

Приложение А

Описание DCS_Electric	3
Настройка рабочей станции	3
Рекомендуемые системные требования:	3
Предварительная работа:	3
Маршрут проектирования	4
Проектирование аналоговой части	5
Создание электрической схемы	5
Основные блоки схемы	7
CAU – ОУ общего применения на основе усилительного блока CAU	7
CAU_COMP – компаратор на основе усилительного блока CAU	7
CAU_NEG_CAP_FB – ОУ общего применения с отрицательной обратной связью (ООС) и шунтирующим конденсатором емкостью 1,6 пФ на основе усилительного блока CAU	7
CAU_NEG_FB – ОУ общего применения с ООС на основе усилительного блока CAU	7
CAU_POS_FB – ОУ общего применения с положительной обратной связью на основе усилительного блока CAU	8
CAU_REPEATER – Повторитель на основе усилительного блока CAU	8
INPUT – вход схемы	8
OUTPUT – выход схемы	8
OUTPUT_ADR – выход схемы через аналоговый буфер	8
OUTPUT_1x5_ADR – выход схемы через усилитель в 1,5 раза	9
OUTPUT_DDR – выход схемы через цифровой буфер	9
PAU – ОУ общего применения на основе прецизионного усилительного блока PAU	9
PAU_COMP – компаратор на основе прецизионного усилительного блока PAU	9
PAU_DIFF – полностью дифференциальный ОУ на основе прецизионного усилительного блока PAU	9
PAU_DIFF_CAP_FB – полностью дифференциальный ОУ с ООС и шунтирующим конденсатором емкостью 2 пФ на основе прецизионного усилительного блока PAU	10
PAU_DIFF_FB – полностью дифференциальный ОУ с ООС на основе прецизионного усилительного блока PAU	10
PAU_NEG_CAP_FB – ОУ общего применения с ООС и шунтирующим конденсатором емкостью 2 пФ на основе прецизионного усилительного блока PAU	10
PAU_NEG_FB – ОУ общего применения с ООС на основе прец. усилительного блока PAU	11
PAU_U1_OPAMP – ОУ общего применения с ООС, шунтирующим конденсатором емкостью 2 пФ и потенциометром на выводе INP на основе прец. усилительного блока PAU	11
REF – источник опорного напряжения	11
MUX – аналоговый мультиплексор	12
RES – программируемый резистор из блока пассивных компонентов	12

CAP – конденсатор	12
SPM_mini – блок свободной конфигурации	13
VSS – вывод «земли» из блока пассивных компонентов	13
isource – источник постоянного тока	13
bsource – источник напряжения, задаваемого формулой	14
vpulse – источник прямоугольных импульсов	14
vpwl – источник напряжения, задаваемый по точкам.....	14
vsin – источник синусоидальных импульсов	15
vsource – источник постоянного напряжения	15
5400TP035_core – блок параметров моделирования	16
Автоматическая трассировка схемы	17
Пользовательское размещение элементов в автоматической трассировке	18
Сбалансированные цепи.....	19
Критические цепи.....	19
Ошибки при построении схем и методы их устранения.....	20
Ошибка количества используемых блоков.	20
Ошибка отсутствия параметров моделирования (блок 5400TP035_core)	20
Ошибка установки номера входа/выхода.....	20
Моделирование аналоговой части	21
Ручная трассировка и моделирование	24
Основные блоки схемы	25
Прецизионный усилительный блок PAU	25
Усилительный блок CAU.....	27
Программируемый блок пассивных компонентов PPC.....	28
Блок ввода/вывода PADDDR	29
Блок свободной конфигурации SPM.....	30
Коммутационный блок CB.....	31
Линейный регулятор напряжения LDO	32
Источник опорного напряжения	33
Примеры коммутации без использования автоматической трассировки.....	34
Построение прецизионных схем	38
Импорт схемы из конфигурационной последовательности	42
Совместимость проектов.....	42
Оптимизация проекта для моделирования.....	43
Восстановление схемы из конфигурационной последовательности	45
Лист регистрации изменений	46

Описание DCS_Electric

Программное обеспечение используется для проектирования, моделирования и конфигурирования схем. Программное обеспечение предназначено для работы с конфигурируемыми микросхемами 5400TP035 (ПАИС), 5400TP094 (ПАЦИС), 5400TP045A-031 (ПАМС), 5400TP055A-008 (ПИКЛ).



Рисунок 1. Программное обеспечение DCS_Electric

Настройка рабочей станции

Рекомендуемые системные требования:

- операционная система: Windows 7, Windows 8, Windows 10;
- оперативная память 8 ГБ;
- 20 ГБ свободного места на жестком диске.

Предварительная работа:

- 1) Скопировать папку с программой на локальный диск.
- 2) Установить Java из папки `.\Install` на диск C:\
- 3) Запустить файл `electric.bat` из папки с программой.
- 4) Загрузить настройки (выполняется один раз при первом запуске программы):

File → Preferences → Import

Путь к файлу `.\electric\Prefs\Cadence_style.xml` (общие настройки)

Важно! Путь, где находится программа, должен содержать только латинские символы. Папка, где находится программа, не должна требовать прав администратора.

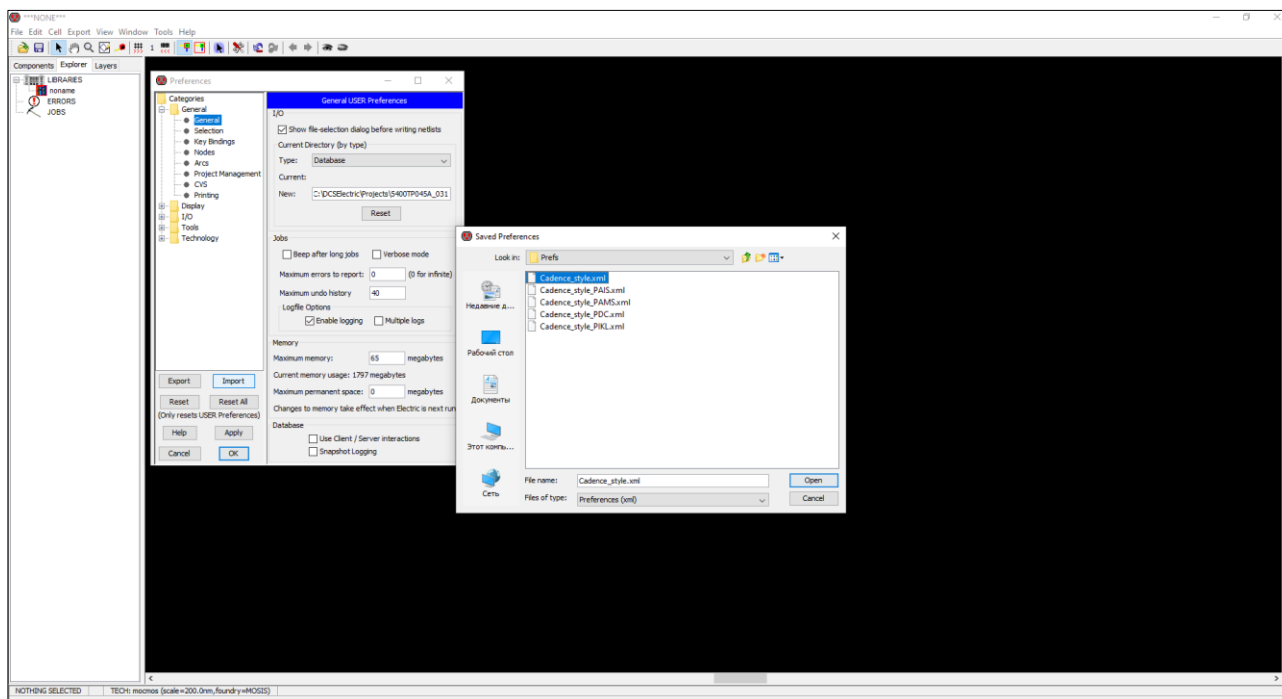


Рисунок 2. Окно загрузки настроек при первом запуске программы

5) Перезапустить программу.

Маршрут проектирования

Общий вид маршрута проектирования схем с использованием DCS_Electric приведен на рисунке 3.



Рисунок 3. Маршрут проектирования программируемых схем

САПР DCS_Electric позволяет спроектировать схему, используя готовые функциональные блоки, провести моделирование и получить конфигурационную последовательность для прошивки в микросхему.

Для прошивки микросхемы в ОЗУ или ПЗУ используется программа DCSProg совместно с программатором (подробнее см. Руководство пользователя 5400TP035 Приложение Б).

Проектирование аналоговой части

Создание электрической схемы

1) Открыть проект (*File → Open Library*)

.DCSElectric\Projects\5400TP035\simulation.jelib

2) Создать новую схему (правой кнопкой мыши по библиотеке *simulation* → *Create New Cell*).

В открывшемся окне в поле *Name* ввести название схемы, в поле *View* выбрать *schematic*.

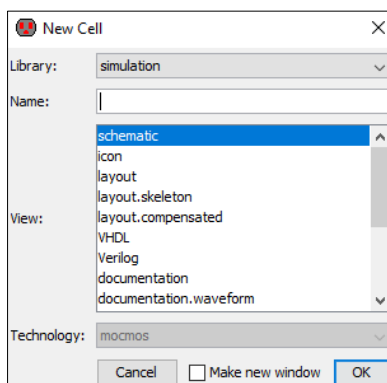


Рисунок 4. Окно создания новой схемы

3) Собрать электрическую схему из готовых блоков.

Функциональные блоки для проектирования схемы расположены в библиотеке *symbol*. Чтобы перенести компоненты из библиотеки в рабочее пространство, нажмите левой кнопкой мыши на нужный блок и, не отпуская кнопку, перетащите в рабочее пространство.

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.

Чтобы установить параметр необходимо нажать клавишу *Ctrl* и левой кнопкой мыши выделить данный параметр. После того как параметр выделен, отпустите клавишу *Ctrl* и дважды нажмите левой кнопкой мыши по параметру. Введите необходимый параметр и нажмите клавишу *Enter*.

Примечание: в процессе проектирования рекомендуется периодически нажимать кнопку F8 (исправление связей). При нажатии проверяются все связи в схеме и удаляются лишние соединительные элементы.

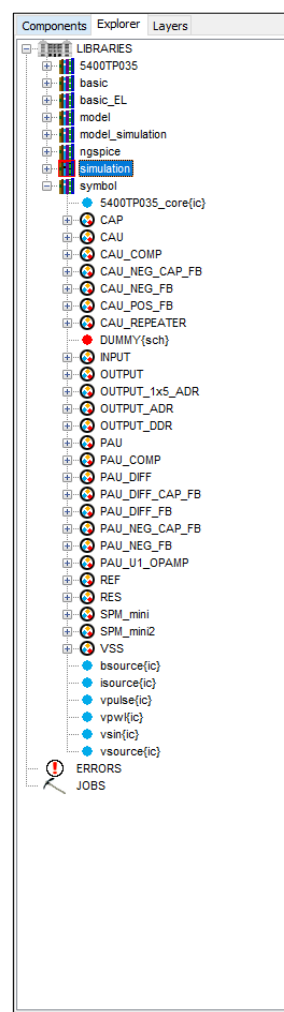


Рисунок 5. Расположение блоков в библиотеке *symbol*

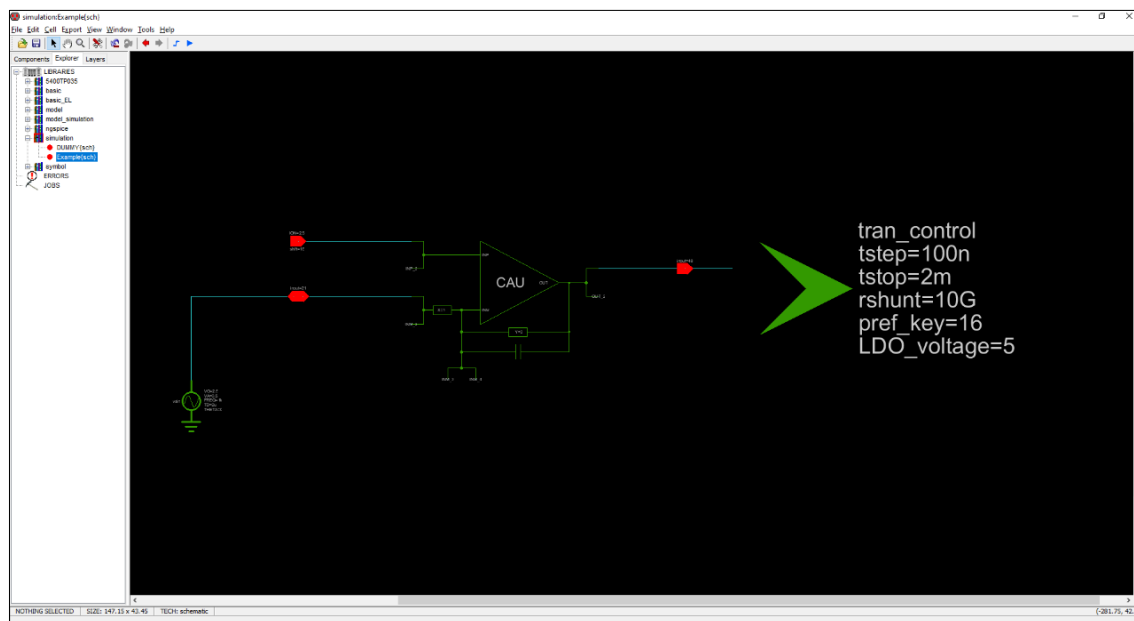


Рисунок 6. Окно проектирования DCS_Electric

Навигация в графическом интерфейсе программы:

- Приближение и отдаление активного поля
 - Клавиша «E» – приближение
 - Клавиша «W» – отдаление
 - Клавиша «Z» – масштабирование области
 - Клавиша «Ctrl» + прокрутка колеса мыши
 - Клавиша «F» – масштабирование и центрирование всей схемы
- Перемещение по полю
 - Нажать колесо мыши, перемещаться по полю
 - Нажать на значок «Toggle Pan» в поле инструментов и, зажав левую кнопку мыши, перемещаться по полю
 - «Num2» – перемещение по рабочей области вниз
 - «Num4» – перемещение по рабочей области влево
 - «Num6» – перемещение по рабочей области вправо
 - «Num8» – перемещение по рабочей области вверх
- Отмена действия
 - Сочетаний клавиш «Ctrl» и «Z»
 - Нажать на значок «Undo» в поле инструментов

Основные блоки схемы

CAU – ОУ общего применения на основе усилительного блока CAU

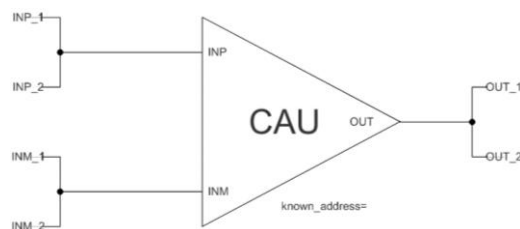


Рисунок 7. Графическое отображение элемента CAU

CAU_COMP – компаратор на основе усилительного блока CAU

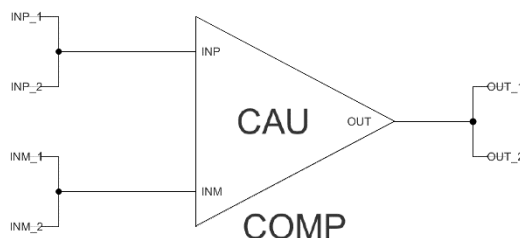


Рисунок 8. Графическое отображение элемента CAU_COMP

CAU_NEG_CAP_FB – ОУ общего применения с отрицательной обратной связью (ООС) и шунтирующим конденсатором емкостью 1,6 пФ на основе усилительного блока CAU

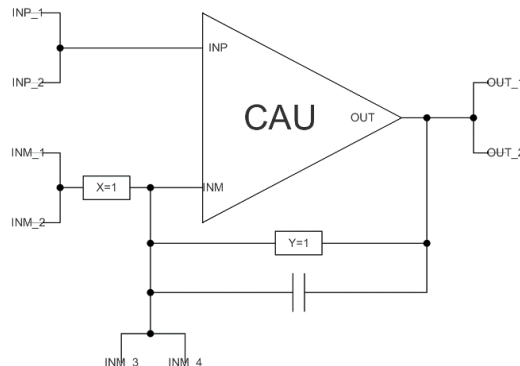


Рисунок 9. Графическое отображение элемента CAU_NEG_CAP_FB

CAU_NEG_FB – ОУ общего применения с ООС на основе усилительного блока CAU

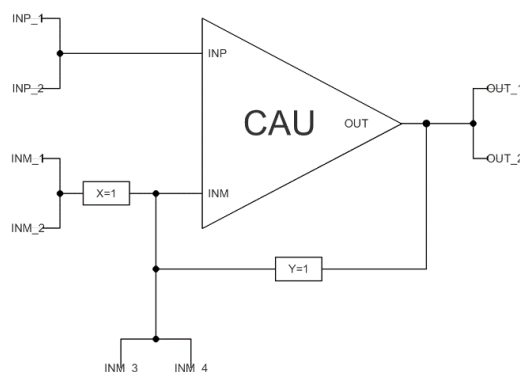


Рисунок 10. Графическое отображение элемента CAU_NEG_FB

CAU_POS_FB – ОУ общего применения с положительной обратной связью на основе усилительного блока CAU

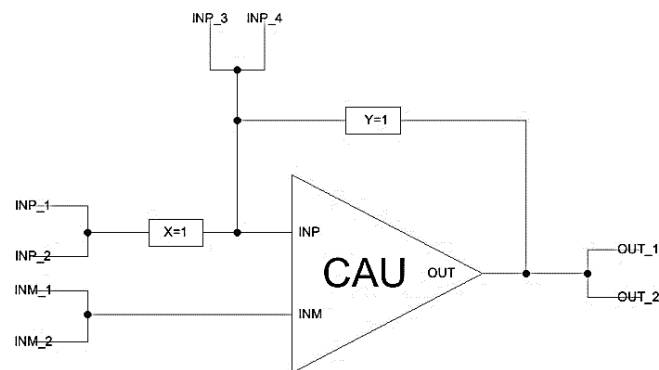


Рисунок 11. Графическое отображение элемента CAU_POS_FB

CAU_REPEATER – Повторитель на основе усилительного блока CAU

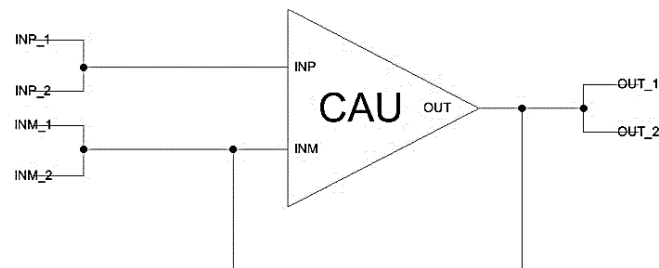


Рисунок 12. Графическое отображение элемента CAU_REPEATER

INPUT – вход схемы

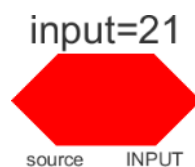


Рисунок 13. Графическое отображение элемента INPUT

OUTPUT – выход схемы

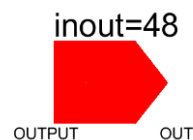


Рисунок 14. Графическое отображение элемента OUTPUT

OUTPUT_ADR – выход схемы через аналоговый буфер

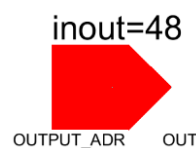


Рисунок 15. Графическое отображение элемента OUTPUT_ADR

OUTPUT_1x5_ADR – выход схемы через усилитель в 1,5 раза

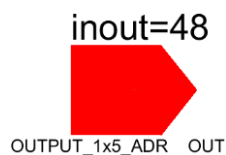


Рисунок 16. Графическое отображение элемента OUTPUT_1x5_ADR

OUTPUT_DDR – выход схемы через цифровой буфер

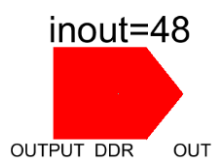


Рисунок 17. Графическое отображение элемента OUTPUT_DDR

PAU – ОУ общего применения на основе прецизионного усилительного блока PAU

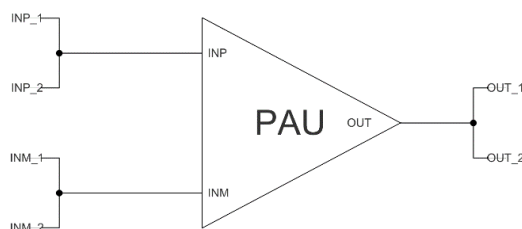


Рисунок 18. Графическое отображение элемента PAU

PAU_COMP – компаратор на основе прецизионного усилительного блока PAU

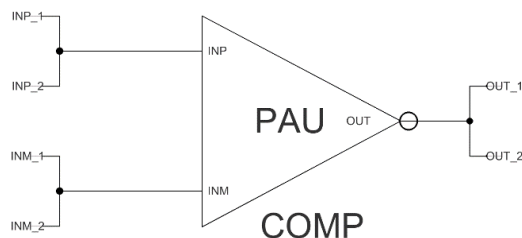


Рисунок 19. Графическое отображение элемента PAU_COMP

PAU_DIFF – полностью дифференциальный ОУ на основе прецизионного усилительного блока PAU

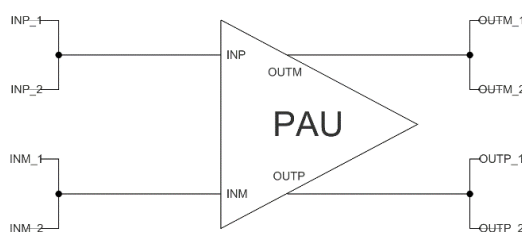


Рисунок 20. Графическое отображение элемента PAU_DIFF

PAU_DIFF_CAP_FB – полностью дифференциальный ОУ с ООС и шунтирующим конденсатором емкостью 2 пФ на основе прецизионного усилительного блока PAU

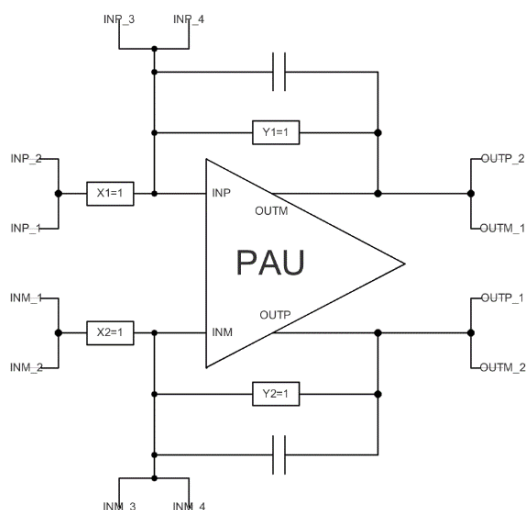


Рисунок 21. Графическое отображение элемента PAU_DIFF_CAP_FB

PAU_DIFF_FB – полностью дифференциальный ОУ с ООС на основе прецизионного усилительного блока PAU

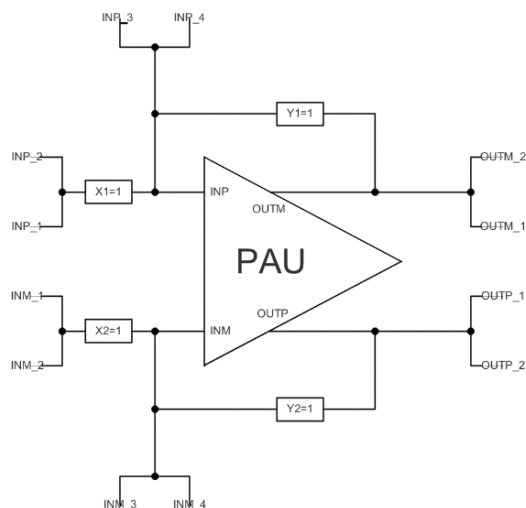


Рисунок 22. Графическое отображение элемента PAU_DIFF_FB

PAU_NEG_CAP_FB – ОУ общего применения с ООС и шунтирующим конденсатором емкостью 2 пФ на основе прецизионного усилительного блока PAU

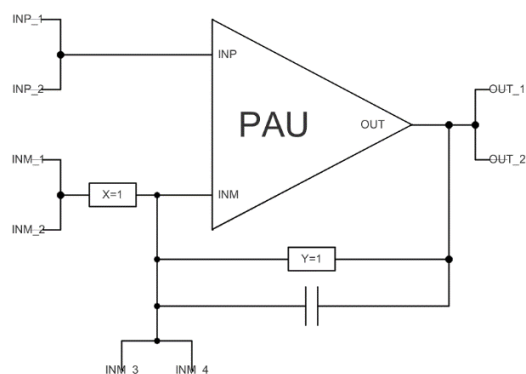


Рисунок 23. Графическое отображение элемента PAU_NEG_CAP_FB

PAU_NEG_FB – ОУ общего применения с ООС на основе прецизионного усилительного блока PAU

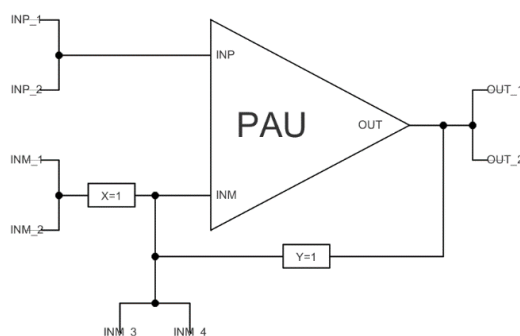


Рисунок 24. Графическое отображение элемента PAU_NEG_FB

PAU_U1_OPAMP – ОУ общего применения с ООС, шунтирующим конденсатором емкостью 2 пФ и потенциометром на выводе INP на основе прецизионного усилительного блока PAU

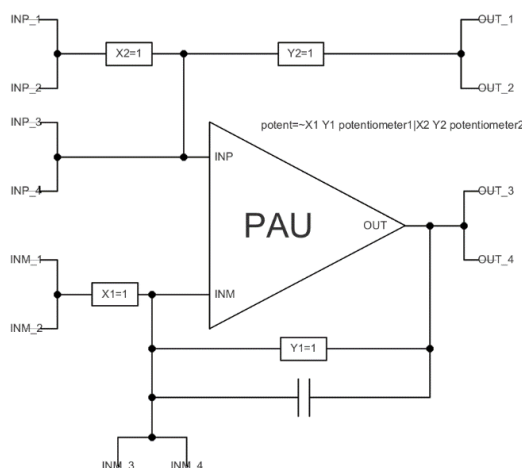


Рисунок 25. Графическое отображение элемента PAU_U1_OPAMP

REF – источник опорного напряжения

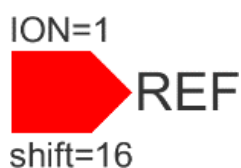


Рисунок 26. Графическое отображение элемента REF

ION – значение выходного напряжения (принимает значение 1,0 В или 2,5 В);

shift – настройка напряжения ИОН (принимает значения от 0 до 31) Шаг настройки 5,0 мВ.

MUX – аналоговый мультиплексор

В микросхеме реализован встроенный 8-ми каналный мультиплексор. Шесть каналов используются для ввода/вывода произвольных аналоговых или цифровых сигналов, один канал для контроля напряжения ИОН и один для контроля целостности конфигурационного кода.

Таблица 1. Выбор канала мультиплексора

MUX2	MUX1	MUX0	MUXIO	INOUT
0	0	0	канал i0 (источник опорного напряжения)	–
0	0	1	канал i1 (конфигурационный код)	–
0	1	0	канал i2	52
0	1	1	канал i3	53
1	0	0	канал i4	54
1	0	1	канал i5	55
1	1	0	канал i6	56
1	1	1	канал i7	57

Напряжения управляющих выводов мультиплексора на макетной плате устанавливаются с помощью программатора (*DCSProg* → *Программатор* → *Установка MUX*)

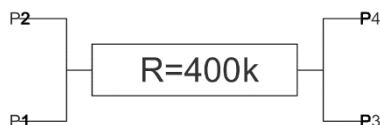
RES – программируемый резистор из блока пассивных компонентов

Рисунок 27. Графическое отображение элемента RES

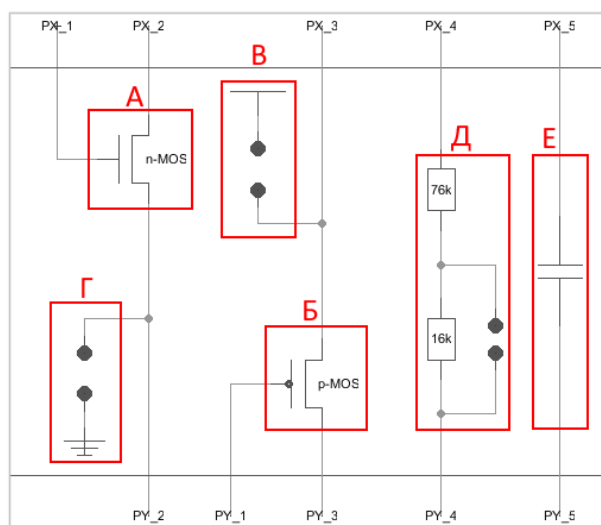
R – значение сопротивления (принимает значения 80, 160, 240, 320, 400 кОм)

CAP – конденсатор

Емкость 8 пФ из блока пассивных компонентов



Рисунок 28. Графическое отображение элемента CAP

SPM_mini – блок свободной конфигурации

- А – n-канальный МОП-транзистор
- Б – p-канальный МОП-транзистор
- В – вывод подключения к VDDAINT
- Г – вывод подключения к VSSA
- Д – резисторы 16 кОм и 76 кОм
- Е – конденсатор 1 пФ

Рисунок 29. Схема ячейки блока свободной конфигурации

Важно! Для улучшения работы автоматической трассировки все блоки SPM разделены в шахматном порядке на 2 части. В библиотеке *symbol* эти части называются *SPM_mini* и *SPM_mini2*. При работе с автоматической трассировкой рекомендуется использовать только блоки одного типа (*SPM_mini* или *SPM_mini2*) т.к. в противном случае мощности трассировки может быть недостаточно для создания схемы.

Важно! Для устойчивой работы автоматической трассировки рекомендуется использовать только один тип элементов (транзистор, резистор или емкость) из блока *SPM_mini*.

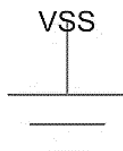
VSS – вывод «земли» из блока пассивных компонентов

Рисунок 30. Графическое отображение элемента VSS

С помощью источников напряжения можно задать внешние воздействия, для этого нужно перенести компоненты из библиотеки *symbol* в рабочее пространство. Источники напряжения необходимо подключать к входу «source» блока ввода «INPUT». Выход блока «INPUT» нужно коммутировать с тем элементом, на который необходимо подать входной сигнал с используемого источника.

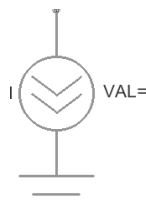
isource – источник постоянного тока

Рисунок 31. Графическое отображение элемента isource

VAL – значение постоянного тока

bsource – источник напряжения, задаваемого формулой

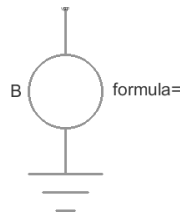


Рисунок 32. Графическое отображение элемента bsource

formula – математическая зависимость напряжения (тока) источника от выбранных параметров

Примеры формул:

formula= $I = \cos(V(1)) + \sin(V(2))$

formula= $V = \ln(\cos(\log(v(1,2)^2))) - v(3)^4 + v(2)^v(1)$

Более подробная информация по источнику приведена в [ngspice manual](#) пункт 5.1 страница 93.

vpulse – источник прямоугольных импульсов

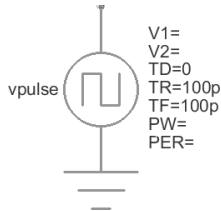


Рисунок 33. Графическое отображение элемента vpulse

V1 – значение напряжения нижнего уровня	TF – время среза
V2 – значение напряжения верхнего уровня	PW – ширина импульса
TD – время задержки	PER – период
TR – время фронта	

vpwl – источник напряжения, задаваемый по точкам

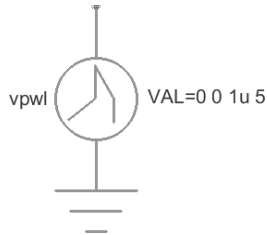


Рисунок 34. Графическое отображение элемента vpwl

VAL = T1 V1 T2 V2 T3 ...

V1 – значение напряжения в точке T1	T2 – время 2 точки
V2 – значение напряжения в точке T2	T3 – ...

vsin – источник синусоидальных импульсов

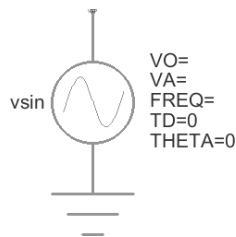


Рисунок 35. Графическое отображение элемента vsin

VO – напряжение смещения	TD – время задержки
VA – амплитуда	THETA – коэффициент затухания
FREQ – частота	

vsource – источник постоянного напряжения

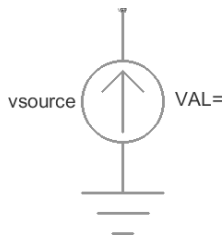


Рисунок 36. Графическое отображение элемента vsource

VAL – значение постоянного напряжения

Для установки 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.

5400TP035_core – блок параметров моделирования

```
tran_control
tstep=100n
tstop=4u
rshunt=10G
pref_key=16
LDO_voltage=5
SAVE=
```

Рисунок 37. Графическое отображение элемента 5400TP035_core

Важно! Блок *5400TP035_core* отвечает за настройку параметров моделирования и конфигурирования. Он должен обязательно присутствовать в каждой схеме.

tstep – шаг моделирования;

tstop – время моделирования;

rshunt – значение сопротивления резистора, добавленного между каждым выводом и «землей» для улучшения сходимости расчетов;

pref_key – настройка напряжения LDO (принимает значения от 0 до 31);

LDO_voltage – напряжения питания ядра (принимает значение 3,3 В или 5,0 В);

SAVE – опция ngspice, которая обеспечивает сохранение только написанных цепей в процессе моделирования. Используется для уменьшения размера файла с результатами моделирования. Для стандартного моделирования поле требуется оставить пустым.

Опция SAVE=all позволяет сохранить все внутренние и внешние цепи. Более подробную информацию можно посмотреть в [ngspice manual](#) «15.6.1. SAVE: Name vector(s) to be saved in raw file». Пример использования: «SAVE=inp inm out».

Автоматическая трассировка схемы

Для создания конфигурационной последовательности необходимо выполнить команду:

Tools → *DCS PDC* → *Autotracing* (кнопка  на панели инструментов).

После завершения процесса автоматической трассировки программа выдаст сообщение:

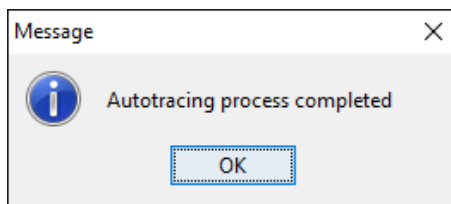


Рисунок 38. Сообщение об успешной трассировке выбранной схемы

В случае получения сообщения об ошибке см. пункт «Ошибки при построении схем и методы их устранения».

Всплывающее окно с сообщением об успешной трассировке схемы также означает, что конфигурационная последовательность аналоговой части экспортирована в текстовый файл `\DCSElectric\config\analog_config.txt`.

В процессе автоматической трассировки происходит размещение элементов в структуру микросхемы 5400TP035 и прокладываются связи между ними. В этот момент учитывается влияние трассировочных ключей и паразитных элементов. Значения их сопротивлений и емкостей записываются во внутреннюю структуру блоков. После автоматической трассировки схемы возможно посмотреть результат на схеме 5400TP035_autotracing в библиотеке 5400TP035.

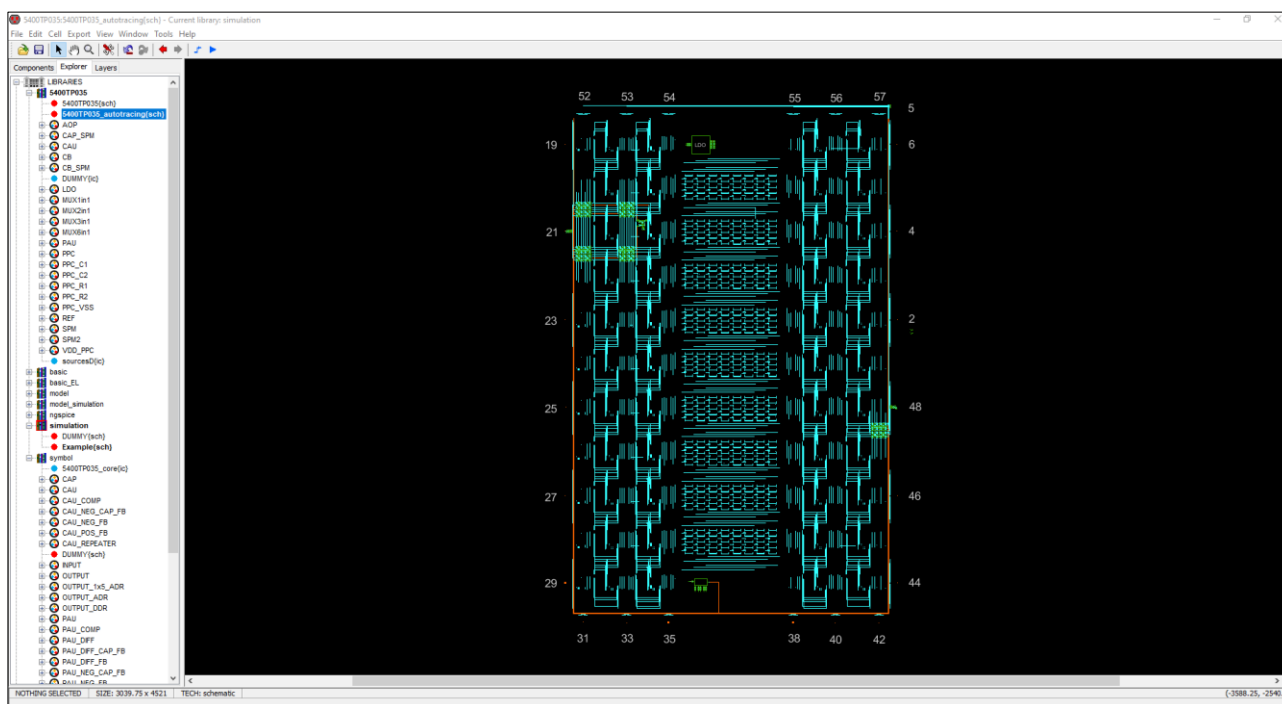


Рисунок 39. Результат автоматической трассировки

Для более наглядного результата работы трассировки рекомендуется выключить отображение неиспользуемых соединений. Для этого необходимо перейти в раздел *Layers* и двойным нажатием левой кнопкой мыши убрать отображение элементов *Arc*.

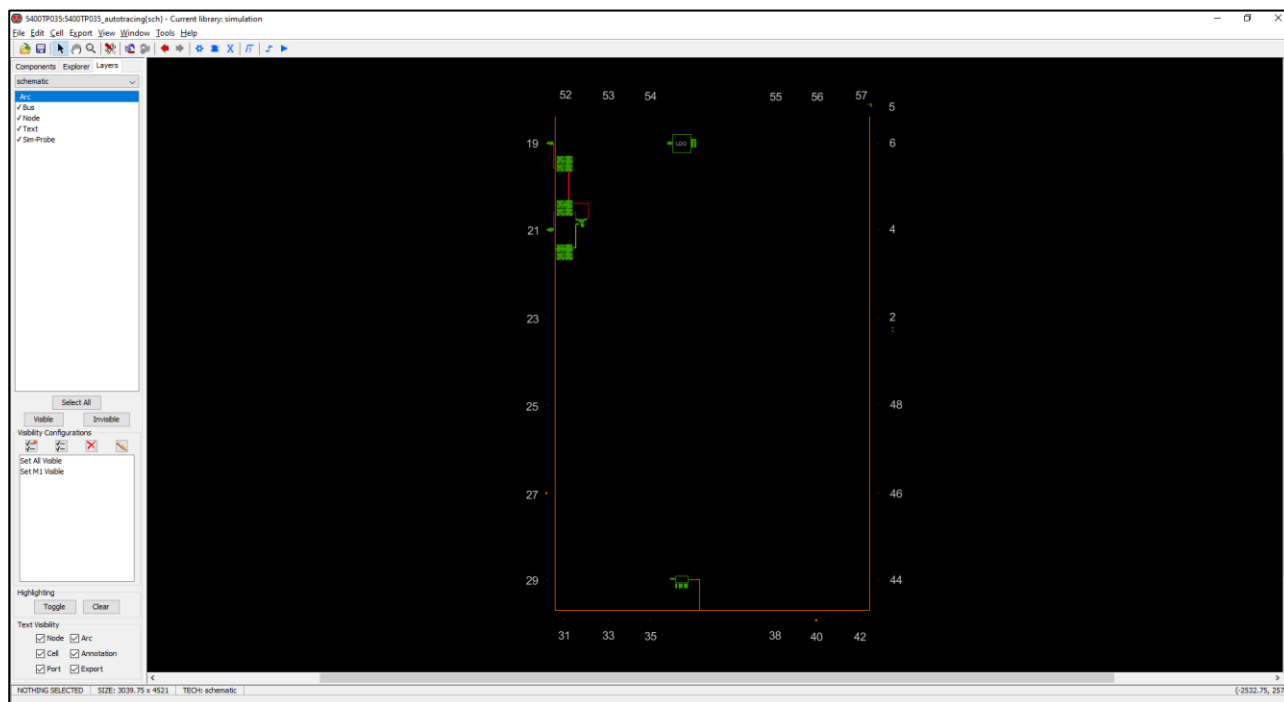


Рисунок 40. Результат автоматической трассировки

Пользовательское размещение элементов в автоматической трассировке (v1.4+)

Каждый элемент в полной схеме ПАИС (в библиотеке 5400TP035.jelib) содержит параметр *uniq*, в который записан адрес элемента.

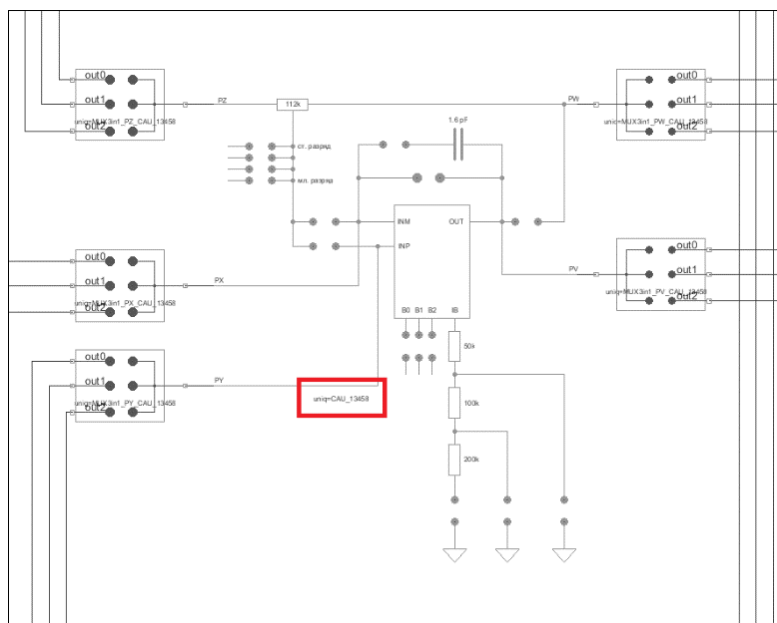


Рисунок 41. Пример параметра *uniq* в блоке CAU

Если указать определенный адрес блока в параметре *known_address* любого элемента из библиотеки *symbol*, то алгоритм автоматической трассировки будет использовать выбранный блок вместо оптимального размещения.

Для автоматического размещения параметр *known_address* следует оставить пустым. Для изменения значения параметра следует выделить блок и зайти в список параметров (клавиша *q*), в поле *parameters* найти *known_address* и изменить на необходимое значение. Затем нажать *Apply* → *OK*.

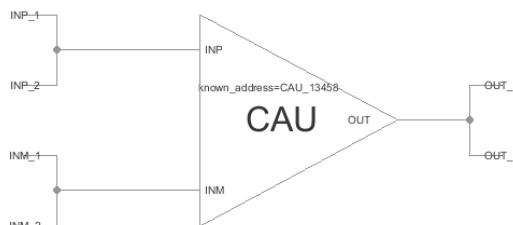


Рисунок 42. Указание адреса блока для автоматической трассировки

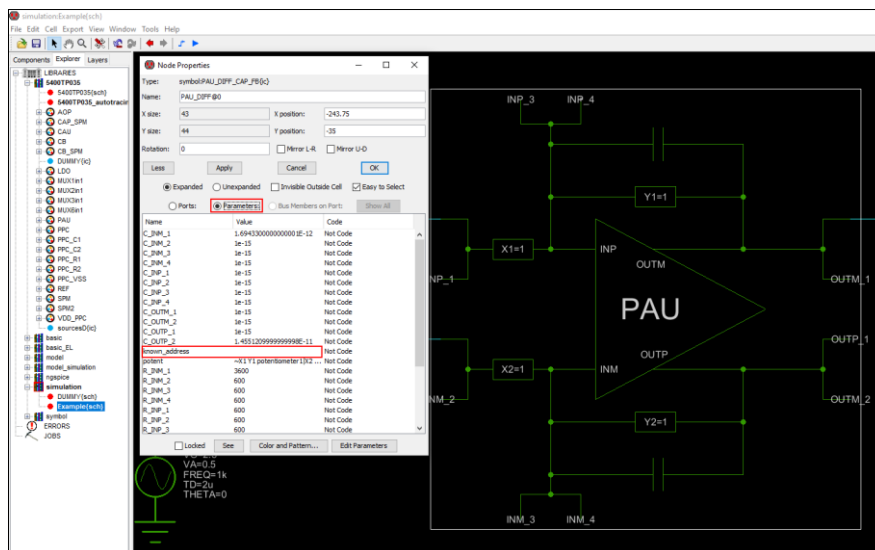


Рисунок 43. Меню изменения параметра *known_address*

Сбалансированные цепи

Опция сбалансированных цепей сделана специально для проектирования прецизионных схем. Сбалансированные цепи, принадлежащие одной группе, трассируются с использованием одинакового количества соединительных ключей. Для того, чтобы пометить цепь как сбалансированную, требуется зайти в настройки выбранной связи (нажатием клавиши *q*) и переименовать ее в соответствии с шаблоном (*balance<group>name*).

Например, связи «*balance<1>out1*» и «*balance<1>out2*» принадлежат одной группе, а связи «*balance<2>out3*» и «*balance<2>out4*» принадлежат другой группе.

Критические цепи

Иногда при проектировании требуется минимизировать сопротивление и емкость некоторых связей. Цепям, которые были помечены пользователем, как критические ставится наивысший приоритет в процессе автоматической трассировки.

Для того, чтобы пометить цепь как критическую, требуется зайти в настройки выбранной связи (нажатием кнопки *q*) и добавить в ее название «*critical_*», например «*out*» → «*critical_out*».

Примечание: Опции сбалансированных и критических цепей являются экспериментальными и находятся в процессе отладки.

Ошибки при построении схем и методы их устранения

В момент создания конфигурационной последовательности (*Tools → DCS PDC → Autotracing*) проводится полная проверка схемы, реализованной пользователем. При некорректном построении схемы или несоответствии внутренней структуре выводится одна из ошибок.

Ошибка количества используемых блоков.

Ошибка возникает при использовании чрезмерного количества блоков в одной схеме. Допустимое количество блоков:

Название блока	Количество	Название блока	Количество
CAU	22	CAP	88
PAU	22	REF	1
SPM_mini	288	5400TP035_core	1
RES	88		

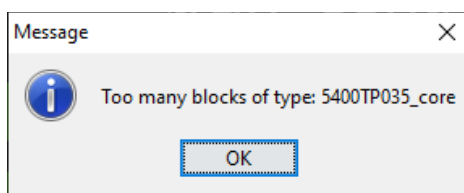


Рисунок 44. Ошибка количества используемых блоков

Решение: уменьшить количество блоков, указанных в тексте ошибки.

Ошибка отсутствия параметров моделирования (блок 5400TP035_core)

Ошибка возникает при отсутствии блока 5400TP035_core в схеме

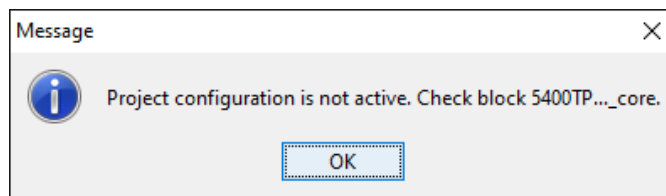


Рисунок 45. Ошибка отсутствия параметров моделирования

Решение: добавить блок 5400TP035_core и установить параметры моделирования.

Ошибка установки номера входа/выхода

Ошибка возникает при неверном численном значении входа/выхода схемы в блоках *INPUT*, *OUTPUT*, *OUTPUT_ADR*, *OUTPUT_DDR*, *OUTPUT_1x5_ADR*. Допустимые значения: 2, 4, 6, 19, 21, 23, 25, 27, 29, 31, 33, 35, 38, 40, 42, 44, 46, 48, 52, 53, 54, 55, 56, 57.

Важно! Вывод 35 не имеет встроенного усилителя в 1,5 раза.

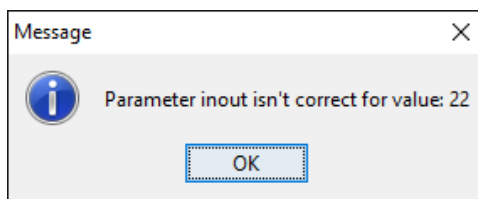


Рисунок 46. Сообщение об использовании некорректного вывода микросхемы

Решение: установить допустимые значения номера входа/выхода.

Моделирование аналоговой части

После создания первоначальной схемы имеется возможность провести моделирование для подтверждения правильности работы. Для этого необходимо:

- 1) Установить параметры источников напряжения;
- 2) Установить параметры моделирования;
- 3) Обозначить выводы, которые необходимо контролировать.

Для обозначения вывода необходимо зайти в его свойства (клавиша *q* или двойное нажатие левой кнопкой мыши по проводу) и в поле «Name» ввести название.

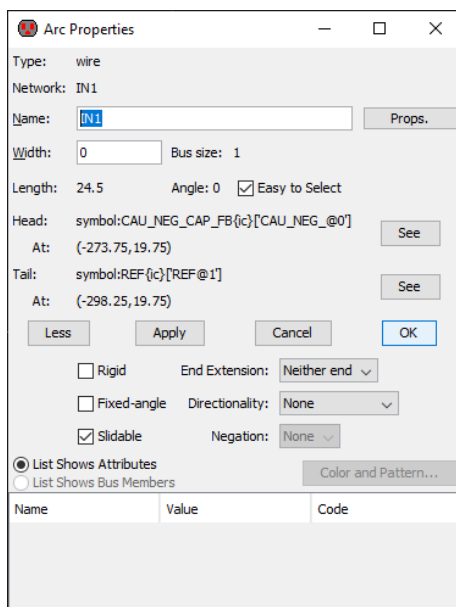


Рисунок 47. Обозначение выводов после построения схемы

- 4) Сохранить проект (*File* → *Save*);
- 5) Запустить моделирование:

Tools → *Simulation (Spice)* → *Simulate* (кнопка ► на панели инструментов).

После завершения процесса моделирования откроется окно *LTSpice IV*.

Для вывода результатов на экран выбрать пункт *Plot Settings* → *Add trace* и в появившемся окне указать нужные выводы (например, *INP*, *INM*, *OUT* и т.д.). Выбор проводника осуществляется при помощи поисковой строки «*Only list traces matching*», где вводятся названия выводов. Например, если необходимо посмотреть сигнал на выходе схемы, то в поисковой строке необходимо ввести *out* и нужный проводник будет обозначаться как «*v(out)*».

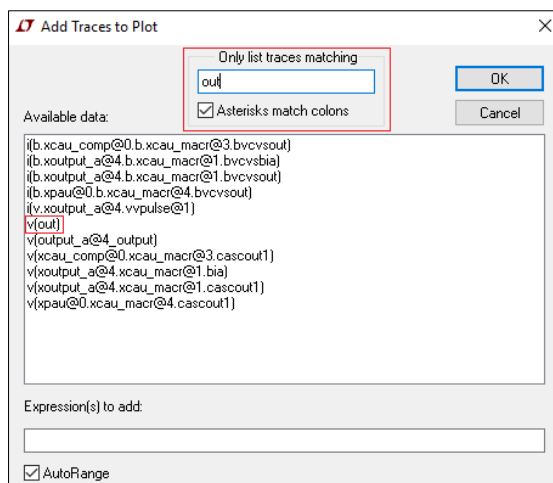


Рисунок 48. Окно вывода результатов моделирования

Для просмотра промежуточных точек (заранее не названных) необходимо зайти в свойства (клавиша «*q*» или двойное нажатие левой кнопкой мыши по проводу) и найти обозначение в поле «*Network*» (обратите внимание, параметр «*Network*» и «*Name*» могут различаться).

Вывод результатов проводится аналогично при помощи поисковой строки «*Only list traces matching*». В поисковой строке необходимо ввести *620* и нужный проводник будет обозначаться как *v(net@620)*.

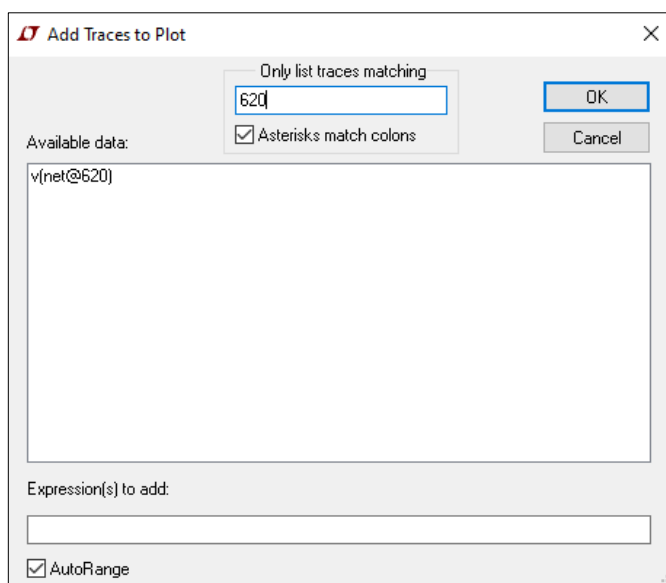


Рисунок 49. Вывод результатов моделирования при помощи поисковой строки

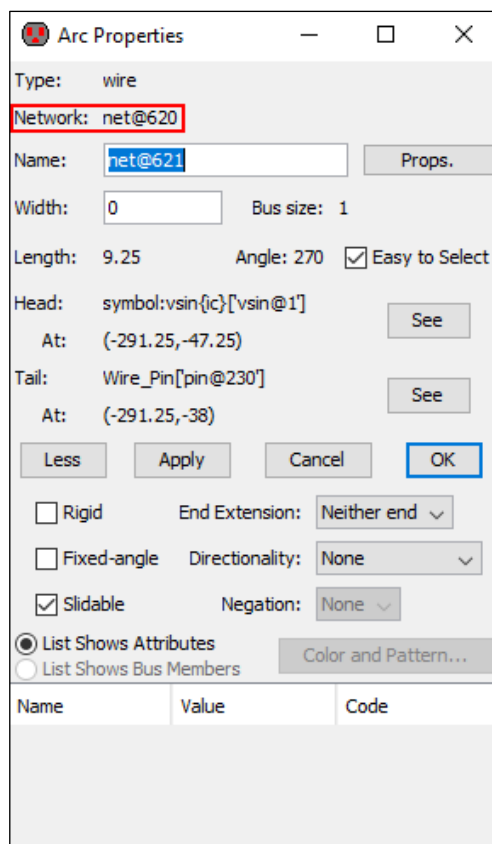


Рисунок 50. Свойство провода для вывода результатов моделирования

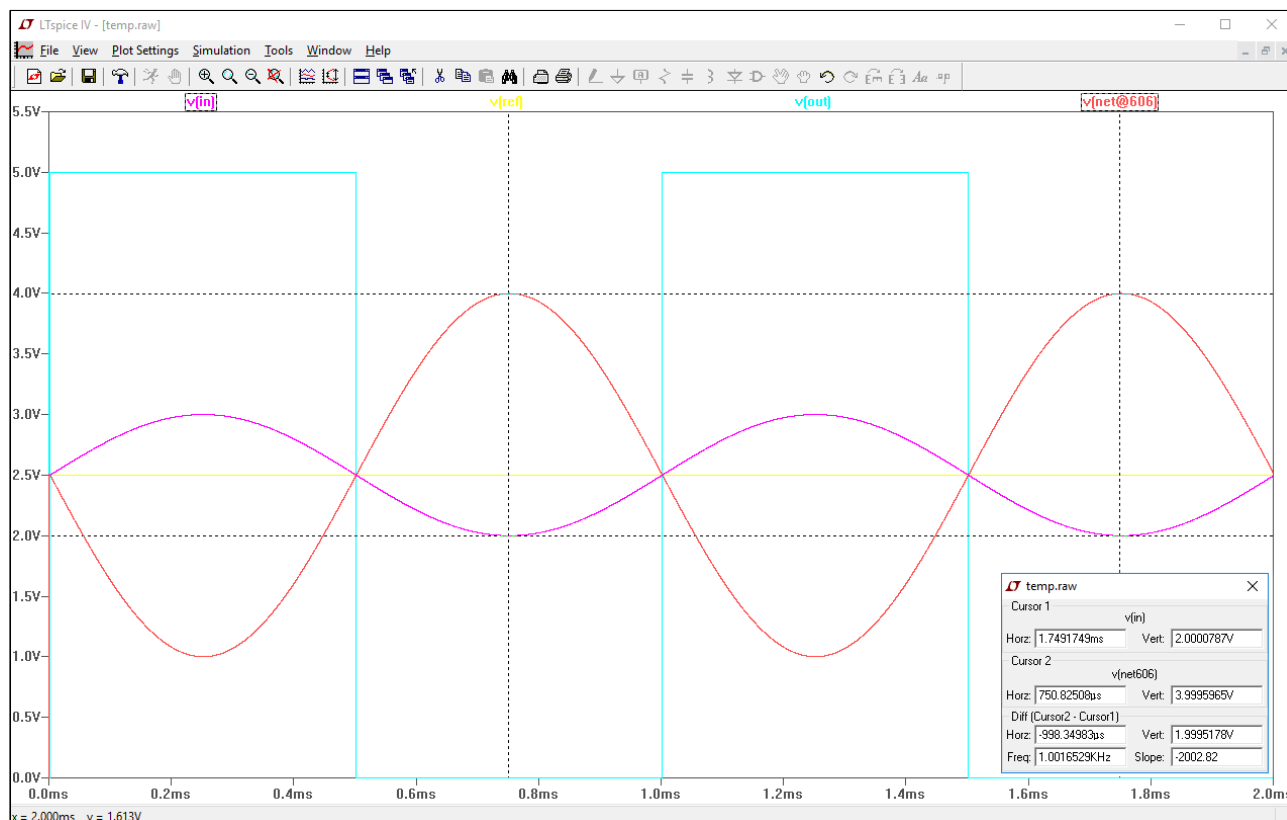


Рисунок 51. Результаты моделирования с использованием маркеров

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: *Plot Settings* → *Add Plot Pane*, также добавить координатную плоскость можно установленной горячей клавишей «}».

Вывод маркеров – нажать левой кнопкой мыши по названию проводника.

Удаление маркера – нажать клавишу «Delete» и левой кнопкой мыши выбрать название проводника.

Важно! На текущий момент в DCS_Electric существует 3 уровня моделирования:

- 1) Функциональное моделирование (схема в библиотеке *simulation* до автоматической трассировки) – данное моделирование не учитывает паразитные и коммутационные элементы.
- 2) Глубокое функциональное моделирование (схема в библиотеке *simulation* после автоматической трассировки) – данное моделирование учитывает паразитные сопротивления и емкости трассировки, а также коммутационных элементов. Данный уровень моделирования является оптимальным для отладки схемы.
- 3) Полное моделирование (схема *5400TP035_autotracing* после автоматической трассировки) – учитывает также паразитные составляющие неактивных коммутационных элементов. Обеспечивает наиболее качественное моделирование, однако может приводить к несходимости расчетов и затрачивает большие временные ресурсы.

Ручная трассировка и моделирование

- 1) Открыть проект (*File → Open*);
- 2) Выбрать схему 5400TP035 в библиотеке 5400TP035;
- 3) Продублировать схему (правой кнопкой мыши по схеме 5400TP035 → *Duplicate cell*). В открывшемся окне ввести название схемы и нажать *OK*. Название должно содержать только латинские буквы, цифры и знак «_» без пробелов. Дважды нажмите левой кнопкой мыши на созданную схему.

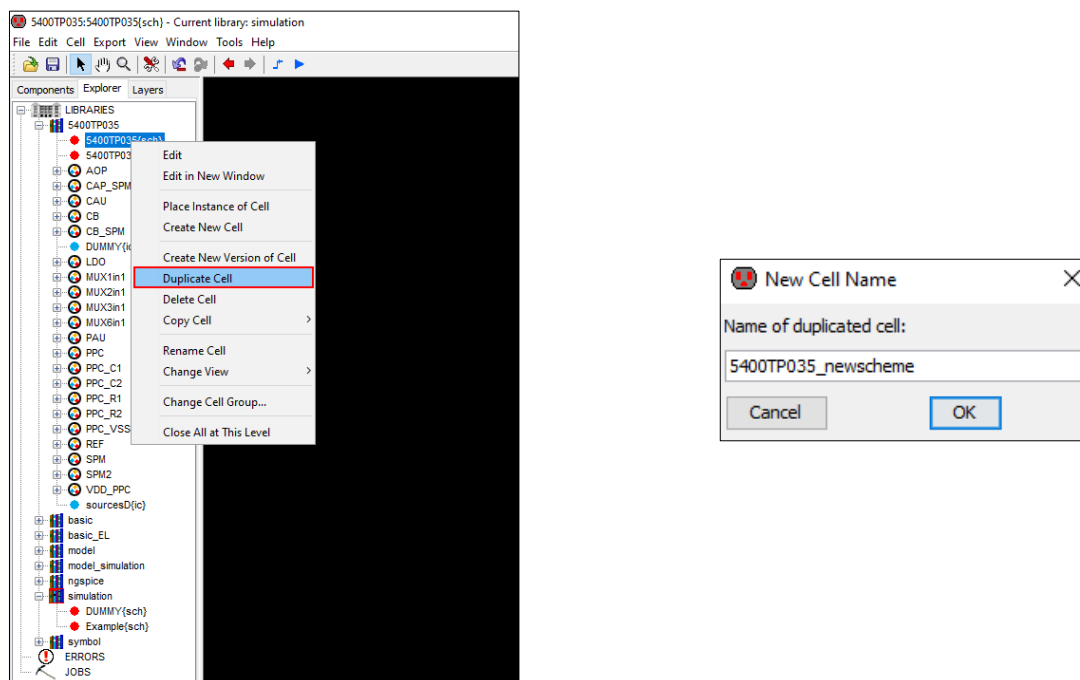


Рисунок 52. Окно дублирования схемы

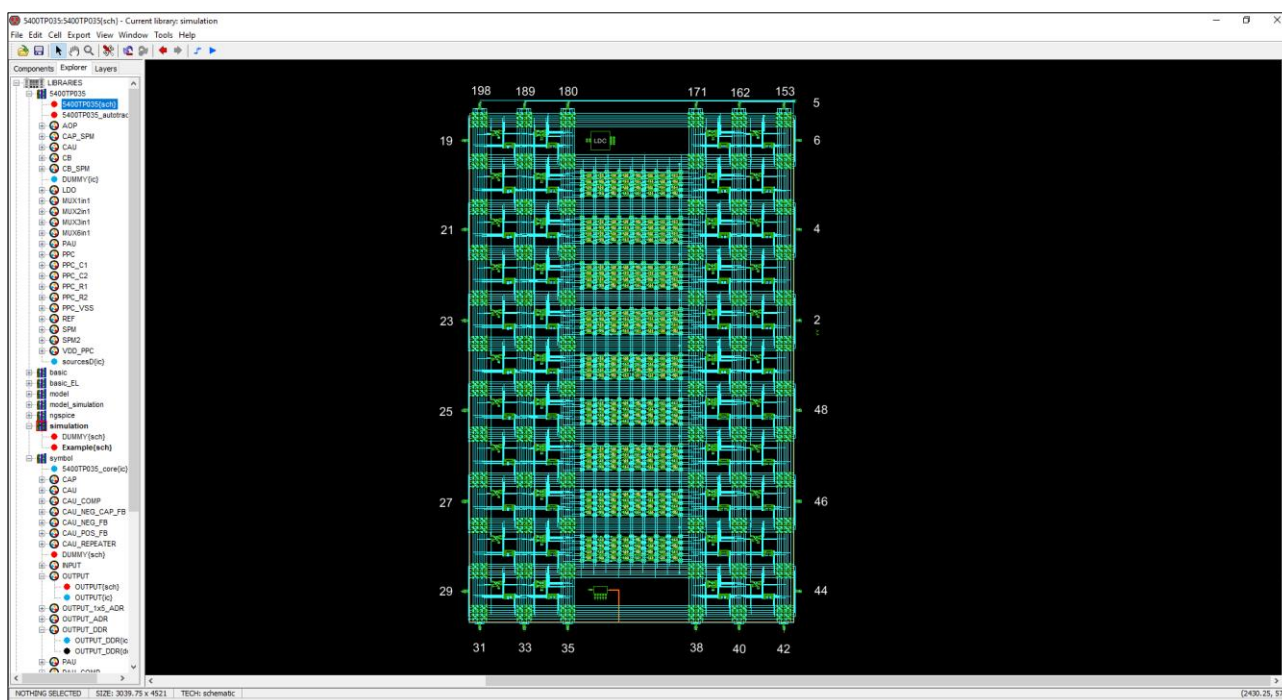


Рисунок 53. Полная схема для ручной трассировки

Основные блоки схемы

Прецизионный усилительный блок PAU

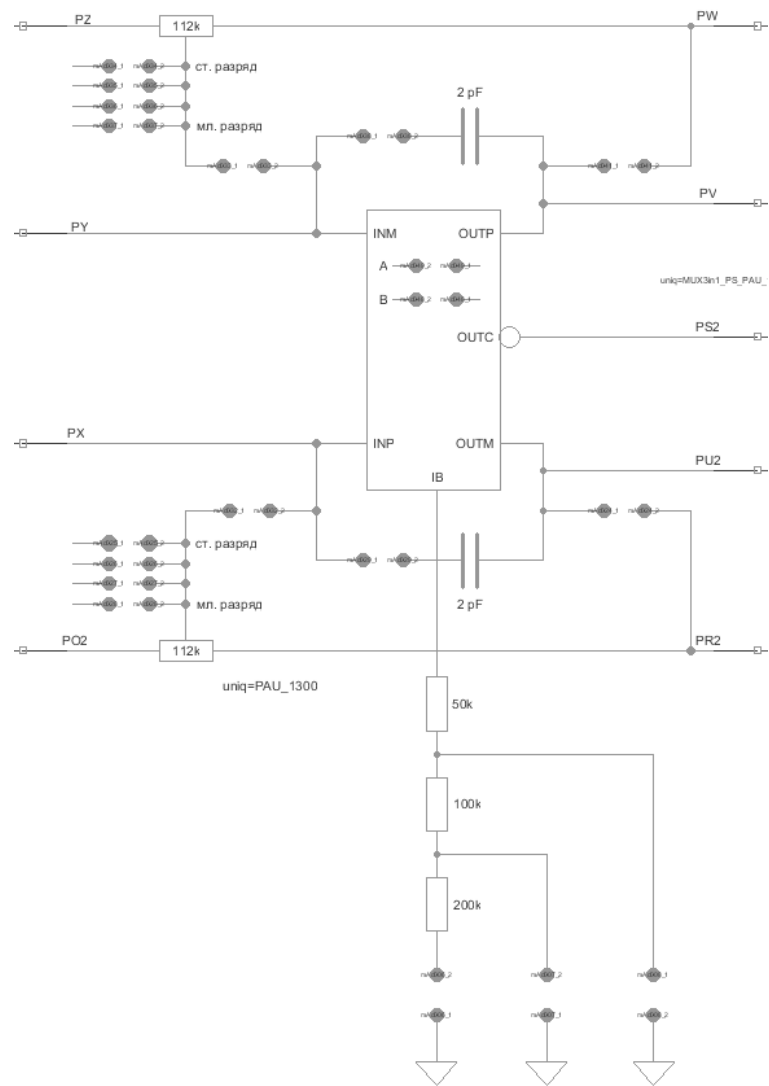


Рисунок 54. Общий вид прецизионного усилительного блока PAU

INP – неинвертирующий вход блока	OUTM – инвертирующий выход
INM – инвертирующий вход блока	OUTC – выход компаратора
OUTP – неинвертирующий выход	IB – вывод для подключения токозадающего резистора

Таблица 2. Выбор режима работы прецизионного усилительного блока
(«0» – ключ разомкнут, «1» – ключ замкнут)

А	В	Режим работы
0	0	Компаратор, выход OUTC
0	1	ОУ общего применения, выход OUTP
1	0	Полностью дифференциальный ОУ, выход OUTP и OUTM
1	1	Комбинация не допустима

В состав блока входят 2 программируемых цифровых потенциометра 112 кОм, каждый управляется с помощью 4 ключей. С помощью каждого потенциометра возможно реализовать 16 комбинаций соотношений X1:Y1 (X2:Y2).

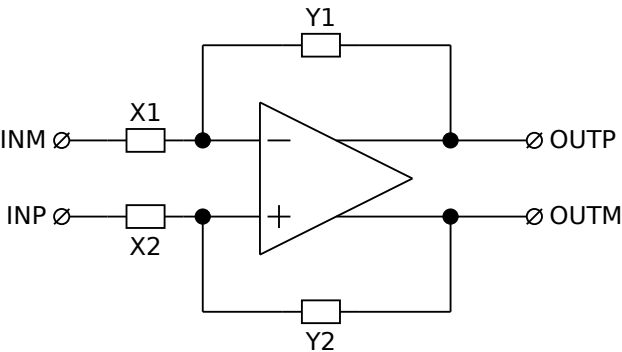


Рисунок 55. Эквивалентная схема потенциометров в прецизионном усилительном блоке

Таблица 3. Соответствие ключей потенциометра и соотношения резисторов
(«0» – ключ разомкнут, «1» – ключ замкнут)

Ключ 4 (ст. разряд)	Ключ 3	Ключ 2	Ключ 1 (мл. разряд)	Соотношение X1:Y1 (X2:Y2)
0	0	0	1	1:15
0	0	1	0	1:7
0	0	1	1	3:13
0	1	0	0	1:3
0	1	0	1	5:11
0	1	1	0	6:10
0	1	1	1	7:9
1	0	0	0	1:1
1	0	0	1	9:7
1	0	1	0	10:6
1	0	1	1	11:5
1	1	0	0	3:1
1	1	0	1	13:3
1	1	1	0	7:1
1	1	1	1	15:1

Средняя точка полностью дифференциального ОУ формируется автоматически и равна середине питания (VDDINT – VSSA)/2.

Динамика и ток потребления ячейки программируются с помощью токозадающих резисторов на выводе IB (50 кОм, 100 кОм, 200 кОм). Для включения блока необходимо установить значение сопротивления 350 кОм. При необходимости увеличения быстродействия, установить значение сопротивления 150 кОм совместно с 350 кОм. При использовании блока в качестве компаратора использовать сопротивление 50 кОм совместно с 350 кОм.

Для обеспечения большей устойчивости схем с длинными обратными связями в блок добавлены шунтирующие емкости номиналом 2 пФ.

На ячейку можно подать импульсы чоппер стабилизации. Для этого на вывод 20 подается меандр от VSSA до VDDINT с частотой от 100 кГц до 300 кГц. При использовании чоппер стабилизации напряжение смещения блока уменьшается до уровня не более 100 мкВ.

Усилительный блок CAU

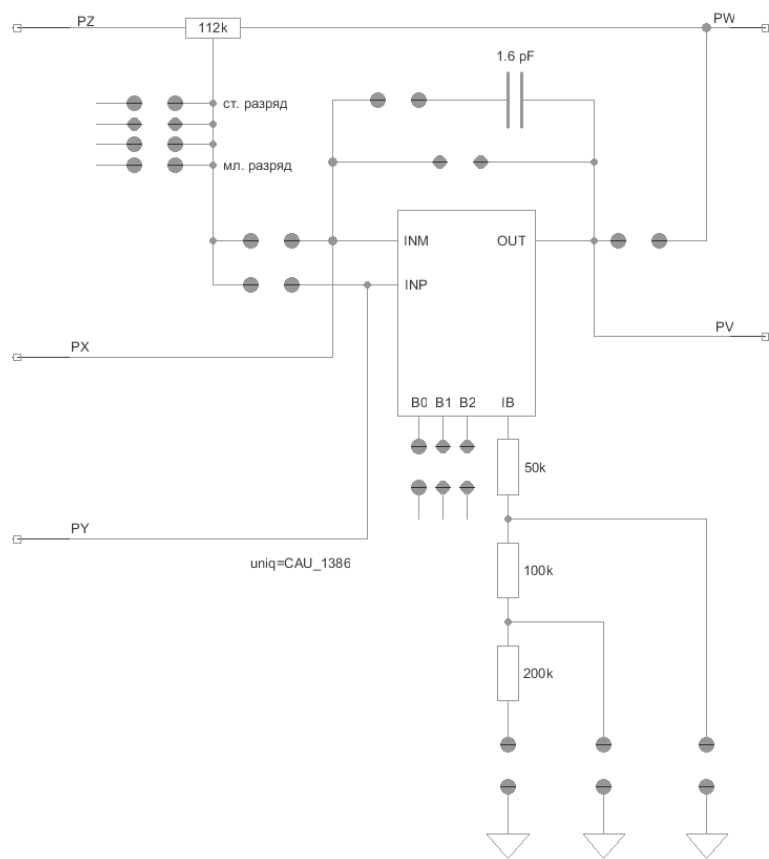


Рисунок 56. Общий вид усилительного блока CAU

INP – неинвертирующий вход блока	IB – вывод для подключения токозадающего резистора
INM – инвертирующий вход блока	B0, B1, B2 – выходы для управления частотной коррекцией
OUT – выход блока	

Таблица 4. Настройка частотной коррекции усилительного блока CAU
(«0» – ключ разомкнут, «1» – ключ замкнут)

B2	B1	B0	C, пФ
0	0	0	0
0	0	1	2
0	1	0	4
0	1	1	6
1	0	0	8
1	0	1	10
1	1	0	12
1	1	1	14

В состав блока входит программируемый цифровой потенциометр 112 кОм, управляется с помощью 4-х ключей.

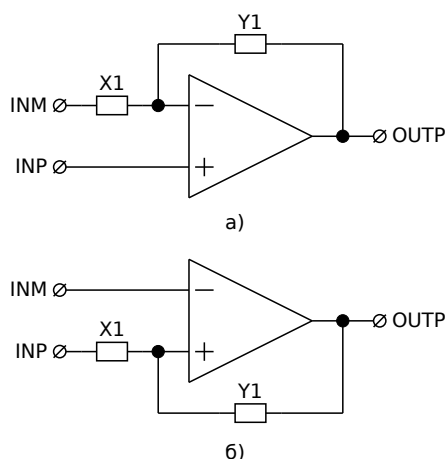


Рисунок 57. Эквивалентная схема потенциометров в усилительном блоке:

а) отрицательная обратная связь; б) положительная обратная связь

С помощью потенциометра возможно реализовать 16 комбинаций соотношений $X1:Y1$. Методика установки необходимого соотношения резисторов в потенциометре аналогична с прецизионным усилительным блоком.

Динамика и ток потребления ячейки программируются с помощью токозадающих резисторов на выводе IB (50 кОм, 100 кОм, 200 кОм). Для включения блока необходимо установить значение сопротивления 350 кОм. При необходимости увеличения быстродействия, установить значение сопротивления 150 кОм совместно с 350 кОм. При использовании блока в качестве компаратора использовать сопротивление 50 кОм совместно с 350 кОм.

Для обеспечения большей устойчивости схем с длинными обратными связями в блок добавлена шунтирующая емкость номиналом 1,6 пФ.

Программируемый блок пассивных компонентов PPC

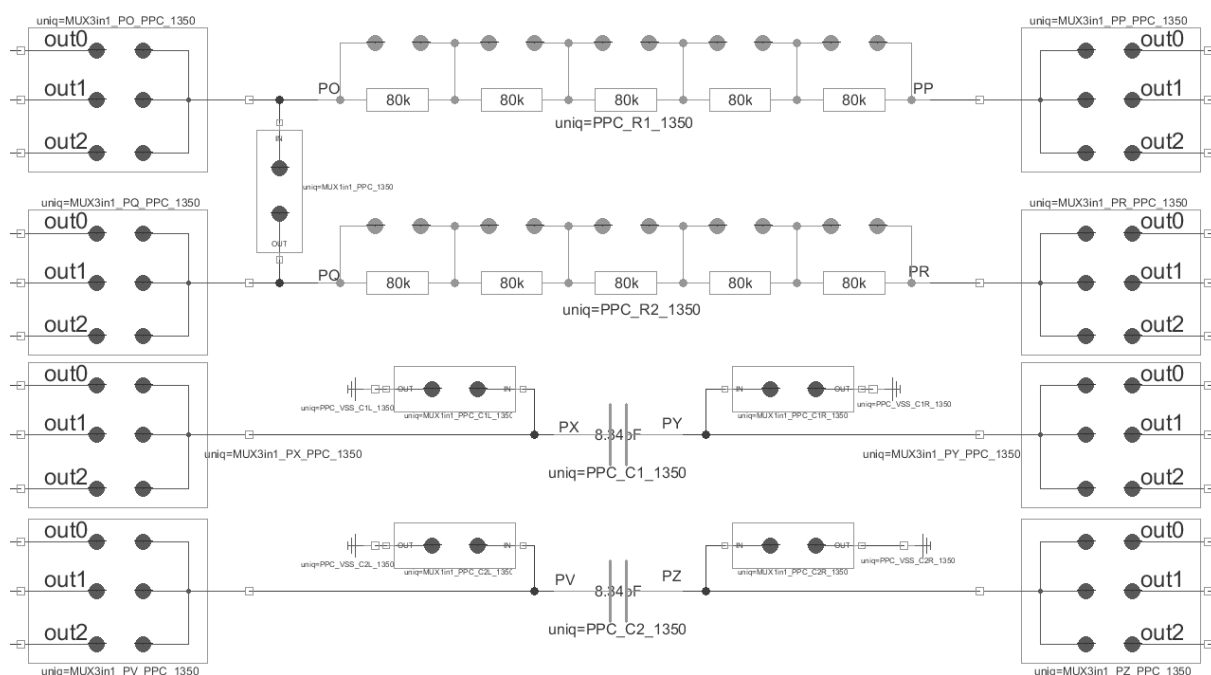


Рисунок 58. Общий вид программируемого блока пассивных компонентов

Блок состоит из 2-х программируемых резисторов (максимальное сопротивление 400 кОм, шаг настройки 80 кОм), 2 конденсаторов (8,34 пФ), 4-х выводов «земли» и набора коммутационных ключей. Блок не имеет самостоятельных встроенных функций и предназначен для работы в составе более сложных блоков вместе с усилительными блоками.

Допускаемое отклонение номинала между блоками в пределах одной микросхемы – 1%.

Блок ввода/вывода PADDR

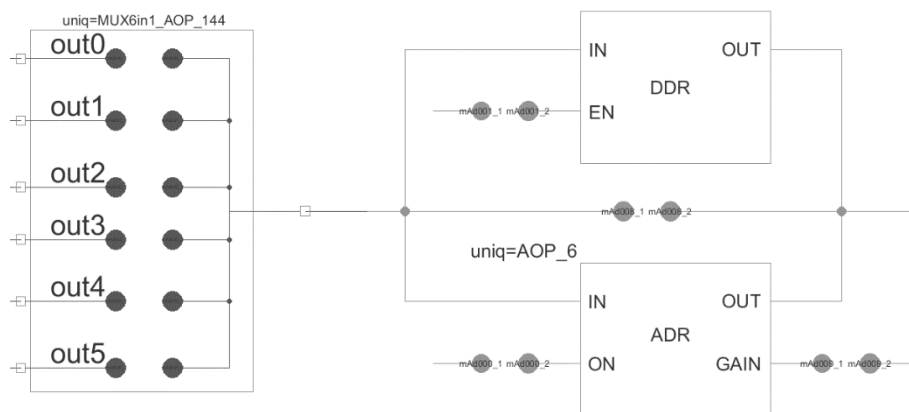


Рисунок 59. Общий вид блока ввода/вывода

Для связи ядра с контактными площадками по периферии кристалла расположены 24 блока ввода/вывода PADDR.

Выходные сигналы могут быть выведены на площадки как напрямую, так и через аналоговый (ADR) или цифровой (DDR) буфер.

Аналоговый буфер построен на основе операционного усилителя с нагрузочной способностью до 30 мА. Включается аналоговый буфер замыканием ключа «ON». Блок ADR может быть сконфигурирован как повторитель и как усилитель в 1,5 раза. Усилитель необходим для увеличения выходного напряжения до 5,0 В при использовании внутреннего напряжения 3,3 В. Включается усилитель замыканием ключей «ON» и «GAIN».

Цифровой буфер используется для вывода сигналов с выходов компараторов. Включается цифровой буфер замыканием ключа «EN».

Для ввода сигнала используется ключ, который напрямую соединяет площадку с внутренними цепями.

Блок свободной конфигурации SPM

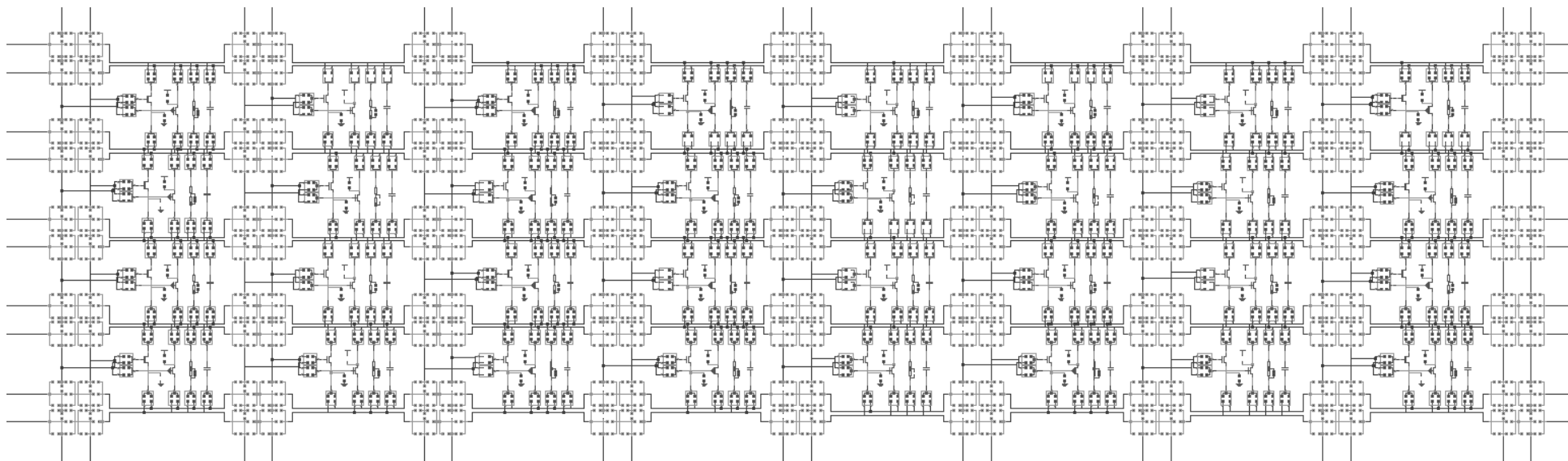
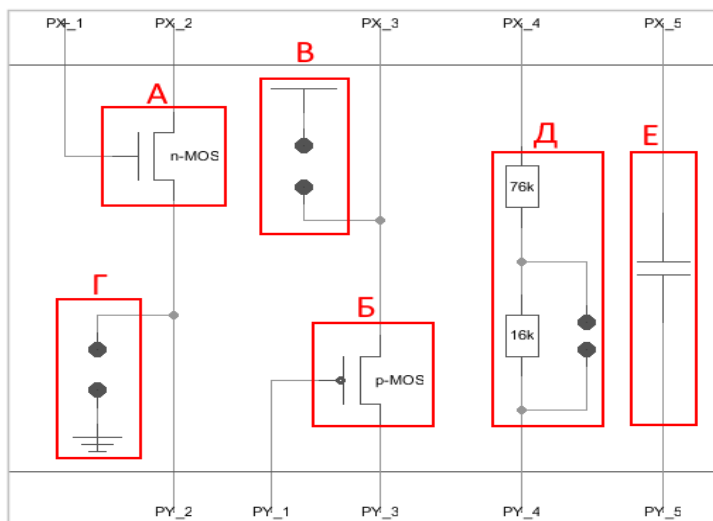


Рисунок 60. Общий вид блока свободной конфигурации

Блок свободной конфигурации представляет собой набор из n- и p-канальных МОП-транзисторов, резисторов и конденсаторов. Блок имеет матричную структуру и состоит из 32 ячеек. Структура повторяющейся ячейки приведена на рисунке.



А – n-канальный МОП-транзистор;
 Б – p-канальный МОП-транзистор;
 В – вывод подключения к VDDA;
 Г – вывод подключения к VSSA;
 Д – резисторы 16 кОм и 76 кОм;
 Е – конденсатор 1 пФ.

Рисунок 61. Структура повторяющейся ячейки блока свободной конфигурации

Коммутационный блок СВ

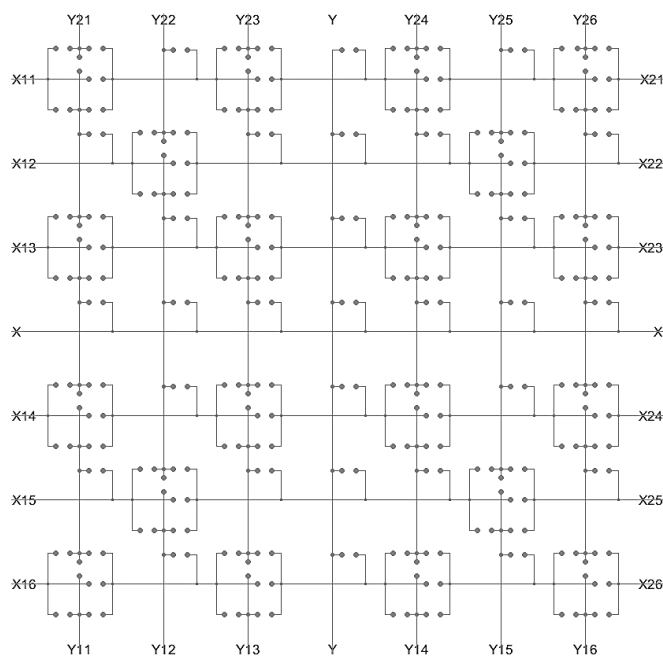


Рисунок 62. Общий вид коммутационного блока

Коммутационный блок СВ осуществляет коммутацию блоков для построения произвольной электрической схемы устройства.

Коммутационные связи на уровне микросхемы имеют 3 составляющие:

- глобальные (шины X, Y);
- среднемагистральные (шины X12 – X22, X15 – X25, Y12 – Y22, Y15 – Y25);
- локальные (шины X11 – X21, X13 – X23, X14 – X24, X16 – X26, Y11 – Y21, Y13 – Y23, Y14 – Y24, Y16 – Y26).

Каждая шина связей по X и Y имеет 1 глобальную, 2 среднемагистральных и 4 локальных. Коммутационный блок стоит на пересечениях X и Y шин и осуществляет коммутацию семи X шин и семи Y шин.

Сопротивление разомкнутого ключа >1 ГОм;

Сопротивление замкнутого ключа – 700 Ом (при напряжении питания 5,0 В); 1200 Ом (при напряжении питания 3,3 В).

Линейный регулятор напряжения LDO

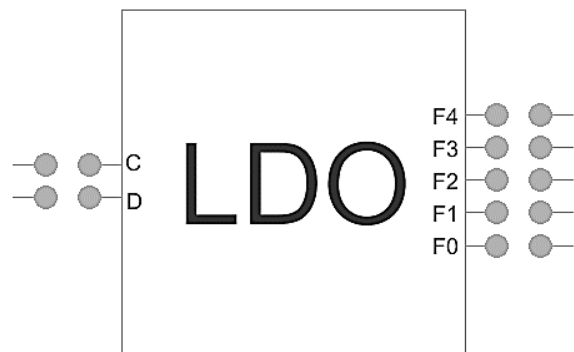


Рисунок 63. Общий вид линейного регулятора напряжения

Для формирования внутреннего напряжения питания ядра (VDDINT) используется линейный регулятор напряжения LDO. Выходное напряжение настраивается с помощью ключей C и D.

Таблица 5. Выбор выходного напряжения LDO («0» – ключ разомкнут, «1» – ключ замкнут)

C	D	Выходное напряжение VDDINT, В
0	0	5,0
1	1	3,3

Выходное напряжение можно проконтролировать на выводе VDDINT (13, 26, 47) микросхемы. Микросхема поставляется с ненастроенным напряжением (без настройки выходное напряжение ниже заявленного). Подстройка выполняется один раз при НУ путем программирования. Шаг настройки 40 мВ.

Таблица 6. Соответствие ключей LDO и напряжения настройки («0» – ключ разомкнут, «1» – ключ замкнут)

F4 (ст. разряд)	F3	F2	F1	F0 (мл. разряд)	Напряжение настройки, мВ
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	40
0	0	0	1	0	80
0	0	0	1	1	120
0	0	1	0	0	160
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1	1	1	0	0	1160
1	1	1	0	1	1200
1	1	1	1	0	1240
1	1	1	1	1	1280

Важно! Тонкая настройка LDO не влияет на моделирование и необходима при программировании микросхемы.

Источник опорного напряжения

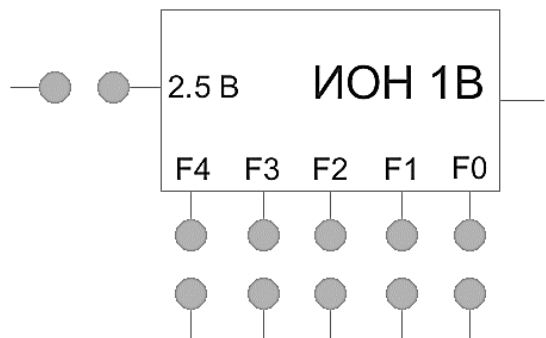


Рисунок 64. Общий вид источника опорного напряжения

В состав микросхемы входит источник опорного напряжения. Выходное напряжение (1,0 В) можно проконтролировать на выводе MUXIO (5) при выбранном канале i0. С помощью программирования возможно усиление выходного напряжения в 2,5 раза.

Микросхема поставляется с ненастроенным напряжением (без настройки выходное напряжение выше заявленного). Подстройка выполняется один раз при НУ путем программирования. Шаг настройки 5 мВ.

Таблица 7. Соответствие ключей ИОНа и напряжения настройки
(«0» – ключ разомкнут, «1» – ключ замкнут)

F4 (ст. разряд)	F3	F2	F1	F0 (мл. разряд)	Напряжение настройки, мВ
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	5
0	0	0	1	0	10
0	0	0	1	1	15
0	0	1	0	0	20
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1	1	1	0	0	145
1	1	1	0	1	150
1	1	1	1	0	155
1	1	1	1	1	160

Важно! Тонкая настройка источника опорного напряжения не влияет на моделирование и необходима при программировании микросхемы.

Примеры коммутации без использования автоматической трассировки.

Для коммутации следует нажать на один из контактов ключа левой кнопкой мыши, а затем на соседний контакт ключа правой кнопкой мыши.

Важно! Для одновременного удаления ключей из отдельного элемента или всей схемы существует скрипт *Delete keys*. Для его использования необходимо выделить либо отдельный элемент левой кнопкой мыши, либо всю схему для удаления всех замкнутых ключей (*Ctrl+A*), затем выполнить команду *Tools -> Service methods -> Delete keys*. Для удаления одного ключа необходимо зажать клавишу *Ctrl* и нажать левой кнопкой мыши на ключ, который необходимо удалить. После того как ключ будет выделен белым цветом нажать клавишу *Backspace* или *Delete*. Для выделения нескольких ключей необходимо использовать комбинацию *Ctrl+Shift+ЛКМ*.

Примеры коммутации и реализации отдельных блоков (трассировка подсвечена для наглядности):

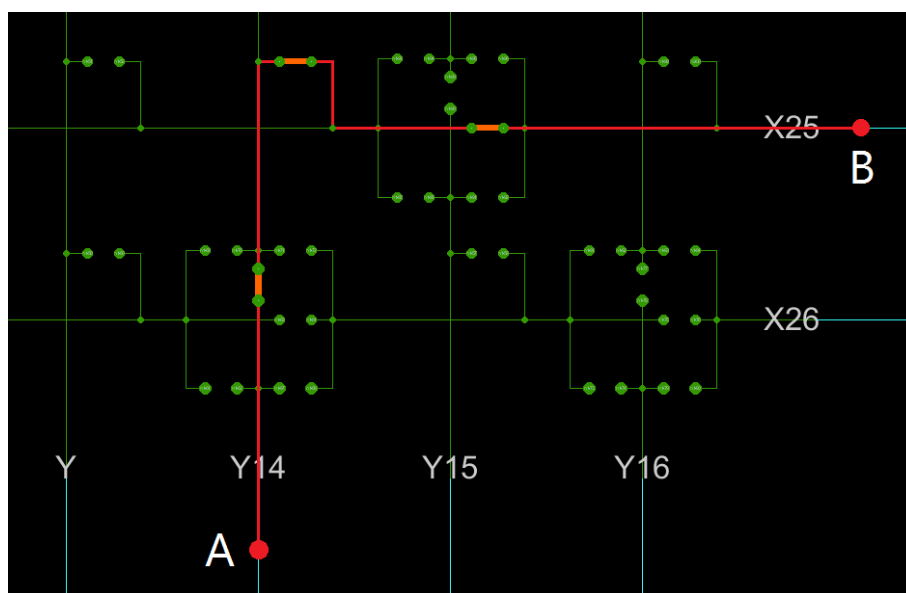


Рисунок 65. Соединение точки А с точкой В в блоке коммутации

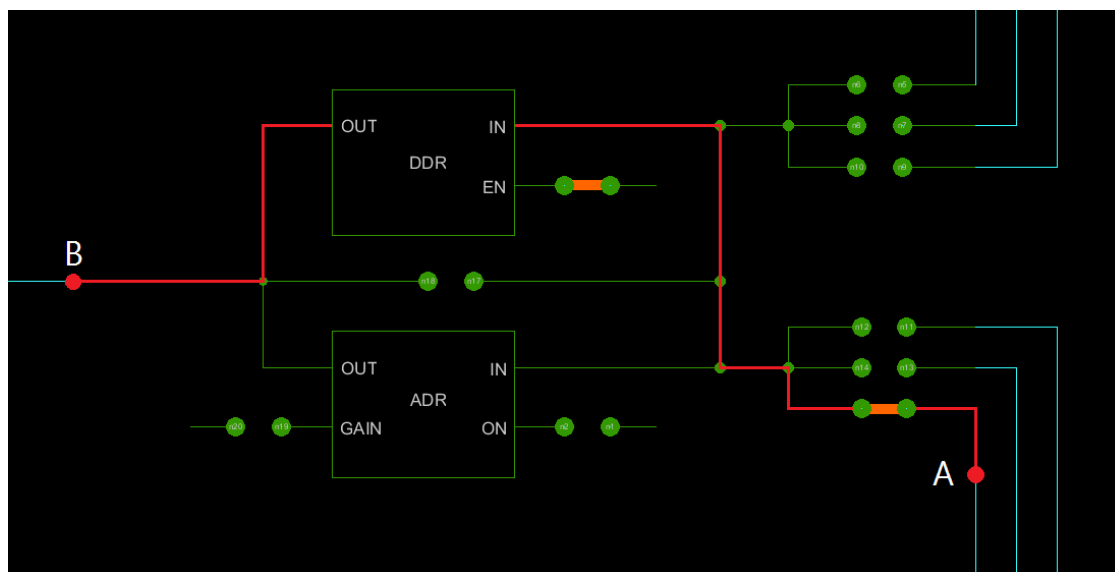


Рисунок 66. Соединение точки А с точкой В через цифровой буфер

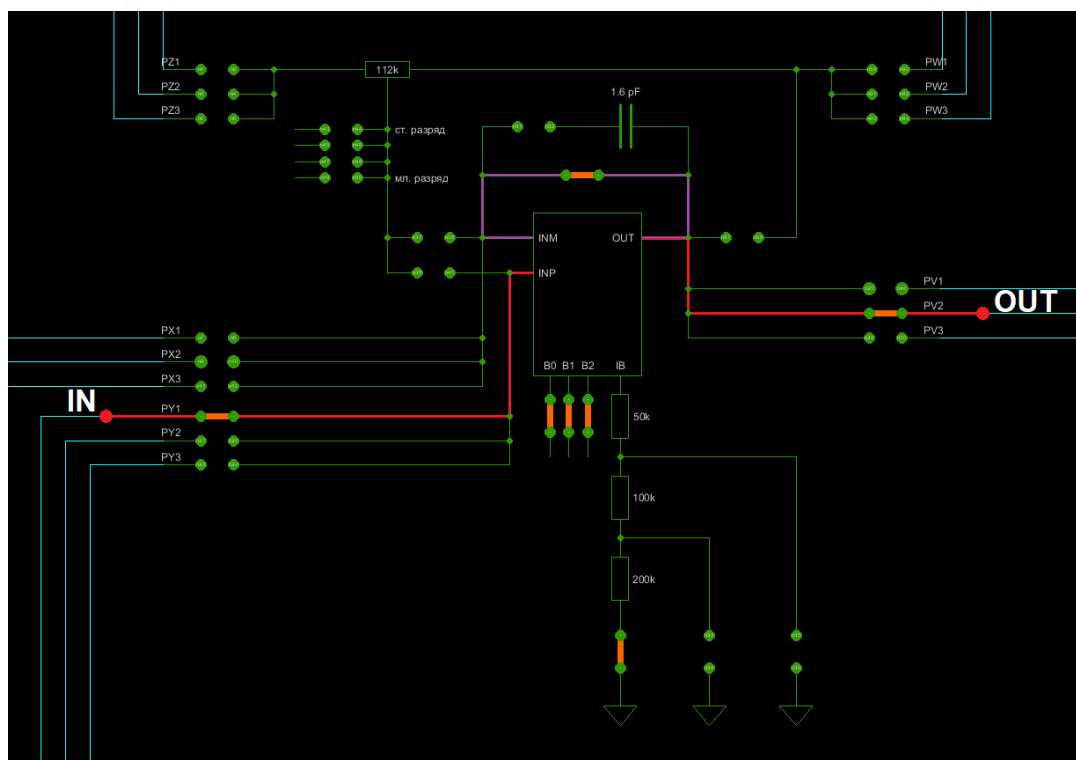


Рисунок 67. Реализация повторителя на блоке CAU

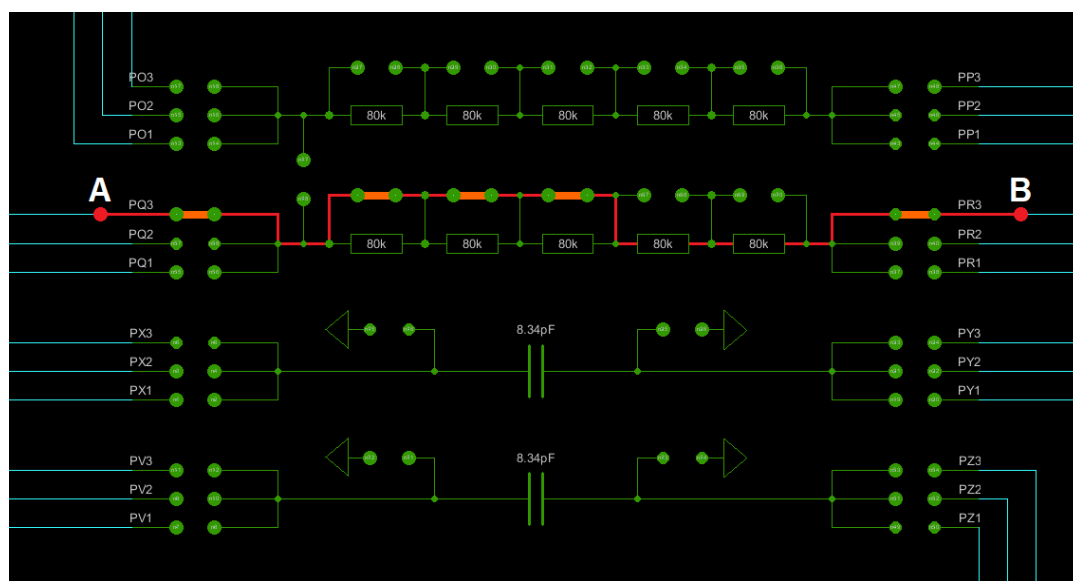


Рисунок 68. Соединение точки А с точкой В через резистор сопротивлением 160 кОм

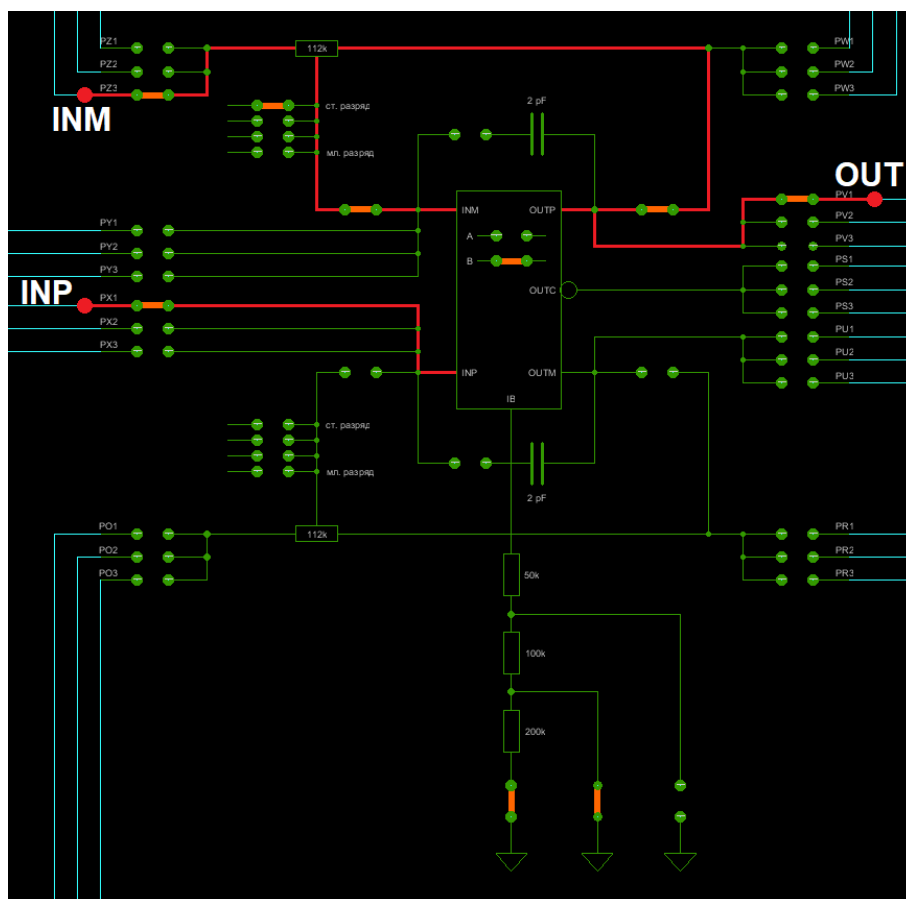


Рисунок 69. Реализация усилителя с соотношением резисторов 1:1 на блоке PAU

4) После построения схемы с помощью источников напряжения можно 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;

5) Задать параметры моделирования с помощью блока *5400TP035_core* из библиотеки *ngspice*;

6) Сохранить проект *File* → *Save*;

7) Выполнить команду: *Tools* → *DCS PAIS* → *Export Analog Keys* для формирования конфигурационной последовательности. Файл *config.txt*;

8) Выполнить команду *Tools* → *Simulation (Spice)* → *Simulate* (кнопка ► на панели инструментов) для запуска моделирования.

После завершения процесса моделирования откроется окно LTSpice IV.

Для вывода результатов на экран выбрать пункт *Plot Settings* → *Add trace* и в появившемся окне указать нужные выходы. Выбор проводника осуществляется при помощи поисковой строки «*Only list traces matching*», где вводятся названия выводов. Для просмотра названий выводов необходимо зайти в свойства (клавиша «q» или двойное нажатие левой кнопкой мыши по проводу) и найти обозначение в поле «*Network*» (обратите внимание, параметр «*Network*» и «*Name*» могут различаться).

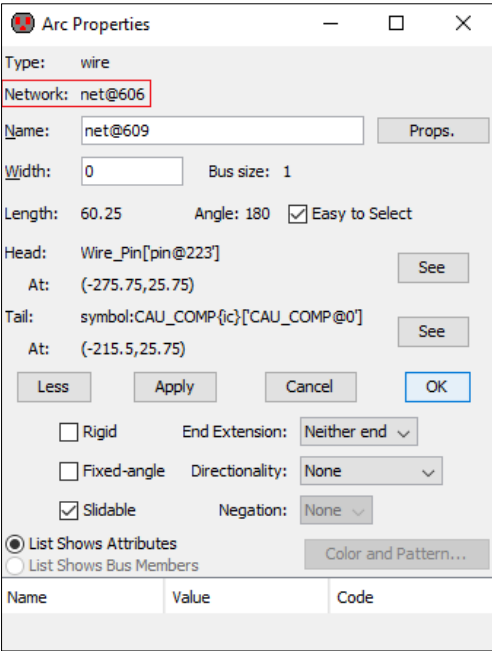


Рисунок 70. Свойства провода для вывода результатов моделирования

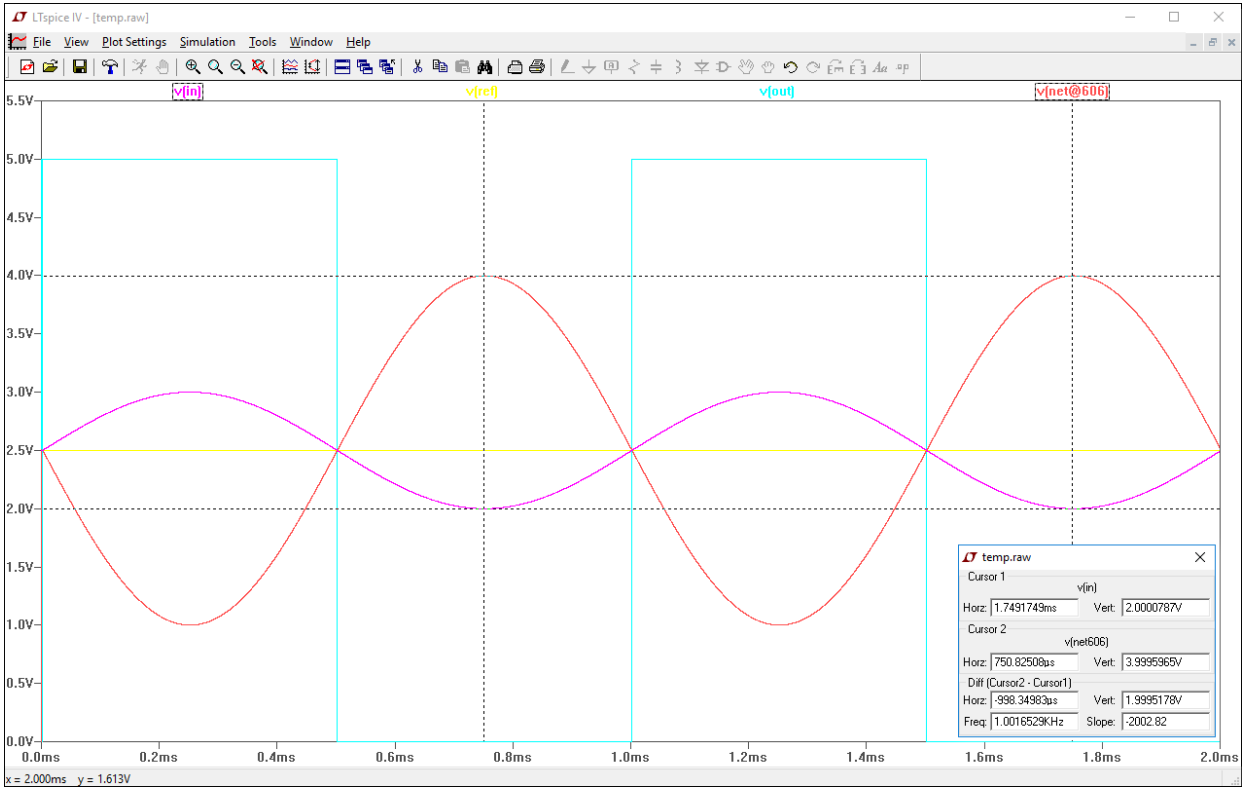


Рисунок 71. Результаты моделирования с использованием маркеров

Построение прецизионных схем

При использовании микросхемы 5400TP035 необходимо учитывать, что сопротивление каждого замкнутого ключа 700 Ом (при напряжении питания 5,0 В) и 1200 Ом (при напряжении питания 3,3 В).

Для уменьшения влияния сопротивления ключей на точность характеристик необходимо использовать четырехточечный метод построения схем. Суть метода состоит в том, чтобы разделить пути протекания тока и пути распространения напряжения сигнала. Рассмотрим пример реализации повторителя, в котором обратная связь замыкается сразу на выходе операционного усилителя.

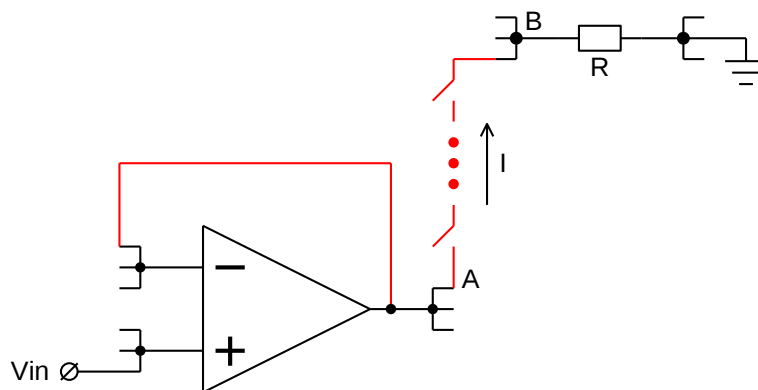


Рисунок 72. Реализация повторителя (вариант 1)

В этом случае из-за тока, протекающего между выходом повторителя и нагрузкой R, произойдет падение напряжения на коммутационных ключах. Поэтому напряжение в точке В будет равно:

$$V_B = V_{in} - I * (n * R_k)$$

где n – количество ключей между точками А и В, R_k – сопротивление ключа.

Осциллограмма данной реализации представлена на рисунке 73, где сигнал 1 – входной сигнал, а сигнал 2 – выходной сигнал (точка В). Видно, что выходной сигнал искажен по сравнению с входным сигналом из-за протекания тока через коммутационные ячейки.

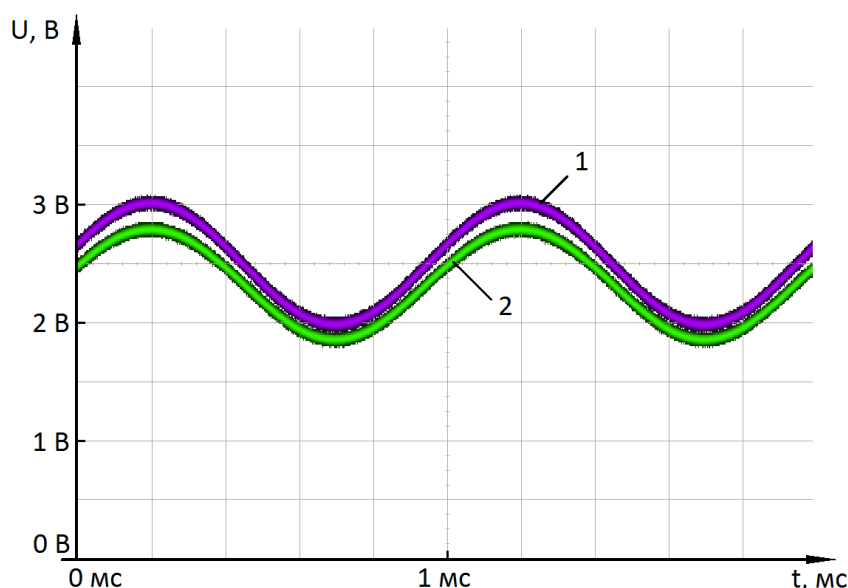


Рисунок 73. Экспериментальный результат реализации повторителя (вариант 1)

Для того, чтобы передать напряжение на выходе повторителя без потерь, необходимо использовать схему, показанную на рисунке 74. Инвертирующий вход и выход ОУ соединяются в точке В, у входа следующего блока.

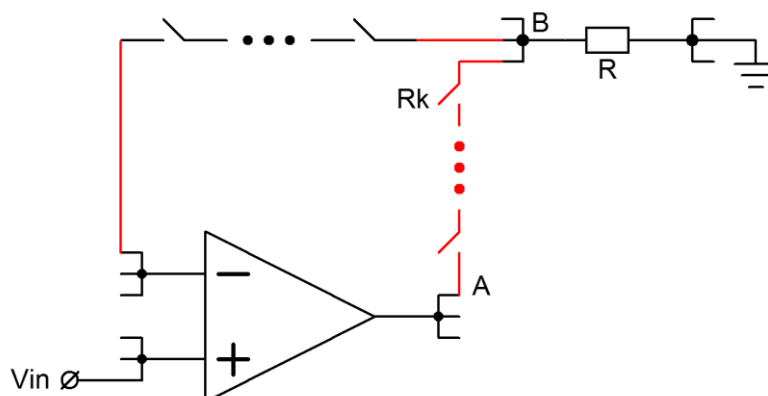


Рисунок 74. Реализация повторителя (вариант 2)

В таком случае падение напряжения на отрезке АВ компенсируется отрицательной обратной связью и искажения сигнала не происходит. Осциллограмма представлена ниже. Выходной сигнал совпадает с входным сигналом.

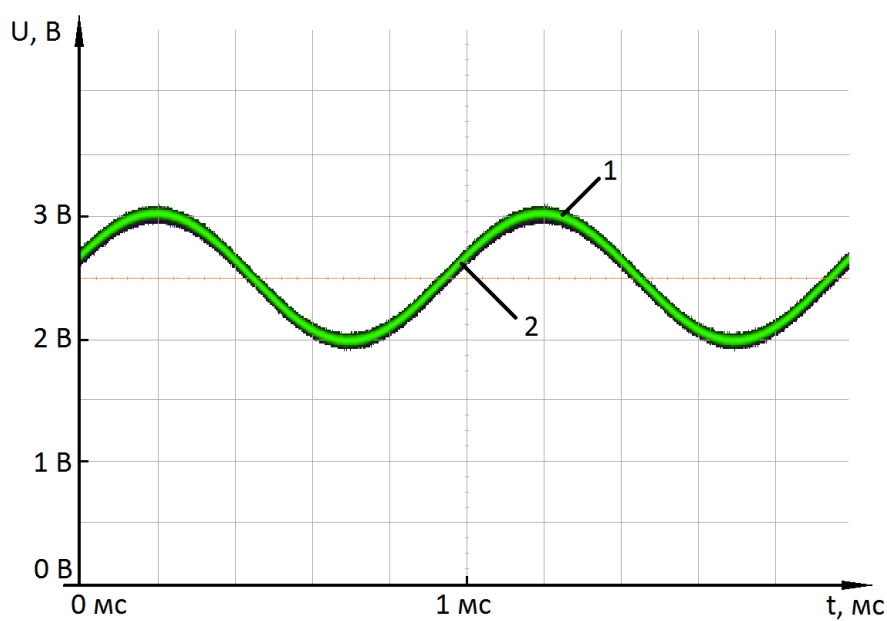


Рисунок 75. Экспериментальный результат реализации повторителя (вариант 2)

Следующий метод улучшения характеристик – шунтирование элементов. В качестве примера предлагается реализация неинвертирующего усилителя с коэффициентом усиления 2. Для установки коэффициента усиления используется цифровой потенциометр (R1, R2). В первом варианте исполнения резистор в обратной связи соединяется с выходом ОУ через некоторое количество коммутационных ключей. Выходной сигнал снимается в точке D.

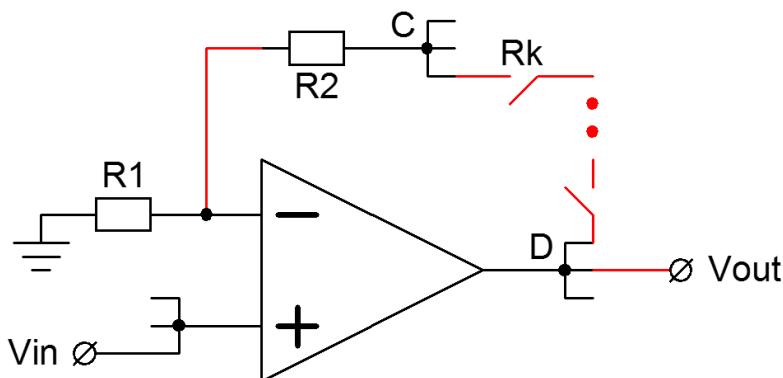


Рисунок 76. Реализация неинвертирующего усилителя (вариант 1)

В этом случае сопротивление резистора в обратной связи суммируется с сопротивлением ключей. Коэффициент усиления будет равен:

$$K_y = 1 + \frac{R_2 + n * R_k}{R_1}$$

где n – количество ключей между точками C и D, Rk – сопротивление ключа.

При достаточно длинном пути между инвертирующим входом и выходом возникает генерация, т.к. из-за сопротивления ключей и паразитных емкостей, путь представляет собой цепочку RC-элементов, осуществляющих фазовый сдвиг.

Осциллограмма данной реализации представлена на рисунке 77, где сигнал 1 – входной сигнал, а сигнал 2 – выходной сигнал. При этом на выходном сигнале наблюдается генерация.

Также из-за неправильно собранной цепи обратной связи, без учета предыдущих рекомендаций, коэффициент усиления выше, чем расчетный.

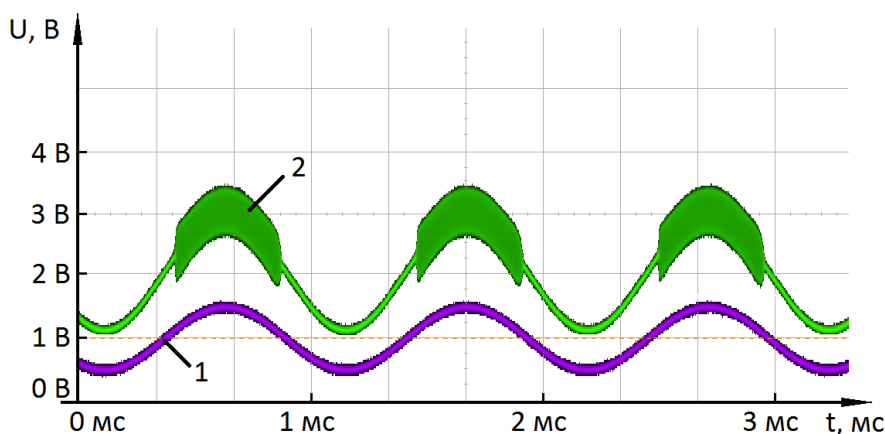


Рисунок 77. Экспериментальный результат реализации неинвертирующего усилителя (вариант 1)

Для исключения влияния коммутационных ключей выходное напряжение нужно снимать с выхода резистивного делителя (точка E), а не с выхода ОУ. В этом случае исключается влияние коммутационных ключей на выходной сигнал.

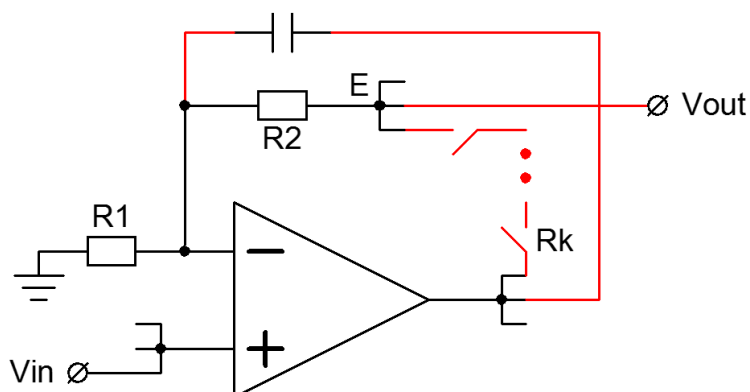


Рисунок 78. Реализация неинвертирующего усилителя (вариант 2)

Если фазовый сдвиг приводит к генерации, обратную связь необходимо шунтировать конденсатором, как показано на рисунке 78. Осциллограмма представлена ниже.

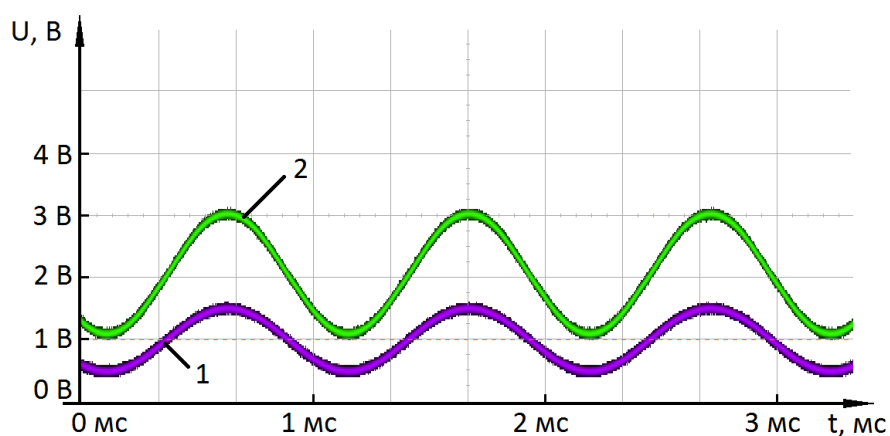


Рисунок 79. Экспериментальный результат реализации неинвертирующего усилителя (вариант 2)

Импорт схемы из конфигурационной последовательности

Для импорта конфигурационной последовательности необходимо открыть схему, в которую будет импортирована последовательность, и выполнить команду: *Tools* → *Service methods* → *Import Keys*.

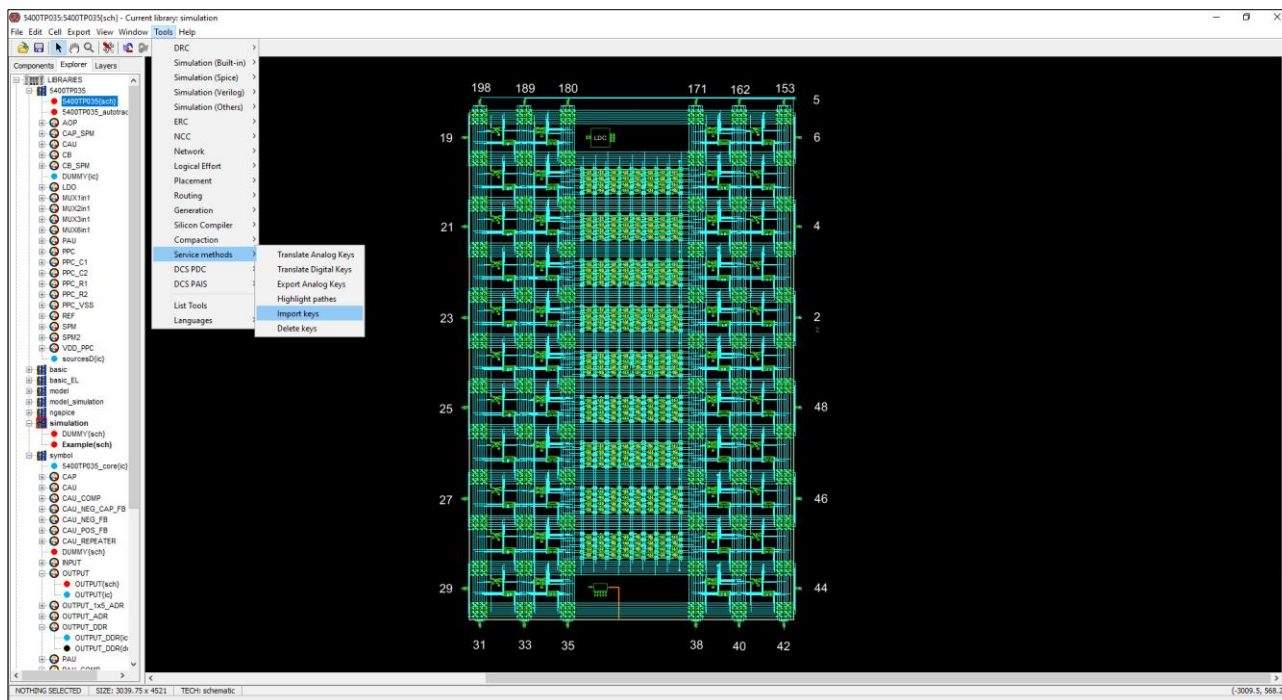


Рисунок 80. Запуск скрипта импорта конфигурационной последовательности

В открывшемся окне выбрать файл с конфигурационной последовательностью. По завершении работы скрипта все ключи из файла проставятся автоматически в текущую выбранную схему.

Совместимость проектов

Прямой перенос проектов из версии CYGELENG v4.0 невозможен.

Существует 3 основных способа переноса проектов:

1) Перенос библиотеки *simulation.jelib* из проекта версии CYGELENG v4.0 в проект DCS_Electric. Размеры элементов были значительно изменены, поэтому такая замена приведет к небольшим изменениям в схеме и возможному разрыву некоторых связей. При первом открывании схемы всплывет уведомление о большом количестве ошибок, его можно игнорировать. Далее следует восстановить разорванные связи и привести схему к читаемому виду, после этого перенос проекта можно считать завершенным.

Важно! Данный способ переноса не работает в случае использования в проекте блоков SPM.

2) Восстановление схемы из конфигурационной последовательности позволяет получить из файла с конфигурационной последовательности функциональную схему, использующую библиотечные элементы из библиотеки *symbol*. После восстановления требуется привести схему к читаемому виду. На этом перенос проекта можно считать завершенным.

3) Перенос ручной трассировки можно осуществить при помощи скрипта импорта, конфигурационные последовательности являются совместимыми.

Оптимизация проекта для моделирования

Оптимизация проекта удаляет неиспользуемые блоки в схеме и значительно ускоряет процесс моделирования полной схемы.

Запуск скрипта оптимизации выполняется командой: *Tools → DCS PAIS → Delete Unused Part*.

В диалоговом окне выбрать файл с конфигурационной последовательностью в данной схеме (если файла нет, то следует предварительно его создать с помощью скрипта *Export Analog Keys*).

Результат работы скрипта:

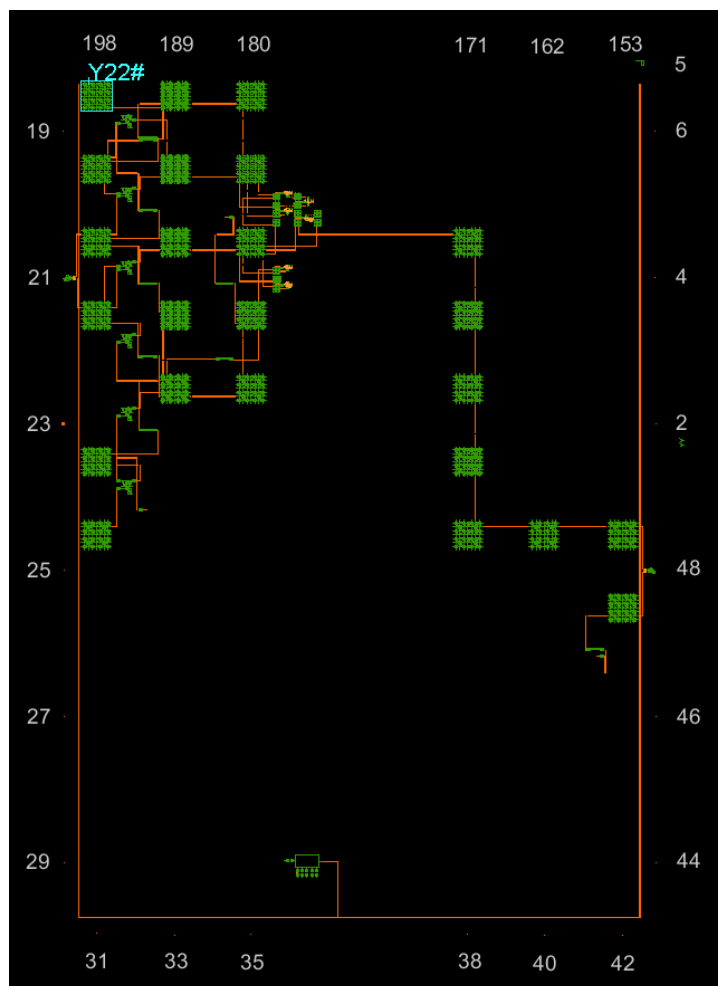


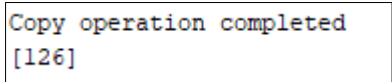
Рисунок 81. Результат работы скрипта оптимизации проекта

Для проведения расчетов при отладке схемы рекомендуется выполнять скрипт оптимизации в дублированной схеме. Отмена скрипта оптимизации (для дальнейшего проектирования) комбинацией клавиш «Ctrl» + «Z» может привести к системным ошибкам и нарушению нумерации ключей.

Скрипты Copy и Paste

Для удобства использования ручной трассировки из CYGELENG 4.0 были перенесены скрипты копирования и вставки внутренних ключей блока.

Для копирования ключей нужно выделить один из блоков и выполнить скрипт *Tools → Service Methods → Copy Keys*. В результате в *Electric Messages* будет выведено сообщение о завершении скрипта и список скопированных ключей.



```
Copy operation completed  
[126]
```

Рисунок 82 Сообщение о корректном копировании ключей

Вставка ключей в другой блок того же типа осуществляется с помощью скрипта *Tools → Service Methods → Paste Keys*.

Результатов выполнения скрипта будет копирование всех внутренних ключей из одного блока в другой.

Скрипт Point to Point

Скрипт *PointToPoint* используются для автоматической трассировки одного сигнала в глобальной схеме. Для использования скрипта нужно выделить точку начала и затем с зажатой клавишей *SHIFT* выделить точку конца пути. Затем запустить скрипт, нажав *Tools → ServiceMethods → PointToPoint*. Выполнение занимает некоторое время т. к. каждый раз выполняется считывание используемых цепей.

Восстановление схемы из конфигурационной последовательности

Начиная с DCS_Electric доступна функция восстановления электрической схемы из конфигурационной последовательности:

- 1) Создать новую схему (правой кнопкой мыши по библиотеке *simulation* → *Create New Cell*).
- 2) В открывшемся окне в поле *Name* ввести название схемы, в поле *View* выбрать *schematic*.
- 3) Вынести из библиотеки *symbol* в рабочее пространство блок *5400TP035_core*.
- 4) Вызвать скрипт восстановления схемы из конфигурационной последовательности (*Tools* → *DCS PAIS* → *Reinvent configuration*)
- 5) В диалоговом окне выбрать файл с конфигурационной последовательностью для восстановления (по умолчанию *analog_config.txt*)

Процесс восстановления может занять длительное время, которое нелинейно зависит от величины схемы. Пример восстановленной схемы приведен на рисунке 83.

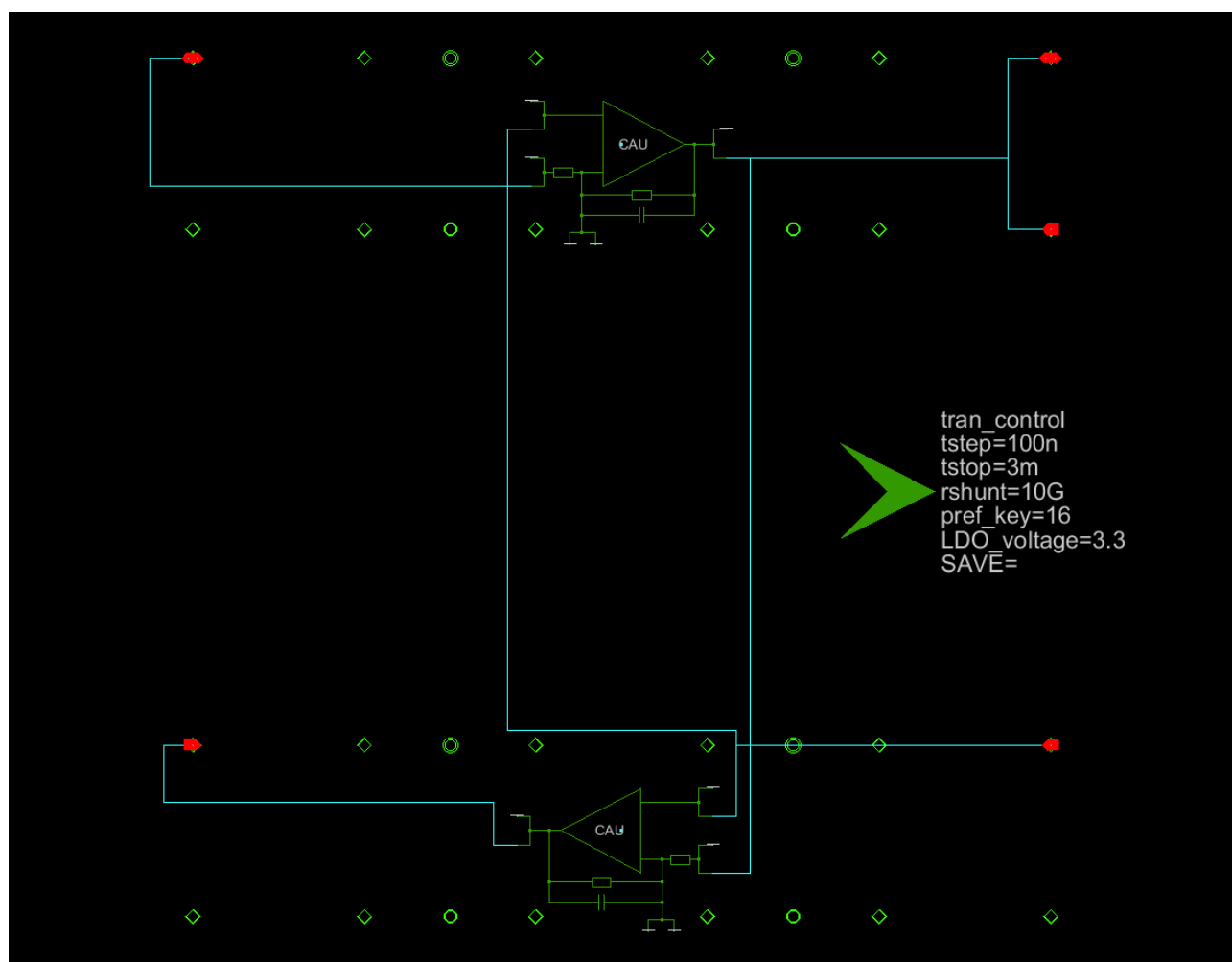


Рисунок 83. Результат работы восстановления схемы из конфигурационной последовательности

Примечание! Окружности, ромбы и голубые точки показывают возможные центры элементов в сетке.

Важно! Восстановление схемы из конфигурационной последовательности является случайным процессом и в текущей версии программного обеспечения могут возникать ошибки, связанные с некорректным расположением элементов. При наличии ошибки нахождения пути, следует удалить полученную часть схемы и запустить процесс еще раз.

[illegible]