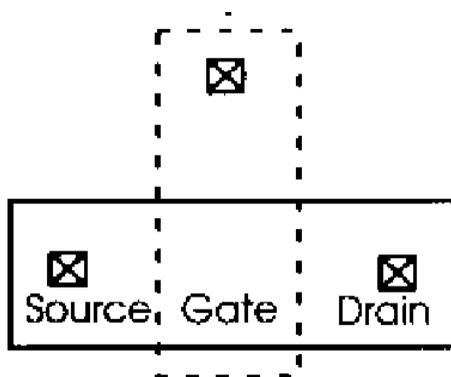


ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет»

Кафедра полупроводниковой электроники и нанoeлектроники

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ № 1 - 4
по дисциплине «Основы проектирования электронной
компонентной базы»
для студентов направления
11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника»
(профиль «Микроэлектроника
и твердотельная электроника»)
очной формы обучения



Воронеж 2016

Составители: канд. техн. наук А.В. Арсентьев,
канд. техн. наук Е.Ю. Плотникова,
ассистент А.А. Винокуров

УДК 621.382

Методические указания к выполнению лабораторных работ № 1 - 4 по дисциплине «Основы проектирования электронной компонентной базы» для студентов направления 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника» (профиль «Микроэлектроника и твердотельная электроника») очной формы обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост. А.В. Арсентьев, Е.Ю. Плотникова, А.А. Винокуров. Воронеж, 2016. 26 с.

В методических указаниях описывается последовательность разработки и моделирования ИС, выполненных по КМОП-технологии, приводятся примеры моделирования схем с использованием SPICE моделей транзисторов в различных режимах анализа.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле «МУ ОПЭКБ.pdf».

Табл. 1. Ил. 18. Библиогр.: 1 назв.

Рецензент д-р техн. наук, проф. А.В. Строгонов

Ответственный за выпуск зав. кафедрой
д-р физ.-мат. наук, проф. С.И. Рембеза

Издается по решению редакционно-издательского совета Воронежского государственного технического университета

© ФГБОУ ВО "Воронежский государственный
технический университет", 2016

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

Моделирование полевого транзистора в статическом режиме

1. Создание нового проекта и подключение необходимых библиотек

Для создания нового проекта дискретного прибора или сложной структуры первым шагом необходимо запустить модуль S-edit из пакета САПР Tanner EDA. После загрузки программы с помощью выпадающего меню **File – New – New Design** необходимо создать новую область–проект, в которой далее будет проводиться разработка требуемой схемы (рис. 1). При генерации проекта в диалоговом окне необходимо указать название проекта и папку, в которой проект будет сохранен. Рекомендуется присваивать файлу такое имя, чтобы в дальнейшем можно было идентифицировать содержание по его названию.

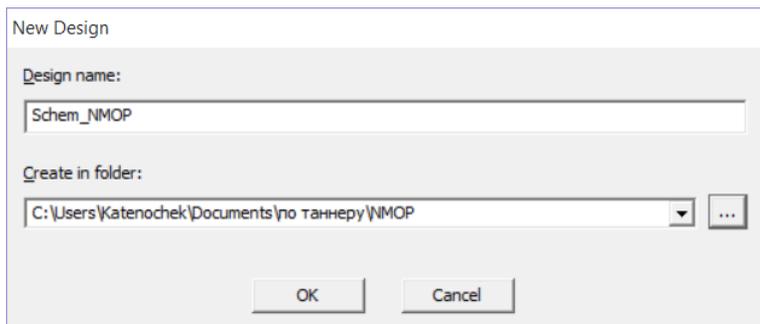


Рис. 1. Создание нового проекта

Следующим шагом после создания проекта обычно следует генерация области, в которой будет происходить непосредственная разработка схемы (так называемой «ячейки» / «cell»). Важным моментом при создании «ячейки» является указание типа, которому эта ячейка будет соответствовать

(можно генерировать область для разработки схемы, отдельного символа, кода на одном из языков программирования и т.д.).

Для генерации ячейки выбирается пункт меню **Cell – New View**, в появившемся окне (рис. 2) задается имя ячейки (cellXX, где XX – номер области проектирования в разрабатываемом проекте), ее тип и т.д. САПР Tanner EDA имеет функцию создания проектов со сложной иерархией (на одном уровне проекта логический элемент изображается в виде «черного ящика», а на более глубоком уровне – это схема, состоящая из транзисторов, диодов и т.д.). По умолчанию в проектах с простой иерархией ячейка занимает верхний уровень дерева проекта. Такой подход позволяет упростить настройку моделирования созданной схемы, скрывая ее элементы в более крупных блоках.

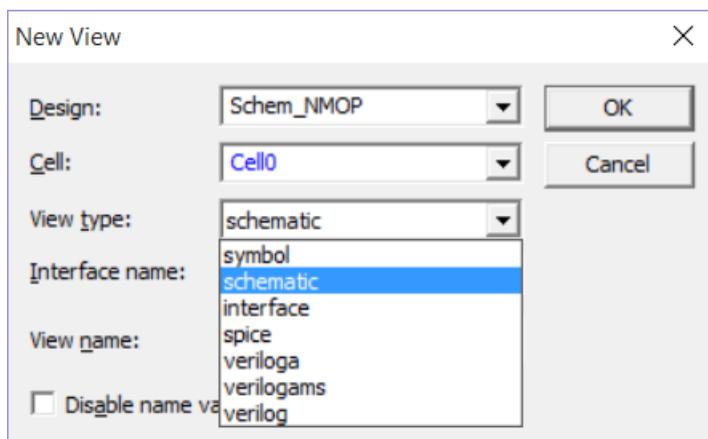


Рис. 2. Создание новой ячейки

После создания проекта его рекомендуется пересохранить перед дальнейшей работой.

Для того чтобы в проекте были доступны различные приборы и управляющие элементы, к проекту требуется подключить библиотеки.

В основном окне программы S-edit, в левой его части, закреплено окно **Libraries** (рис. 3), в котором кнопкой **Add...** можно найти файлы библиотек, которые будут присоединены к проекту.

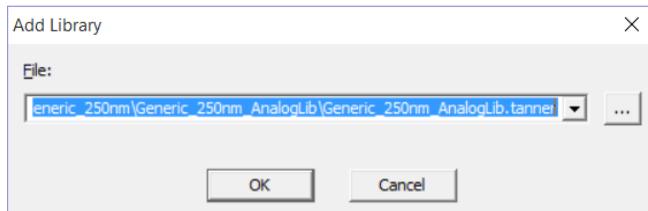


Рис. 3. Подключение библиотечных файлов

Первой необходимой для исследования характеристик n-канального МОП-транзистора нам понадобится библиотека **Generic_250nm_Devices**. По умолчанию эта библиотека расположена в папке с примерами проектов Tanner. Один из вариантов расположения файла библиотеки:

C:\Users\...\Documents\Tanner EDA\Tanner Tools v16.0\Process\Generic_250nm\Generic_250nm_Devices\

Библиотека **Generic_250nm_Devices** содержит символы полевых транзисторов, диода, резисторов, емкости и биполярного p-n-p-транзистора, выполненных по 250 нм технологии.

Также необходимо подключить служебные стандартные библиотеки, содержащие элементы стандарта SPICE по пути:

C:\Users\...\Documents\Tanner EDA\Tanner Tools v16.0\Process\Standard_Libraries\

Библиотека **SPICE_Elements** содержит символы источников питания, необходимые для моделирования работы прибора.

Библиотека **SPICE_Commands** содержит графические символы команд схемотехнического анализа для интерпретатора T-Spice.

Misc (Разное) содержит символы портов, глобальной земли и питания.

Вместе с одной из библиотек автоматически подключится библиотека **Devices**, содержащая стандартные символы транзисторов и пассивных элементов, однако использовать для создания схем необходимо элементы из **Generic_250nm_Devices** (рис. 4).

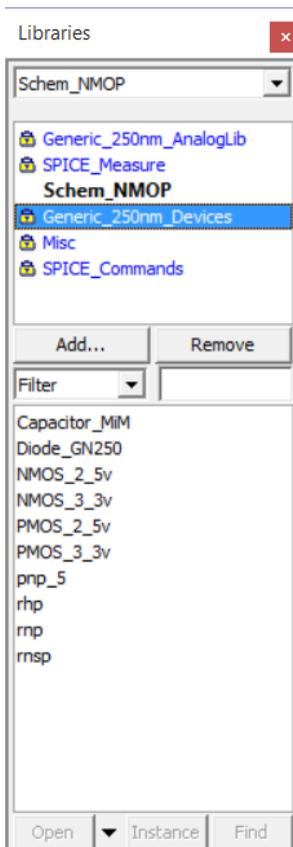


Рис. 4. Содержимое библиотеки Generic_250nm_Devices

После того, как к проекту будут подключены файлы библиотек, в созданной ранее ячейке можно собирать схему для исследования компонента. В нашем случае таким компонентом будет n-канальный МОП-транзистор.

2. Размещение компонентов схемы для измерения ВАХ n-канального МОП-транзистора

1) Из соответствующих библиотек вытащите на рабочую область элементы как показано на рис. 5.

Первым элементом, который должен присутствовать в схеме измерения характеристик n-канального МОП-транзистора, является сам транзистор. Его можно найти в библиотеке **Generic_250nm_Devices** под именем **NMOS_3_3v** (в случае транзистора, работающего при управляющем напряжении 3,3 В). Для моделирования необходимо добавить два источника напряжения **VoltageSource** из библиотеки **SPICE_Elements**, глобальный порт земли **Gnd** из библиотеки **Misc**, элемент **PrintCurrent** из библиотеки **SPICE_Commands** для измерения тока в узле.

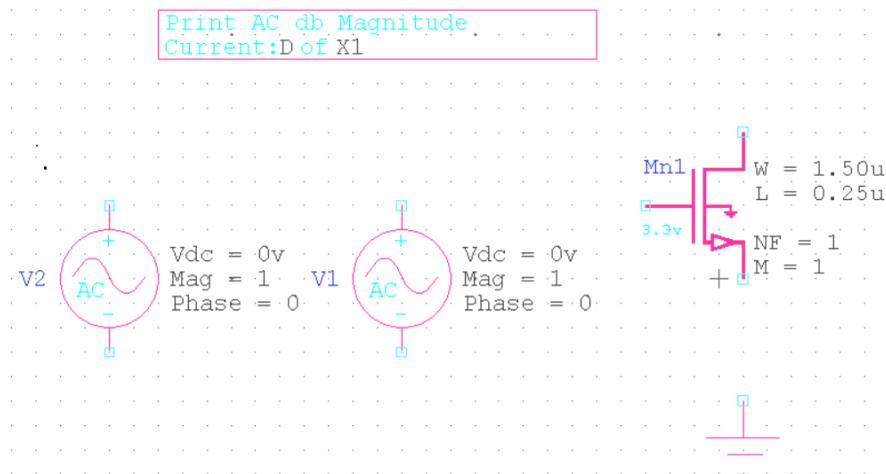


Рис. 5. Компоненты схемы

2) Теперь необходимо соединить все элементы инструментом **Wire** (катушка с проволокой на панели инструментов). Только после этого элементы будут считаться электрически связанными (рис. 6).

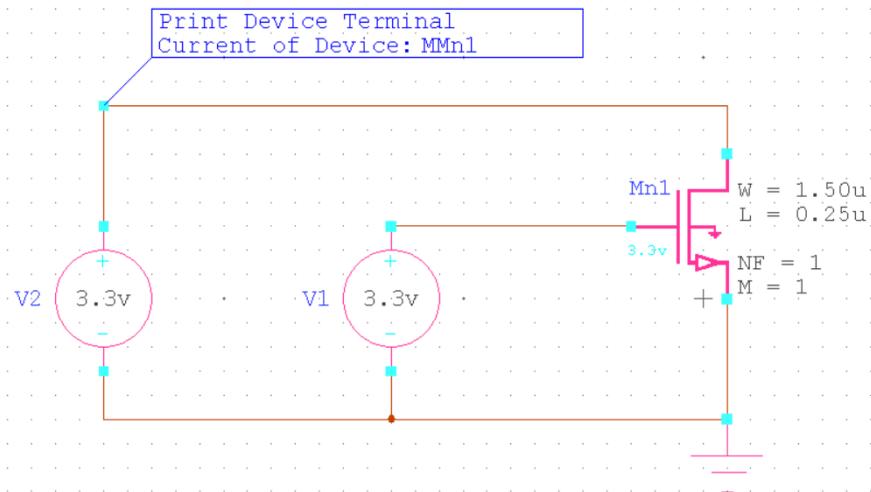


Рис. 6. Соединенные и настроенные компоненты схемы

3) Все элементы добавляются в рабочую область с параметрами по умолчанию, которые необходимо настроить.

а) Для источников **V1** и **V2** в панели свойств **Properties** (обычно располагается справа) в пункте **MasterInterface** необходимо сменить тип источника напряжения с **AC** (переменное напряжение) на **DC** (постоянное напряжение) и в пункте **V** (напряжение) выставить напряжение 3.3V.

б) Для элемента **PrintCurrent** в панели свойств **Properties** в пункте **MasterInterface** необходимо выбрать **DeviceTerminalNode** (вариант с щупом) и указать точку измерения. Данный элемент выполняет функцию амперметра, а также предоставляет данные для построения графиков зависимостей. В пункте **Device** надо указать ток какого устройства мы измеряем, в

нашем случае это транзистор **Mn1**, однако синтаксис требует добавить к имени транзистора букву “M”, что является указанием на тип транзистора, т.е. полевой транзистор МОП (MOSFET).

3. Настройка параметров моделирования

Все нелинейные компоненты (в том числе и МОП-транзисторы) берутся из библиотеки и «привязаны» к моделям, описывающим их поведение. Если просто взять и поместить требуемый символ n-канального МОП-транзистора в ячейку проекта, инструмент SPICE-моделирования не сможет автоматически соотнести указанный транзистор с выбранной для моделирования технологией (в зависимости от технологии производства изготовленные элементы будут вести себя по-разному).

Для настройки моделирования используется выпадающий список **Setup – SPICE Simulation**, при включении которого открывается окно настроек проекта. Для построения характеристик n-канального МОП-транзистора на первом этапе на вкладке **General** в поле **Library Files** требуется указать библиотеку **Generic_250nm**, характеристики приборов из которой (SPICE - модели) будут использованы для расчетов. После адреса библиотеки в этой же строке указываются 2 литеры «ТТ» (рис. 7).

После того, как в проект были подключены библиотеки, требуется задать параметры анализа исследуемых процессов. Для построения ВАХ транзистора отмечается вкладка **DC Sweep Analysis** (рис. 8).

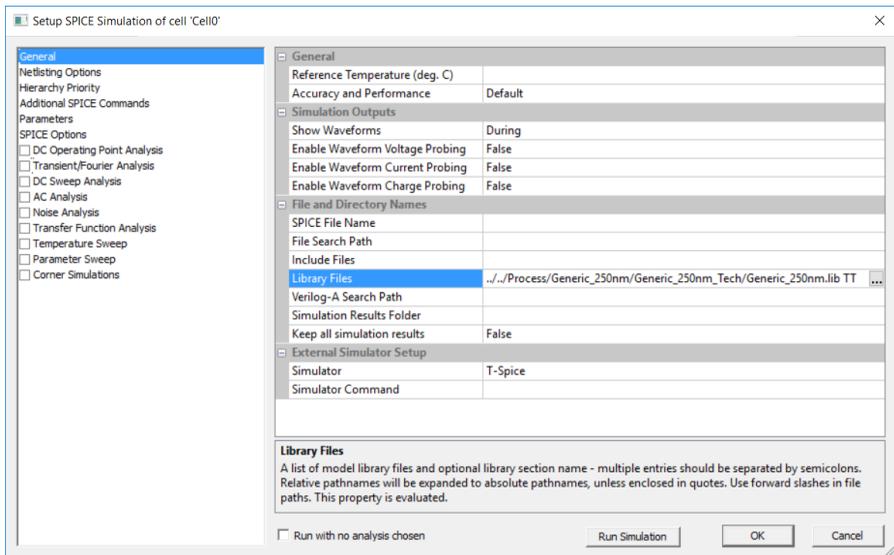


Рис. 7. Подключение библиотеки с моделями компонентов

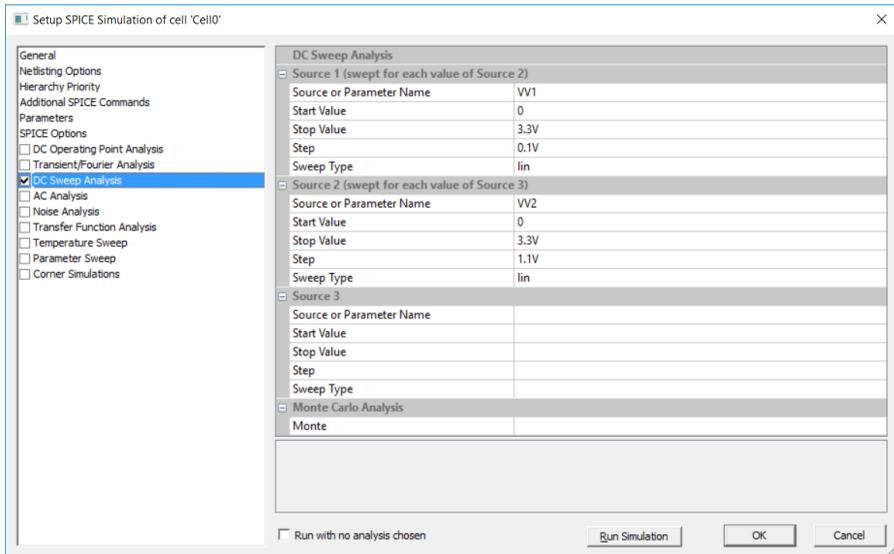


Рис. 8. Настройка источников сигнала

В настройках нужно указать параметры поведения источников напряжения. Сюда относится **Source or Parameter Name** – имя источника напряжения. Источник напряжения **V1** отвечает за напряжение на затворе, источник **V2** за напряжение сток-исток. Для соблюдения синтаксиса программы к имени источника напряжения необходимо добавить символ **V**. **Start Value** – начальное значение на источнике напряжения, с которого будет происходить расчет характеристик. **Stop Value** – финальное значение напряжения на источнике питания, после которого расчет останавливается. **Step** – шаг моделирования, определяет количество точек, в которых будет произведен расчет состояния схемы. **Sweep Type** – вид развертки, выбираем **lin** – линейный вид.

4. Моделирование проекта

Для начала моделирования в меню выполните **Tools -> Start Simulation** или нажмите кнопку **Start Simulation** на панели быстрого доступа. Если все сделано без ошибок, то конечным результатом будут графики ВАХ полевого транзистора в редакторе W-Edit (рис. 9, 10).

После нажатия кнопки **Start Simulation** графическая оболочка S-Edit формирует выходной файл NetList для T-Spice с полным текстовым описанием схемы, режимов моделирования и параметров отображения результатов моделирования. Расчет протекающих в схеме токов и потенциалов в узлах выполняет T-Spice, после чего передает данные для визуализации W-Edit. Если в окне редактора T-Spice красным указываются найденные ошибки или синим – предупреждения, необходимо перепроверить весь проект с самого начала. Подсказками могут служить выдаваемые программой предупреждения, ссылающиеся на ту или иную строку NetList. Анализ текстового описания схемы может помочь в нахождении ошибки сделанной в S-Edit.

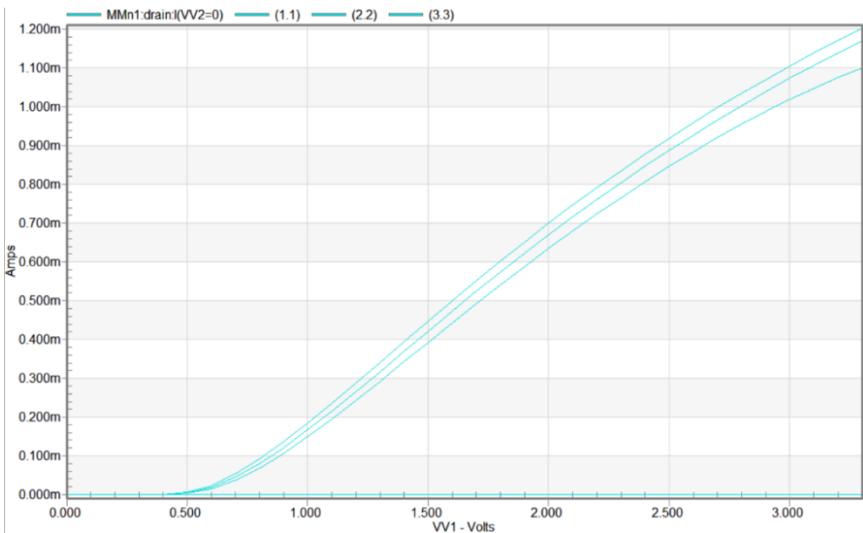


Рис. 9. Ток сток-истока в зависимости от напряжения на затворе при разном напряжении сток-исток

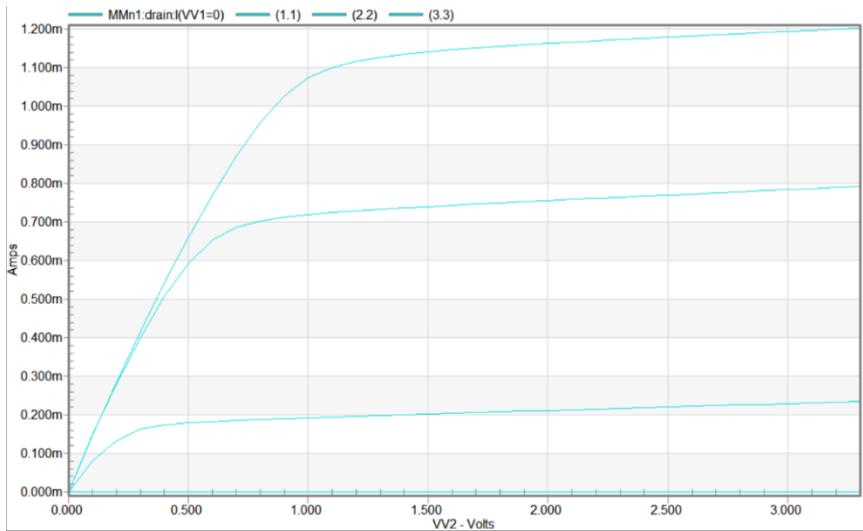


Рис. 10. Ток сток-истока в зависимости от напряжения сток-исток при разном напряжении на затворе

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

Ручная настройка модели полевого транзистора

Конструкции и параметры полевых транзисторов разнообразны в зависимости от технологии их изготовления. В САПР Tanner это учитывается подключением библиотек компонентов, которые предоставляются заводом-изготовителем разработчикам интегральных схем. В редакторе S-Edit напрямую в панели **Properties** можно указать только основные параметры полевого транзистора, которые будут переданы при генерации NetList'a программе моделирования T-Spice. Остальные параметры задаются либо вручную, либо подключением библиотеки производителя, в противном случае будут оставлены значения по умолчанию.

Основные параметры, доступные в редакторе S-Edit (входные параметры для T-Spice):

L – длина канала. Размерность: метры.

W – ширина канала. Размерность: метры.

Ad – площадь стока. Размерность: квадратные метры.

Pd – периметр истока. Размерность: метры.

As – площадь истока. Размерность: квадратные метры.

Ps – периметр истока. Размерность: метры.

Nrd – количество квадратов диффузионной области стока.

Nrs – количество квадратов диффузионной области истока.

Rdc – добавочное сопротивление контакта, которое переписывает параметр RDC модели стока. Размерность: Ом. По умолчанию равно 0.

Rsc – добавочное сопротивление контакта, которое переписывает параметр RSC модели истока. Размерность: Ом. По умолчанию равно 0.

Rsh – поверхностное сопротивление области между Истоком-Стоком, которое переписывает параметр RSH модели. Размерность: ом на квадрат. По умолчанию равно 0.

При этом обязательно указывать только параметры W и L, параметры AS, PS, AD, PD рассчитываются автоматически, однако могут быть заданы и вручную, если есть информация о не стандартной геометрии транзистора.

Проведем моделирование работы полевого транзистора, настроив его параметры вручную.

1. Создание нового проекта и подключение необходимых библиотек

Создайте новый проект как в лабораторной работе №1. Подключите последовательно библиотеки **Devices**, **SPICE_Element**, **SPICE_Commands**, **Misc** из каталога C:\Users\...\Documents\Tanner EDA\Tanner Tools v16.0\Process\Standard_Libraries\

2. Составьте электрическую схему из полевых транзисторов в библиотеке Device и проведите настройки моделирования как в предыдущей лабораторной работе

3. Настройка параметров модели полевого транзистора

Не запуская проект на расчет, выполните Tools -> T-Spice. Запустится редактор T-Spice с открытым NetList'ом проекта.

```
***** Simulation Settings - General Section *****
```

```
***** Top Level *****
```

```
MNM Vdd N_1 Gnd 0 NMOS W=25u L=2u AS=22.5p PS=51.8u AD=22.5p PD=51.8u  
VV1 Vdd Gnd DC 5  
VV2 N_1 Gnd DC 5  
.PRINT I(MNM,Vdd)
```

```

***** Simulation Settings - Analysis Section *****
.dc lin VV1 0 5 0.5 SWEEP lin VV2 0 5 0.5

***** Simulation Settings - Additional SPICE Commands *****

.end

```

Все записи зеленым цветом представляют собой комментарии и могут быть удалены. Не рекомендуем удалять Секции **Section**, т.к. они определяют порядок расположения команд, что помогает не запутаться. Чтобы вручную задать параметры модели, необходимо в секции Simulation Settings прописать подключение модели транзистора. В общем случае синтаксис команды выглядит так:

.model *name* **nmos|pmos** **level=1|2|3** [*parameters*]

здесь **.model** – команда подключение модели; **name** – имя модели транзистора (не путать с именем транзистора); **nmos|pmos** – тип модели транзистора (n- или p-канальный), в нашем случае n-канальный; **level=1|2|3** уровень точности модели, повышается от 1 к 3; [**parameters**] – общие (групповые) характеристики транзисторов, такие как концентрация примеси в подложке, толщина подзатворного окисла и т.д. Для моделей разного уровня может быть порядка 50 различных настраиваемых параметров.

Пример кода с заданными вручную параметрами модели

```

***** Simulation Settings - General Section *****
.model nmos nmos level=3
+ Vto=1.0          Kp=20.83u          Gamma=0.35
+ Phi=0.65         Tox=0.1u          Nsub=1.0E+15
+ Nss=1.0E+10      Nfs=1.0E+10       Xj=1.0u
+ Ld=0.8u          Tpg=1.00          Uo=700.0
+ Vmax=5.0E+4      Delta=1.0         Kappa=0.8
+ Eta=0.001        Theta=0.05
**** Top Level ****
MNM Vdd N_1 Gnd 0 NMOS W=25u L=2u AS=22.5p PS=51.8u AD=22.5p PD=51.8u
VV1 Vdd Gnd DC 5
VV2 N_1 Gnd DC 5
.PRINT I(MNM,Vdd)
***** Simulation Settings - Analysis Section *****
.dc lin VV1 0 5 0.2 SWEEP lin VV2 0 5 0.2

```

Параметры модели

Vto – пороговое напряжение при нулевом смещении на подложке, определяет момент открытия транзистора, т.е. момент начала протекания тока от истока к стоку. На графике смещает передаточную характеристику по оси X. Не путать с V_{th} , пороговым напряжением при ненулевом потенциале на подложке.

KP – удельная крутизна транзистора, используется для расчета β – крутизны транзистора. Если не задана, рассчитывается как $KP = U_0 \cdot C_{ox}$.

gamma – коэффициент влияния потенциала подложки на пороговое напряжение. Если не задан, вычисляется по формуле $\gamma = \frac{\sqrt{2\varepsilon_0\varepsilon_{Si}qN_{sub}}}{C_{ox}}$, $C_{ox} = \frac{\varepsilon_0\varepsilon_{ox}}{T_{ox}}$.

Phi – поверхностный потенциал. Если не задан, рассчитывается по формуле $\phi = 2\phi_F = 2\frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_{sub}}{n_i}\right)$.

lambda – параметр модуляции длины канала. Параметр характеризует наклон выходной характеристики транзистора в области насыщения.

Tox – толщина подзатворного окисла.

Nsub – концентрация примеси в подложке, характеристика технологии изготовления.

Nss=1.0E+10 – плотность медленных поверхностных состояний на границе раздела кремний – подзатворный оксид.

Nfs=1.0E+10 – плотность быстрых поверхностных состояний на границе раздела кремний – подзатворный оксид.

Поверхностные состояния могут захватывать заряды, которые будут экранировать канал транзистора от напряжения на затворе, корректируя напряжение V_{th} .

Xj - глубина металургического p-n-перехода областей стока и истока.

Ld – боковая диффузия в канал со стороны стока и истока. Если величина LD и X_j не определены, то считаются по умолчанию 0. Если определена только X_j , то LD высчитывается как $LD=X_j*0,75$.

Wd – боковая диффузия в канал от подложки по ширине.

Uo – подвижность основных носителей в канале при слабых полях.

UCRIT – критическая напряженность поля, при которой подвижность носителей уменьшается в 2 раза.

UEXP – критические поля показатель степени в эмпирической формуле, которая характеризует деградацию поверхностной подвижности.

VMAX – максимальная скорость дрейфа носителей заряда. При параметре, равном 0, скорость считается бесконечной (неограниченной).

NEFF – Эмпирический коэффициент коррекции концентрации примеси в канале.

DELTA – Коэффициент влияния ширины канала на пороговое напряжение.

TPG – Тип материала затвора (+1 – примесью того же типа, как и для подложки; -1 – примесью противоположного типа; 0 – металл).

Theta – коэффициент модуляции подвижности носителей под влиянием вертикального поля.

ETA – Параметр влияния напряжения сток–исток на пороговое напряжение (статическая обратная связь).

KAPPA – Параметр модуляции длины канала напряжением сток–исток.

DEL – сокращение длины канала с каждой стороны

Задание:

1. Проведите моделирование для трех уровней модели полевого транзистора.

Сделайте вывод о влиянии уровня модели на выходную и передаточную характеристику.

2. Оцените влияние каждого из параметров на выходную и передаточную характеристику полевого транзистора в статическом режиме. Вариант даны в таблице.

3. Сделайте вывод о влиянии параметра на изменение выходной и передаточной характеристики.

Варианты задания

Вариант	Vto	Nsub	KP	TPG	gamma	lambda	delta	theta	kappa
1	1	1e14	10u	1	0.35	0.7	1	0.05	0.8
2	1.5	5e14	20u	0	0.4	0.8	1.1	0.05	0.9
3	2	1e15	40u	1	0.45	0.9	1.2	0.05	0.95
4	-1	5e15	60u	-1	0.3	1	0.9	0.05	1
5	-1.5	1e16	80u	0	0.25	1.1	0.8	0.05	0.7
6	-2	5e16	100u	-1	0.1	1.2	0.7	0.05	0.6

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

Моделирование инвертора

Инвертор является простейшим логическим элементом и является базой для построения более сложных логических элементов, таких как ИЛИ, И, ИЛИ-НЕ, И-НЕ и др. Проведем исследование работы инверторов выполненных по разным схемотехническим решениям.

I. Моделирование простейшего инвертора

1. Создание нового проекта и подключение необходимых библиотек

Создайте новый проект и ячейку. Подключите библиотеки **Generic_250nm_Devices**, **SPICE_Elements**, **SPICE_Commands**, **Misc**, **Devices**.

2. Размещение компонентов схемы

Вытащите на рабочую область из библиотеки **Generic_250nm_Devices** n-канальный МОП транзистор с рабочим напряжением 3.3 Вольта. Из библиотеки **SPICE_Elements** – два источника напряжения, из **Misc** – 2 символа земли и питания, из **Devices** – резистор, из **SPICE_Commands** – элемент **PrintVoltage**. Соедините элементы как показано на рис. 11.

3. Настройка параметров моделирования

В меню **SetupSimulation** в пункте **General** поле **Library Files** укажите путь к библиотеке **Generic_250nm_Devices** и в конце пути после пробела добавьте две латинские буквы **TT**.

Выберете тип анализа **DC Sweep Analysis** и заполните поля поведения источника **V2** как показано на рис 12.

На схеме через панель **Properties** измените тип источников питания на DC и укажите номинал в 3.3 В.

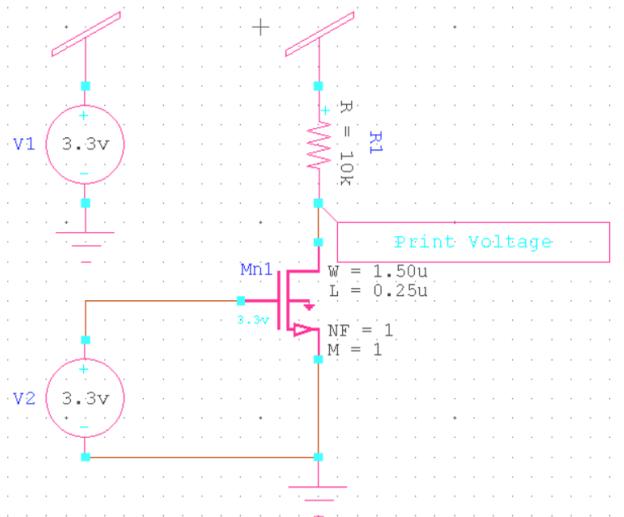


Рис. 11. Схема простейшего инвертора

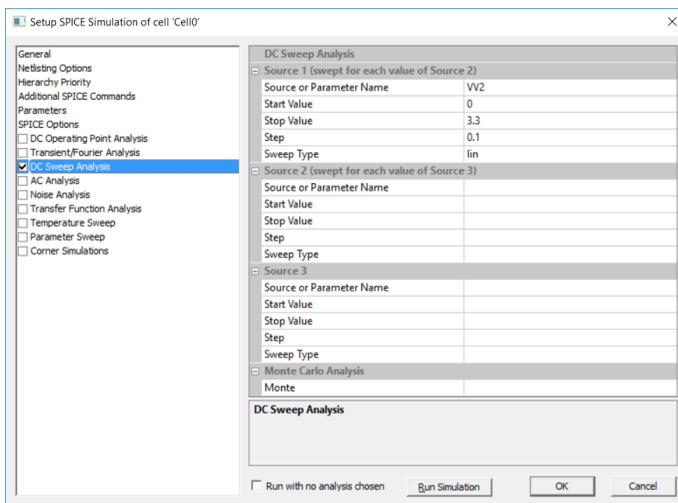


Рис. 12. Настройки параметров моделирования инвертора

4. Моделирование проекта

Запустите проект на моделирование кнопкой **Start Simulation**, в результате должен получиться график зависимости выходного напряжения от входного (рис. 13).

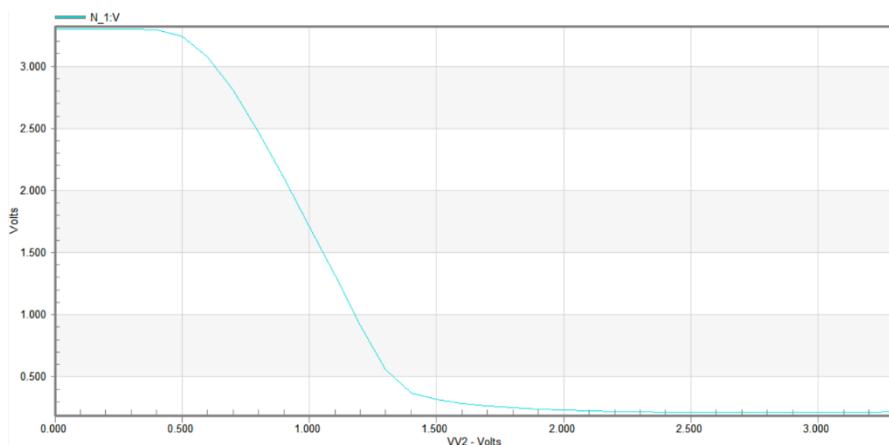


Рис. 13. График переключения инвертора

Задание: проведите моделирование при трех номиналах резистора $R1 = 1k, 10k$ и $100k$. Сравните графики, сделайте вывод о влиянии сопротивления на передаточную характеристику инвертора. Какой из вариантов наиболее близок к идеальной характеристике инвертора?

II. Моделирование инвертора с нелинейной нагрузкой

Используя настройки как для простейшего инвертора, замените в схеме резистор на еще один n-канальный транзистор 3.3 В из библиотеки **Generic_250nm_Devices** (рис. 14). Проведите повторное моделирование.

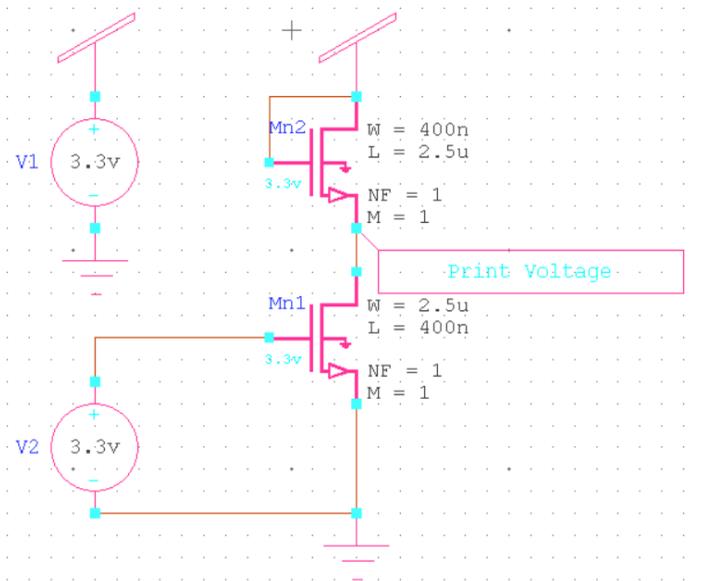


Рис. 14. Схема инвертора с нелинейной нагрузкой

Кругизна передаточной характеристики инвертора растет с ростом отношения $\frac{\beta^y}{\beta^H}$. Зависимость этого отношения от геометрических параметров транзистора нетрудно установить:

$$\frac{\beta^y}{\beta^H} = \frac{W^y/L^y}{W^H/L^H} = \frac{W^y \cdot L^H}{W^H \cdot L^y}$$

Тогда, чтобы инвертор занимал минимальную площадь и обладал максимальной помехоустойчивостью, необходимо, чтобы знаменатель был минимален, а числитель - максимален. Поэтому минимально возможными L_{min} должны быть длина канала управляющего транзистора ($L^y = L_{min}$), ширина нагрузочного ($W^H = L_{min}$). И, наоборот, L^H и W^y должны быть мак-

симальны. Например, чтобы получить $\frac{\beta^y}{\beta^H} = 100$ нужно, чтобы $L^H = W^y = 10 \cdot L_{min}$.

Задание: проведите моделирование при различных соотношениях $\frac{\beta^y}{\beta^H} = 0.1, 1, 10, 30, 100$. Сравните графики, сделайте вывод о влиянии соотношения на передаточную характеристику инвертора. Какой из вариантов наиболее близок к идеальной характеристике инвертора?

III. Моделирование инвертора на КМОП транзисторах

Замените в схеме верхний n-канальный транзистор на p-канальный транзистор 3.3 В из библиотеки **Generic_250nm_Devices** (рис. 15). Проведите повторное моделирование.

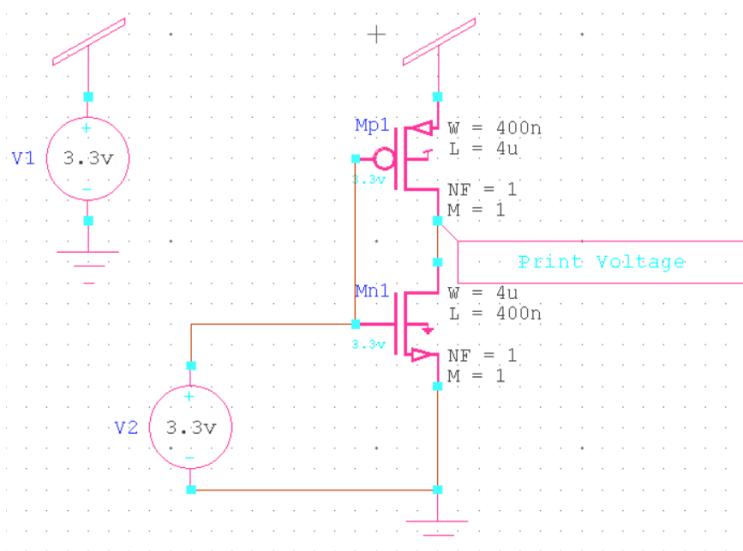


Рис. 15. Схема инвертора по КМОП технологии

Задание: проведите моделирование при различных соотношениях $\frac{\beta^y}{\beta^H} = 0.1, 1, 10, 30, 100$. Сравните графики, сделайте вывод о влиянии соотношения на передаточную характеристику инвертора. Какой из вариантов наиболее близок к идеальной характеристике инвертора?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

Моделирование элементов И-НЕ и ИЛИ-НЕ

1. Создание нового проекта и подключение необходимых библиотек

Создайте новый дизайн и вид. Подключите библиотеки **Generic_250nm_Devices**, **SPICE_Elements**, **SPICE_Commands**, **Misc**.

2. Размещение компонентов схемы

Вытащите на рабочую область из библиотеки **Generic_250nm_Devices** два n-канальных и два p-канальных МОП транзистора с рабочим напряжением 3.3 В. Из библиотеки **SPICE_Elements** два источника напряжения, из **Misc** – 4 символа земли и 2 питания, из **SPICE_Commands** – три элемента **PrintVoltage**. Соедините элементы как показано на рис. 16.

3. Настройка параметров моделирования

В меню **SetupSimulation** в пункте **General** поле **Library Files** укажите путь к библиотеке **Generic_250nm_Devices** и в конце пути после пробела добавьте две латинские буквы **TT**.

Выберете тип анализа **Transient/Fourier Analysis** и заполните поля как показано на рис. 17.

Задайте значения для источников сигнала с периодом для $V2=1\text{ms}$ и $V3=1.5\text{ms}$

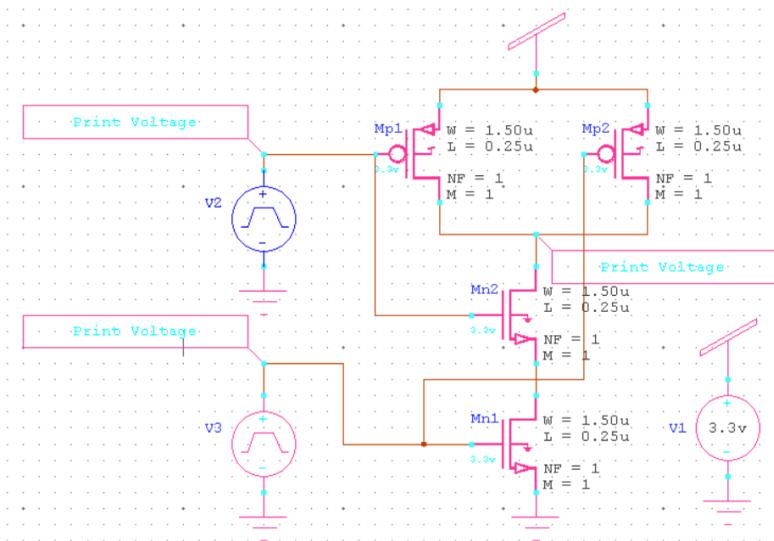


Рис. 16. Схема элемента И-НЕ, выполненного по КМОП технологии

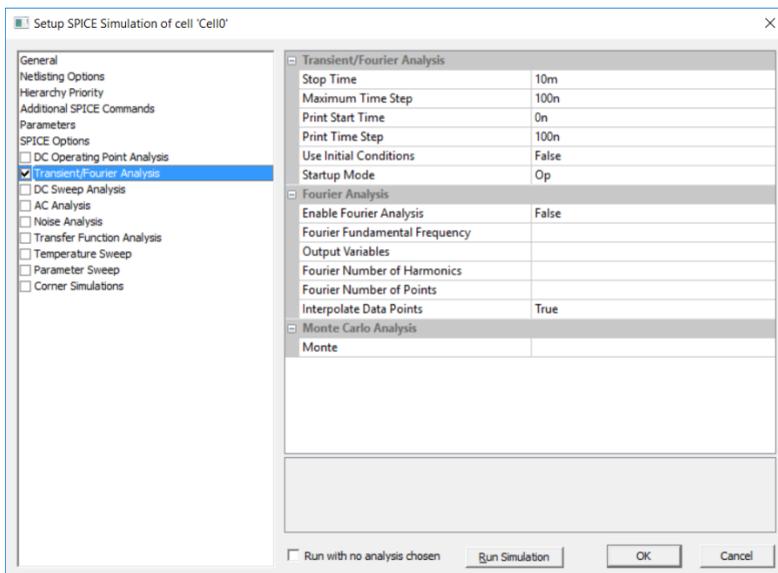


Рис. 17. Настройки моделирования элемента И-НЕ

4. Моделирование проекта

Запустите проект на моделирование кнопкой **Start Simulation**, в результате должны получиться графики временных зависимостей (рис. 18).

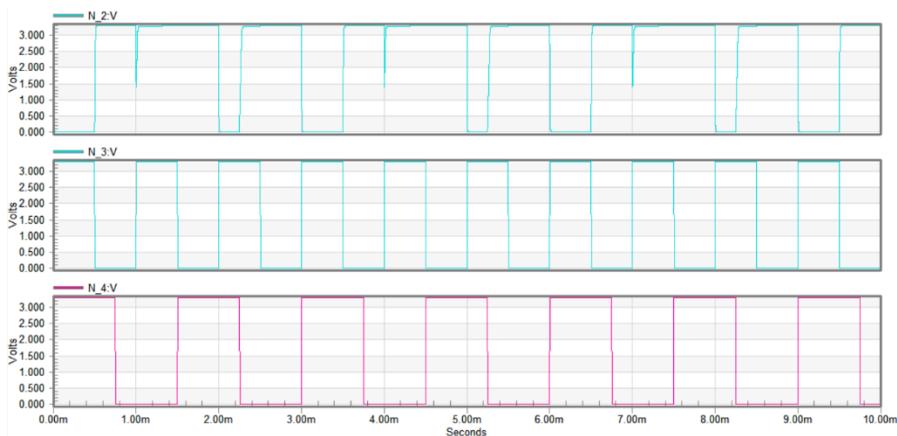


Рис. 18. Временные диаграммы работы элемента 2И-НЕ

Задание:

1. Объясните вид сигнала на выходе.
2. Перестройте схему так чтобы получился элемент ИЛИ-НЕ.
3. Замените транзисторы на 2,5-вольтовые из библиотеки **Generic_250nm_Devices** и повторите моделирование.
4. Для всех смоделированных схем определите время переключения из 1->0 и из 0->1.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Разевиг, В.Д. Применение программ P_CAD и PSPICE для схемотехнического моделирования на ПЭВМ [Текст]: в 4 вып. / В.Д. Разевиг – М.: Радио и связь, 1992. – №2. – С. 23-25.

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа № 1	1
Лабораторная работа № 2	11
Лабораторная работа № 3	16
Лабораторная работа № 4	22
Библиографический список	25

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ № 1 - 4
по дисциплине «Основы проектирования электронной
компонентной базы»
для студентов направления
11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»
(профиль «Микроэлектроника
и твердотельная электроника»)
очной формы обучения

Составители:

Арсентьев Алексей Владимирович
Плотникова Екатерина Юрьевна
Винокуров Александр Александрович

В авторской редакции

Компьютерный набор А.В. Арсентьева, Е.Ю. Плотниковой

Подписано к изданию 25.04.2016.

Уч.-изд. л. 1,6.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический уни-
верситет»

394026 Воронеж, Московский просп., 14