

## Лабораторная работа №3

### Построение простейших фильтров на ПАИС.

**Цель работы:** продолжение изучения особенностей работы с ПАИС. Знакомство с блоком пассивных компонентов. Изучение и повторение теории по простейшим активным и пассивным фильтрам.

**Оборудование:** микросхема 5400TP035, отладочная плата, программатор, комплект интерфейсных проводов, персональный компьютер, генератор электрических сигналов, осциллограф, блок питания.

**Программное обеспечение:** ПО программатора «DCSProg», САПР «Electric VLSI Design System».

**Продолжительность работы:** 4 академических часа.

## Теоретические сведения

### 1.1. Пассивный фильтр нижних частот первого порядка.

Фильтр нижних частот (ФНЧ) является схемой, которая без изменений передает сигналы нижних частот, а на высоких частотах обеспечивает затухание сигналов и запаздывание их по фазе относительно входных сигналов. На рисунке 1 изображена схема простейшего RC-фильтра нижних частот первого порядка.

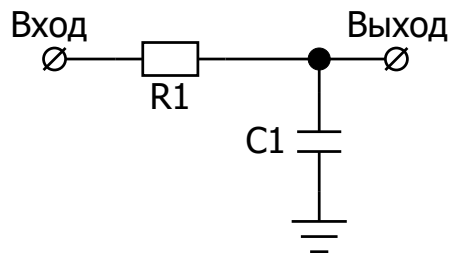


Рисунок 1. Схема пассивного фильтра нижних частот первого порядка.

Выражение для частоты среза  $f_{cp}$  пассивного ФНЧ:

$$f_{cp} = \frac{1}{2\pi RC}$$

Коэффициент передачи в комплексном виде может быть выражен формулой:

$$K(j\omega) = \frac{U_{\text{вых}}(j\omega)}{U_{\text{вх}}(j\omega)} = \frac{1/j\omega C}{R + 1/j\omega C} = \frac{1}{1 + j\omega RC} \quad (1)$$

Отсюда получим формулы для АЧХ и ФЧХ:

$$|K| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}, \varphi = \text{arctg}(\omega RC)$$

$$|K| = \frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega_{cp} RC)^2}}$$

Фазовый сдвиг на этой частоте составляет  $-45^\circ$ .

$|K| = 1 = 0$  дБ на нижних частотах  $f \ll f_{cp}$ .

На высоких частотах  $f \gg f_{cp}$  согласно формуле (1),  $|K| \approx 1/(\omega RC)$ , то есть коэффициент передачи обратно пропорционален частоте. При увеличении частоты в 10 раз, коэффициент усиления уменьшается в 10 раз, то есть он уменьшается на 20 дБ на декаду.

Отношение выходного сигнала к входному при изменении входного сигнала по гармоническому закону, называется частотной передаточной функцией  $W(j\omega)$ .

$W(j\omega)$  есть комплексная функция, поэтому:

$$W(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)} = P(\omega) + jQ(\omega),$$

где  $P(\omega)$  – вещественная частотная характеристика,  $Q(\omega)$  – мнимая частотная характеристика,  $A(\omega)$  – амплитудно-частотная характеристика (АЧХ),  $\varphi(\omega)$  – фазо-частотная характеристика (ФЧХ).

АЧХ показывает отношение амплитуд выходного и входного сигнала, ФЧХ – сдвиг по фазе выходной величины относительно входной:

$$A(\omega) = \frac{U_m}{Y_m} = \sqrt{P(\omega)^2 + Q(\omega)^2};$$

$$\varphi(\omega) = \text{arctg} \frac{Q(\omega)}{P(\omega)}.$$

Также широко используются логарифмические частотные характеристики (ЛЧХ): логарифмическая амплитудно-частотная характеристика (ЛАЧХ) (рисунок 2), логарифмическая фазо-частотная характеристика (рисунок 3).

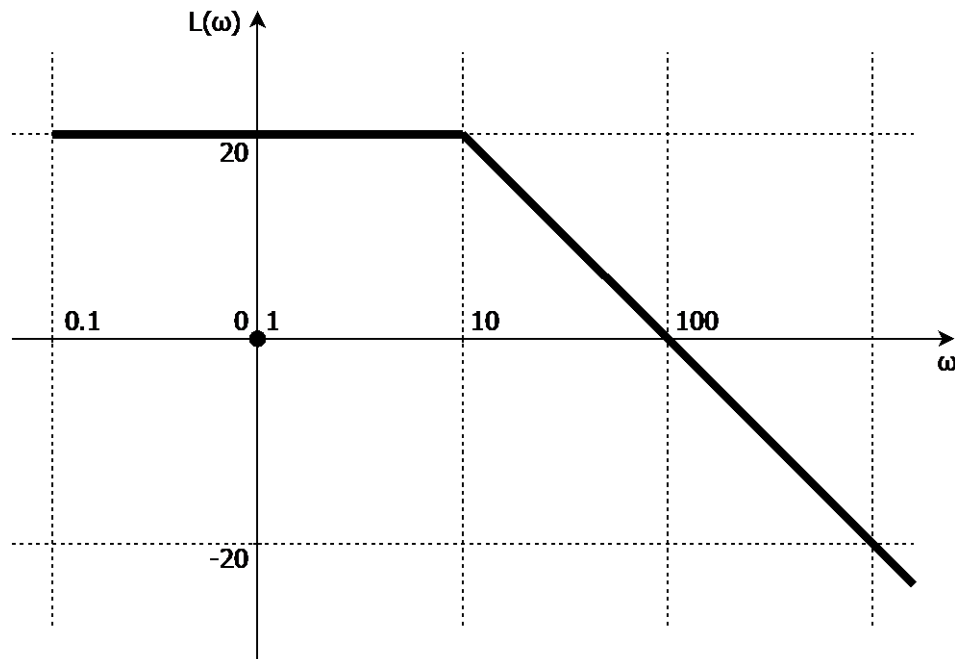


Рисунок 2. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика.

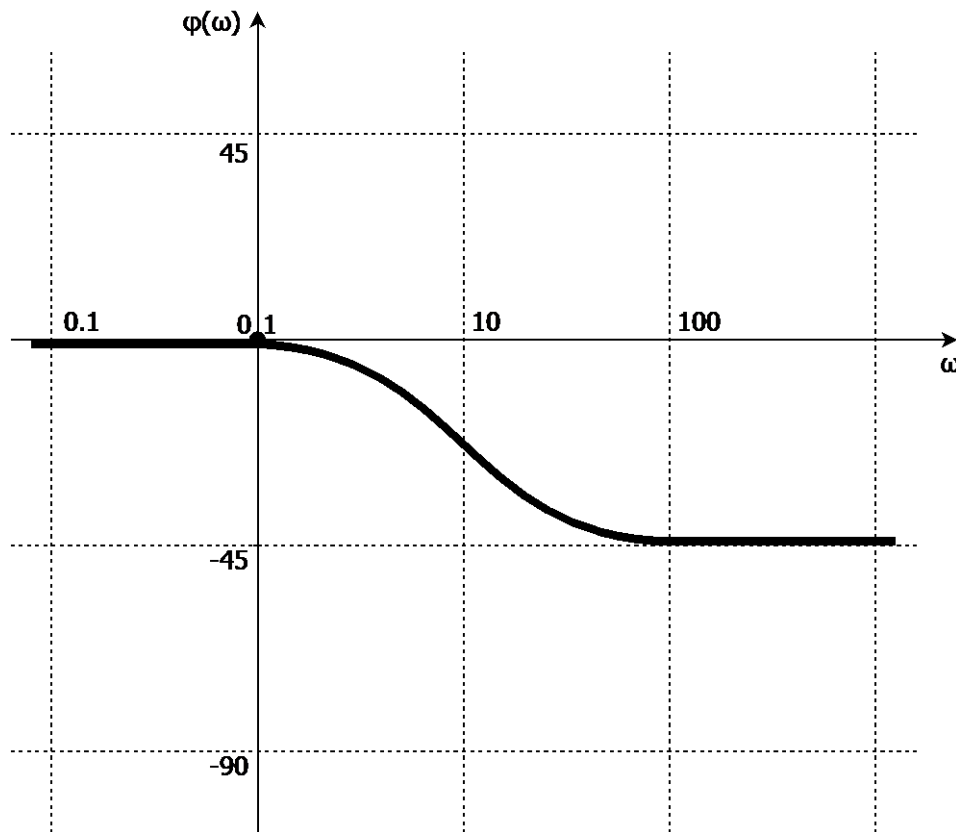


Рисунок 3. Логарифмическая фазо-частотная характеристика.

Такие характеристики получаются путем логарифмирования передаточной функции:

$$\ln(W(j\omega)) = \ln(A(\omega)e^{j\varphi(\omega)}) = \ln(A(\omega)) + \ln(e^{j\varphi(\omega)}) = \ln(A(\omega)) + \varphi(\omega).$$

ЛАЧХ получают из первого слагаемого, которое из соображений масштабирования умножается на 20, и используют не натуральный логарифм, а десятичный, то есть  $L(\omega) = 20 \times \lg(A(\omega))$ . Величина  $L(\omega)$  откладывается по оси ординат в децибелах (дБ). Изменение уровня сигнала на 10 дБ соответствует изменению его мощности в 10 раз. Так как мощность гармонического сигнала  $P$  пропорциональна квадрату его амплитуды  $A$ , то изменению сигнала в 10 раз соответствует изменение его уровня на 20 дБ, так как:

$$\lg\left(\frac{P_1}{P_2}\right) = \lg\left(\frac{A_2^2}{A_1^2}\right) = 20 \cdot \lg\left(\frac{A_2}{A_1}\right).$$

По оси абсцисс откладывается частота  $\omega$  в логарифмическом масштабе. То есть единичным промежуткам по оси абсцисс соответствует изменение  $\omega$  в 10 раз. Такой интервал называется **декадой**. Так как  $\lg(0) = -\infty$ , то ось ординат проводят произвольно.

При  $f = f_{cp}$ :

$$|K| = 1/\sqrt{2} = 3 \text{ дБ.}$$

## 1.2. Активный фильтр нижних частот второго порядка

Примером активного ФНЧ второго порядка является фильтр с отрицательной обратной связью, схема которого показана на рисунке 4.

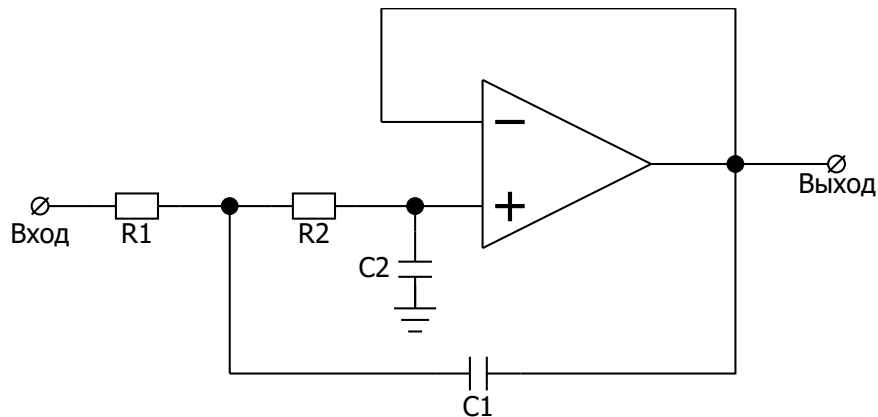


Рисунок 4. Схема активного фильтра низких частот второго порядка.

Операционный усилитель в схеме на рисунке 4 включен в качестве повторителя напряжения.

Передачная функция данного фильтра имеет вид:

$$W(s) = \frac{1}{1 + C_2(R_1 + R_2)s + C_1 C_2 R_1 R_2 s^2},$$

где  $s$  – оператор Лапласа.

При формальной замене  $s=j\omega$  получаем комплексную передаточную характеристику в виде:

$$W(\omega) = \frac{1}{1 + jC_2(R_1 + R_2)\omega - C_1 C_2 R_1 R_2 \omega^2}.$$

В общем случае частота среза  $f_{cp}$  фильтра задается следующим выражением:

$$f_{cp} = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}.$$

В данной лабораторной работе принимаем, что  $C_1 = C_2$ ,  $R_1 = R_2$ .

Исходя из этого частота среза для активного фильтра нижних частот второго порядка будет рассчитываться также, как и для пассивного фильтра нижних частот первого порядка, то есть:

$$f_{cp} = \frac{1}{2\pi RC}.$$

## Лабораторное задание

### 1) Построить пассивный фильтр низких частот первого порядка с заданной частотой среза.

Подать на вход с внешнего источника синусоидальный сигнал с частотами  $f_{cp}$ ,  $0,1f_{cp}$ ,  $10f_{cp}$  и амплитудой 1 В относительно уровня 2,5 В.

Построить пассивный фильтр первого порядка по схеме на рисунке 5 с параметрами в соответствии с вариантом. Рассчитать значения  $R$  и  $C$  для своего варианта, используя номиналы пассивных элементов. Определить амплитуду выходного сигнала при частотах  $f_{cp}$ ,  $10f_{cp}$ ,  $0,1f_{cp}$ , а также определить частоту среза экспериментально. Внести результаты измерений в таблицу 3.

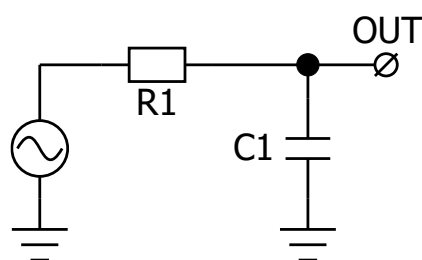


Рисунок 5. Функциональная схема пассивного фильтра низких частот первого порядка.

Для данного пункта лабораторной работы необходимо использовать выходной аналоговый буфер OUTPUT\_ADR. Рекомендуется самостоятельно подобрать время моделирования и шаг моделирования в зависимости от выполняемого варианта лабораторной работы. Установить время задержки 4 мкс ( $TD=4$  у.) на источнике синусоидальных импульсов ( $v_{sin}$ ).

### 2) Построить активный фильтр второго порядка с заданной частотой среза.

Подать на вход с внешнего источника синусоидальный сигнал с частотами  $f_{cp}$ ,  $0,1f_{cp}$ ,  $10f_{cp}$  и амплитудой 1 В относительно уровня 2,5 В.

Построить активный фильтр второго порядка по схеме на рисунке 6 с параметрами в соответствии с вариантом. Рассчитать значения  $R_1$  и  $C_1$  для своего варианта, используя номиналы пассивных элементов. Определить амплитуду выходного сигнала при частотах  $f_{cp}$ ,  $10f_{cp}$ ,  $0,1f_{cp}$ , а также определить частоту среза экспериментально. Внести результаты измерений в таблицу 3.

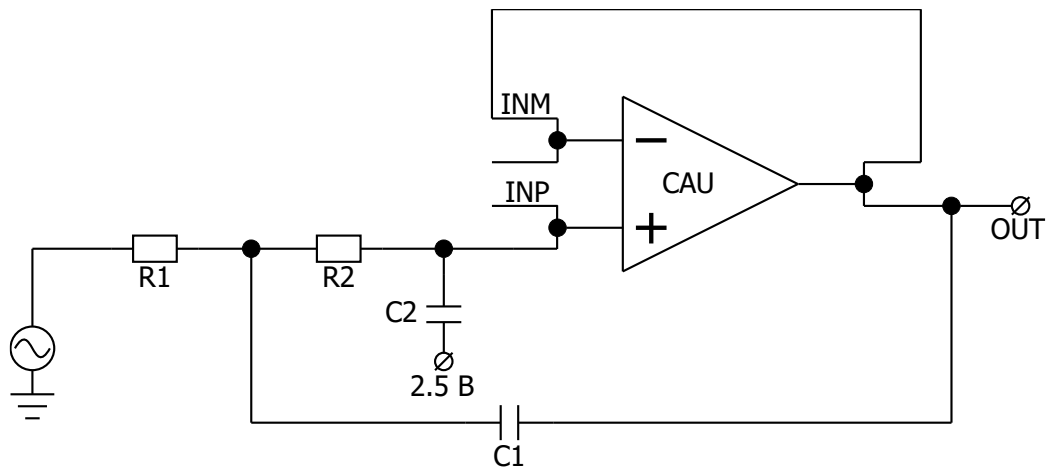


Рисунок 6. Функциональная схема активного фильтра низких частот второго порядка

Для данного пункта лабораторной работы необходимо использовать выходной аналоговый буфер OUTPUT\_ADR. Рекомендуется самостоятельно подобрать время моделирования и шаг моделирования в зависимости от выполняемого варианта лабораторной работы. Установить время задержки 4 мкс ( $TD=4$  у.) на источнике синусоидальных импульсов ( $v_{sin}$ ).

Для всех пунктов задания необходимо промоделировать схему в программе «Electric VLSI Design System». Запрограммировать микросхему с помощью программатора и ПО программатора «DCSProg». С помощью генератора подать входные сигналы на соответствующие выводы микросхемы на отладочной плате. С помощью осциллографа зарегистрировать значения выходного сигнала.

Значения параметров частоты среза и типа фильтра указаны в таблице 1. Номер варианта определяется преподавателем.

Таблица 1. Соответствие номера варианта и условия задания

Пункт задания	Вариант	Тип фильтра	Значение частоты среза
1	1,3	Пассивный ФНЧ	19 кГц
	2,4	Пассивный ФНЧ	9,5 кГц
2	1,3	Активный ФНЧ	64 кГц
	2,4	Активный ФНЧ	95,5 кГц

## Порядок выполнения работы

### Общие указания

Выполнение работы начинается с проектирования схемы в программе «Electric VLSI Design System». Для начала работы, выполните следующие действия:

- Запустите программу «Electric VLSI Design System»
- Откройте библиотеку:
  - Выполните команду: File → Open Library.
  - В открывшемся окне откройте файл simulation.jelib

Путь к файлу C:\CYGELENG\PROJECTS\5400TP035

Создайте свою схему в библиотеке:

- Правой кнопкой мыши нажмите на библиотеку «simulation», в контекстном меню выберите пункт «Create New Cell».
- В появившемся окне «New Cell» в списке «View» выберите тип файла «schematic».
- В пункте «Name» назовите свою схему и нажмите «ОК». Название должно содержать только латинские буквы, цифры и знак «\_» без пробелов. Рекомендуемый формат: lab3\_scheme\_1.
- Дважды нажмите левой кнопкой мыши на свою созданную схему.

Блоки, из которых проектируется схема, расположены в библиотеке symbol (рисунок 7). Чтобы перенести компоненты из библиотеки в рабочее пространство, нажмите левой кнопкой мыши на нужный блок и, не отпуская кнопку, перетащите в рабочее пространство.



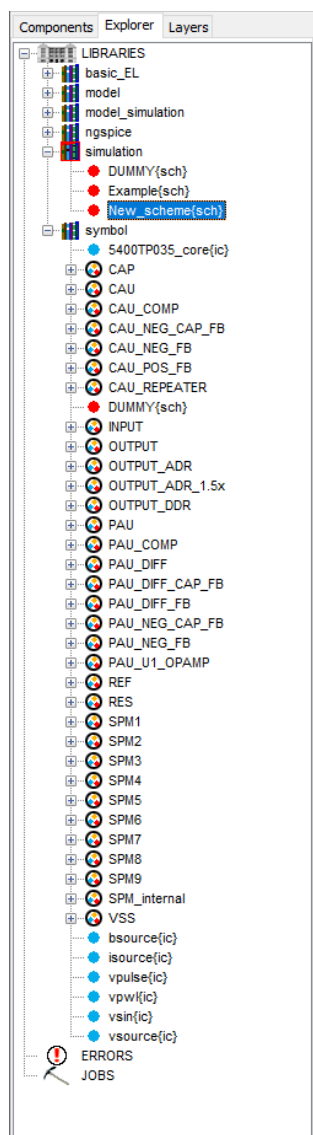


Рисунок 7. Расположение блоков библиотеки symbol в программе «Electric VLSI Design System».

### Блоки, используемые в лабораторной работе

Таблица 2. Описание используемых в лабораторной работе блоков

Название блока	Описание блока
CAU	ОУ общего применения 1-го типа
INPUT	Блок ввода
OUTPUT_ADR	Блок вывода с аналоговым буфером
CAP	Конденсатор емкостью 8,34 пФ
RES	Резистор с настраиваемым сопротивлением
VSS	«Общий» вывод
vsin	Источник синусоидальных импульсов для подачи внешних воздействий
vsource	Источник постоянного напряжения для подачи внешних воздействий

## Усилительный блок 1-го типа

Усилительный блок 1-го типа построен на основе ОУ общего применения. Диапазон входных и выходных сигналов от 0 В до напряжения питания 5 В.

Элементы на основе усилительного блока 1-го типа:

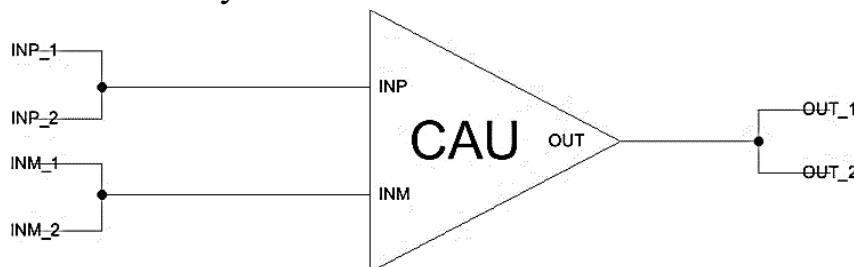


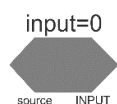
Рисунок 8. ОУ общего применения 1-го типа.

## Блок ввода/вывода

Блок ввода предназначен для входных сигналов микросхемы. Вывод сигналов осуществляется через аналоговый буфер.

Аналоговый буфер построен на основе операционного усилителя с нагрузочной способностью до 30 мА.

Для установки определенного входа (выхода) микросхемы необходимо в поле «input=0» («output\_adr=0») ввести номер вывода микросхемы.



а)



б)

Рисунок 9. а) блок ввода; б) блок вывода с аналоговым буфером.

## Конденсатор с фиксированной емкостью

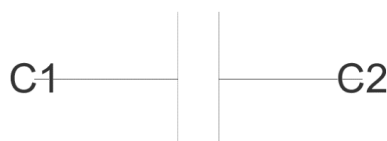


Рисунок 10. Конденсатор с фиксированной емкостью.

Блок CAP, указанный на рисунке 10 имеет фиксированную емкость, равную 8,34 пФ.

## Резистор с настраиваемым сопротивлением

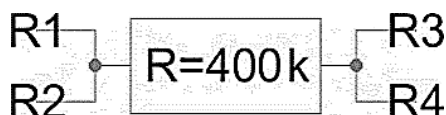


Рисунок 11. Резистор с настраиваемым сопротивлением.

Для того, чтобы запрограммировать резистор RES на необходимое значение сопротивления нужно зажать клавишу «Ctrl», навести курсор на заданное по умолчанию значение соответствующего резистора и нажать левой кнопкой мыши, затем отпустить клавишу «Ctrl» и нажать левой кнопкой на это же значение резистора и заменить на нужное.

Максимальное значение сопротивления – 400 кОм, минимальное значение сопротивления – 80 кОм, шаг – 80 кОм.

### Общий вывод

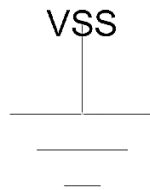


Рисунок 12. «Общий» вывод.

Для коммутации блоков между собой следует нажать на один из контактов блока левой кнопкой мыши, а затем на контакт другого блока правой кнопкой мыши, либо произвести коммутацию вручную путем последовательной отрисовки проводника в необходимых областях. Для этого нужно нажать левую кнопку мыши на начальную точку, затем перевести курсор в необходимую область и нажать правую кнопку, повторять операцию до тех пор, пока не будет осуществлена коммутация нужных блоков.

Для автоматической трассировки важно, чтобы одному выводу блока соответствовало не более 1 провода. В противном случае схема будет разведена не полностью.

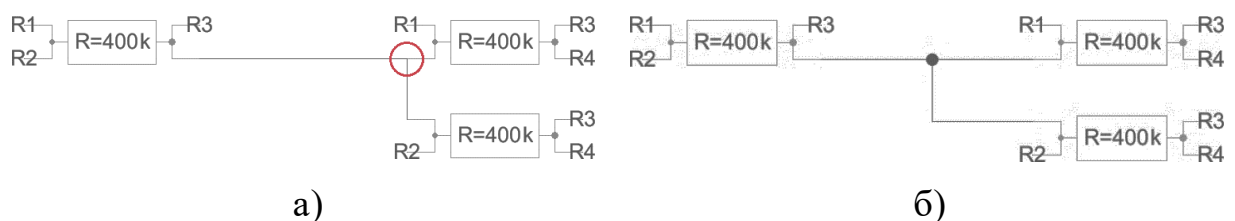


Рисунок 13. а) пример неправильного построения схемы; б) пример правильного построения схемы.

В некоторых случаях в работе автоматической трассировки могут возникать ошибки из-за некорректных замыканий связей. Для автоматического исправления связей используется команда Cleanup Pins (горячая клавиша «F8»).

## Моделирование

После того, как схема собрана, необходимо промоделировать ее и создать конфигурационную последовательность для дальнейшей зашивки.

С помощью источников напряжения задать внешние воздействия, для этого нужно перенести компоненты из библиотеки `symbol` в рабочее пространство. Чтобы перенести блоки в рабочее пространство нажмите левой кнопкой мыши на нужный блок и, не отпуская кнопку, перетащите в рабочее пространство.

### Важно!

Источники напряжения необходимо подключать ко входу «source» блока ввода «INPUT». Выход блока «INPUT» нужно коммутировать с тем элементом, на который необходимо подать входной сигнал с используемого источника.

Источники сигналов имеют следующие параметры:

- `vsourse` – источник постоянного напряжения:
  - `VAL` – значение постоянного напряжения.
- `vsin` – источник синусоидальных импульсов:
  - `VO` – напряжение смещения;
  - `VA` – амплитуда;
  - `FREQ` – частота;
  - `TD` – время задержки;
  - `THETA` – коэффициент затухания.

Для задания параметров источников напряжения дважды нажать на параметр левой кнопкой мыши и вписать значение. Значения параметра вводится без указания единиц измерения. Чтобы ввести десятичную приставку, используются следующие обозначения: фемто-f, пико-p, нано-n, микро-u, милли-m, кило-K, мега-Meg, гига-G, тера-T.

Примечание:

Если после значения Вы напишите букву «M», то программа сочтет это за приставку «милли», точно так же, как и в случае с «m»! Поэтому, если Вам необходима приставка «мега», то после значения нужно вводить символы: «Meg».

После установки параметров источников, нужно задать параметры моделирования. Для этого необходимо перенести из библиотеки `symbol` блок «5400TP035\_core». Чтобы перенести блоки в рабочее пространство нажмите

левой кнопкой мыши на нужный блок и, не отпуская кнопку, перетащите в рабочее пространство.

В данной лабораторной работе выполняется анализ по времени:

- $tstep$  – шаг моделирования. Чем меньше значение, тем детальнее график (больше точек в ед. времени) и тем дольше процесс моделирования.
- $tstop$  – время моделирования.

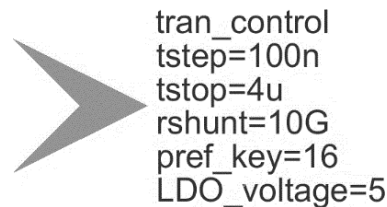


Рисунок 14. Параметры tran-моделирования.

Далее требуется обозначить выходы, которые необходимо контролировать (IN, OUT, REF и т.д.). Для обозначения выхода необходимо зайти в его свойства (клавиша «q» или двойное нажатие левой кнопкой мыши по проводу) и в поле «Name» ввести название (рисунок 15).

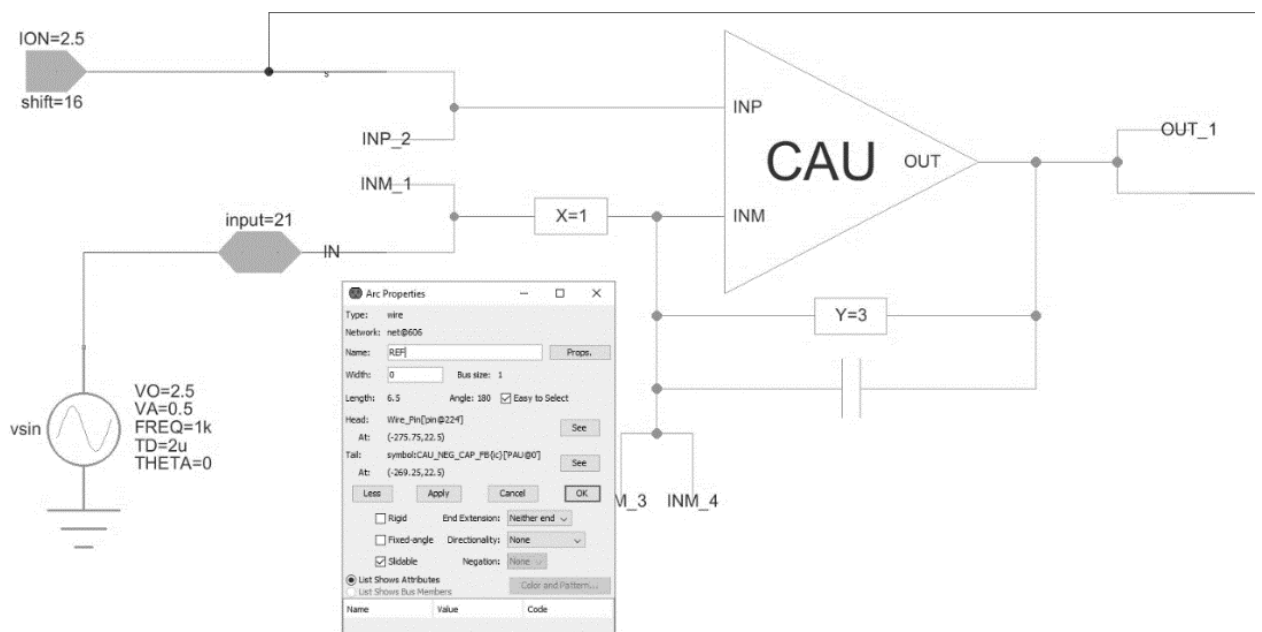




Рисунок 15. Обозначение выводов после построения схемы

Следующий этап – моделирование:

- Для проведения функционального моделирования выполнить команду: Tools → Languages → Write Simulation Path (кнопка  на панели инструментов);
- Запустить функциональное моделирование: Tools → Simulation (Spice) → Write Spice Deck... (кнопка **CreateNetlist** на панели инструментов);

- Для того, чтобы получить конфигурационную последовательность построенной схемы необходимо выполнить команду: Tools → Languages → Make Trace (кнопка  на панели инструментов).

После окончания расчетов откроется окно LTspice IV с результатами моделирования. Для вывода графиков выполнить команду Plot Settings → Add Trace (или нажать клавиши «Ctrl» + «A») и выбрать проводник. Выбор проводника осуществляется при помощи поисковой строки «Only list tracing matches», где вводятся номера или названия входов и выходов, соответствующие введенным в поля «Name». Например, если необходимо посмотреть сигнал на выходе с именем OUT, то в поисковой строке необходимо ввести «OUT» и нужный проводник будет обозначаться как «v(OUT)» (рисунок 16).

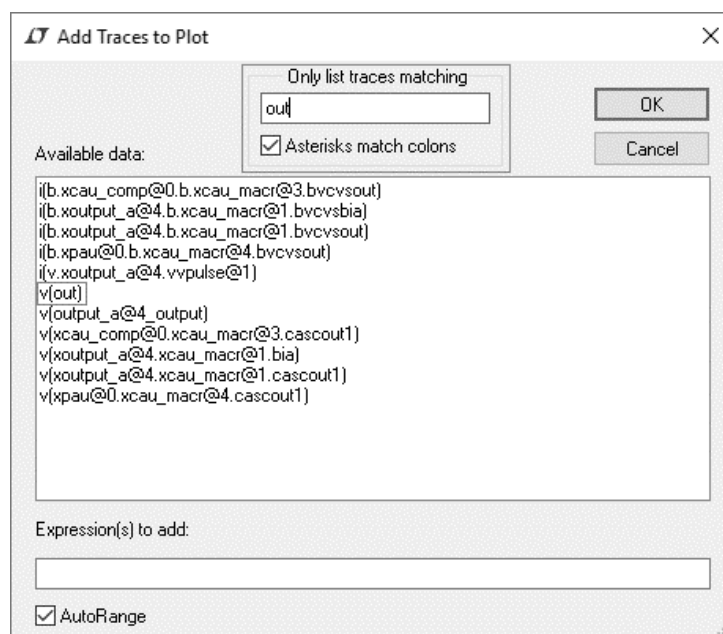


Рисунок 16. Окно вывода результатов моделирования

Некоторые инструменты программы моделирования LTspice IV:

- Увеличение интересующей области – нажать левую кнопку мыши, и не отпуская, выделить интересующую область.
- Возврат масштаба к начальному – нажать кнопку «Zoom full extents» в панели инструментов.
- Добавление координатной плоскости – выполнить команду: Plot Settings → Add Plot Pane.
- Вывод маркеров – нажать левой кнопкой мыши по названию проводника.

Для определения частоты среза спроектированного фильтра необходимо воспользоваться настраиваемыми маркерами: в окне результатов моделирования нажать левой кнопкой мыши по названию проводника.

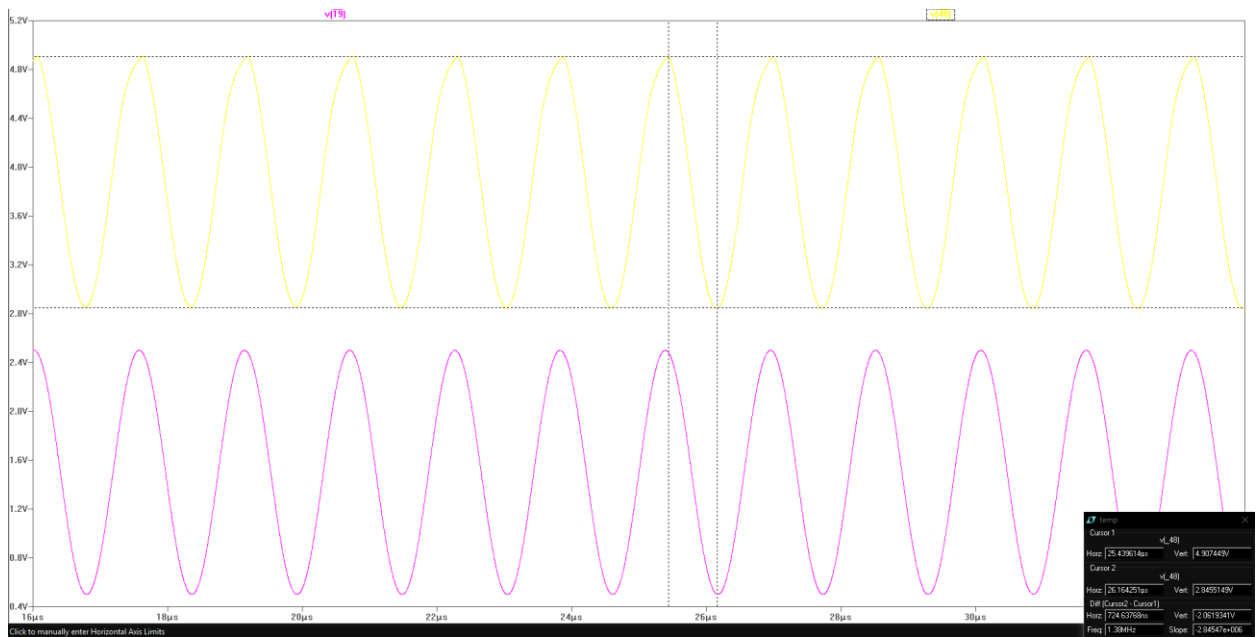


Рисунок 17. Создание маркеров.

Передвигая маркер по исследуемому графику, найти значение амплитуд выходных сигналов по трем частотам, а именно  $f_{cp}$ ,  $10f_{cp}$ ,  $0,1f_{cp}$ .

## Прошивка и измерения

Для записи пользовательской схемы в память микросхемы, необходимо:

- Вставить микросхему в контактирующее устройство на отладочной плате;
- Вставить перемычку («джампер») в два верхних контакта разъема «Г» отладочной платы;
- Соединить программатор с ПК с помощью USB кабеля. Соединить отладочную плату с программатором шлейфом;
- Открыть программу «DCSProg»;
- Выбрать тип микросхемы (выполнить команду: Микросхема → Тип → 5400TP035);
- Загрузить конфигурационную последовательность построенной схемы (выполнить команду: Микросхема → Загрузить файл в буфер. В открывшемся окне выбрать файл Autotracing.txt. Путь к файлу C:\CYGELENG\config\);
- Включить блок питания. Установить 6 В постоянного напряжения. Ограничение по току – 200 мА. Подсоединить сначала «землю» блока питания к «земле» разъема «А», затем питающий провод блока питания к выводу питания разъема «А». Включить подачу напряжения питания.

Примечание №1. Сначала включается блок питания, а затем его выводы подключаются к отладочной плате. Это необходимо для предотвращения выхода из строя микросхемы при скачках напряжения в момент включения блока питания.

Примечание №2. После подачи питания на микросхему и до ее прошивки, напряжение на блоке питания может просесть из-за установленного ограничения по току. После прошивки питание станет равным изначально установленному.

- Запрограммировать микросхему (выполнить команду: Микросхема → Прошить);

При условии правильного выполнения предыдущих инструкций, в основном окне программы «DCSProg» последние три строки будут заканчиваться надписью: «ОК».

- Задать внешние воздействия на соответствующие выводы отладочной платы;
- Проконтролировать выходные сигналы с помощью осциллографа;
- Занести результаты измерений в отчет.



## Контроль результатов

Итогом выполненной работы является отчет, который содержит результаты выполненных пунктов задания. Результаты измерений необходимо занести в таблицу 3. Отчет считается успешным, если расчетное значение частоты среза совпадает с точностью не менее 30% с значением, полученным при моделировании. Оформление и другие аспекты отчета определяются преподавателем.

Таблица 3. Результаты измерений пунктов 1 и 2 лабораторной работы

Тип фильтра	Частота среза			Амплитуда выходного сигнала на частоте $0,1f_{cp}$	Амплитуда выходного сигнала на частоте $f_{cp}$	Амплитуда выходного сигнала на частоте $10f_{cp}$
	Расчёт	Моделирование	Практика			
Пассивный ФНЧ						
Активный ФНЧ						