

## **Лабораторная работа №2**

### **Построение схем на операционных усилителях на ПАИС.**

**Цель работы:** обучение построению схем на ПАИС при помощи автоматической трассировки. Изучение и повторение теории операционных усилителей и схем их включения.

**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. Схема включения неинвертирующего усилителя

Неинвертирующий усилитель характеризуется тем, что входной сигнал поступает на неинвертирующий вход операционного усилителя, а опорный уровень – на инвертирующий. Данная схема включения изображена на рисунке 1.

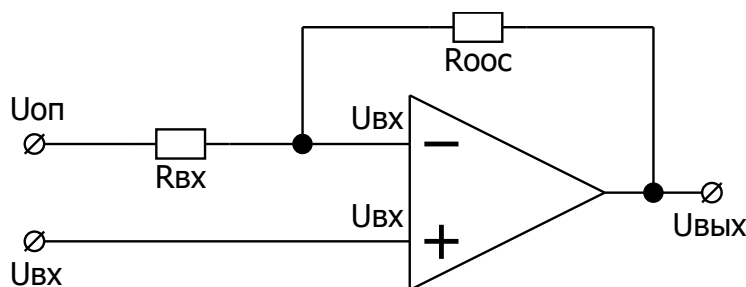


Рисунок 1. Схема включения неинвертирующего усилителя.

Работа данной схемы объясняется следующим образом: так как собственный коэффициент усиления идеального ОУ бесконечно большой, то разность входных напряжений стремится к нулю. Отсюда следует важнейшее свойство идеального ОУ, упрощающее рассмотрение схем с его использованием: идеальный ОУ, охваченный отрицательной обратной связью, поддерживает одинаковое напряжение на своих входах.

Идеальный ОУ имеет бесконечно большое входное сопротивление, поэтому ток во вход ОУ не втекает, поэтому ток, протекающий через резисторы  $R_{вх}$  и  $R_{оос}$ , будет одинаковым.

Таким образом, основные параметры данной схемы описываются следующими соотношением:

$$\begin{aligned} I_{R_{вх}} &= I_{R_{оос}}, \\ I_{R_{вх}} &= \frac{U_{вх} - U_{оп}}{R_{вх}}, \\ I_{R_{оос}} &= \frac{U_{вых} - U_{вх}}{R_{оос}}, \\ \frac{U_{вх} - U_{оп}}{R_{вх}} &= \frac{U_{вых} - U_{вх}}{R_{оос}} \end{aligned}$$

Отсюда выводится соотношение для коэффициента усиления неинвертирующего усилителя:

$$K_{yc} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{R_{оос} + R_{вх}}{R_{вх}} = \frac{R_{оос}}{R_{вх}} + 1$$

Таким образом, можно сделать вывод, что на коэффициент усиления влияют только номиналы пассивных компонентов.

## 1.2. Схема включения инвертирующего усилителя

Инвертирующий усилитель характеризуется тем, что неинвертирующий вход операционного усилителя подключен к опорному напряжению. В идеальном ОУ разность напряжений между входами усилителя равна нулю. Поэтому цепь обратной связи должна обеспечивать напряжение на инвертирующем входе также равное опорному уровню. Схема инвертирующего усилителя изображена на рисунке 2:

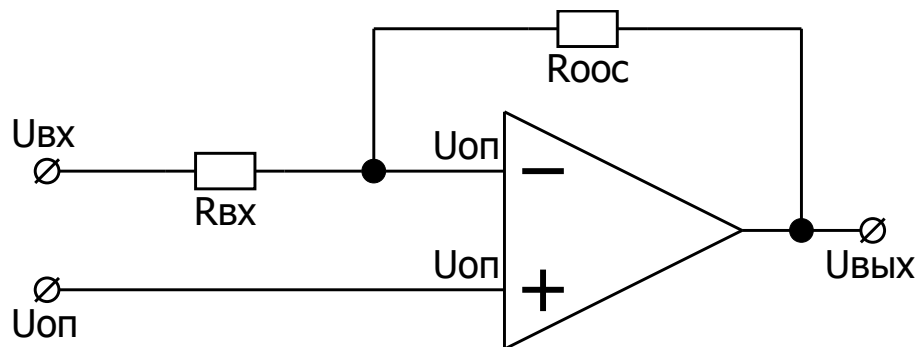


Рисунок 2. Схема включения инвертирующего усилителя.

Идеальный ОУ имеет бесконечно большое входное сопротивление, поэтому ток во входы ОУ не втекает и ток, протекающий через резисторы  $R_{вх}$  и  $R_{оос}$ , будет одинаковым по значению и противоположным по направлению.

$$I_{R_{вх}} = -I_{R_{оос}},$$

$$I_{R_{вх}} = \frac{U_{вх} - U_{оп}}{R_{вх}},$$

$$I_{R_{оос}} = \frac{U_{вых} - U_{оп}}{R_{оос}},$$

$$\frac{U_{вх} - U_{оп}}{R_{вх}} = -\frac{U_{вых} - U_{оп}}{R_{оос}},$$

где  $U_{оп}$  – опорное напряжение.

Тогда коэффициент усиления данной схемы будет равен:

$$K_{ус} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = -\frac{R_{оос}}{R_{вх}}.$$

Знак минус в данной формуле указывает на то, что сигнал на выходе схемы инвертирован по отношению к входному сигналу.

## Лабораторное задание

### 1) Построить неинвертирующий усилитель на усилительном блоке 1-го типа с заданным коэффициентом усиления.

Подать на неинвертирующий вход INP с внешнего источника синусоидальный сигнал с частотой 1 кГц и амплитудой 500 мВ относительно уровня 2,5 В.

Подать на инвертирующий вход INM с внешнего источника постоянное напряжение 2,5 В.

Построить неинвертирующий усилитель по схеме на рисунке 3 с параметрами в соответствии с вариантом из таблицы 1. Определить коэффициент усиления при моделировании в САПР и при программировании микросхемы. Внести результаты в таблицу 3.

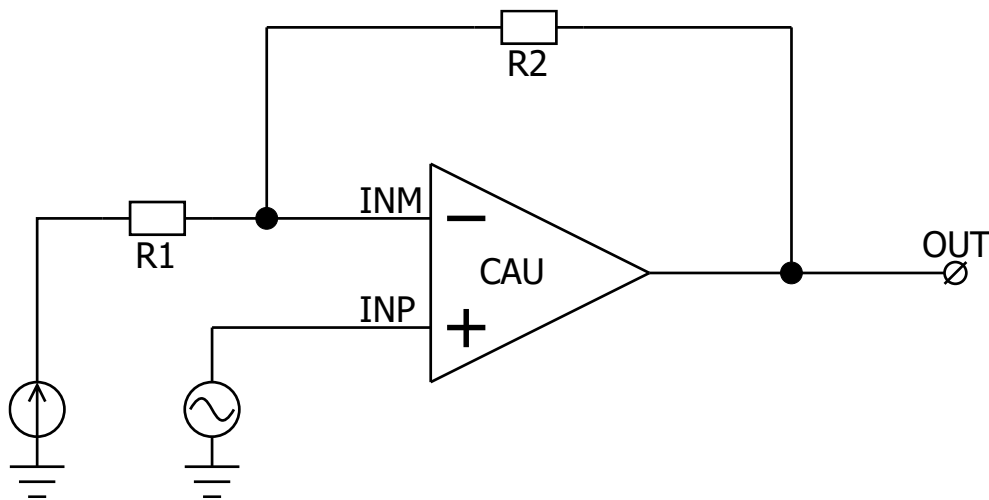


Рисунок 3. Функциональная схема неинвертирующего усилителя.

В данном пункте лабораторной работы используется выходной аналоговый буфер OUTPUT\_ADR. Рекомендуется установить время моделирования 2 мс ( $t_{stop}=2\text{ м}$ ) с шагом моделирования 100 нс ( $t_{step} = 100\text{ н}$ ), а также время задержки 4 мкс ( $TD=4\text{ у.}$ ) на источнике синусоидальных импульсов ( $v_{sin}$ ).

### 2) Построить инвертирующий усилитель на усилительном блоке 1-го типа с заданным коэффициентом усиления.

Подать на неинвертирующий вход INP с внешнего источника постоянное напряжение 2,5 В.

Подать на инвертирующий вход INM с внешнего источника синусоидальный сигнал с частотой 1 кГц и амплитудой 250 мВ относительно уровня 2,5 В.

Построить инвертирующий усилитель по схеме на рисунке 4 с параметрами в соответствии с вариантом из таблицы 1. Определить коэффициент усиления при моделировании в САПР и при программировании микросхемы. Внести результаты в таблицу 4.

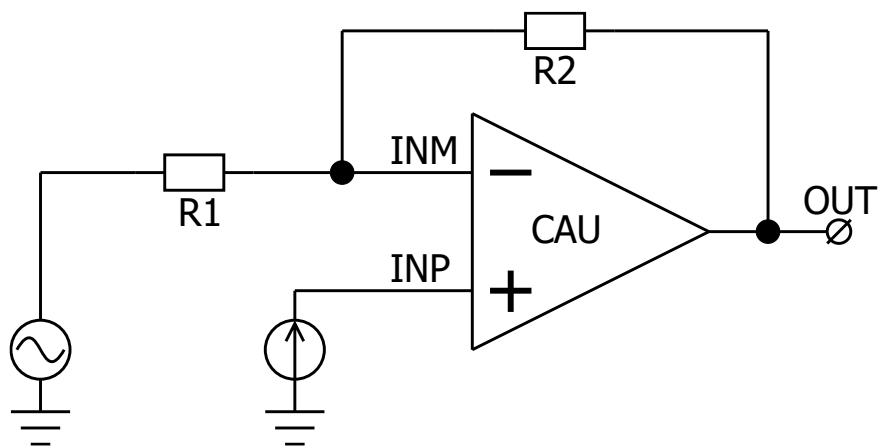


Рисунок 4. Функциональная схема инвертирующего усилителя.

В данном пункте лабораторной работы используется выходной аналоговый буфер OUTPUT\_ADR. Рекомендуется установить время моделирования 2 мс ( $t_{stop}=2\text{ m}$ ) с шагом моделирования 100 нс ( $t_{step}=100\text{ n}$ ), а также время задержки 4 мкс ( $TD=4\text{ u.}$ ) на источнике синусоидальных импульсов ( $v_{sin}$ ).

### 3) Построить дифференциальный усилитель на усилительном блоке 2-го типа с заданным коэффициентом усиления.

Подать на неинвертирующий вход INP с внешнего источника синусоидальный сигнал с частотой 1 кГц и амплитудой 500 мВ относительно уровня 2,5 В.

Подать на инвертирующий вход INM с внешнего источника постоянное напряжение 2,5 В.

Построить полностью дифференциальный усилитель по схеме на рисунке 5 с параметрами в соответствии с вариантом из таблицы 1. Определить коэффициент усиления при моделировании в САПР и при программировании микросхемы. Внести результаты в таблицу 5.

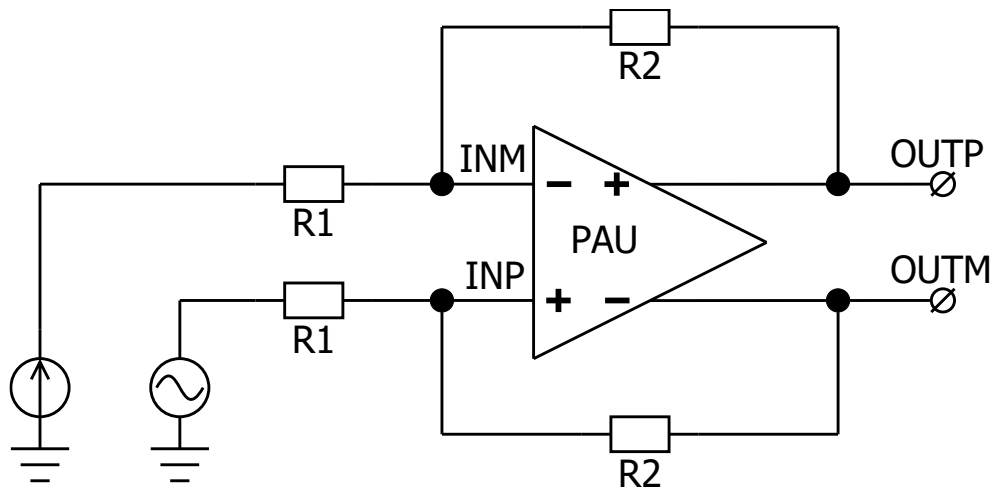


Рисунок 5. Функциональная схема дифференциального усилителя.

В данном пункте лабораторной работы используется выходной аналоговый буфер OUTPUT\_ADR. Рекомендуется установить время моделирования 2 мс ( $t_{stop}=2\text{ m}$ ) с шагом моделирования 100 нс ( $t_{step}=100\text{ n}$ ), а также время задержки 4 мкс ( $TD=4\text{ u.}$ ) на источнике синусоидальных импульсов ( $v_{sin}$ ).

Таблица 1. Соответствие номера варианта и условий задания

Пункт задания	Вариант	Тип параметра	Значение параметра
1	1	Коэффициент усиления	2
	2		3,5
	3		4
	4		1,5
2	1	Коэффициент усиления	2
	2		3
	3		4
	4		5
3	1	Коэффициент усиления	0,5
	2		1,5
	3		1
	4		2,5

## 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: lab2\_scheme\_1.
- Дважды нажмите левой кнопкой мыши на свою созданную схему.

Блоки, из которых проектируется схема, расположены в библиотеке symbol (рисунок 6). Чтобы перенести компоненты из библиотеки в рабочее пространство, нажмите левой кнопкой мыши на нужный блок и, не отпуская кнопку, перетащите в рабочее пространство.

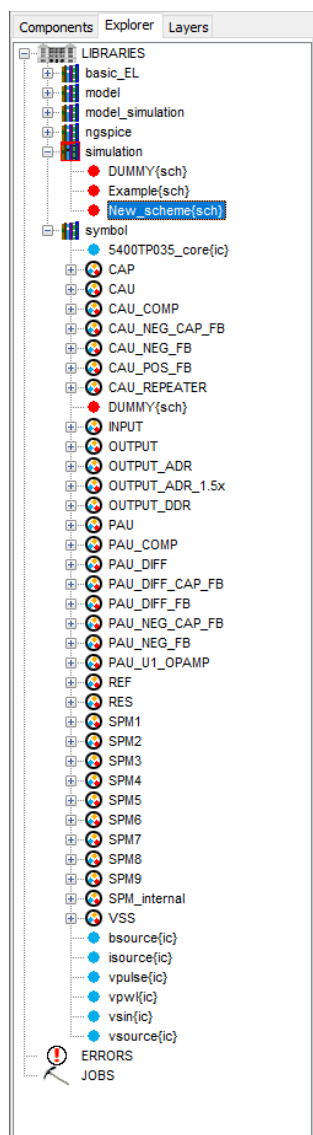


Рисунок 6. Расположение блоков библиотеки symbol в программе «Electric VLSI Design System».

### Блоки, используемые в лабораторной работе

Таблица 2. Описание используемых в лабораторной работе блоков.

5400TP035_core	Параметры моделирования по времени
CAU_NEG_FB	ОУ 1-го типа с отрицательной обратной связью
INPUT	Блок ввода
OUTPUT_ADR	Блок вывода с аналоговым буфером
PAU_DIFF_FB	Полностью дифференциальный ОУ 2-го типа с отрицательной обратной связью
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.

В усилительном блоке 1-го типа предусмотрен программируемый потенциометр.

Элементы на основе усилительного блока 1-го типа:

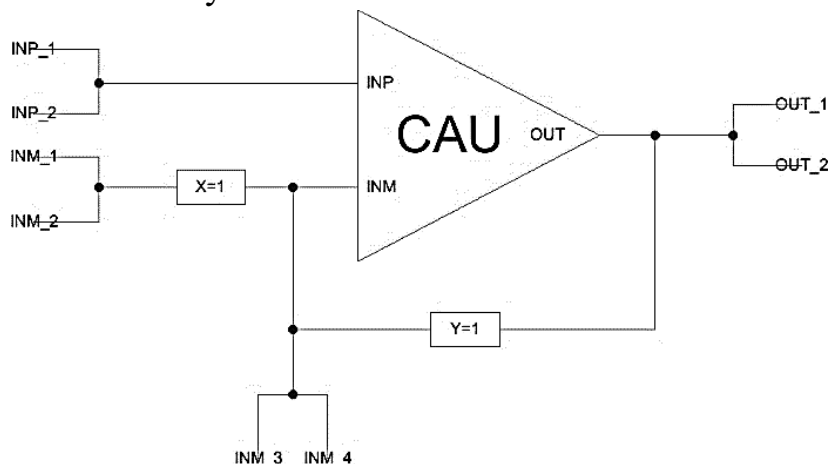


Рисунок 7. ОУ 1-го типа с отрицательной обратной связью.

Назначение выводов:

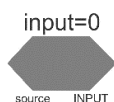
- INP – неинвертирующий вход;
- INM – инвертирующий вход;
- OUT – выход.

## 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 8. а) блок ввода; б) блок вывода с аналоговым буфером.

## Усилительный блок 2-го типа

Прецизионный усилительный блок 2-го типа предназначен для построения блоков со смещением нуля до 3 мВ. Диапазон входного напряжения сигналов от 0,5 до 3,0 В. Диапазон выходного напряжения сигналов от 0 В до напряжения питания 5 В. Средняя точка  $U_{cp} = 2,5$  В.

В усилительном блоке 2-го типа предусмотрено 2 программируемых потенциометра, а также 2 шунтирующие емкости номиналом 2 пФ каждая. Установка соотношения резисторов аналогична с усилительным блоком 1-го типа.

Элементы на основе усилительного блока 2-го типа:

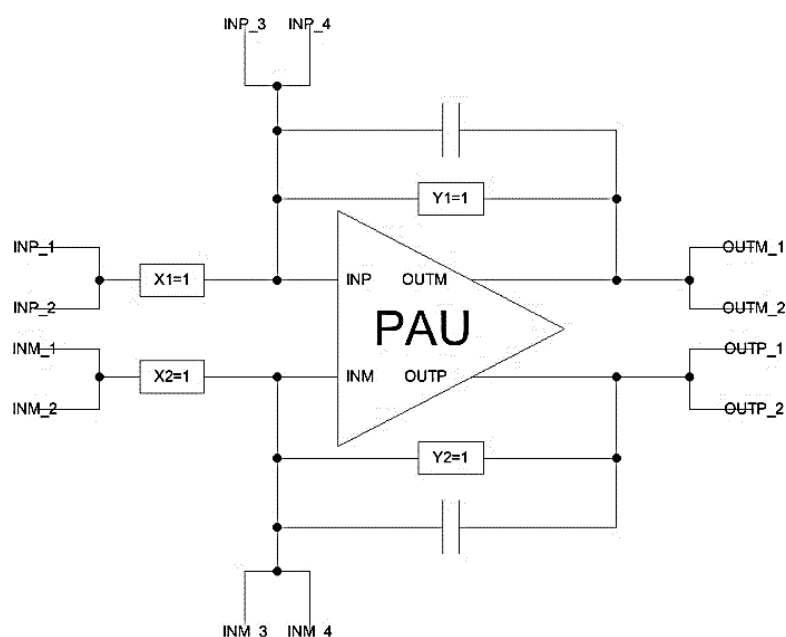


Рисунок 9. Полностью дифференциальный ОУ 2-го типа с отрицательной обратной связью.

Назначение выводов:

- INP – неинвертирующий вход;
- INM – инвертирующий вход;
- OUTP – неинвертирующий выход;
- OUTM – инвертирующий выход;

### Важно!

В состав блока CAU\_NEG\_FB входит один программируемый потенциометр. Чтобы задать необходимый коэффициент усиления нужно подобрать соответствующее соотношение резисторов обратной связи. Для этого 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.

В состав блока PAU\_DIFF\_FB входят два программируемых потенциометра. Чтобы задать необходимый коэффициент усиления нужно провести те же операции, которые указаны для блока CAU\_NEG\_FB.

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.

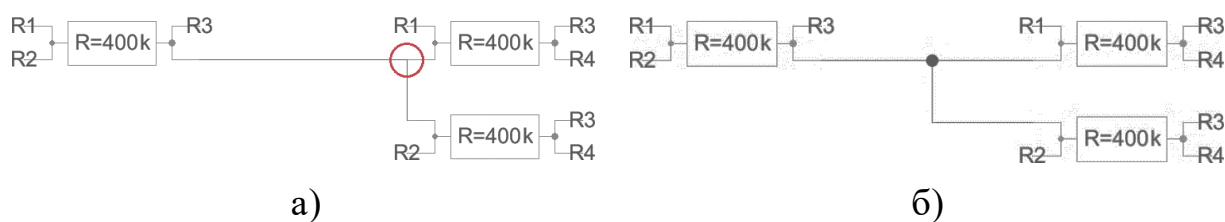


Рисунок 10. а) пример неправильного построения схемы; б) пример правильного построения схемы.

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 единицу времени) и тем дольше процесс моделирования.
- $tstop$  – время моделирования.

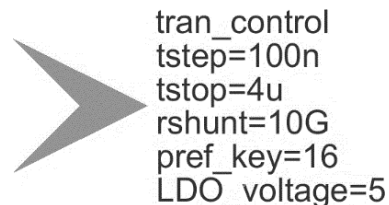


Рисунок 11. Параметры tran-моделирования.

Далее требуется обозначить выводы, которые необходимо контролировать (IN, OUT, REF и т.д.). Для обозначения вывода необходимо зайти в его свойства (клавиша «q» или двойное нажатие левой кнопкой мыши по проводу) и в поле «Name» ввести название (рисунок 12).

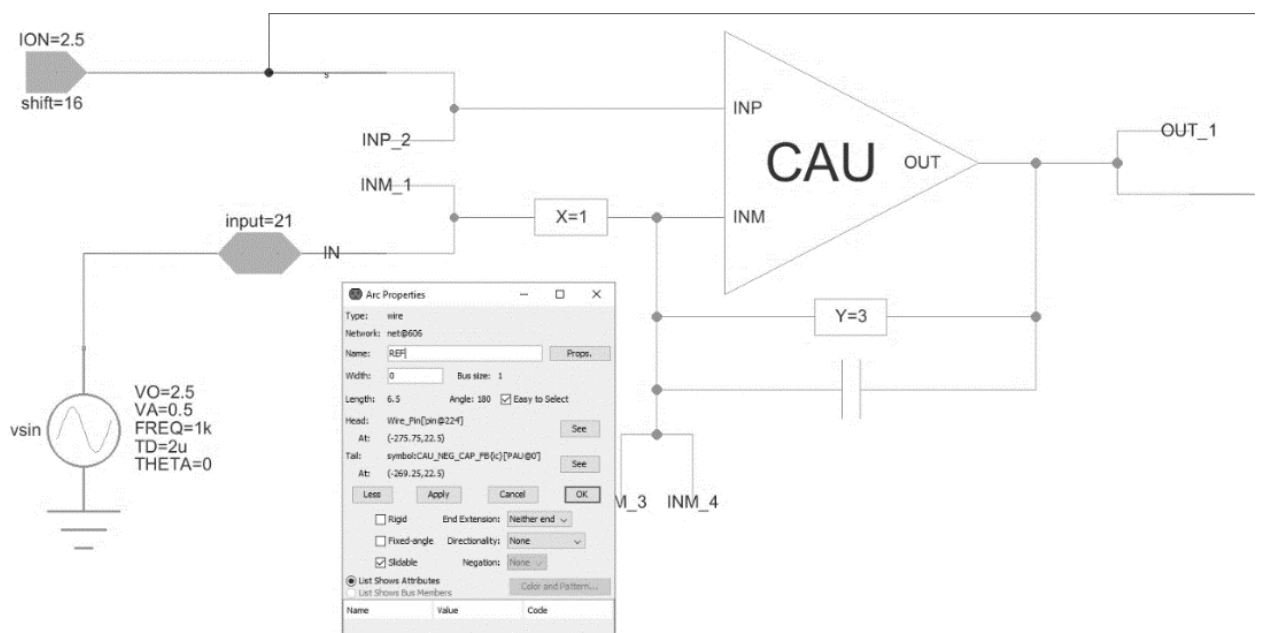




Рисунок 12. Обозначение выводов после построения схемы

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 13).

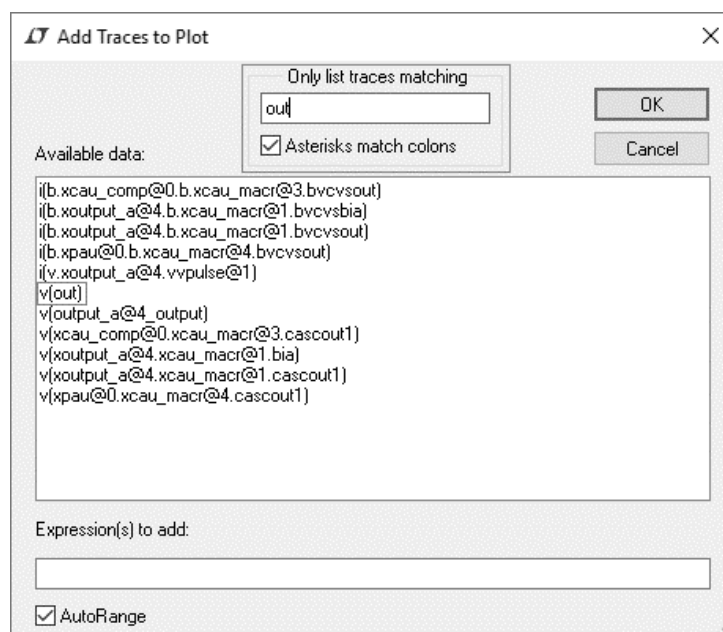


Рисунок 13. Окно вывода результатов моделирования

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.

**Важно!**

Возможно, Ваши теоретические расчеты будут не совпадать с результатами моделирования. Это обусловлено тем, что внутри схемы присутствует падение напряжения на коммутационных ключах. О том, как избежать этого эффекта будет изложено в лабораторной работе № 6.

## 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 таблицы 3, 4, 5. Отчет считается успешным, если все построенные схемы функционируют корректно и проведен анализ причин несовпадения практически полученных и теоретически ожидаемых данных. Оформление и другие аспекты отчета определяются преподавателем.

Таблица 3. Результаты измерений пункта 1 лабораторной работы.

Входное напряжение, В	Выходное напряжение при моделировании, В	Выходное напряжение при программировании, В

Таблица 4. Результаты измерений пункта 2 лабораторной работы.

Входное напряжение, В	Выходное напряжение при моделировании, В	Выходное напряжение при программировании, В

Таблица 5. Результаты измерений пункта 3 лабораторной работы.

	Выходное напряжение на неинвертирующем выходе, В	Выходное напряжение на инвертирующем выходе, В
При моделировании		
При программировании микросхемы		