

# Уровни представления интегральных операционных усилителей при схемотехническом моделировании

Юрий ЗИНИН  
umz42@mail.ru

**В статье рассмотрены эквивалентные схемы замещения, параметры и особенности представления Spice-моделей интегральных операционных усилителей (ИОУ) при моделировании электронных схем в программе MicroCAP 9. Рассмотрены параметры моделей ИОУ трех уровней. Реальные характеристики ИОУ получают при 3-м уровне (level) моделирования.**

С момента создания в 1960-х годах первых операционных усилителей (ОУ) улучшаются их параметры. Фирмы National Semiconductor (NSC) и Texas Instruments (TI) являются ведущими в мире производителями интегральных микросхем (ИМС) операционных усилителей различного назначения, сочетающих передовой уровень технологии и схемотехники. Основанная в 1959 году фирма National Semiconductor прошла путь от изготовления первых дискретных транзисторов до выпуска современных микроэлектронных устройств. Одно из приоритетных направлений современной электронной промышленности — это разработка интегральных операционных усилителей, объем производства которых в настоящее время фирмой National Semiconductor составляет около 1 млрд изделий в год.

Корпорация Linear Technology, основанная в 1981 году в США, определила своим основным направлением разработку и изготовление высококачественных линейных операционных усилителей, компараторов, источников опорного напряжения, линейных стабилизаторов и других интегральных микросхем (ИМС). Использование ИМС позволяет эффективно решать широкий круг задач по разработке электронной аппаратуры. Микросхемы с операционными усилителями нашли широкое применение в различных устройствах и системах — от сотовых телефонов до MP3-проигрывателей, от автомобильной электроники и медицинских приборов до военной и космической аппаратуры.

В настоящее время определились ведущие мировые производители аналоговых интегральных микросхем — National Semiconductor, Analog Devices, Texas Instruments, Linear Technology, Maxim Integrated Products, STMicroelectronics.

В то же время развивается и метод схемотехнического моделирования, который стал универсальным и эффективным инструментом для инженеров электронной техники. Первая версия программы схемотехнического моделирования MicroCAP (Microcomputer Circuit Analysis Program) фирмы Spectrum Software появилась в 1981 г. и быстро завоевала популярность в нашей стране, потому что не предъявляла высоких требований к компьютерам. Сейчас широко распространена версия программы MicroCAP 9.0.4.1, но уже появилась версия 9.0.5. Компьютерное моделирование основано на использовании Spice-моделей, в распространении которых, в первую очередь, заинтересованы производители электронных компонентов. Сейчас все системы схемотехнического моделирования используют модели электронных компонентов, принятых в Spice совместимых программах.

Для удобства использования Spice-моделей разработано много программ схемотехнического моделирования, количество которых также постоянно увеличивается. Многие фирмы, производители электронных компонентов, разрабатывают все новые специализированные программы-симуляторы, ориентированные на использование своих компонентов или их приложений, обеспечивающих, например, возможность моделирования импульсных устройств, в которых используются ИМС.

Программа MicroCAP относится к числу универсальных симуляторов аналоговых и дискретных схем. Spice-модели в программе MicroCAP, как и в DesignLab, OrCAD, Multisim, включены в состав стандартных библиотек компонентов и имеют индивидуальное условное графическое обозначение [1–6].

MicroCAP создает и анализирует текстовые файлы стандарта Spice, Spice3 и PSpice, а также свои собственные схематические файлы. Симулятор MicroCAP можно использовать для создания и исследования разработанных схемотехнических моделей или для создания их текстовых файлов (subckt), на языке Spice. В MicroCAP используются также Spice subckt модели, представленные производителями электронных компонентов. Совместимость со Spice-моделями и возможности конвертирования позволяют пользователю MicroCAP применять разработки, предназначенные для DesignLab и OrCAD.

Математические модели ОУ основаны на формальном сходстве между поведением модели и объекта относительно внешних выводов. При этом уравнения модели выводятся из физических представлений о работе прибора, путем экспертного подбора функциональных зависимостей для наилучшей аппроксимации характеристик. С целью минимизации погрешности моделирования используются методы среднеквадратической аппроксимации параметров. В практике схемотехнического моделирования долгое время применялись математические модели, однако последние 10 лет подавляющее большинство разработчиков интегральных схем (ИС) в основном работают с физическими моделями, они позволяют прогнозировать поведение ИС при изменении электрофизических параметров.

На важность моделирования операционных усилителей как компонентов электронной схемы указывает то, что в 1995 году в рамках альянса предприятий полупроводниковой промышленности Electronic Industry Alliance (EIA) был создан совет по компактным моделям (Compact Model Council), в который вошли лидирующие фирмы: AMD, Analog Devices,

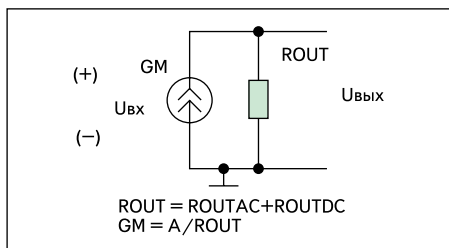


Рис. 1. Модель операционного усилителя первого расчетного уровня (LEVEL 1) в программе MicroCAP

Avanti, BTA Technology, Cadence Design System, Conexant System, Hewlett Packard, Hitachi, Motorola, IBM, Intel, Lucent Technology, NEC, Philips System, Texas Instruments и др.

Задачей совета является стандартизация и решение проблем качества моделей. За время работы совета было сделано много поправок в описаниях моделей, разработаны процедуры их верификации. Работы по усовершенствованию моделей проводятся также в рамках Semiconductor Association, членами которой являются 148 компаний полупроводниковой промышленности. Вопросы метрологии, аттестации, верификации и тестирования полупроводниковых моделей разрабатываются и в отделе полупроводниковой электроники NIST (Национального института стандартов США).

В программе схемотехнического моделирования MicroCAP 9, как и в других программах-симуляторах, использующих Spice-описания компонентов и моделей, в зависимости от поставленных задач исследований возможны различные уровни представления ИОУ. MicroCAP 9 позволяет представить операционный усилитель моделями трех уровней, основанных на моделях электронных компонентов, принятых в Spice.

Усилитель (OPAMP) уровня LEVEL 1 (идеальный ИОУ) — простейшая линейная модель, представляющая источник тока, управляемый напряжением. ИОУ имеет конечное входное и бесконечное выходное сопротивление, тем не менее, выводы питания ИОУ при схемотехническом моделировании нужно подключить к источнику питания, так как в модели они подсоединены к «земле» через сопротивление 1 Ом.

На рис. 1 приведена эквивалентная схема и параметры схемотехнической модели идеального операционного усилителя (Ideal model OPAMP), где RoutAC и RoutDC — выходное сопротивление на постоянном и переменном токе для ИОУ. Эти величины, устанавливаемые по умолчанию, приведены в таблице. Источник постоянного тока  $GM = A / Rout$ . Параметр A определяет коэффициент усиления ИОУ.

На рис. 2 показана панель Spice-модели идеального (\$IDEAL) операционного усилителя. Слева приведен полученный график Bode Plot, показывающий постоянство коэффициента усиления при изменении рабочей час-

Таблица. Параметры моделей ИОУ

Параметр и уровень моделирования	Наименование параметра	Величина по умолчанию
LEVEL, 1-3	Уровень модели (1, 2, 3)	1
TYPE, 3	Тип входного транзистора: 1-NPN; 2-PNP, 3-JFET	1
C, 3	Емкость коррекции, Ф	$30 \times 10^{-12}$
A, 1-3	Коэффициент усиления на постоянном токе	$2 \times 10^5$
ROUTAC, 1-3	Выходное сопротивление переменному току, Ом	75
ROUTDC, 1-3	Выходное сопротивление постоянному току, Ом	125
VOFF, 3	Напряжение смещения нуля, В	0,001
IOFF, 3	Разность входных токов смещения, А	$10^{-9}$
SRP, 2-3	Максимальная скорость нарастания выходного напряжения, В/с	$5 \times 10^5$
SRN, 2-3	Максимальная скорость спада выходного напряжения, В/с	$5 \times 10^5$
IBIAC, 3	Входной ток смещения, А	$10^{-7}$
VCC, 3	Напряжение отрицательного питания, В	-15
VEE, 3	Напряжение положительного питания, В	15
VPS, 3	Максимальное положительное выходное напряжение, В	13
VNS, 3	Максимальное выходное отрицательное напряжение, В	-13
CMRR, 3	Коэффициент подавления синфазного сигнала	$10^5$
GBW, 2-3	Площадь усиления (произведение коэффициента усиления A на частоту первого полюса)	$10^6$
PM, 2-3	Запас по фазе на частоте единичного усиления, град	60
PD, 3	Потребляемая мощность, Вт	0,025
IOSC, 3	Выходной ток короткого замыкания, А	0,02

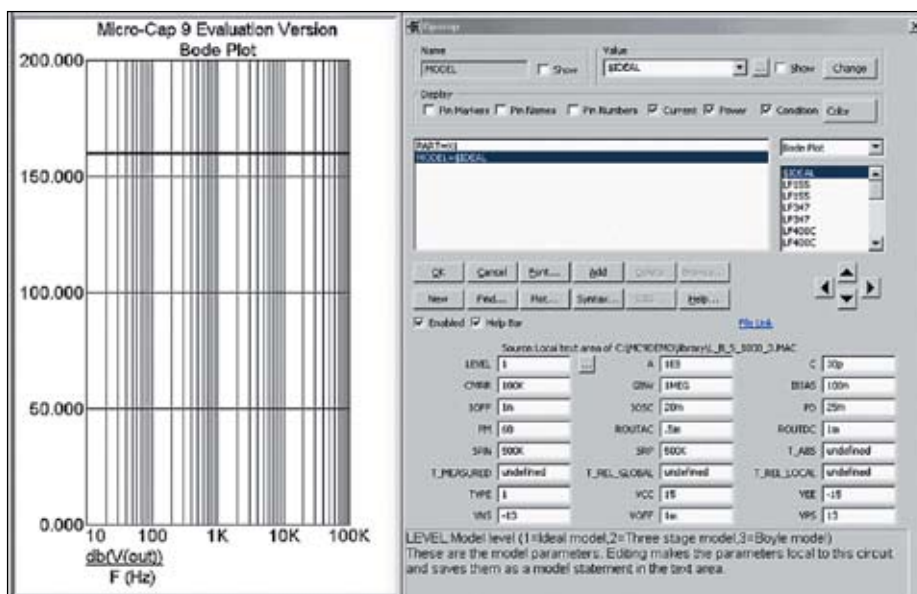


Рис. 2. Панель Spice-модели идеального операционного усилителя и его ЛАЧХ

тоты ИОУ первого уровня моделирования. У аналогового ИОУ, используемого в программе MicroCAP, выходное сопротивление может зависеть от частоты сигнала, сопротивления и типа нагрузки, глубины отрицательной обратной связи (ООС), поэтому такой уровень модели часто неприемлем. Эти недостатки устраняются в Spice-модели ИОУ второго уровня.

Уровень LEVEL 2 — более сложная линейная модель, состоящая из трех каскадов и имитирующая два полюса передаточной

функции ИОУ. Но и она имеет ограничение по скорости нарастания выходного напряжения, у нее конечный коэффициент усиления и величина выходного сопротивления (75 Ом по постоянному току и 150 Ом по переменному току, устанавливаемому по умолчанию, согласно таблице).

На рис. 3 показана схемотехническая модель операционного усилителя второго расчетного уровня. Второй уровень моделирования ИОУ решает паллиатив между точностью представления расчетной модели и вычислительными

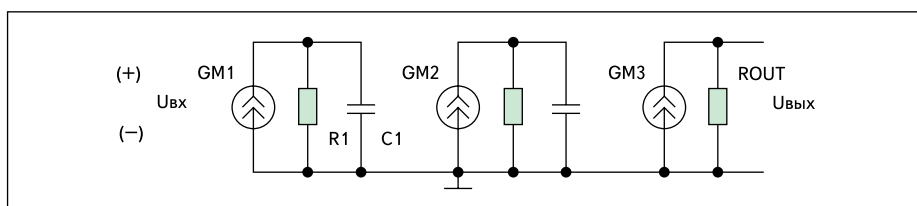


Рис. 3. Модель операционного усилителя второго расчетного уровня

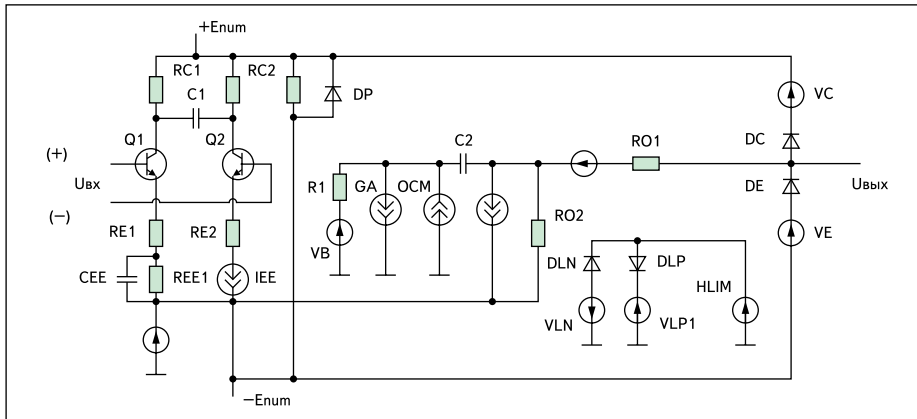


Рис. 4. MicroCAP модель операционного усилителя третьего уровня

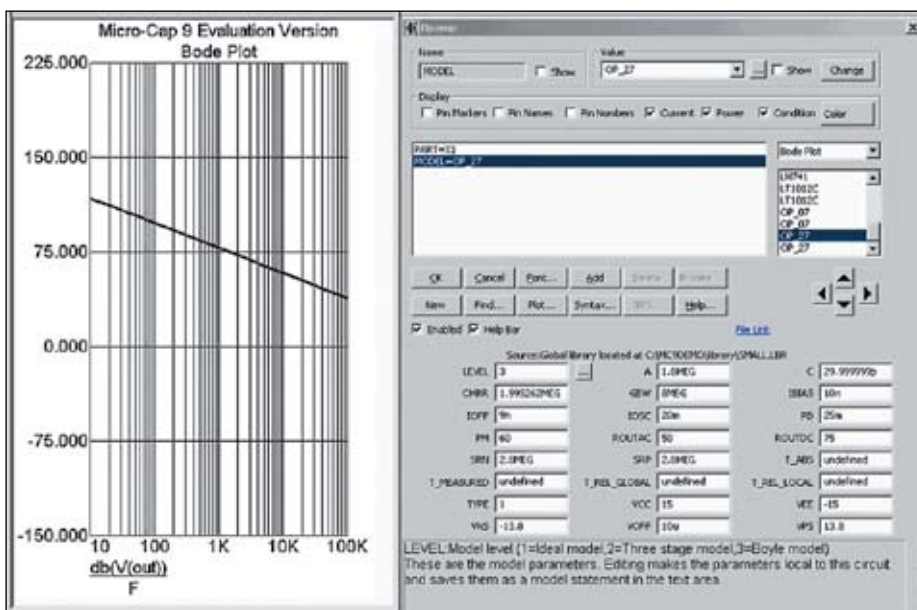


Рис. 5. Параметры Spice-модели третьего уровня для операционного усилителя OP\_27 (LEVEL 3) и ЛАЧХ в области звуковых частот

На рис. 5 приведена характеристика  $db(V(out))$  (Bode Plot — график Боде) модели ИОУ третьего уровня (Boyle model 03) для ИМС OP\_27. Диаграмма показывает ЛАЧХ для области звуковых частот.

Модель операционного усилителя (OPAMP) в формате схем MicroCAP задается по директиве: MODEL <имя модели> OPA [список параметров]. Параметры моделей ИОУ приведены в таблице.

На рис. 6 показан файл MicroCAP, в котором представлены модели ИОУ трех рассмотренных уровней: the ideal model O1 (LEVEL 1), the two pole model O2 (LEVEL 2) и the Boyle model O3 (LEVEL 3). Имена моделей ИОУ: модель 1-го уровня — MODEL O1 OPA; модель 2-го уровня — MODEL O2 OPA; модель 3-го уровня — MODEL O3 OPA. Дано математическое описание модели ИОУ — в программе Spice. Ниже приведен список параметров моделей, использованных при схемотехническом моделировании. Параметры моделей могут указываться непосредственно в окне схемотехнической модели:

```
.MODEL O1 OPA (LEVEL=1 A=1e6 ROUTAC=50 ROUTDC=75);
.MODEL O2 OPA (LEVEL=2 A=1e6 ROUTAC=50 ROUTDC=75
SRP=4MEG SRN= 3MEG GBW=5MEG PM=60);
.MODEL O3 OPA
(LEVEL=3 C=30P A=1E6 ROUTAC=50 ROUTDC=75 VOFF=0.0
IOFF=0.0 SRP=4MEG SRN= 3MEG IBIAS=800n VEE=-15 VCC=15
VPS=12 VNS=-12 CMRR=100Meg GBW=5MEG PM=60 PD=0.25
IOSC=0.025).
```

По степени универсальности использования модели ИОУ можно разделить на статические и динамические, для малого и большого сигналов, низкочастотные и высокочастотные. Наиболее точной и универсальной является динамическая высокочастотная модель большого сигнала — ИОУ 3-го уровня. В MicroCAP модели 3-го уровня используются для расчета по постоянному току, анализа переходных процессов и частотного анализа.

Малосигнальные модели 2-го уровня проще и описываются линейными уравнениями, они используются при воздействии малых приращений сигнала, когда ВАХ ИОУ можно

ресурсами ЭВМ. Эту модель как основу используют другие программы моделирования электронных схем, например Design Center и др. В программе Spice часть параметров модели этого уровня вводится пользователем, другая определяется по умолчанию.

На рис. 4 показана нелинейная модель MicroCAP (LEVEL 3), аналогичная той, что применяется в программе Spice. В ней учитываются ограничения на скорость нарастания выходного напряжения, значения выходного сопротивления на постоянном и переменном токе, ток и напряжение смещения, запас по фазе на частоте единичного усиления, площадь усиления, коэффициент подавления синфазного сигнала, допустимые значения выходного напряжения и тока (согласно таблице). Возможен выбор типа транзисторов входного дифференциального каскада. Таким образом, в отличие от программы PSpice, в которой ИОУ описывается как макромодель, в программе MicroCAP могут использоваться встроенные модели ИОУ, что упрощает ра-

боту с ними и повышает скорость моделирования [2].

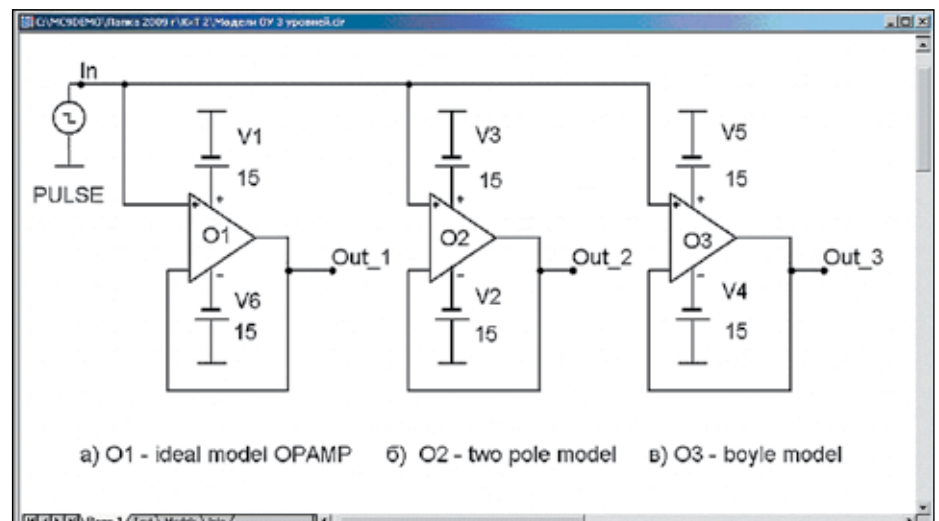


Рис. 6. Уровни представления моделей ИОУ



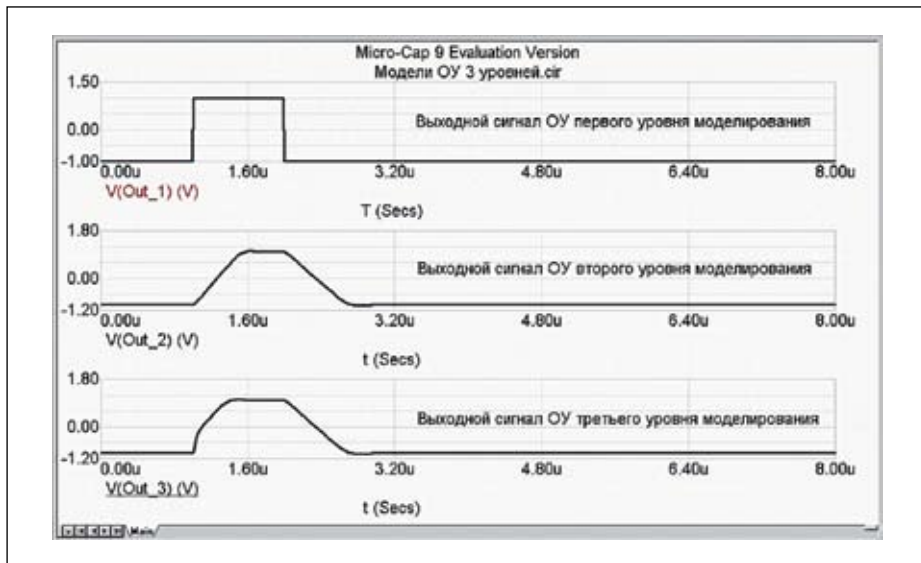


Рис. 7. Передача фронта импульсного сигнала моделями ОУ различного уровня

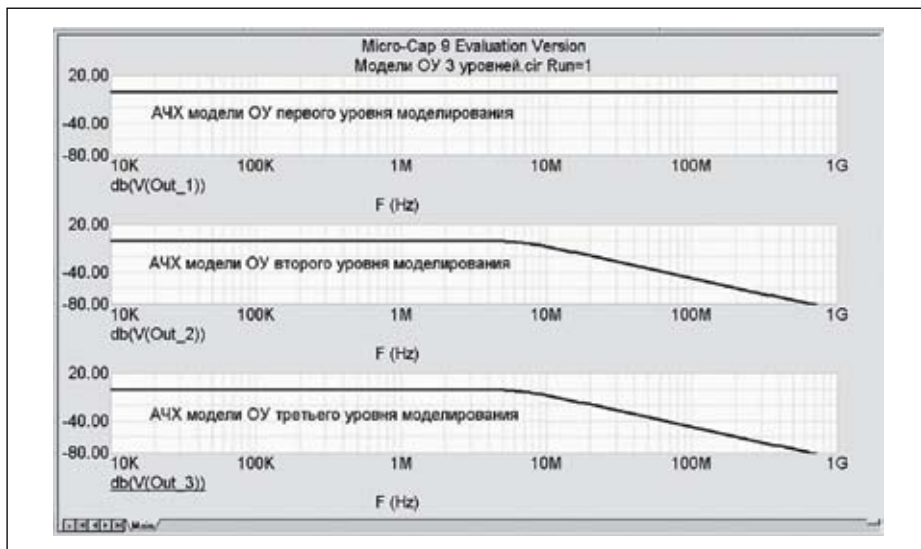


Рис. 8. Графики АЧХ моделей ИОУ различного уровня

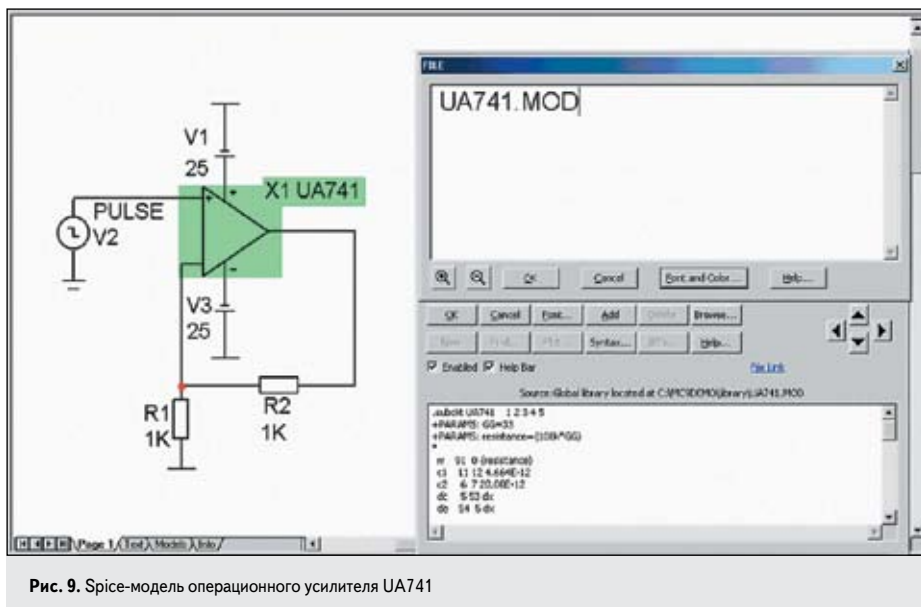


Рис. 9. Spice-модель операционного усилителя UA741

считать линейной в окрестности рабочей точки. В Spice эти модели используются для расчетов в частотной области. Встроенные Spice-модели активных компонентов являются динамическими моделями большого сигнала и действительны для не очень высоких частот. Высокочастотные модели (выше 100 МГц) должны учитывать паразитные эффекты. Все модели ИОУ имеют одинаковые условные графические обозначения.

В отличие от программы PSpice, в которой модель ИОУ описывается только как макромодель, в программе MicroCAP наряду с макромоделями используются и встроенные модели ОУ (LEVEL = 1, 2, 3), что упрощает работу с ними и повышает скорость моделирования.

На рис. 6 показаны встроенные модели MicroCAP различного уровня представления, которые используются разработчиками в зависимости от поставленных целей моделирования. Отрицательная обратная связь, использованная при моделировании ОУ, придает ему свойства повторителя напряжения.

Импульсный источник на входе ИОУ позволяет исследовать переходные характеристики. Источник описывается PSpice-моделью:

```
.MODEL PULSE PUL (P1=1u P2=1.u P3=2u P4=2u P5=10u VONE=1 VZERO=-1).
```

На рис. 7 показаны графики анализа переходного процесса на выходах ИОУ при действии на входе моделей импульсного сигнала.

На рис. 8 приведены графики Боде (АЧХ) для моделей усилителей, полученные при анализе их частотных свойств. Графики показывают, что усилитель О1 имеет идеальный график, который не выявляет зависимости коэффициента усиления при изменении частоты входного сигнала. Амплитудно-частотные характеристики моделей усилителей О2 и О3 одинаковы. В частотном анализе программа MicroCAP автоматически заменяет импульсный источник сигнала синусоидальным источником с переменной частотой.

В настоящее время программа MicroCAP способна, по паспортным данным, создавать макромодели необходимых моделей в Spice-формате.

На рис. 9 представлена Spice subckt макромодель операционного усилителя UA741 из библиотеки MicroCAP. В макросе использованы модели транзисторов различной проводимости:

```
.MODEL QPL PNP (BF=10 CJC=4P CJE=6P RB=20 VAF=50 TF=1N TR=20N) и .MODEL QNL NPN (BF=80 CJC=2P CJE=3P RB=100 VAF=50 TF=300P TR=6N CJS=2P).
```

На рис. 10 приведены компоненты внутренней структуры интегрального операционного усилителя UA741. Диоды представлены в виде эмиттерно-базовых p-n-переходов транзисторов.

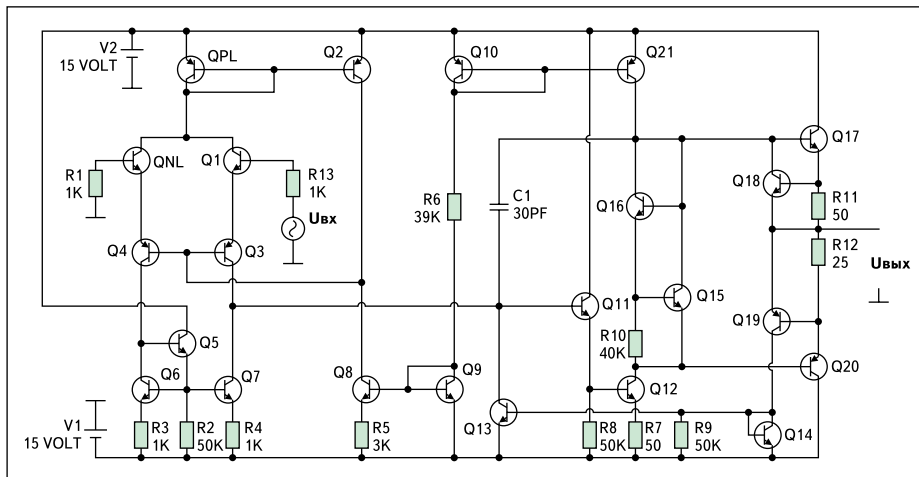


Рис. 10. Схематехническая модель операционного усилителя UA741

Пользователь не может изменять встроенные математические модели резисторов, конденсаторов, транзисторов, можно только изменять значение их параметров и в последней версии MicroCAP учитывать паразитные параметры, важные при моделировании на высоких частотах. Новые макромодел, составляемые пользователями, используют стандартные компоненты, которые описываются одним–тремя параметрами. Модели биполярных транзисторов являются сложными моделями и характеризуются 52 параметрами [2].

Если необходимой модели нет в библиотеке пользователя MicroCAP, на сайте производителя можно найти ее Spice-модель или использовать аналог. Таким образом моделируются достаточно сложные устройства, в которых содержатся макроэлементы полупроводниковых компонентов различных производителей [7–10].

### Литература

1. Разевиг В.Д. Система схематехнического моделирования MicroCAP V. М.: СОЛОН, 1997.

2. Antognetti P., Moniri M. Semiconductor Device Modeling with SPICE. McGraw-Hill, Second Edition, 1993.
3. Колпаков А. САПР схематехнического моделирования. Практика и психология разработки // Электронные компоненты. 2008, № 5.
4. Златин И. Новые возможности программы схематехнического моделирования MicroCAP // Компоненты и технологии. 2007. № 10.
5. Болотовский Ю., Таназлы Г. Опыт моделирования систем силовой электроники в среде OrCAD 9.2 // Силовая электроника. 2008. № 3.
6. [www.spectrum-soft.com](http://www.spectrum-soft.com)
7. Зинин Ю., Рахимова И. Мостовая схема тиристорного инвертора тока для установок индукционного нагрева металлов // Силовая электроника. 2009. № 3.
8. Зинин Ю.М. Определение длины воздушного зазора в сердечнике для дросселей и трансформаторов // Компоненты и технологии. 2009. № 5.
9. Валиуллина З., Егоров А., Есаулов А., Зинин Ю. Исследование средствами схематехнического моделирования нелинейного дросселя переменного тока в составе тиристорного высокочастотного инвертора // Силовая электроника. 2008. № 2.
10. Дюсьметов М., Егоров А., Есаулов А., Задирака И., Рахимова И. Проектирование мощного источника питания постоянного тока с применением анимированных компонентов симулятора — evaluation-версии программы схематехнического моделирования MicroCAP 9 // Электромеханика, электротехнические комплексы и системы. Межвузовский научный сборник. Уфа, 2008.