УДК 621.375(075.8)

Объявляется набор в магистратуру в 2021г.

По направлению: **12.04.01 Приборостроение** Направленность (профиль) программы:

(Технологии цифрового города)

Bce вопросы по почте: ankravets@mail.ru

А.В. Кравец

Учебно-методическое пособие

по курсу

### Схемотехника аналоговых электронных устройств

Часть 3

ИРСУ

Ростов-на-Дону – Таганрог 2017

Кафедра радиоприемных устройств и телевидения

#### УДК 621.375(075.8)+621.382(075.8) ББК 32.846.+3285 У-912

#### Рецензент

кандидат технических наук, профессор кафедры РТС ИРСУ ЮФУ В.Т. Лобач

Кравец А.В.

У-912 Схемотехника аналоговых электронных устройств: учебно-методическое пособие Ч. 3.
/А.В. Кравец – Ростов-на-Дону; Таганрог, 2017. – 80 с. Ил. 74. Библиогр.: 8 назв.

В данной работе изложен теоретический материал соответствующий объему 3-го модуля курса «Схемотехника аналоговых электронных устройств». Приведены примеры моделирования в системе Micro-Cap.

Соответствует программе курса «Схемотехника аналоговых электронных устройств» для студентов всех форм обучения по направлению «Радиотехника».

УДК 621.375(075.8)+621.382(075.8) ББК 32.846.+3285

© Южный федеральный университет, 2017 © Кравец А.В., 2017

#### Оглавление

| 1.   | Общие      | сведен     | ия о      | модел    | IS XRI                | лектј         | онных                 |    |
|------|------------|------------|-----------|----------|-----------------------|---------------|-----------------------|----|
| KON  | ипонентов  |            |           |          |                       | •••••         |                       | 6  |
| 2.   | Модели     | пассивн    | іых эл    | ектрони  | ных к                 | омпо          | нентов                |    |
| (Pa  | ssive comp | oonents) . |           |          |                       | •••••         | • • • • • • • • • •   | 9  |
| 2.1. | Модель ре  | езистора   | (Resistor | ·)       |                       | ••••          | • • • • • • • • • • • | 10 |
| 2.2. | Модель ко  | онденсато  | pa (Cap   | acitor)  |                       | ••••••        | ••••                  | 12 |
| 2.3. | Модель и   | ндуктивн   | ости (In  | ductor)  |                       | • • • • • •   |                       | 14 |
| 2.4. | Модель     | взаимн     | ой инд    | уктивно  | сти и                 | маг           | нитный                |    |
| cep  | дечник (К) |            | ••••••    | ••••     | • • • • • • • • • • • | •••••         | ••••                  | 16 |
| 2.5. | Модель ли  | инии пере  | едачи (Т  | ransmiss | ion line)             | ••••          | • • • • • • • • • •   | 18 |
| 2.6. | Модель д   | иода (Dio  | de) и ста | абилитро | она (Zer              | ner)          | • • • • • • • • • •   | 19 |
| 2.6. | 1. Основни | ме сведен  | ия        | ••••     | ••••                  | • • • • • • • |                       | 19 |
| 2.6. | 2. Прямая  | ветвь во.  | льт-амп   | ерной ха | практер               | исті          | <i>ки</i>             | 22 |
| 2.6. | 3. Обратн  | ая ветвь   | вольт-а   | мперной  | і харакп              | перис         | стики                 | 26 |
| 2.6. | 4. Исслее  | дование    | динами    | ческого  | режи                  | ма ј          | работы                |    |
| вын  | ірямитель  | ного диод  | a         | ••••••   | ••••••                |               | ••••                  | 30 |
| 2.6. | 5. Исслее  | дование    | Вольт-    | фарадно  | й хара                | ктер          | истики                |    |
| дио  | да         |            |           |          |                       |               |                       | 35 |

| 3. Модели активных электронных компонентов           | 38 |
|--|----|
| 3.1. Модель биполярного транзистора                  | 38 |
| 3.1.1. Основные сведения                             | 38 |
| 3.1.2. Исследование параметров модели влияющих на    |    |
| входную вольт-амперную характеристику биполярного    |    |
| транзистора  | 42 |
| 3.1.3. Исследование параметров модели влияющих на    |    |
| выходную вольт-амперную характеристику биполярного   |    |
| транзистора  | 46 |
| 3.1.4. Исследование динамического режима транзистора | 48 |
| 3.1.5. Измерение емкости обратносмещенного коллек-   |    |
| торно-базового перехода Ск                           | 52 |
| 3.2. Модель полевого транзистора с управляющим p-n-  |    |
| переходом  | 55 |
| 3.2.1.Основные сведения                              | 55 |
| 3.2.2. Передаточная характеристика п-канального МОП  |    |
| транзистора  | 62 |
| 3.2.3. Исследование выходных вольт-амперных          |    |
| характеристик  | 63 |

| 3.3.  | Измерение    | параметров      | полевых                               | транзисторов | c      |    |
|-------|--------------|-----------------|---------------------------------------|--------------|--------|----|
| изолі | ированным за | атвором         |                                       | •••••        | 6      | 55 |
| 3.3.1 | Основные с   | ведения         |                                       | •••••••      | 6      | 55 |
| 3.3.2 | Исследован   | ие модели \$В\$ | SIM3_N                                |              | . 7    | 70 |
| 3.3.3 | Исследован   | ие модели \$В\$ | SIM4_N                                |              | ,<br>, | 73 |
| 3.3.4 | Исследован   | ие стандарт     | ной модел                             | и МОП- транз | 3U-    |    |
| стор  | a            |                 | • • • • • • • • • • • • • • • • • • • | ••••         | 7      | 74 |
| Cnuc  | ок литерату  | ры              | •••••••                               | ••••••       | 7      | 78 |

#### 1. Общие сведения о моделях электронных

#### компонентов

В этой части учебно-методического пособия пойдет речь о моделях электронных компонентов. Прежде всего, разберемся, что понимают под термином компонент.

Электронный компонент является конструктивно законченной составной частью электронного узла или модуля. Электронные компоненты являются основой электронного изделия и минимальной единицей замены.

Электронные компоненты делятся по функциональным признакам.

Пассивные: резисторы, конденсаторы, индуктивности, диоды и т.д. То есть все компоненты, для работы которых не требуется подключения источника питания.

Активные: транзисторы, лампы, туннельные диоды и т.д. То есть все компоненты, для работы которых требуется подключение источника питания

По степени интеграции.

Дискретные: транзисторы, резисторы, диоды, тиристоры и т.д. То есть все компоненты, имеющие простейшую структуру, заключенную в отдельный корпус.

Интегральные: микросхемы различного назначения,

резисторные сборки (несколько резисторов на одной подложке), диодные сборки (несколько диодов на одной подложке) и т.д.

По технологии монтажа (для поверхностного монтажа или для монтажа в отверстия), типу и расположению выводов, типу и материалу корпуса и т.д.

При автоматизированном проектировании под моделью компонента понимается единая модель, содержащая данные о типе корпуса, его условном графическом изображении на схеме, параметры для моделирования работы схемы, а также информацию. Условное графическое вспомогательную изображение создается, как правило, простейшем Β графическом редакторе и сохраняется в отдельный файл с другими символами компонентов. Данные о типе корпуса так же, как правило, хранятся в отдельном файле с базой данных различных корпусов электронных компонентов. Эта часть моделей компонентов останется за рамками нашего пособия.

В дальнейшем будем МЫ говорить только 0 компонентов. В общем математических моделях случае моделью реального обычно под математической объекта понимают любое математическое описание, отражающее с требуемой точностью поведение этого объекта в заданных условиях.

Если объектом является компонент, то математической моделью будем называть математическое описание токов и напряжений в компоненте в статическом или в динамическом режимах работы. Математические модели необходимы прежде всего для программ схемотехнического моделирования, которые позволяют существенно ускорить процесс создания и настройки электронных схем.

Сейчас наибольшей популярностью пользуются программы, использующие SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) – алгоритм моделирования процессов, протекающих в электронных схемах. Алгоритм SPICE, де-факто стал стандартом для большинства систем схемотехнического моделирования.

Для наших целей наилучшим образом подойдет система схемотехнического моделирования MicroCap от корпорации Spectrum Software, которая имеет бесплатную версию с ограниченным быстродействием и функционалом, но достаточную для наших экспериментов.

Все компоненты, из которых составляется электрическая принципиальная схема, имеют математические модели двух типов:

• встроенные математические модели стандартных компонентов, таких как резисторы, конденсаторы, диоды, транзи-

сторы, независимые и зависимые источники сигналов, вентили и др., которые не могут быть изменены пользователями; можно только изменять значения их параметров;

•макромодели компонентов, составляемые пользователями из стандартных компонентов.

В свою очередь встроенные модели подразделяются на две категории:

 простые модели, характеризуемые малым количеством параметров, которые можно указать непосредственно на схеме в виде атрибутов;

•сложные модели, характеризуемые большим количеством параметров, которые заносятся в библиотеки моделей.

## 2. Модели пассивных электронных компонентов (Passive components)

В меню компонентов, в раздел пассивные компоненты (**Passive components**) включены резисторы, конденсаторы, индуктивности, линии передачи, трансформаторы, взаимные индуктивности, диоды.

Значения сопротивлений, емкостей и индуктивностей могут быть числом или выражением, зависящим от времени, узловых потенциалов, разности узловых потенциалов или токов ветвей, температуры и других параметров.

#### 2.1. Модель резистора (Resistor)

#### Формат схем:

Атрибут PART: *<имя>* 

Атрибут VALUE: *<значение>* [*TC*=*<TC1>*[,*<TC2>*]]

резистора, Сопротивление определяемое параметром быть <значение>, может числом ИЛИ выражением, включающим в себя изменяющиеся переменные, например 10+V(1)\*2. Эти выражения можно использовать только при анализе переходных процессов. В режиме АС эти выражения значений переменных в вычисляются ДЛЯ режиме ПО постоянному току.

Атрибут MODEL: [имя модели]

Параметры, описывающие модель резистора, приведены ниже.

Атрибут FREQ: [<выражение>] – например 100\*f\*v(1), при этом значение атрибута FREQ заменяет значение атрибута VALUE при расчете режима по постоянному току и проведении AC-анализа (где f – частота), при расчете переходных процессов сопротивление резистора равно значению атрибута VALUE.

#### Параметры модели резистора

**R** – масштабный множитель сопротивления (значение по

умолчанию 1).

**TC** – линейный температурный коэффициент сопротивления (значение по умолчанию 0 °C<sup>-1</sup>).

**TC2** – квадратичный температурный коэффициент сопротивления (*значение по умолчанию*  $0 \ ^{o}C^{2}$ ).

**ТСЕ** – экспоненциальный температурный коэффициент сопротивления (*значение по умолчанию 0 %/°C*).

**NM** – масштабный коэффициент спектральной плотности шума (*значение по умолчанию 1*).

Если в описании резистора *«имя модели»* опущено, то его сопротивление равно параметру *«сопротивление»* в Омах. Если *«имя модели»* указано и в директиве .MODEL отсутствует параметр TCE, то температурный фактор равен

#### $TF = 1 + TC1 (T-TNOM) + TC2(T-TNOM)^2;$

если параметр TCE указан, то температурный фактор равен TF = 1.01 <sup>TCE(T-TNOM)</sup>.

где Т – текущее значение температуры;

TNOM = 27 °C – номинальная температура (указывается в okne Global Settings).

Параметр *<значение>* может быть как положительным, так и отрицательным. Сопротивление резистора определяется выражением

#### rvalue = <*3Hayehue*> \*R\*TF\*MF,

#### где MF=1 ±<*разброс в процентах, DEV или LOT*>/100.

Среднеквадратичное значение тока тепловых шумов на 1 Гц полосы пропускания

#### I=NM\*sqrt(4\*K\*T/Resistance),

где К=1,38\*10<sup>-23</sup> Дж/К – постоянная Больцмана;

Т – температура в Кельвинах.

Для резисторов с отрицательным сопротивлением в этой формуле берется абсолютное значение сопротивления.

#### **2.2.** Модель конденсатора (Capacitor)

#### Формат схем:

#### Атрибут PART: *<имя>*

Атрибут VALUE: *<значение>* [IC=*< начальное значение напряжения>*]

Емкость конденсатора, определяемая параметром *<значение>*, может быть числом ИЛИ выражением, включающим в себя изменяющиеся во времени переменные, 10+V(1)\*0.02\*TIME. Эти например выражения можно использовать только при анализе переходных процессов. В режиме АС эти выражения вычисляются для значений переменных в режиме по постоянному току.

После ключевого слова IC указывается значение напряжения на конденсаторе при расчете режима по постоянному току, которое при расчете переходных процессов служит начальным значением этого напряжения.

Атрибут MODEL: [имя модели]

Атрибут FREQ: [<выражение>] – например 100\*SQRT(f), при этом значение атрибута FREQ заменяет значение атрибута VALUE при проведении AC-анализа (здесь f – частота), при расчете переходных процессов емкость конденсатора равна значению атрибута VALUE. В формате SPICE применение таких выражений недопустимо.

#### Параметры модели конденсатора

С – масштабный множитель емкости (значение по умолчанию 1).

VC1 – линейный коэффициент напряжения (значение по умолчанию В<sup>-1</sup>).

VC2 – квадратичный коэффициент напряжения (значение по умолчанию B<sup>-1</sup>).

**TC1** – линейный температурный коэффициент емкости (значение по умолчанию  $0 \ ^{o}C^{1}$ ).

**TC2** – квадратичный температурный коэффициент емкости (значение по умолчанию 0  $^{o}C^{-2}$ ).

Если в описании конденсатора *«имя модели»* опущено, то его емкость равна параметру *«значение»* в фарадах, в противном случае она определяется выражением

#### cvalue = value \* C \* QF \* TF \* MF,

где

- фактор нелинейности

 $\mathbf{QF} = \mathbf{1} + \mathbf{VC1}^*\mathbf{V} + \mathbf{VC2}^*\mathbf{V}^*\mathbf{V}.$ 

Здесь V – напряжение на конденсаторе при расчете переходных процессов. При расчете частотных характеристик (режим AC) емкость считается постоянной величиной, определяемой в рабочей точке по постоянному току;

– температурный фактор

**TF** = 1 + **TC1**\*(**T**-**Tnom**) + **TC2**\*(**T**-**Tnom**)\*(**T**-**Tnom**);

– Монте-Карло фактор

MF=1 ±<pазброс в процентах, DEV или LOT>/100.

#### 2.3. Модель индуктивности (Inductor)

#### Формат схем:

Атрибут PART: *<имя>* 

Атрибут VALUE: <значение> [IC=<начальный ток>]

Индуктивность, определяемая параметром *<значение>*, может быть числом или выражением, включающим в себя изменяющиеся во времени переменные, например 10+I(L2)\*2.

Эти выражения можно использовать только при анализе переходных процессов. В режиме АС эти выражения вычисляются для значений переменных в режиме по постоянному току.

После ключевого слова IC указывается значение тока через катушку индуктивностей при расчете режима по постоянному току, которое при расчете переходных процессов служит начальным значением этого тока.

Атрибут MODEL: [имя модели]

Атрибут FREQ: [<выражение>] – например 10u\*(F/10), при этом значение атрибута FREQ заменяет значение атрибута VALUE при проведении AC-анализа (здесь F – частота), при расчете переходных процессов индуктивность равна значению атрибута VALUE.

#### Параметры модели индуктивности

L – масштабный множитель индуктивности (значение по умолчанию 1).

IL1 – линейный коэффициент тока (значение по умолчанию  $0 A^{-1}$ ).

IL2 – квадратичный коэффициент тока (значение по умолчанию 0 А<sup>-2</sup>).

ТС1 – линейный температурный коэффициент индук-

тивности (значение по умолчанию  $0^{0}C^{1}$ ).

**TC2** – квадратичный температурный коэффициент индуктивности (*значение по умолчанию*  $0^{0}C^{2}$ ).

Если в описании опущено *«имя модели»*, то индуктивность равна параметру *«значение»* в Генри, в противном случае она определяется выражением

где

– фактор нелинейности

#### $\mathbf{QF} = \mathbf{1} + \mathbf{IL}\mathbf{1}^{*}\mathbf{I} + \mathbf{IL}\mathbf{2}^{*}\mathbf{I}^{*}\mathbf{I}.$

Здесь **I** – ток через катушку индуктивности при расчете переходных процессов. При расчете частотных характеристик (режим AC) индуктивность считается постоянной величиной, определяемой в рабочей точке по постоянному току;

– температурный фактор

**TF** = 1 + **TC1**\*(**T**-**Tnom**) + **TC2**\*(**T**-**Tnom**)\*(**T**-**Tnom**);

– Монте-Карло фактор

MF=1 ±<pазброс в процентах, DEV или LOT>/100.

# 2.4. Модель взаимной индуктивности и магнитный сердечник (К)

#### Формат схем:

Атрибут PART: *<имя>* 

Атрибут INDUCTORS: <*имя индуктивности>* <*имя* индуктивности>\*

Порядок перечисления имен индуктивностей *Lyyy*, *Lzzz* ... безразличен, знак взаимной индуктивности определяется порядком перечисления узлов в описании каждой индуктивности.

Атрибут COUPLING: <коэффициент связи>

Параметром взаимной индуктивности является *<коэффициент связи>*, который может принимать значения от 0 до 1.

Атрибут MODEL: [имя модели]

#### Параметры модели магнитного сердечника

**AREA** – площадь поперечного сечения магнитопровода (*значение по умолчанию* 1 см<sup>2</sup>).

РАТН – средняя длина магнитной силовой линии (*значение по умолчанию* 1см).

GAP – ширина воздушного зазора (значение по умолчанию 0 см).

MS – намагниченность насыщения (значение по умолчанию 400 <sup>·</sup>10<sup>3</sup> А/м).

А – параметр формы безгистерезисной кривой намагничивания (*значение по умолчанию* 25А/м).

С – постоянная упругого смещения доменных границ (значение по умолчанию 0,001).

К – постоянная подвижности доменов (значение по умолчанию 25).

ALPHA – параметр магнитной связи доменов (*значение по умолчанию* 0,001).

#### 2.5. Модель линии передачи (Transmission line)

#### Формат схем:

Атрибут PART: *<имя>* 

Атрибут VALUE:

Z0=<значение> [TD=<значение>] | [F=<значение>
 [NL=<значение>]] – для идеальной линии передач без потерь;
 LEN=<значение> R=<значение> L=<значение>
 G=<значение> C=<значение> – для линии передач с потерями.

Атрибут MODEL: [имя модели]

Модель линии передачи характеризуется следующими параметрами.

#### Параметры модели линии передачи

#### Идеальная линия без потерь

**Z0** – волновое сопротивление (размерность Ом).

**ТD** – время задержки сигнала (размерность с).

**F** – частота для расчета NL (размерность Гц).

NL – электрическая длина на частоте F (значение по умолчанию 0,25).

#### Линия с потерями

**R** – погонное сопротивление (размерность Ом/м).

L – погонная индуктивность (размерность Гн/м).

G – погонная проводимость( размерность См/м).

С – погонная емкость (размерность  $\Phi/M$ ).

**LEN** – Длина линии (размерность м).

Линия передач без потерь при расчете переходных процессов выполняет роль линии задержки, при расчете частотных характеристик она представляет собой безынерционное звено. Для линии передач с потерями аналитически рассчитывается комплексный коэффициент передачи линии.

### 2.6. Модель Диода (Diode) и стабилитрона (Zener) 2.6.1. Основные сведения

Формат схем: Атрибут PART: *<имя>* Атрибут VALUE: *[Area]* [OFF] *[IC=<Vd>]* Атрибут MODEL: *[имя модели]* 

Параметр Area задает коэффициент кратности для учета подключения нескольких параллельных диодов (параметры модели диода умножаются или делятся на эту величину). Параметр IC задает начальное напряжение на диоде Vd при расчете переходных процессов, если на панели Transient Analysis Limits выключена опция Operating Point. Включение OFF исключает слова ключевого ДИОД ИЗ схемы при проведении первой итерации расчета режима по постоянному току.

Модель диода задается директивой

.MODEL <имя модели> (Параметры модели)

Приведем пример модели диода Д104А:

.model D104A D (IS=5.81E-12 RS=8.1 N=1.15 TT=8.28NS CJ0=41.2PF VJ=0.71 M=0.33FC=0.5EG=1.11 XTI=3)

Схема замещения полупроводникового диода (рис. 1) состоит из идеального диода, изображенного в виде нелинейного зависимого источника тока I(V), емкости p–n-перехода С и объемного сопротивления RS.

Ток утечки диода можно учесть, включив параллельно диоду резистор с большим сопротивлением (около 100 МОм). Это также поможет облегчить некоторые проблемы сходимости.

Для диодов с барьером Шоттки ширину запрещенной зоны

EG необходимо выбрать, равной 0,69, в то время как температурный коэффициент тока насыщения XTI должен быть равен 2.

Варакторы очень похожи на плоскостные диоды и поэтому могут быть смоделированы с использованием стандартной модели диода путем выбора соответствующего параметра СЈО, VJ, и М.



Рис. 1. Нелинейная (а) и линейная (б) схемы замещения диода с включением источников внутреннего шума

# 2.6.2. Прямая ветвь вольт-амперной характеристики (BAX)

Выберем для этого модель диода 1N752, представляющую собой стабилитрон.



Рис. 2. Схема для анализа прямой ветви ВАХ

Провести анализ схемы по постоянному току.

| 🛗 DC Analysis Limits 📃 🗖 🔀   |                |                     |              |             |   |  |
|--|----------------|---------------------|--------------|-------------|---|--|
| Run <u>A</u> dd D  | Expand,,,      | Stepping Properties | <u>H</u> elp |             |   |  |
| Sweep<br>Method Name   |                | Range               |              |             |   |  |
| Variable 1 Linear 💌 V1   | •              | 2,0,.05             |              |             |   |  |
| Variable 2 None 💌  | <b>v</b>       | V                   |              |             |   |  |
| Temperature       Number of Points       Maximum Change %         Method       Range       51       5         Linear       27       51       5         Run Options       Normal       ✓ Auto Scale Ranges       Accumulate Plots |                |                     |              |             |   |  |
| Page   | P X Expression | Y Expression        | X Range      | Y Range     | > |  |
|  | 1 V(D1)        | I(D1)               | 2.5,0,0.5    | 0.15,0,0.03 |   |  |
|  |                |                     |              |             |   |  |
|  |                |                     |              |             |   |  |
|  |                |                     |              |             |   |  |

Рис. 3. Окно задания параметров анализа схемы по

постоянному току

Провести анализ прямой ветви ВАХ.



Рис. 4. Прямая ветвь ВАХ

Исследовать параметры, влияющие на прямую ветвь ВАХ в режиме Stepping:

| Stepping   | × |  |  |  |  |  |
|--|---|--|--|--|--|--|
| ✓ 1:D1.I5 2: 3: 4: 5: 6: 7: 8: 9: 10: 11: 12: 13: ▲  | Þ |  |  |  |  |  |
| Step What 15   | J |  |  |  |  |  |
| Erom 2f  |   |  |  |  |  |  |
| Io 20f   |   |  |  |  |  |  |
| Step Value 5f  |   |  |  |  |  |  |
| Step It     Method     Parameter Type          • Yes        • Linear        • Log        • List           • Component        • Model        • Symbolic |   |  |  |  |  |  |
| Change C Step all variables simultaneously C Step variables in nested loops  |   |  |  |  |  |  |
| All On All Off Default <u>OK</u> <u>Cancel H</u> elp   |   |  |  |  |  |  |

Рис. 5. Окно задания параметров Stepping

**IS** – ток насыщения.



Рис. 6. Зависимости ВАХ от изменения тока насыщения

#### N – коэффициент инжекции

| s | tepping                 |                  |                      |            |             |               |                        |                |          |            | × |
|---|-------------------------|------------------|----------------------|------------|-------------|---------------|------------------------|----------------|----------|------------|---|
|   | ✓ 1:D1.N                | 2: 3:            | 4:                   | 5: 6:      | 7:          | 8:            | 9:                     | 10: :          | 11:   1: | 2:   13:   |   |
|   | <u>S</u> tep What       | D1               |                      |            |             |               | <b>•</b> N             |                |          |            | • |
|   | Erom                    | 500m             |                      |            |             |               |                        |                |          |            |   |
|   | Īo                      | 2                |                      |            |             |               |                        |                |          |            |   |
|   | Step <u>V</u> alue      | 300m             |                      |            |             |               |                        |                |          |            |   |
|   | Step It —<br>• Yes      | C No             | Method –<br>© Linear | C Log (    | 🔿 List      | Paran<br>© Co | neter Type<br>omponent | C Mo           | del      | C Symbolic |   |
|   | Change<br>O Step all va | ariables simult. | aneously             | Step value | ariables in | nested loo    | ops                    |                |          |            |   |
|   | All On                  | A                | ll Off               | Defaul     | t           | <u>0</u> K    |                        | <u>C</u> ancel |          | Help       |   |

#### Рис. 7. Окно задания параметров Stepping



Рис. 8. Зависимости ВАХ от изменения коэффициента инжекции

**RS** – объемное сопротивление.

| Stepping               |   |
|------------------------|---|
| ✓ 1:D1.RS              | 2: 3: 4: 5: 6: 7: 8: 9: 10: 11: 12: 13: •   |
| <u>S</u> tep What      | RS V  |
| Erom                   | 5.5   |
| Īo                     | 22  |
| Step <u>V</u> alue     | 3.3   |
| Step It -<br>Yes       | No     Method     Parameter Type       Image: Component Com |
| Change<br>C Step all v | variables simultaneously 💿 Step variables in nested loops   |
| All On                 | All Off Default <u>O</u> K <u>C</u> ancel <u>H</u> elp  |

Рис. 9. Окно задания параметров Stepping



Рис. 10. Зависимости ВАХ от изменения объемного сопротивления

#### 2.6.3. Обратная ветвь вольт-амперной характеристики

Соберем схему для исследования обратной ветви ВАХ.



Рис. 11. Схема для исследования обратной ветви ВАХ

Провести анализ схемы по постоянному току (аналогично п.

1)

| E DC Analysis Limits   |                            |                 |         |              | X |  |
|--|----------------------------|-----------------|---------|--------------|---|--|
| Run     Add     Delete     Expand     Stepping     Properties     Help   |                            |                 |         |              |   |  |
| Method     Name     Range       Variable 1     Linear     V1     12,0,.005       Variable 2     None     Image |                            |                 |         |              |   |  |
| Temperature     Number of Points     Maximum Change %       Method     Range     51     5                      |                            |                 |         |              |   |  |
| Run Options Normal 💌   | 🔽 Auto Scale Ranges 🗌 Acc  | cumulate Plots  |         |              |   |  |
| Page   | P X Expression             | Y Expression    | X Range | Y Range      | > |  |
|  | 1 v(d1)                    | i(d1)           | 3,-12,3 | 0.4,-0.6,0.2 |   |  |
|  |                            |                 | Auto    | Auto         |   |  |
| Auto Auto  |                            |                 |         |              |   |  |
| Specifies temperature values t   | o be used for analysis. To | p[,From[,Step]] |         |              |   |  |

Рис. 12. Окно задания параметров по постоянному току



Рис. 13. Обратная ветвь ВАХ

Исследовать параметры влияющие на обратную ветвь ВАХ.

#### **RL** – сопротивление утечки перехода.

| Stepping   |   |  |  |  |  |  |
|--|---|--|--|--|--|--|
| ✓ 1:D1.RL  | 2: 3: 4: 5: 6: 7: 8: 9: 10: 11: 12: 13: •               |  |  |  |  |  |
| <u>S</u> tep What  | ▶ RL ▼  |  |  |  |  |  |
| Erom   | S00MEG  |  |  |  |  |  |
| Īo   | 2G  |  |  |  |  |  |
| Step <u>V</u> alue   | 300MEG  |  |  |  |  |  |
| Step It  | C No Method Parameter Type Component C Model C Symbolic |  |  |  |  |  |
| Change         C Step all variables simultaneously         Image         All On         All Off         Default         OK         Cancel         Help |   |  |  |  |  |  |
| Steps throu  | gh the listed values.                                   |  |  |  |  |  |

Рис. 14. Окно задания параметров Stepping



**Рис. 15.** Зависимости ВАХ от изменения сопротивления утечки перехода

#### **BV** – напряжение пробоя.

| DC Analysis Limits   |                          |                                 |         |              |  |  |
|--|--------------------------|---------------------------------|---------|--------------|--|--|
| Add     Delete     Expand     Stepping     Properties     Help       Sweep     Method     Name     Range       Variable 1     V1     Image     15,0,.005       Variable 2     None     Image             |                          |                                 |         |              |  |  |
| Temperature     Number of Points     Maximum Change %       Method     Range     51     5       Linear     27     51     5       Run Options     Normal     Image Auto Scale Ranges     Accumulate Plots |                          |                                 |         |              |  |  |
| Page P   | X Expression             | Y Expression                    | X Range | Y Range >    |  |  |
|  | v(d1)                    | i(d1)                           | 4,-16,4 | 0.8,-1.2,0.4 |  |  |
| 📀 🛄 📃 🛄 🛛 🔹 Auto   |                          |                                 |         |              |  |  |
| Auto Auto  |                          |                                 |         |              |  |  |
| Defines the expression for the Y-  | axis. Click the right mo | use button for a variable menu. |         |              |  |  |

Рис. 16. Окно задания параметров Stepping



**Рис. 17.** Зависимости ВАХ от изменения напряжения пробоя

## 2.6.4. Исследование динамического режима работы выпрямительного диода.

Построим схему как на рис. 18.



**Рис. 18.** Схема для исследования динамического режима работы выпрямительного диода

| 任 Voltage Source  | $\overline{\mathbf{X}}$ |  |  |  |  |
|---|-------------------------|--|--|--|--|
| Name       Value         VALUE       Show         Display       Pin Markers         Pin Markers       Pin Numbers    Current        Power   |                         |  |  |  |  |
| PART=V1       Border Do       Fill       Do         VALUE=DC 0 AC 1 0 Pulse -4 4 2n 0 0 40n 80n       Voltage vs. Time       Voltage vs. Time         COST=       POWER=       SHAPEGROUP=Default       Voltage vs. Time         PACKAGE=       Voltage vs. Time       Voltage vs. Time   |                         |  |  |  |  |
| QK       Cancel       Eont       Add       Delete       Browse       Default S         New       Find       Plot       Syntax       IBIS       Help       Save Se         ✓       Enabled       ✓       Help Bar       File Link         None       Pulse       Sin       Exp       PWL       SFFM       Noise       Gaussian       Define         DC       0       AC magnitude       1       AC F         V1       -4       V2       4       AC F         PER       80n       TF       0       TF       0 | ettings                 |  |  |  |  |
| Default Typical Square Triangle Impuls  | e Sawtooth              |  |  |  |  |
|   |                         |  |  |  |  |

Рис. 19. Окно задания параметров генератора

Провести временной анализ схемы.

| Transient Analysis L   | imits                       |   |                                |  |  |  |
|--|-----------------------------|---|--------------------------------|--|--|--|
| Run         Add         Delete         Expand         Stepping         PSS         Properties         Help |                             |   |                                |  |  |  |
| Time Range   | 80n                         | Run Options Normal                          |                                |  |  |  |
| Maximum Time Step  | 0                           | State Variables Zero                        |                                |  |  |  |
| Number of Points 51 V Operating Point Accumulate Plots   |                             |   |                                |  |  |  |
| Temperature Linear 💌   | 27                          | Coperating Point Only                       |                                |  |  |  |
| Retrace Runs   | 1                           | 🔽 Auto Scale Ranges 👘 Periodic Steady State | e                              |  |  |  |
|  | Page P X Expres             | ion Y Expression                            | X Range Y Range >              |  |  |  |
|  | 1 T                         | v(d1)                                       | 8e-8,0,1.6e-8 6,-4,2           |  |  |  |
|  | 1 T                         | v(1)  | 8e-8,0,1.6e-8 6,-4,2           |  |  |  |
|  | 2 T                         | i(d1)                                       | 8e-8,0,1.6e-8 0.012,-0.008,0.C |  |  |  |
|  |                             |   |                                |  |  |  |
|  |                             |   |                                |  |  |  |
| Defines the expressior   | n for the Y-axis. Click the | right mouse button for a variable menu.     |                                |  |  |  |

Рис. 20. Окно задания параметров временного анализа

Построение временной диаграммы работы схемы (представлено на рис. 21).



Рис. 21. Временная диаграмма

При выключении диода сначала разряжается диффузионная ёмкость. Ток через диод мгновенно меняется на противоположный, но прямое напряжение падает до нуля постепенно. Этот участок – время рассасывания неосновных носителей  $t_{pac}$ . При смене полярности напряжения на переходе возникает барьерная ёмкость, которую требуется зарядить. «Зарядка» происходит через резистор  $R_{orp}$  от источника питания, постоянная времени заряда  $\tau = C_6 R_{orp}$ . По мере «зарядки» обратный ток уменьшается до некоторого постоянного значения  $I_0+I_{yt}+I_{trt}$ .

При положительном напряжении у диода возникает и начинает заряжаться диффузионная ёмкость  $C_{d}$ . Ее заряд (процесс накопления неосновных носителей) ведется от источника питания через резистор  $R_{orp}$ . Таким образом, диффузионная ёмкость  $C_{d}$  при включении диода заряжается постепенно, практически не влияя на форму напряжения на диоде.

Время выключения диода много больше времени включения. Время выключения, в течение которого обратный ток велик, называется временем восстановления диода t<sub>восст</sub>.

Импульсные и высокочастотные диоды выполняют точечными с целью уменьшения барьерной ёмкости и, следовательно, ускорения переключения.

#### Изменение параметров модели диода.

Изменение параметра СЈО, ТТ представлено на рис. 22.



Рис. 22. Последовательное изменение параметра СЈО

**СЈО** – барьерная емкость (образуется двумя проводящими слоями полупроводника по обе стороны от границ обедненного слоя, выполняющими роль обкладок конденсатора, и расположенным между ними обедненным слоем, который не проводит электрический ток и играет роль диэлектрика) при нулевом смещении;

ТТ- время переноса заряда.



Рис. 23. Последовательное изменение параметра ТТ

### 2.6.5. Исследование вольт-фарадной характеристики диода



Рис. 24. Схема для исследования вольт-фарадной характеристики диода

| 📕 Voltage Source   |                                   |                 |                 |
|--|-----------------------------------|-----------------|-----------------|
| Name       Value         VALUE       Show         Display       Image         Pin Markers       Pin Names         Pin Markers       Pin Names         PART=V2       Border Do         VALUE       Fill |                                   |                 |                 |
| COST=<br>POWER=<br>SHAPEGROUP=Default<br>PACKAGE=  |                                   | Vol             | tage vs. Time 💌 |
| <u>QK</u> <u>Cancel</u> <u>Font</u>  | <u>A</u> dd <u>D</u> elete Browse | Default Setting |                 |
| New Find Plot  | Syntax IBIS <u>H</u> elp          | Save Settings   |                 |
| Enabled     Help Bar     File Link   |                                   |                 |                 |
| None Pulse Sin Exp PWL   | SFFM Noise Gaussian Define        |                 | 1               |
| DC [0  |                                   | AC Phase        |                 |
| V1 0   | V2 15                             | TD              | 0               |
| TR 1u  | TF 10n                            | PW              | 400n            |
| PER 1u   |                                   |                 |                 |
| Default Typical  | Square Triangle                   | Impulse         | Sawtooth        |
|  |                                   |                 |                 |
|  |                                   |                 |                 |
|  |                                   |                 |                 |
|  |                                   |                 |                 |
|  |                                   |                 | //              |

Рис. 25. Окно задания параметров генератора
| 📕 Transient Analysis Li | mits   |            |                  |                   |                         |             |                  | × |
|-------------------------|--------|------------|------------------|-------------------|-------------------------|-------------|------------------|---|
| Run <u>A</u> dd         | Delet  | e Expand., | Step             | ping PSS          | Properties Help         |             |                  |   |
| Time Range              | 1u     |            | <u>R</u> un Opt  | ions Normal       | •                       |             |                  |   |
| Maximum Time Step       | 0      |            | <u>S</u> tate Va | ariables Zero     | <b>•</b>                |             |                  |   |
| Number of Points        | 51     |            | 🔽 Ope            | rating Point      | C Accumulate Plots      |             |                  |   |
| Temperature Linear 💌    | 27     |            | 🗌 Ope            | rating Point Only | 🔲 Fixed Time Step       |             |                  |   |
| Retrace Runs            | 1      |            | 💌 Auto           | ) Scale Ranges    | 🦳 Periodic Steady State |             |                  |   |
|                         | Page P | X Express  | ion              | Y                 | Expression              | X Range     | Y Range          | > |
|                         | 1      | Т          |                  | v(1)              |                         | 1e-6,0,2e-7 | 20,0,4           |   |
|                         | 2      | v(1)       |                  | c <b>(</b> d1)    |                         | 20,0,4      | 1.75e-10,5e-11,2 |   |
|                         |        |            |                  |                   |                         |             |                  |   |
|                         |        |            |                  |                   |                         |             |                  |   |

Рис. 26. Окно задания параметров временного анализа



Рис. 27. Вольт-фарадная характеристика диода



**Рис. 28.** Вольт-фарадная характеристика диода, изменение барьерной емкости при нулевом смещении (**CJO**).

#### 3. Модели активных электронных компонентов

#### 3.1. Модель биполярного транзистора

### 3.1.1. Основные сведения

Форма описания включения в схему:

#### **PART:** имя

#### VALUE: [area] [OFF] [IC=<vbe>[,vce]]

#### **MODEL:** имя модели

Параметр *Area* задает коэффициент кратности для учета подключения нескольких параллельных транзисторов (параметры модели диода умножаются или делятся на эту величину). Параметр IC задает начальные напряжения на транзисторе при расчете переходных процессов, если на панели Transient Analysis Limits выключена опция Operating Point. Включение ключевого слова OFF исключает транзистор из схемы при проведении первой итерации расчета режима по постоянному току.

Форма описания модели:

.Model <имя модели> NPN [<параметры модели>]; биполярный n-p-n

.Model <имя модели> PNP [<параметры модели>]; биполярный p–n–p

В программе PSPICE используется схема замещения биполярного транзистора в виде адаптированной модели Гумме-ля-Пуна см. рис. 29, которая по сравнению с исходной моделью позволяет учесть эффекты, возникающие при больших смещениях на переходах.

На схемах замещения биполярного n-p-n-транзистора (рис. 9-11) приняты следующие обозначения:  $I_b -$ ток базы;  $I_c -$ ток коллектора;  $I_{be1} -$ ток коллектора в нормальном режиме;  $I_{bc1} -$ ток коллектора в инверсном режиме;  $I_{be2}$ ,  $I_{bc2} -$ составляющие тока перехода база-эмиттер, вызванные неидеальностью перехода;  $I_s -$ ток подложки;  $V_{be}$ ,  $V_{bc} -$ напряжения на переходе "внутренняя база" – эмиттер и "внутренняя база" – подложка;  $V_{bn} -$ напряжение "внутренняя база" –

подложка для режима квазинасыщения; V<sub>bx</sub> – напряжение база – "внутренний коллектор";



**Рис. 29.** Нелинейная схема замещения Гуммеля-Пуна биполярного п–р–п-транзистора

V<sub>ce</sub> – напряжение "внутренний коллектор" – "внутренний эмиттер"; Vj<sub>S</sub> – напряжение "внутренний коллектор" – подложка для NPN-транзистора, напряжение "внутренняя подложка" – коллектор для PNP-транзистора или напряжение "внутренняя база" – подложка для LPNP-транзистора.

Линейная схема замещения биполярного транзистора (см. рис. 30) дополнительно содержит источники флуктуационных токов. Тепловые шумы I<sub>mRB</sub>, I<sub>mRC</sub> и I<sub>mRE</sub>, создаваемые

## резисторами RB, RC и RE, имеют спектральные плотности $S_{RB} = 4kT/R_b$ , $S_{RC} = 4kT/(RC/Area)$ , $S_{RE} = 4kT/(RE/Area)$ .



## Рис. 30. Линейная схема замещения биполярного n-p-n-транзистора с включением источников внутреннего шума

Источники тока I<sub>шВ</sub>, I<sub>шС</sub>, характеризующие дробовой и фликкер-шумы в цепях базы и коллектора, имеют, соответственно, спектральные плотности

В выражении для спектральной мощности теплового шума Area – скалярный коэффициент. Он позволяет учесть параллельное соединение однотипных транзисторов, для чего умножается на следующие параметры:

IS, ISE, ISC, ISS, IKF, IKR, IRB, ITF, CJC, CJS, QCO и делит следующие параметры RE, RC.

Значение коэффициента Area указывается в задании на моделирование при включении транзистора в схему. По умолчанию Area = 1.

## 3.1.2. Исследование параметров модели, влияющих на входную вольт-амперную характеристику биполярного транзистора

Входная вольт-амперная характеристика биполярного транзистора описывается уравнением

$$Vbe = VT \cdot NF \cdot ln\left(\frac{Ic}{IS}\right) + Ic \cdot RE$$

где IS – ток насыщения при температуре 27 °С;

NF – коэффициент неидеальности в нормальном режиме;

RE – объемное сопротивление эмиттера.

Соберем схему для исследования входной вольт-амперной характеристики в Micro-Cap.



**Рис. 31.** Схема для исследования входной вольт-амперной характеристики в Місго-Сар

Параметры источника напряжения (рис. 32).

| 据 Battery  | $\mathbf{X}$                    |
|--|---------------------------------|
| Value<br>VALUE Show  | Show Change                     |
| Display<br>Pin Markers Pin Names Pin Numbers V Current V Power V         | Condition                       |
| PART=V2<br>VALUE=10<br>COST=<br>POWER=<br>SHAPEGROUP=Default<br>PACKAGE= | Border Do Fill Voltage vs. Time |
| <u>QK</u> <u>Cancel</u> <u>Font</u> <u>A</u> dd <u>D</u> elete Browse    |                                 |
| New Find Plot Syntax IBI5 Help   |                                 |
| 🔽 Enabled 🔽 Help Bar File Link   |                                 |
| Closes this dialog box and saves any changes you have made               |                                 |

Рис. 32. Окно задания параметров источника напряжения

Зададим параметры анализа по постоянному току (рис. 33).

| III DC Analysis Limits   |                   |                      |                 |                 | × |
|--|-------------------|----------------------|-----------------|-----------------|---|
| Run <u>A</u> dd De   | lete Expand, Step | ping Properties Help |                 |                 |   |
| Method     Name     Range       Variable 1     Linear     V1     I0,0,.005       Variable 2     Linear     NPN 2N2222     I5     50f,10f,10f |                   |                      |                 |                 |   |
| Temperature     Number of Points     Maximum Change %       Linear     27     51   |                   |                      |                 |                 |   |
| Run Options Normal 💌 🔽 Auto Scale Ranges 🔽 Accumulate Plots  |                   |                      |                 |                 |   |
| Page   | P X Expression    | Y Expression         | X Range         | Y Range         | > |
|  | 1 V(2)            | ic(Q1)               | 0.9,0.525,0.075 | 0.12,-0.03,0.03 | _ |
|  |                   |                      |                 |                 | 1 |

Рис. 33. Окно задания параметров анализа по постоянному току

Изменение тока насыщения IS при температуре 27 °C (рис. 34).



Рис. 34. Входная вольт-амперная характеристика с изменением тока насыщения (IS)

Изменения коэффициента неидеальности NF в нормальном режиме, диапазон изменения коэффициента неидеальности NF сильно увеличен для наглядности (рис. 35).



Рис. 35. Изменения коэффициента неидеальности (NF) в нормальном режиме

Изменение объемного сопротивления эмиттера RE (рис. 36).



Рис. 36. Изменение объемного сопротивления эмиттера (RE)

## 3.1.3. Исследование параметров модели влияющих на выходную вольт-амперную характеристику биполярного транзистора



Влияние коэффициента передачи тока базы BF (рис. 37).

Рис. 37. Изменение коэффициента передачи тока базы (BF)

Исследование изменения коэффициента передачи тока базы BF от тока коллектора IC (рис. 38).



Рис. 38. Изменение коэффициента передачи тока базы BF от тока коллектора (IC)

Изменение коэффициента передачи тока базы BF от тока коллектора IC задается в табличной форме на основании экспериментальных характеристик. Для разных моделей транзисторов максимум BF может наблюдаться как в области малых токов IC, так и в области больших или средних токов IC.

Исследование изменения коэффициента неидеальности перехода база-эмиттер NE (рис. 39).



**Рис. 39.** Изменение коэффициента неидеальности перехода база-эмиттер NE

## 3.1.4. Исследование динамического режима транзистора

Для определения влияния динамических параметров модели биполярного транзистора на переходные процессы соберем следующую схему (рис. 40).



VALUE=DC 0 AC 1 0 Pulse 0 1 10n 0 0 100n 400n

# Рис. 40. Схема для определения влияния динамических параметров модели биполярного транзистора

Проведем анализ схемы во временной области (рис. 41).



Рис. 41. Переходные процессы в схеме на биполярном транзисторе

Для наглядности график входного напряжения V(in) увеличен в 10 раз, а график выходного напряжения V(out) инвертирован и добавлена постоянная составляющая в 10 вольт. Это сделано потому что, исследуемый нами каскад с общим эмиттером усиливает по напряжению примерно в 10 раз и инвертирует сигнал.

Теперь будем варьировать параметры модели биполярного транзистора, влияющие на переходные процессы (рис. 42).



Рис. 42. Переходные процессы в схеме на биполярном транзисторе, изменение емкости коллекторного перехода при нулевом смещении (СЈС)



Рис. 43. Переходные процессы в схеме на биполярном транзисторе, изменение емкости эмиттерного перехода при нулевом смещении (СЈЕ)



**Рис. 44.** Переходные процессы в схеме на биполярном транзисторе, изменение времени переноса заряда в нормальном режиме (TF)



Рис. 45. Переходные процессы в схеме на биполярном транзисторе, изменение времени переноса заряда в инверсном режиме (TR)

# 3.1.5. Измерение емкости обратносмещенного коллекторно-базового перехода Ск

Измерительная схема приведена на рис. 46.



VALUE=DC 0 AC 1 0 Pulse 0 15 0 1u 10n 400n 1u

Рис. 46. Схема для измерения емкости обратносмещенного коллекторно-базового перехода Ск

| 📕 Transient Analysis Li | imits |                |                  |  | . 🗆 🛛 |
|-------------------------|-------|----------------|------------------|--|-------|
| Run <u>A</u> dd         | De    | ete Expand     | , Step           | pping PSS Properties Help                |       |
| Time Range              | 1u    |                | <u>R</u> un Opl  | ptions Normal 💌                          |       |
| Maximum Time Step       | 0     |                | <u>S</u> tate Va | Variables Zero 💌                         |       |
| Number of Points        | 51    |                | 🔽 Ope            | perating Point 🗌 Accumulate Plots        |       |
| Temperature Linear 💌    | 27    |                | 🗌 Ope            | perating Point Only 🔲 Fixed Time Step    |       |
| Retrace Runs            | 1     |                | 🔽 Auto           | ito Scale Ranges 🗌 Periodic Steady State |       |
|                         | Page  | P X Express    | sion             | Y Expression X Range Y Ran               | nge > |
|                         |       | I T            |                  | v(1) 1e-6,0,2e-7 20,0,4                  |       |
|                         |       | 2 V <b>(1)</b> |                  | cbc(Q1) 20,0,4 5e-11,0,1                 | le-11 |
|                         |       |                |                  |  |       |
|                         |       |                |                  |  |       |

Рис. 47. Окно задания параметров для измерения емкости

обратносмещенного коллекторно-базового перехода Ск



Рис. 48. Графики линейно-нарастающего обратного наряжения (вверху) и зависимость емкости обратносмещенного коллекторно-базового перехода Ск от этого напряжения



Рис. 49. График изменения емкости обратносмещенного коллекторно-базового перехода Ск от емкости коллекторно-базового перехода при нулевом смещении (СJС)



Рис. 50. График изменения емкости обратносмещенного коллекторно-базового перехода Ск от коэффициента учитывающего плавность коллекторного перехода (MJC)



Рис. 51. График изменения емкости обратносмещенного коллекторно-базового перехода Ск от контактной разности потенциалов коллекторного перехода (VJC)

Аналогично может быть исследована емкость обратносмещенного эмиттерно-базового перехода.

#### 3.2. Модель полевого транзистора с управляющим

#### р-п-переходом

#### 3.2.1. Основные сведения

PART:<имя >

VALUE: [area] [OFF] [IC=vds[,vgs]]

MODEL: <имя модели >

Параметр *Area* задает коэффициент кратности для учета подключения нескольких параллельных транзисторов (параметры модели диода умножаются или делятся на эту величину). Параметр IC задает начальные напряжения на транзисторе при расчете переходных процессов, если на панели Transient Analysis Limits выключена опция Operating Point. Включение ключевого слова OFF исключает транзистор из схемы при проведении первой итерации расчета режима по постоянному току.

Форма описания модели:

.Model <имя модели>NJF[<параметры модели>]; полевой пканальный

.Model <имя модели > PJF[<параметры модели>]; полевой р-канальный

Полевые транзисторы с управляющим p-n-переходом (Junction FET) описываются моделью Шихмана-Ходжеса в соответствии с эквивалентной схемой (рис. 52).

Заметим, что полевой транзистор обедненного типа характеризуется отрицательными значениями порогового напряжения VTO<0 (для каналов р- и п-типа), а транзистор обогащенного типа – положительными VTO>0.



**Рис. 52.** Нелинейная схема замещения полевого транзистора с управляющим p–n-переходом



**Рис. 53.** Линеаризированная схема замещения полевого транзистора с управляющим p–n-переходом

#### Измерение параметров полевых транзисторов с управляющим переходом

В стандарте Spice имеется несколько видов моделей МОПмоделью Шихмана-Ходжеса транзисторов. Наряду С (Shichman-Hodges) 1, 2 и 3 уровней имеются модели, обычно используемые для описания современных субмикронных транзисторов: BSIM3, BSIM4 и EKV. Все они относятся к В моделям. отличие физикоэлектрическим OT технологических моделей, где текущие значения электрических параметров транзисторов вычисляются B результате решения систем физических уравнений, В электрических моделях они вычисляются по формулам на данных о численных параметров основании значениях электрической Это модели. позволяет ускорить вычисления.

Большая часть параметров формальных электрических моделей не имеет явной физической интерпретации. Такие модели, как и модель Шихмана-Ходжеса 3-го уровня, являются эмпирическими, а их параметры определяются с помощью математической обработки данных тестирования реальных компонентов.

Некоторые из конструктивно - топологических параметров моделей МОП-транзисторов (длина и ширина канала,

емкостей) паразитных ΜΟΓΥΤ быть заданы величины непосредственно в списке параметров модели. Такой способ описания моделей применяется В основном ДЛЯ МОП-транзисторов, дискретных создаваемых ИХ производителями (обычно это модели Шихмана-Ходжеса уровня 3). В таком случае длина канала часто выбирается, условно равной 2 мкм, a ширина канала подбирается чтобы обеспечить реальное такой. значение удельной При проектировании аналоговых ИМС размеры крутизны. всех МОП-транзисторов задает разработчик схемы. Поэтому при описании схем для транзисторов могут быть указаны соответствующие конструктивно-топологические параметры: Μ масштабный (число \_ множитель параллельно МОП-структур); необязательный соединенных ЭТО умолчанию равный 1, L – конструктивная параметр ПО длина канала (в модели пересчитывается в физическую – эффективную длину), W – ширина канала, PS и PD – периметр диффузионных областей, соответственно, истока и стока, AS и AD – площадь диффузионных областей По параметрам вычисляются истока И стока. ЭТИМ паразитные емкости p-n-переходов периферийной и донной частей областей истока и стока. Если значения L и W схеме, тексте модели, заданы и В И Β TO значения.

в тексте модели, игнорируются. При проведении заданные DC-анализа параметры PS, PD, AS, AD можно не задавать, используются поскольку ОНИ ЛИШЬ ДЛЯ вычисления паразитных емкостей. При выполнении аудиторной части исследуются п-канальные МОП-транзисторы, работы описываемые моделями BSIM3, BSIM4 и EKV, входящими стандартной библиотеки Micro-CAP. Для В состав НИХ задаются L и W. Рекомендуется для общности указывать также необязательные в данном виде анализа параметры PS, PD, AS и AD. Все они записываются в одну строку через пробел в окошке ввода поля VALUE диалогового окна задания параметров модели транзистора, например: L=0.18u W=5u PD=11.6u PS=11.6u AD=4p AS=4p. Для самостоятельной части работы студентам выполнения предложены универсальные модели n- и p-ΜΟΓΥΤ быть канальных транзисторов (Шихмана-Ходжеса уровня 3 или BSIM3, 4) или модели серийных дискретных n- и p-канальных МОП транзисторов, в которых размеры уже заданы.

Схема для снятия выходных и передаточных ВАХ пканального МОП-транзистора показана на рис. 54.

Выберем модель BSIM3.

Вид диалогового окна задания параметров анализа для

снятия выходных ВАХ показан на рис. 55.

График выходных ВАХ транзистора с моделью BSIM3 (размеры: L = 0,25 мкм, W = 2,5 мкм) приведен на рис. 56.



Рис. 54. Схема для снятия выходных и передаточных ВАХ п-канального МОП-транзистора

| 🔡 DC Analysis Limits   |                           |                      |         | _ 🗆 🔀        |  |  |
|--|---------------------------|----------------------|---------|--------------|--|--|
| Run <u>A</u> dd D  | elete Expand Stepp        | ping Properties Help |         |              |  |  |
| Method     Name     Range       Variable 1     Linear     VGS     VGS       Variable 2     List     VDS     2,5,10 |                           |                      |         |              |  |  |
| Temperature<br>Method Range<br>Linear V 27   | Number of Poir            | Maximum Change %     |         |              |  |  |
| Run Options Normal 💌   | 🔽 Auto Scale Ranges 🗌 Acc | cumulate Plots       |         |              |  |  |
| Page   | P X Expression            | Y Expression         | X Range | Y Range >    |  |  |
|  | 1 vgs(j1)                 | id(j1)               | 4,-6,2  | 0.06,0,0.012 |  |  |
|  |                           |                      |         |              |  |  |
|  |                           |                      |         |              |  |  |
|  |                           |                      |         | /            |  |  |

**Рис. 55.** Окно задания параметров для снятия выходных и передаточных ВАХ п-канального МОП-транзистора



3.2.2. Передаточная характеристика п-канального

## МОП-транзистора

**Рис. 56.** Передаточная характеристика п-канального МОП-транзистора, изменение напряжения затвор-исток (Vds)



Рис. 57. Передаточная характеристика п-канального МОПтранзистора, изменение коэффициент пропорциональности для тока стока (Beta)



Рис. 58. Передаточная характеристика n-канального МОПтранзистора, изменение барьерного потенциала перехода Шотки (VT0)

## 3.2.3. Исследование выходных вольт-амперных

#### характеристик

Для исследования выходных ВАХ проведем анализ по постоянному току (рис. 59).

| DC Analysis Limits  |                           |                      |         | _ 🗆 🔀            |  |  |
|---|---------------------------|----------------------|---------|------------------|--|--|
| Run Add   | elete Expand,,, Step      | ping Properties Help |         |                  |  |  |
| Method     Name     Range       Variable 1     Linear     VDS     -0.5,15,.05       Variable 2     List     VGS     0,-1,-2 |                           |                      |         |                  |  |  |
| Temperature<br>Method Range<br>Linear 💌 27  | Number of Poir            | Maximum Change % –   |         |                  |  |  |
| Run Options Normal 💌  | 🔽 Auto Scale Ranges 🗌 Acc | cumulate Plots       |         |                  |  |  |
| Page  | P X Expression            | Y Expression         | X Range | Y Range >        |  |  |
|   | 1 vds(j1)                 | id(j1)               | 20,-5,5 | 0.06,-0.015,0.01 |  |  |
|   |                           |                      |         |                  |  |  |
|   |                           |                      |         |                  |  |  |
|   |                           |                      |         |                  |  |  |

**Рис. 59.** Окно задания параметров для исследования выходных ВАХ







Рис. 61. Выходные ВАХ при изменении коэффициент пропорциональности для тока стока (Beta)

## 3.3. Измерение параметров полевых транзисторов с

#### изолированным затвором

#### 3.3.1. Основные сведения





Форма описания модели:

.Model <имя модели> NMOS [<параметры модели>]: полевой МОП п-канальный

.Model < имя модели > PMOS [<параметры модели>] рканальный

На рис. 62 представлена нелинейная схема замещения МОПтранзистора с каналом n-типа. При включении МОП-транзистора в схему можно указать значения необязательных параметров.

Существуют несколько уровней модели МОП-транзисторов.

1. Шихмана-Ходжеса.

2. Гроува–Фромана MOS2 (SPICE 3F5).

3. Эмпирическая модель MOS3 (SPICE 3F5).

4. Оригинальная BSIM-модель BSIM1 (Berkeley-модель короткоканального IGFET).

5. Модель BSIM 2-го поколения BSIM2.

6. Модель BSIM 3-го поколения BSIM3 V3.2.4 A2/2001).

7. Модель BSIM 4-го поколения BSIM4 BSIM4.4.0 С/4/2004).

8. Зарядовая модель короткоканального прибора EKV 2.6,

предложенная Швейцарским институтом технологий (Swiss Institute of Technology).

На практике чаще всего используется модель первого уровня Level=1. Она применяется при грубых расчетах, когда высокой точности не требуется. По умолчанию, если параметр Level не указан при описании модели, используется модель МОП - транзистора первого типа.

Отметим основные достоинства и недостатки модели первого уровня:

• наименьшее время вычисления из всех моделей благодаря простоте уравнений;

• не учитывается зависимость подвижности носителей от электрического поля;

• не рассматривается подпороговый режим;

• не учитывается зависимость порогового напряжения от параметров L и W;

• все емкости рассчитываются упрощенно;

• не учитывается неоднородность легирования.

• Модель Level=2 основана на более точных теоретических построениях, однако ряд ее параметров трудно оценить по экспериментальным данным. При этом модель достаточно сложна, требует больших затрат на моделирование, и при расчете режима по постоянному току могут возникнуть проблемы сходимости метода Ньютона – Рафсона.

Полуэмпирическая модель Level=3 требует меньших вычислительных затрат, и ее рекомендуется использовать для практических расчетов мощных вертикальных МОПтранзисторов с коротким каналом. Ее недостаток заключается

в сложности оценки параметров математической модели по экспериментальным данным, но все равно это сделать проще, чем для модели Level=2.

Модель Level=4 (BSIM1) основана на физике работы транзисторов с малыми размерами и рассчитана на получение параметров моделей, изготовленных образцов с помощью специальной программы, управляющей работой тестера полупроводниковых приборов.

Модели Level=5 (BS1M3) более точно описывают субмикронные МОП-транзисторы и непрерывно модифицируются.

Сведения для первых трех моделей МОП-транзистора являются общими. Часть параметров модели МОП-транзистора задается на входном языке программы PSPICE – это параметры L, W, AD, AS, PD, PS, NRD, NRS, NRG, NRB и M (см. форму включения транзистора в схему). При этом значения по умолчанию параметров L, W, AD и AS устанавливаются с помощью директивы .Options. Очень удобен параметр M достаточно для каждой технологии занести в библиотеку моделей параметры модели МОП-транзистора с длиной канала 1 мкм и затем учитывать изменение длины.

#### Уравнения для шумов MOSFET

Уравнения для шумов, приведенные ниже, применяются в моделях уровней (Level) 1, 2, 3, 4, 5 и в модели EKV. Также они используютя для моделей BSIM3 (Level 8) и BSIM4 (Level 14) в том случае, если модельный параметр NLEV указан. Если NLEV не определен, то для расчета шумов моделей, указанных уровней, используются исходные модели BSIM3 и BSIM4.

Паразитный тепловой шум резисторов:

Irg^2 =  $4 k^T / RG$ 

 $Ird^2 = 4 k^T / RD$ 

 $Irs^2 = 4 k^T / RS$ 

 $Irb^2 = 4*k*T / RB.$ 

Канальный дробовой и фликер-шумы:

 $Ichannel^2 = Ishot^2 + Iflicker^2.$ 

Внутренний фликер-шум:

- если NLEV = 0Iflicker^2 = KF\*Idrain^AF / ( COX \* Leff^2 \* f )

- если NLEV = 1 Iflicker^2 = KF\*Idrain^AF / ( COX \* Weff \* Leff \* f )

- если NLEV = 2 or 3 Iflicker^2 = KF\*gm^2 / (COX \* Weff

\* Leff \* f^AF )

Внутренний дробовой шум:

a = 1 - Vds/Vdsat если Vds <= Vdsat (линейная область),

и а=0 во всех остальных случаях.

### 3.3.2. Исследование модели \$BSIM3\_N

Для исследования модели МОП-транзистора соберем следующую схему.



Рис. 63. Схема для исследования модели МОП-транзистора

Исследуем для начала передаточную характеристику.

| III DC Analysis Limits  |                |         |                 |  |  |  |
|---|----------------|---------|-----------------|--|--|--|
| Run Add Delete Expand Step  | pping          |         |                 |  |  |  |
| Method     Name     Range       Variable 1     Linear     VGS     -0.5,15,.05       Variable 2     Linear     VDS     9,1,2 |                |         |                 |  |  |  |
| Temperature     Number of Points     Maximum Change %       Method     Range     51     5                                   |                |         |                 |  |  |  |
| Run Options Normal 💌 🔽 Auto Scale Ranges 🗌 Act  | cumulate Plots |         |                 |  |  |  |
| Page P X Expression   | Y Expression   | X Range | Y Range >       |  |  |  |
|   | id(m1)         | 20,-5,5 | 0.00075,0,0.000 |  |  |  |
|   |                |         |                 |  |  |  |
|   |                |         |                 |  |  |  |
| Runs the analysis.  |                |         |                 |  |  |  |





Рис. 65. Передаточная характеристика при изменении напряжения сток-исток (Vds)

## Исследуем выходные ВАХ.

| DC Analysis Limits  |                             |                |         | X               |  |  |
|---|-----------------------------|----------------|---------|-----------------|--|--|
| Run Add Delete Ex   | xpand, Stepping Properties. | . <u>H</u> elp |         |                 |  |  |
| Method     Name     Range       Variable 1     Linear     VDS     -0.5,15,.05       Variable 2     Linear     VGS     9,1,2 |                             |                |         |                 |  |  |
| Temperature<br>Method Range<br>Linear V 27  | Number of Points Maximum Ch | ange %         |         |                 |  |  |
| Run Options Normal 🔽 🔽 Auto Scale   | Ranges 🔲 Accumulate Plots   |                |         |                 |  |  |
| Page P XE   | Expression Y                | Expression     | X Range | Y Range >       |  |  |
| 📀 🛄 📃 🧾 1 vds(m1)   | id(m1)                      |                | 20,-5,5 | 0.00048,-0.0001 |  |  |
|   |                             |                |         |                 |  |  |
|   |                             |                |         |                 |  |  |
|   |                             |                |         |                 |  |  |

Рис. 66. Окно задания параметров для исследования выходных ВАХ



**Рис. 67.** Выходные ВАХ при изменении напряжения затвор-исток (Vgs)
## 3.3.3. Исследование модели \$BSIM4\_N

Исследуем теперь более совершенную модель \$BSIM4\_N, которая отличается наличием участка пробоя.



**Рис. 68.** Схема для исследования модели МОП-транзистора \$BSIM4\_N

| 📰 DC Analysis Limits   |               |                 |      |         |              |  |  |
|--|---------------|-----------------|------|---------|--------------|--|--|
| Run <u>A</u> dd <u>D</u> elete Exp   | and, Stepping | Properties Help |      |         |              |  |  |
| Method     Name     Range       Variable 1     Linear     VDS     0,4,.05        |               |                 |      |         |              |  |  |
| Variable 2 Linear VG5 V 2,1,0.2  |               |                 |      |         |              |  |  |
| Temperature     Number of Points     Maximum Change %       Linear     27     51 |               |                 |      |         |              |  |  |
| Run Options Normal 💌 🗹 Auto Scale Ranges 🗌 Accumulate Plots                      |               |                 |      |         |              |  |  |
| Page P X Ex  | pression      | Y Expression    |      | X Range | Y Range >    |  |  |
| 오 🛄 📃 🧾 🔟 1 vds(m1)  | id(m1)        |                 | 5,0, | ,1 0.0  | 006,0,0.0001 |  |  |
|  |               |                 |      |         |              |  |  |
|  |               |                 |      |         |              |  |  |
|  |               |                 |      |         |              |  |  |

**Рис. 69.** Окно задания параметров для исследования выходных ВАХ модели МОП-транзистора \$BSIM4\_N



Рис. 70. Выходные ВАХ при изменении напряжения затвор-исток (Vgs)

# 3.3.4. Исследование стандартной модели МОП-транзистора



**Рис. 71.** Схема для исследования стандартной модели МОП-транзистора

|   |  | _ 🗆 🔀  |  |  |  |  |  |
|---|--|--|--|--|--|--|--|
| Run     Add     Delete     Expand     Stepping     Properties     Help  |  |  |  |  |  |  |  |
| Method     Name     Range       Variable 1     Linear     VDS     0,4,.05       Variable 2     None     VGS     2,1,0.2 |  |  |  |  |  |  |  |
| Temperature     Number of Points     Maximum Change %       Method     Range     51     5                               |  |  |  |  |  |  |  |
| Run Options Normal 💌 🗹 Auto Scale Ranges 🔽 Accumulate Plots   |  |  |  |  |  |  |  |
| Y Expression  | X Range  | Y Range >  |  |  |  |  |  |
| id(m1)  | 5,0,1  | 0.01,0,0.002   |  |  |  |  |  |
|   |  |  |  |  |  |  |  |
|   |  |  |  |  |  |  |  |
|   | epping Properties   Range   0,4,.05   2,1,0.2   Points   Maximum Change %   5   Accumulate Plots   Y Expression   id(m1) | epping Properties   Range   0,4,.05   2,1,0.2   roints   Maximum Change %   5   Accumulate Plots   Y Expression   X Range   id(m1)     5,0,1 |  |  |  |  |  |

Рис. 72. Окно задания параметров для исследования выходных ВАХ стандартной модели МОП-транзистора



Рис. 73. Выходные ВАХ при изменении ширины канала (W)



**Рис. 74.** Выходные ВАХ при изменении порогового напряжения при нулевом напряжении подложки (VT0)

#### Общие атрибуты

Общие атрибуты указываются у всех моделей элементов.

Атрибут РАСКАGE <имя пакета> позволяет задавать имя корпуса элемента, что позволяет передавать это имя в РСВ файл, необходимый для программ, разводящих платы. Например: DIP14.

Атрибут COST :<себестоимость> определяет себестоимость компонента, которая затем используется в перечне материалов при определении общей себестоимости схемы. Значение себестоимости может быть определено как во время задания компонента, так и в поле Cost редактора компонентов Component editor.

Атрибут POWER:<мощность> определяет мощность, потребляемую этим компонентом, это используется в перечне материалов при определении общей потребляемой мощности схемы. Значение мощности может быть определено как во время задания компонента, так и в поле Power редактора компонентов Component editor.

77

#### Список литературы

1. Усилительные устройства [текст]/ И. Г. Мамонкин, – Москва: Связь, 1977. – 357 с.

2. Электроника: учебное пособие для приборостроит. спец. вузов. [текст]/ Гусев В.Г., Гусев Ю.М. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Высш. шк., 1991. – 622 с.

3. Электроника: полный курс лекций. [текст]/ В.А.
Прянишников. – 3-е изд., испр. и доп. – Санкт-Петербург:
Учитель и ученик: КОРОНА–принт, 2003. – 416 с.

4. Применение операционных усилителей и линейных интегральных схем. [текст]/ Л. Фолкенберри. – Москва: Мир, 1995. – 250 с.

5. Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство: [текст]/ У. Титце, К. Шенк, пер. с нем. – Москва: Мир, 1982. – 512 с.

6. Проектирование активных фильтров: [текст]/ Г.
Мошиц, П. Хорн пер. с англ.– Москва: Мир, 1984. – 320 с.

7. Избирательные RC-усилители. [текст]/ Масленников В.В., Сироткин А.П. – Москва: Энергия, 1980. – 217 с.

78

### Кравец Андрей Владимирович

#### Учебно-методическое пособие

по курсу

## Схемотехника аналоговых электронных устройств Часть 3

Ответственный за выпуск Кравец А.В. Редактор Селезнева Н.И. Корректор Селезнева Н.И.

Подписано в печать

Заказ № Тираж 20 экз.

Формат 60х84 1/16. Усл. п.л. – 5,0. Уч.-изд. л. – 4,9.

Издательство Южного федерального университета 344091, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1. Тел. (863)2478051. Отпечатано в отделе полиграфической, корпоративной и сувенирной продукции ИПК КИБИ МЕДИА ЦЕНТРА ЮФУ.