передачи от частоты. Приборы, предназначенные для получения АЧХ, называют *измерителями АЧХ* или *скалярными анализаторами цепей* (scalar network analyzer).

Понятие комплексного коэффициента передачи и АЧХ применимо к линейным устройствам. Его используют и в случае *активных* усилителей, фильтров и пр. при условии, что входное и выходное напряжения представляют собой неискаженные гармонические колебания одной частоты. В таких устройствах АЧХ обычно зависит от уровня входного сигнала и режима работы устройства.

Наиболее часто приходится измерять АЧХ *фильтров*. Это устройства, осуществляющие частотную селекцию сигналов. Фильтр выделяет из сигнала с широким спектром частотные составляющие, попадающие в заданную полосу частот, называемую *полосой пропускания* (ПП). Остальные частотные составляющие попадают в другую заданную полосу частот, называемую *полосой заграждения* (ПЗ). В реальных фильтрах между ПП и ПЗ располагается «переходная область». Взаимное расположение ПП и ПЗ определяет частотные свойства фильтра и позволяет отнести его к одному из четырёх видов:

- фильтры нижних частот (ФНЧ) – ПП располагается в области низких частот;
- фильтры верхних частот (ФВЧ) – ПП располагается в области высоких частот;
- полосовые фильтры (ПФ) – ПП располагается в области средних частот;
- режекторные фильтры (РФ) – ПЗ располагается в области средних частот.

АЧХ идеальных фильтров разного типа приведены на рисунке 4.1.

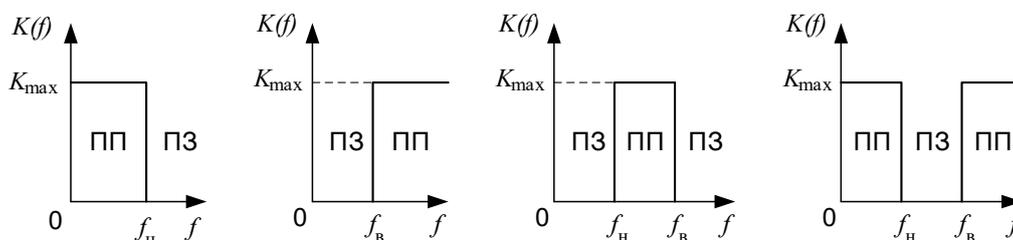


Рис. 4.1 АЧХ идеальных фильтров.

Частотную зависимость коэффициента передачи фильтра, отнесенную к максимальному значению  $K(f)/K_0$ , называют *нормированной АЧХ* устройства. Коэффициент передачи чаще строят в линейном масштабе по оси уровня (относительные единицы). Обратную коэффициенту передачи величину – *ослабление (затухание)* — строят, как правило, в логарифмических единицах (дБ).

Вид АЧХ определяет *рабочие параметры* фильтров. Наиболее важным является *полоса пропускания*  $\Delta f$  — диапазон частот, в котором АЧХ фильтра больше заранее выбранного значения. Наиболее часто используют ширину полосы пропускания по уровню  $K(f)/K_{\max} = 0,707$  (-3 дБ)). Нижняя и верхняя *частоты среза*  $f_{\text{н}}$  и  $f_{\text{в}}$  полосно-пропускающего фильтра соответствуют ее границам. Полоса пропускания ФНЧ ограничена нулевой частотой и верхней частотой среза  $f_{\text{в}}$ . Полоса ФВЧ занимает область частот от нижней частоты среза  $f_{\text{н}}$  до бесконечности, полоса ППФ — от  $f_{\text{н}}$  до  $f_{\text{в}}$ . Частотная характеристика полосно-заграждающего фильтра (ПЗФ) соответствует перевернутой АЧХ ППФ. Ее параметром является *полоса заграждения*  $\Delta f_z$ , которую отсчитывают по заданному уровню (обычно -20 дБ, то есть в 10 раз меньше максимума АЧХ).

Форму АЧХ характеризует *коэффициент прямоугольности*. Это отношение ширины полосы пропускания, измеренной по одному уровню  $d_1$ , к ширине полосы, измеренной по другому уровню  $d_2$ . Удобно выбрать уровни  $d_1$  и  $d_2$  равными 0,707 и 0,1 (-3 дБ и -20 дБ) соответственно:

$$K_{\text{п}} = \Delta f_{0,707} / \Delta f_{0,1}.$$

Коэффициент прямоугольности для реального фильтра всегда меньше единицы.

Форма АЧХ реального фильтра отличается от идеальной прямоугольной. При проектировании фильтров используют несколько стандартных аппроксимаций формы АЧХ. Наиболее часто используют характеристики Баттерворта, Чебышева и Кауэра (эллиптическая АЧХ).

Семейство максимально гладких функций Баттерворта разных порядков  $n$  для АЧХ ФНЧ, нормированных по частоте, приведено на рис. 4.2.

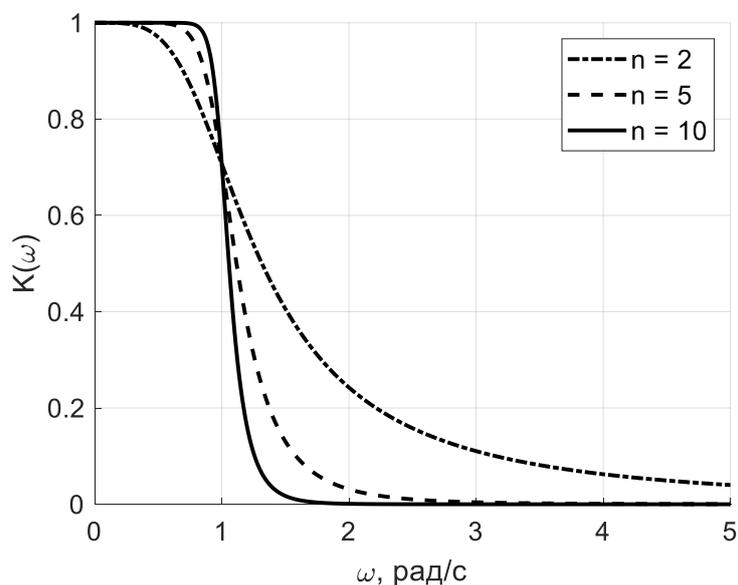


Рис. 4.2 АЧХ для функций Баттерворта различных порядков  $n$ .

Функция Баттерворта максимальна на нулевой частоте и обеспечивает гладкую частотную зависимость не только АЧХ, но и ФЧХ. Однако она не обеспечивает резкого спада АЧХ на границе полосы пропускания. Существует другой тип аппроксимации, при которой максимум коэффициента передачи достигается в нескольких частотных точках в полосе пропускания. Такую аппроксимацию называют *равноволновой*. В ней используют функцию (полином) Чебышева. АЧХ ФНЧ, соответствующие равноволновым функциям разных порядков, приведены на рисунке 4.3:

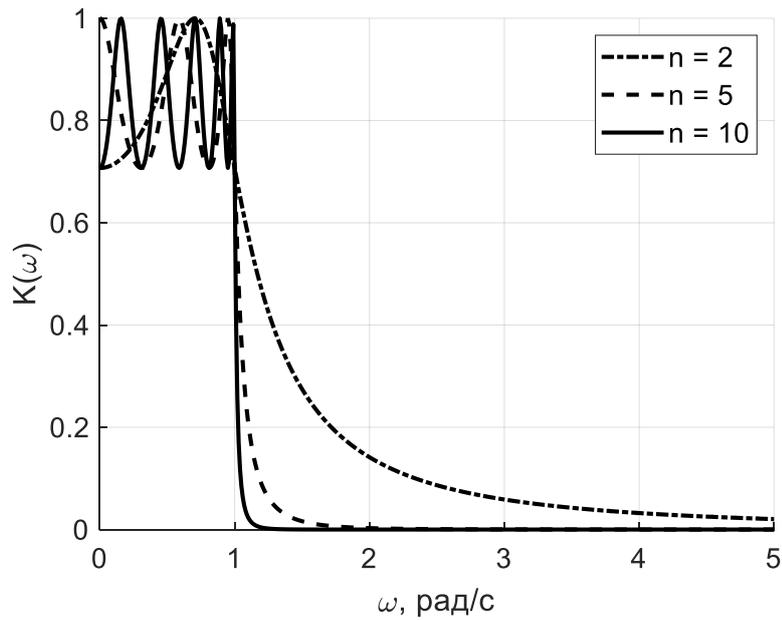


Рис. 4.3 АЧХ прототипа фильтров Чебышева различных порядков

Существует аппроксимация *рациональной функцией Чебышева*, при которой можно сформировать АЧХ, равноволновую не только в полосе пропускания, но и в полосе задерживания. При одном и том же порядке фильтра результирующая АЧХ спадает в переходной области даже более круто, чем для равноволновой функции Чебышева. В этой аппроксимации используют эллиптические функции первого рода и полные эллиптические интегралы, поэтому такие фильтры часто называют *эллиптическими* (или *фильтрами Кауэра*) (рис.4.4).

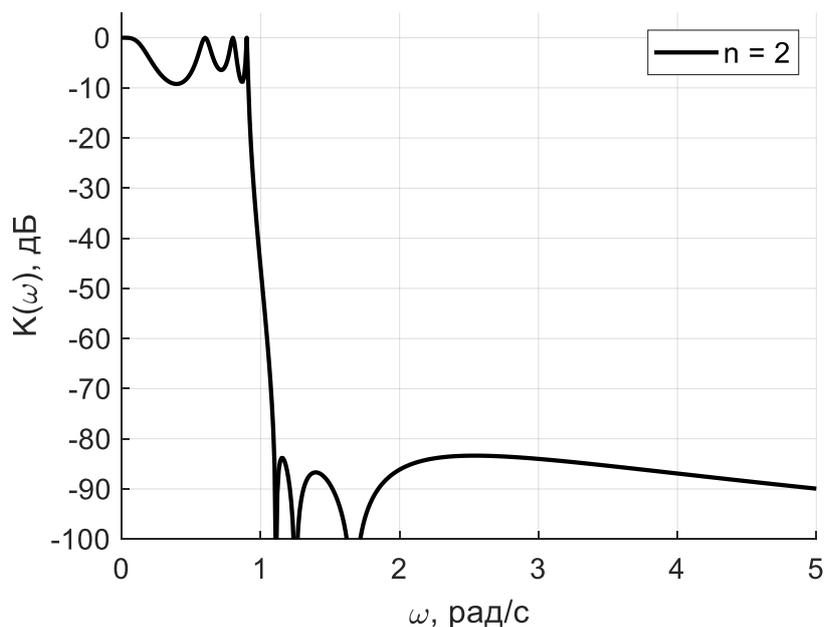


Рис. 4.4 . АЧХ ФНЧ эллиптического типа

Классический синтез фильтров предполагает использование в его схеме катушек индуктивностей и конденсаторов (LC-фильтры). Реализация таких фильтров в ряде случаев затруднена и даже невозможна. Проектирование и реализация фильтров упрощается при использовании активных схемных компонентов (транзисторов, операционных усилителей). Такие конструкции называют *активными фильтрами*. Благодаря введению в схему активных элементов можно исключить из схемы катушки индуктивности и реализовать необходимый вид частотной характеристики только с помощью RC-компонентов — резисторов и конденсаторов.

Активные фильтры имеют ряд преимуществ по сравнению с пассивными конструкциями. Они:

- характерны меньшими массой и габаритами;
- позволяют отказаться от катушек индуктивностей;
- могут быть изготовлены в микромодульном интегральном исполнении;
- имеют, как правило, более простую методику настройки;
- реализуют, при необходимости, коэффициент передачи фильтра больше единицы (фильтр-усилитель).

Стоит отметить и недостатки активных фильтров:

- активные элементы фильтра нуждаются в источнике питания;
- наличие активных элементов приводит к нелинейности фильтра. Большой уровень входного сигнала вызывает искажения формы выходного сиг-

нала. Это приводит к зависимости формы АЧХ от амплитуды входного сигнала, появляются паразитные комбинационные составляющие на выходе фильтра;

- в активных фильтрах возможно самовозбуждение активного элемента;
- диапазон рабочих частот активного фильтра ограничен сверху предельной рабочей частотой активного элемента.

Рассмотрим схемы некоторых активных фильтров, использованных в лабораторном макете. На рис. 4.5 представлена схема простого активного ФНЧ второго порядка, с помощью которой могут быть реализованы АЧХ Баттерворта и Чебышева.

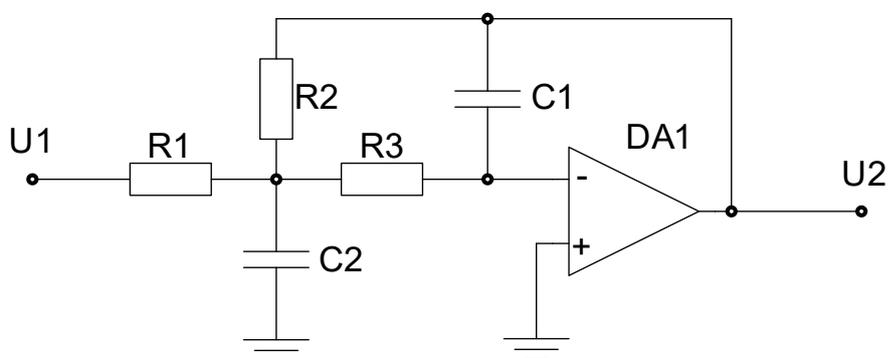


Рис. 4.5 Схема фильтра НЧ с МОС

В ней использован операционный усилитель с *многопетлевой обратной связью (МОС)*, которая названа так из-за наличия двух путей прохождения сигнала обратной связи (через элементы  $C_1$  и  $R_2$ ).

Эллиптический ФНЧ второго порядка имеет более сложную схему (рис.4.6). Здесь использованы повторитель напряжения DA2 и два пути прохождения сигнала: через цепочку DA1 и цепочку DA3.

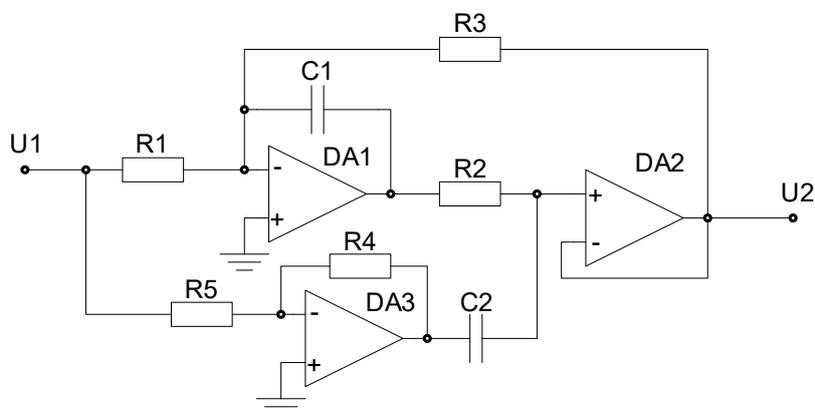


Рис. 4.6 . Схема эллиптического фильтра нижних частот

Схема, изображенная на рис.4.7, реализует передаточную функцию фильтра ППФ.

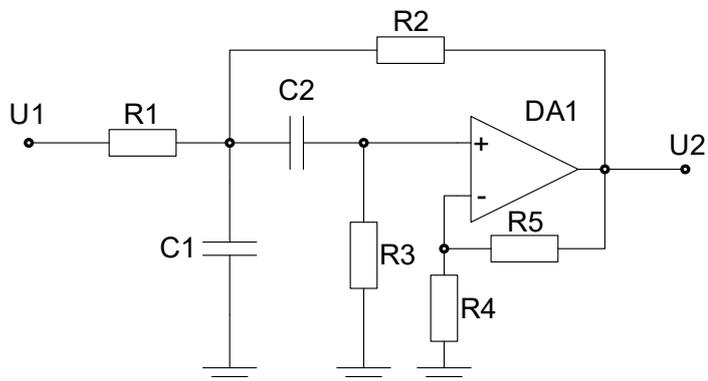


Рис. 4.7 Схема активного полосового фильтра

Для реализации звена полоснозаграждающего фильтра, соответствующего звену первого порядка ФНЧ прототипа, может быть применена схема фильтра, изображённая на рисунке 4.8:

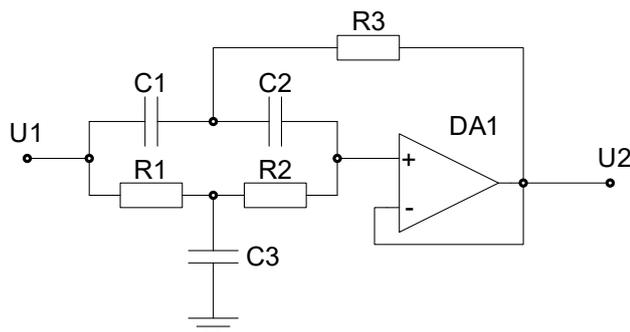


Рис. 4.8 Схема полосно-заграждающего фильтра

Реализация фильтра с АЧХ типа «колебательный контур» выполнена на основе схемы с двойным Т-фильтром в цепи обратной связи (рис. 4.9). Двойной Т-фильтр образован резисторами  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_5$  и конденсаторами  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ .

При выполнении соотношений  $R_2 = R_5 = R$ ,  $R_3 = R/2$ ,  $C_1 = C_2 = C$  и  $C_3 = 2C$  АЧХ двойного Т-фильтра имеет квазирезонанс на частоте

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}, \quad (4.1)$$

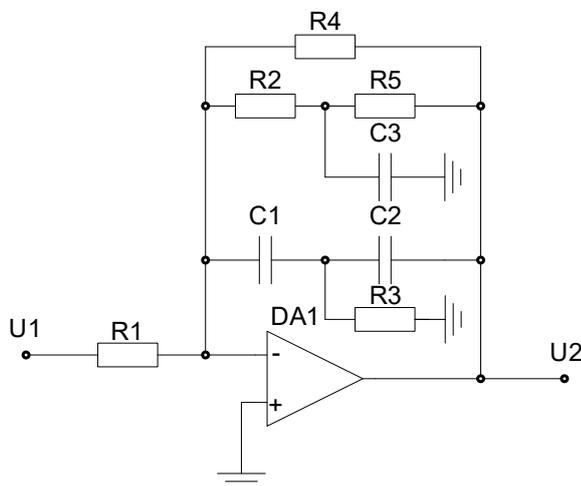


Рис. 4.9 Схема полосового фильтра «колебательный контур» с двойным Т-фильтром

Значение АЧХ активного фильтра имеет максимум на частоте квазирезонанса. Его величина определяется соотношением сопротивлений  $R_1$  и  $R_4$ .

## 4.2. Компьютерные измерители АЧХ

Использование микропроцессорной и компьютерной техники в измерителях частотных характеристик позволяет увеличить точность измерений, повысить их быстродействие и надежность, решает задачу сохранения данных и передачи их в устройства обработки. Основное отличие таких приборов от аналоговых панорамных измерителей АЧХ – применение генератора с цифровым управлением по частоте. В лабораторной работе для этого используют 16-битный цифроаналоговый преобразователь (ЦАП), управляемый компьютером. На ЦАП поступает последовательность кодов, создающая ступенчато-нарастающий закон изменения частоты выходного сигнала генератора. Диапазон частот ( $f_{в..}..f_{н}$ ), в котором исследуется АЧХ, разбивают на  $N$  интервалов – ступенек  $\Delta f_{СТ}$ . На каждой ступеньке частота генератора в течение длительности ступеньки  $\Delta t_{СТ}$  не меняется.

Установившееся к концу интервала  $\Delta t_{СТ}$  значение амплитуды выходного напряжения исследуемого устройства измеряется цифровым вольтметром. В качестве такого вольтметра в лабораторной работе используется 16-разрядный

аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) с тактовой частотой 250 кГц.

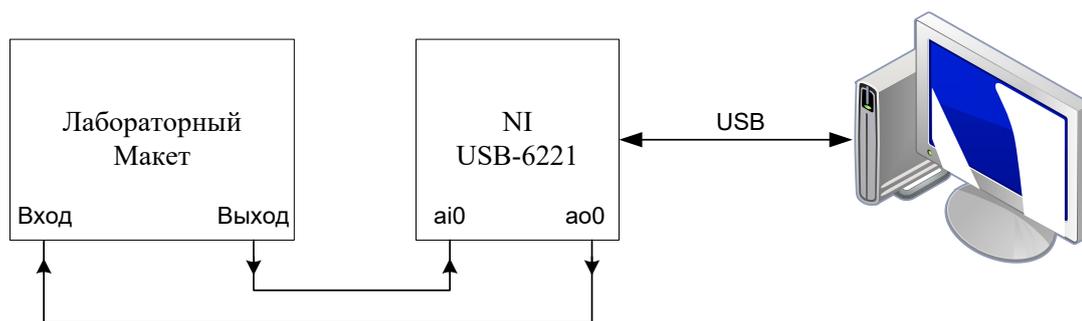


Рис. 4.10.. Схема лабораторной установки для измерения АЧХ

Полученный после преобразования код амплитуды выходного сигнала передается в компьютер. Время одного цикла измерения всей АЧХ в выбранном интервале частот равно  $T = N \Delta t_{ст}$ .

### 4.3. Состав лабораторной установки

Структура лабораторной установки представлена на рисунке 4.10.

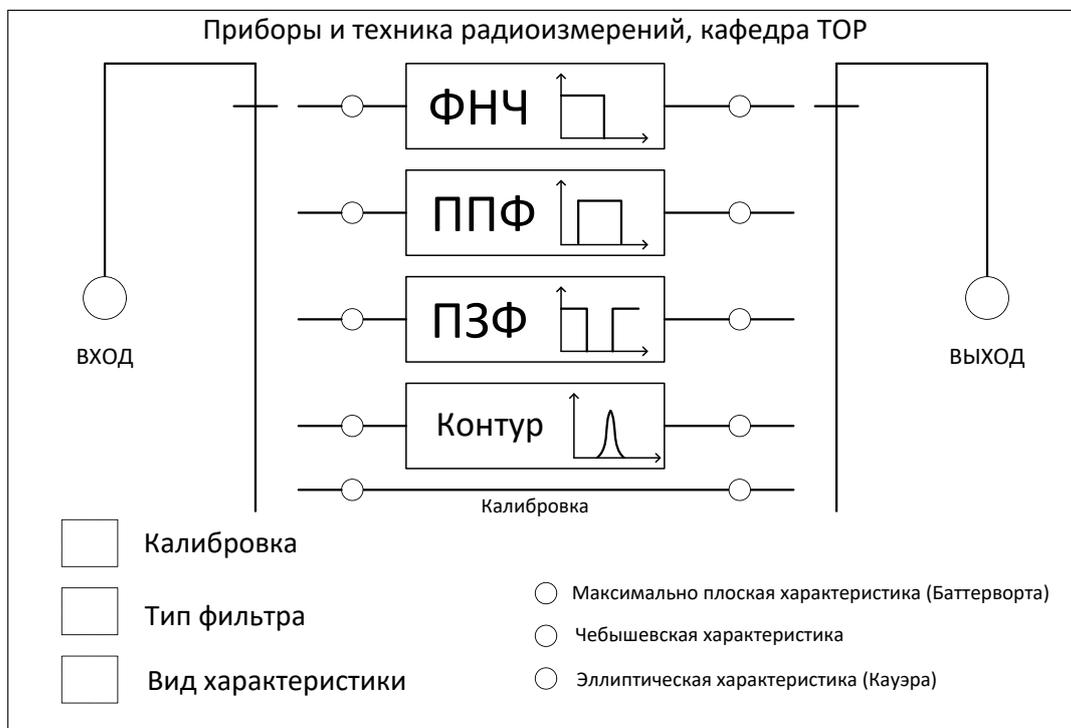
Аппаратная часть установки включает в себя лабораторный макет, персональный компьютер (ПК) и модуль DAQ (Data Acquisition) NI USB-6221 производства фирмы National Instruments. Модуль представляет собой высокопроизводительное многофункциональное устройство ввода/вывода цифровой и аналоговой информации (рис. 4.11).



Рис. 4.11.. Внешний вид модуля ввода/вывода NI USB-6221

Основные характеристики модуля NI USB-6221:

- количество аналоговых входов - 16;
- разрядность АЦП - 16 бит;
- частота дискретизации 250 кГц (250 кслов/с);
- диапазон входных напряжений АЦП: от -10 В до 10 В;



*Рис. 4.12.* Лицевая панель лабораторного макета

- встроенная память - 4095 слов;
- количество аналоговых выходов - 2;
- разрядность ЦАП - 16 бит;
- частота обновления выходных сигналов – 833 кГц;
- диапазон выходных напряжений: от -10 В до 10 В;
- интерфейс подключения к ПК – USB 2.0.

В качестве объекта измерения используется набор активных фильтров, собранных в лабораторном макете (рис. 4.12);

Исследуются 8 активных фильтров, отличающихся по типу и виду АЧХ:

- 3 ФНЧ 5-го порядка с характеристиками Баттерворта, Чебышева, Кауэра;
- 3 ППФ 3-го порядка с характеристиками Баттерворта, Чебышева, Кауэра;
- 1 ПЗФ 3-го порядка с эллиптической характеристикой Кауэра;
- 1 высокочастотный фильтр типа "колебательный контур".

Расчетные параметры фильтров, заданные при их проектировании:

- частота среза ФНЧ – 10 кГц;
- центральная частота ППФ и ПЗФ – 10 кГц;
- ширины полосы пропускания и полосы заграждения ППФ и ПЗФ – 3 кГц (по уровню -3 дБ);
- неравномерность АЧХ в полосе пропускания для фильтров Чебышева и Кауэра не более 1 дБ;
- ослабление фильтров Кауэра в полосе заграждения не хуже 30 дБ;
- центральная частота фильтра «колебательный контур» - 1 кГц, добротность порядка 15.

Максимальная амплитуда входного сигнала, при которой активные фильтры не входят в режим ограничения - порядка 1,5 В. Макет работает на стандартную нагрузку, равную 600 Ом. На входе и выходе стоят буферные ОУ с единичным коэффициентом усиления для обеспечения развязки макета с модулем ввода-вывода. Сигналы с модуля ввода/вывода подключаются к макету с помощью разъёмов типа BNC "Вход" (белый кабель) и "Выход" (синий кабель). Включение питания макета осуществляется кнопкой, расположенным около сетевого разъема.

Для управления лабораторным макетом используются электронные коммутаторы, позволяющие переключать тип фильтра и вид их АЧХ с помощью трех кнопок на лицевой панели:

- «Калибровка»;
- «Тип фильтра»;
- «Вид характеристики».

Сразу после включения макет переходит в режим непосредственного соединения входа и выхода. Нажатие на кнопку "Тип фильтра" приводит к циклическому перебору вида фильтра «ФНЧ => ППФ => ПЗФ => Колебательный контур». Кнопкой "Вид характеристики" осуществляют циклический перебор типов характеристик ФНЧ и ППФ «Баттерворт => Чебышев => Кауэр» с соответствующей светодиодной индикацией.

Лабораторный макет и модуль NI USB-6221 являются аппаратной частью компьютерного измерителя АЧХ. Его программное обеспечение реализовано в среде графического программирования LabVIEW (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) фирмы National Instruments. Интерфейс между программой и пользователем в LabVIEW представляет собой переднюю панель *виртуального прибора*. Программа подает на ЦАП модуля последовательность кодов мгновенных значений гармонического сигнала со сту-

пенчатый изменением частоты и постоянной амплитудой. Количество ступенек, диапазон качания частоты и время качания задаются пользователем. Сформированный сигнал с выхода модуля ввода/вывода поступает на лабораторный макет, а также на первый входной аналоговый канал модуля NI USB-6221. На второй входной канал поступает сигнал с выхода лабораторного макета. Первый канал используется для измерения частоты и амплитуды входного сигнала макета на каждой ступеньке, второй – для измерения амплитуды выходного сигнала. Отношение амплитуд выходного и входного сигналов дает значение АЧХ в каждой частотной точке.

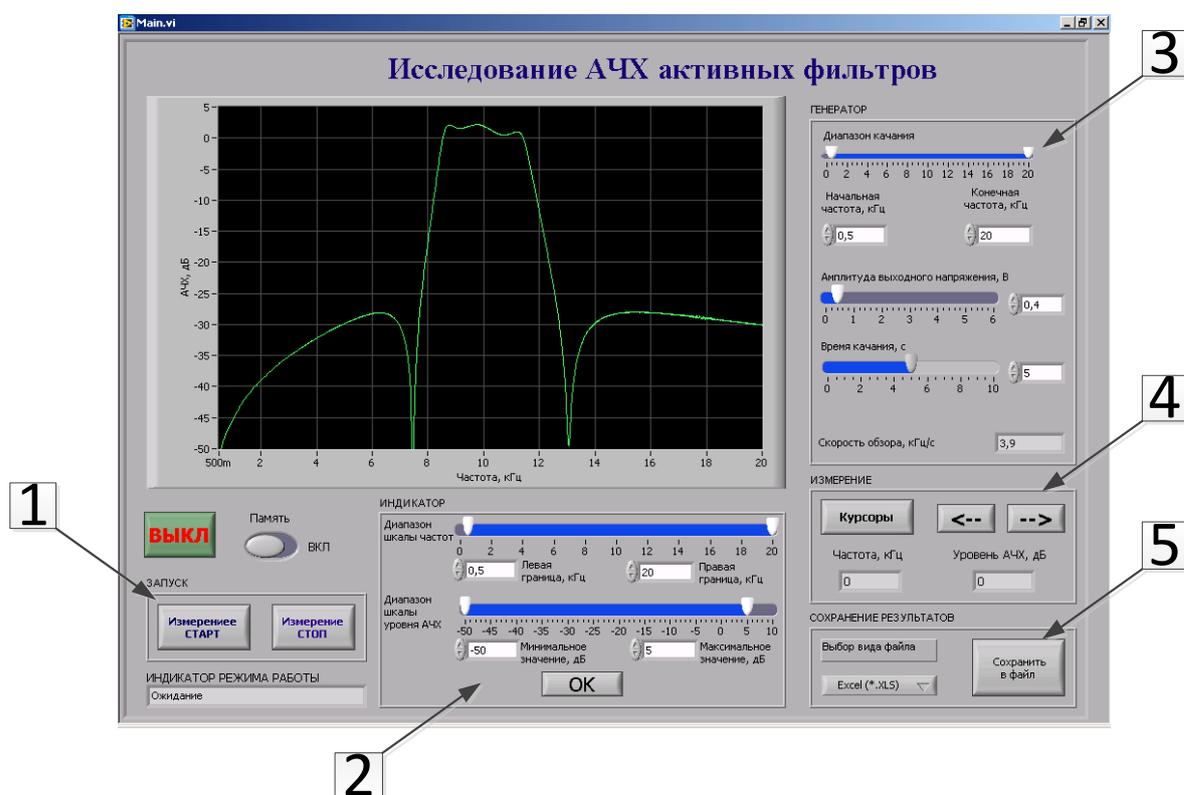


Рис. 4.13. Передняя панель виртуального измерителя АЧХ.

На рис. 4.13 представлен внешний вид передней панели виртуального прибора (файл AFR\_meter.exe). В области 1 расположены кнопки управления ходом процесса измерения – «Измерение СТАРТ» и «Измерение СТОП». Выше области 1 расположена кнопка, включающая режим «Память», позволяющий сохранять на экране результаты предыдущих измерений АЧХ (режим «послесвечения»). Этот режим используется при сравнительном анализе разных АЧХ. В области 2 представлена группа ползунковых переключателей, позволяющих изменять пределы отображаемой области АЧХ на индикаторе как по частоте, так и по уровню (режим «Zoom» экрана). После установки

ползунковых переключателей в новое положение необходимо осуществить ввод их данных нажатием кнопки «ОК».

Регулировка параметров сигнала генератора производится органами управления в области 3. Важно понимать, что ДИАПАЗОН ИЗМЕРЕНИЯ АЧХ зависит от настроек генератора, настройки же индикатора в области 2 влияют на ДИАПАЗОН ОТОБРАЖЕНИЯ измеренной АЧХ.

Для получения данных АЧХ в отдельных точках кривой предназначены курсоры, органы управления которыми находятся в области 5. Вывод курсоров на экран осуществляется нажатием кнопки «Курсоры». Управление положением курсоров по горизонтали (по оси частот) осуществляется кнопками в области 4 (грубо) и кнопками на клавиатуре компьютера ← → (плавно).

В программе предусмотрена возможность сохранения результатов измерения в файл в формате электронных таблиц (.xls) или в графическом формате (.bmp). Для вывода результатов используют кнопки, расположенные в области 5.

#### **4.4. Задание и указания к выполнению лабораторной работы**

##### ***4.4.1. Подготовка лабораторной установки к работе***

Включите питание макета (на верхней стенке у сетевого разъема) и питание модуля NI USB-6221 (тумблер на задней панели). Запустите на компьютере программу виртуального измерителя АЧХ AFR-meter.exe.

Установите амплитуду выходного напряжения 0.5 В, время качания частоты 1 с, полный диапазон качания частоты 0.5 ...20 кГц. Режим запоминания графиков («ПАМЯТЬ ЭКРАНА») и «Курсоры» должны быть отключены.

Проверьте калибровку измерителя. Для этого включите режим калибровки макета (в этом режиме вход и выход замкнуты между собой). Нажмите кнопку «Измерение СТАРТ». На экране должна появиться горизонтальная линия АЧХ «на проход» с уровнем 0 дБ в полном диапазоне частот измерителя. Проверьте и (при необходимости) отрегулируйте по максимуму диапазоны шкал частот и уровня индикатора АЧХ (область 2).

Виртуальный измеритель АЧХ готов к работе.

#### 4.4.2. Измерение АЧХ фильтров и их параметров.

В данном пункте лабораторной работы (по указанию преподавателя) измеряются АЧХ одного комплекта из трех фильтров (таблица 4.1).

Таблица 4.1

Номер фильтра	Тип фильтра	Вид АЧХ
Вариант 1		
1	ФНЧ	Баттерворта
2	ППФ	Чебышева
3	ПЗФ	Эллиптическая
Вариант 2		
1	ППФ	Баттерворта
2	ПЗФ	Эллиптическая
3	ФНЧ	Эллиптическая
Вариант 3		
1	ПЗФ	Эллиптическая
2	ФНЧ	Чебышева
3	ППФ	Эллиптическая

Кнопками на макете выберите нужный тип фильтра и вид его АЧХ. Нажмите кнопку «Измерение СТАРТ» и получите на экране частотную характеристику выбранного фильтра в полном диапазоне частот (0.5...20 кГц). Выведите данные измерения в файл (область 5 «СОХРАНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ» на передней панели прибора).

Активируйте курсоры прибора, нажав клавишу «Курсоры». Перемещение курсоров по кривой АЧХ производится с помощью стрелок на клавиатуре ( $\rightarrow$ ,  $\leftarrow$ ). Значения частоты и уровня АЧХ в точке расположения курсора отображаются в окнах индикаторов.

Методика измерения параметров АЧХ фильтров ФНЧ и ППФ (частот среза, полосы пропускания и пр.) такова. Сначала найдите значение АЧХ в максимуме  $K_{\max}$ . Затем измерьте полосы пропускания фильтра по двум уровням (-3 дБ и -20 дБ). Перемещая курсор по кривой АЧХ, установите его в точки спада АЧХ примерно на 3 дБ ниже относительно максимума. Для ППФ это нижняя и верхняя границы полосы пропускания по уровню -3 дБ. Для ФНЧ нижняя граничная частота равна нулю. Рассчитайте полосу пропускания фильтра  $\Delta f_{-3\text{дБ}}$ . Повторите измерение полосы пропускания по уровню -20 дБ ( $\Delta f_{-20\text{дБ}}$ ) и рассчитайте коэффициент прямоугольности АЧХ фильтра

$$K_{\Pi} = \Delta f_{-3\text{дБ}} / \Delta f_{-20\text{дБ}}.$$

Для чебышевской и эллиптической характеристик определите минимальное значение АЧХ  $K_{\min}$  в полосе заграждения. Затем измерьте неравномерность АЧХ в полосе пропускания  $\Delta A$ . Для этого регулятором «Диапазон частот» установите начальную и конечную частоты диапазона измерения, примерно равными границам полосы пропускания  $\Delta f_{-3\text{дБ}}$ . Установите удобный масштаб изображения по вертикали регулятором «Диапазон шкалы уровня АЧХ» так, чтобы график занимал бы большую часть экрана. С помощью курсоров найдите максимальное и минимальное значение АЧХ в пределах неравномерного участка характеристики и запишите их разность  $\Delta A$ , дБ. Выключите курсоры и переведите программу в режим индикации максимального диапазона по частоте и уровню.

Сведите полученные параметры фильтра в таблицу 4.2

Таблица 4.2

Тип фильтра	Вид АЧХ	$K_{\max}$ , дБ	$d_1 = -3$ дБ			$d_1 = -20$ дБ			$\Delta A$ , дБ	$K_{\min}$ , дБ
			$f_n$ , кГц	$f_b$ , кГц	$\Delta f$ , кГц	$f_n$ , кГц	$f_b$ , кГц	$\Delta f$ , кГц		

Для полосно-заграждающего фильтра (ПЗФ) методика измерения не-много отличается. Сначала надо найти максимальное значение коэффициента передачи  $K_{\max}$  вне пределов полосы заграждения. Затем найдите граничные частоты, соответствующие уровням  $-3$  дБ и  $-20$  дБ относительно этого значения. Рассчитайте полосы заграждения по уровням  $-3$  дБ,  $-20$  дБ и рассчитайте коэффициент прямоугольности ПЗФ

$$K_{\text{ПЗФ}} = \Delta f_{-20\text{дБ}} / \Delta f_{-3\text{дБ}}.$$

Измерьте минимальное значение АЧХ ПЗФ и неравномерность АЧХ в полосе заграждения. Для этого используйте регулировку диапазона частот на индикаторе. Запишите параметры ПЗФ в таблицу 4.2.

#### ***4.4.3. Исследование динамических искажений АЧХ узкополосного резонансного контура***

В данном пункте лабораторной работы производят измерение АЧХ узкополосного активного фильтра типа «колебательный контур», настроенного на частоту 1 кГц. С помощью клавиши «Тип фильтра» выберите «Контур». Установите частотный диапазон качания частоты  $f_1 = 0.5$  кГц,  $f_2 = 2$  кГц, время анализа  $T_p = 5$  с. Этот же диапазон частот следует установить и в настройках индикатора. Используйте максимальное значение шкалы уровня АЧХ на индикаторе 5 дБ, минимальное  $-30$  дБ, включите режим «Память», в котором на экране кривые АЧХ будут накладываться друг на друга.

Получите АЧХ контура при установке времени качания частоты 5 с. Будем считать, что при этом времени динамические искажения АЧХ пренебрежимо малы. По шкале индикатора приближенно оцените полосу пропускания контура  $\Delta f_{-3\text{дБ}}$  по уровню  $-3$  дБ. Затем повторите измерения при наименьшем времени  $T_p = 0.5$  с. Сохраните скриншот полученного семейства кривых АЧХ в файл.

Рассчитайте коэффициент динамических искажений для двух использованных времен качания по формуле

$$\mu = \frac{(f_2 - f_1)}{\pi \cdot (\Delta f_{-3\text{дБ}})^2 \cdot T_p}.$$

По шкале индикатора оцените спад вершины  $\Delta A, \text{дБ}$ , сдвиг вершины по частоте  $\frac{f'_0 - f_0}{f_0}$  и изменение ширины кривой АЧХ  $\frac{\Delta f' - \Delta f}{\Delta f}$  (полосы пропускания на уровне -3 дБ) для  $T_p=0.5$  с относительно АЧХ при  $T_p=5$  с. Здесь штрихом обозначены параметры, измеренные при  $T_p=0.5$  с, без штриха – при  $T_p=5$  с. Рассчитайте спад вершины в относительных единицах

$$\frac{A'_0 - A_0}{A_0} = 10^{\frac{-\Delta A, \text{дБ}}{20}}.$$

Сравните полученные результаты с теоретическими результатами, полученными по формулам:

$$\frac{f'_0 - f_0}{f_0} \approx 1,27\mu, \quad \frac{A'_0 - A_0}{A_0} \approx -0,42\mu^2, \quad \frac{\Delta f'_{0,707} - \Delta f_{0,707}}{\Delta f_{0,707}} \approx 1,04\mu^2,$$

где  $\mu$  - коэффициент динамических искажений при  $T_p=0.5$  с.

#### **4.4.4. Исследование влияния уровня входного сигнала на вид АЧХ активных фильтров**

В данном пункте лабораторной работы исследуется зависимость полученной кривой АЧХ активного фильтра типа «колебательный контур» от амплитуды входного сигнала.

С помощью клавиши «Тип фильтра» выберите «Контур». Установите частотный диапазон качания частоты и диапазон индикации  $f_1=0.5$  кГц,  $f_2=2$  кГц, время анализа  $T_p=5$  с. Включите режим «Память» и установите в настройках индикатора максимальное значение шкалы уровня АЧХ 5 дБ, ми-

нимальное -30 дБ. Проведите измерение АЧХ контура при уровне входного сигнала 0.5 В. Затем повторите измерение при амплитудах 2 и 4 В. Зафиксируйте искажения кривой АЧХ, вызванные ограничением сигнала в активном фильтре. Сохраните изображение семейства АЧХ в файл.

#### **4.5. Содержание отчета**

Отчет должен содержать структурную схему виртуального измерителя АЧХ, результаты измерений (таблицы и графики, данные расчетов параметров фильтров), краткие выводы по лабораторной работе.

#### **4.6. Контрольные вопросы**

1. Объясните принцип действия компьютерного виртуального измерителя АЧХ.
2. Сформулируйте и объясните преимущества виртуального измерителя АЧХ в сравнении с аналоговым панорамным измерителем