

ВЫСШЕЕ ОБРАЗОВАНИЕ

# ПРОГРАММА СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ MICRO-CAP Версии 9, 10



М. А. Амелина  
С. А. Амелин



E.LANBOOK.COM

# СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ .....	11
ПРЕДИСЛОВИЕ .....	13
ВВЕДЕНИЕ .....	14
<b>1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ПРОГРАММАХ MICRO-CAP 9, 10 .....</b>	<b>17</b>
1.1. Возможности программ Micro-Cap 9, 10 .....	17
1.1.1. Графические возможности .....	17
1.1.2. Моделирование .....	18
1.1.3. Синтез аналоговых фильтров .....	20
1.1.4. Создание новых моделей компонентов .....	20
1.1.5. Основные возможности обработки результатов анализа .....	21
1.2. Отличительные особенности Micro-Cap 9, 10 по сравнению с Micro-Cap 8 .....	22
<i>Контрольные вопросы</i> .....	32
<b>2. КРАТКИЙ ОЗНАКОМИТЕЛЬНЫЙ ЭКСКУРС .....</b>	<b>33</b>
2.1. Основные возможности Micro-Cap .....	33
2.2. Идеология работы с программой Micro-Cap .....	34
2.2.1. Терминология .....	34
2.2.2. Порядок анализа электронных устройств при помощи Micro-Cap .....	34
2.2.3. Создание схемы для моделирования .....	35
2.2.4. Особенности построения схем для моделирования .....	39
2.2.5. Основные виды анализа электронных схем .....	40
2.2.6. Дополнительные виды анализа электронных схем .....	43
2.2.7. Вывод результатов расчетов .....	45
2.2.8. Особенности моделирования схем с отечественными компонентами .....	45
2.2.9. Моделирование неэлектрических воздействий .....	47
2.2.10. Особенности анализа цифровых схем .....	47
2.2.11. Совместное использование цифровых и аналоговых компонентов .....	48
2.3. Основные правила моделирования электронных устройств с использованием программ схемотехнического анализа .....	48
2.4. Русификация Micro-Cap и выбор стандартов УГО .....	52
2.4.1. Использование русскоязычного интерфейса .....	52
2.4.2. Использование разных стандартов УГО .....	52
2.5. Примеры построения и анализа электронных схем .....	54
2.5.1. Транзисторный каскад по схеме с общим эмиттером .....	54
2.5.2. Получение семейства ВАХ биполярного транзистора при помощи Stepping .....	59
2.5.3. Получение семейства ВАХ биполярного транзистора при помощи DC Analysis .....	62
2.5.4. Использование функциональных блоков .....	62
2.5.5. Создание собственных макромоделей .....	63
2.5.6. Тиристорный регулятор мощности .....	66
2.5.7. Анализ процессов в двухтактном преобразователе напряжения .....	68
2.5.8. Использование макромоделей ШИМ-контроллера для моделирования импульсного стабилизатора напряжения .....	72
2.5.9. Использование непрерывной модели преобразователя напряжения .....	77
2.5.10. Синтез и моделирование цифрового автомата .....	80
2.5.11. Расчет интермодуляционных искажений усилителя .....	85

2.5.12. Использование wav-файлов .....	90
Контрольные вопросы .....	93
<b>3. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ПРОГРАММЕ .....</b>	<b>94</b>
3.1. Установка Micro-Cap .....	94
3.2. Основные файлы каталога Micro-Cap .....	95
3.2.1. Корневой каталог MC9, MC10 .....	95
3.2.2. Подкаталог DATA .....	96
3.2.3. Подкаталог LIBRARY .....	98
3.3. Описание графического интерфейса .....	99
3.3.1. Главное окно программы .....	99
3.3.2. Основные команды меню .....	101
3.3.3. Пункт меню FILE (рис. 3.2) .....	101
3.3.4. Пункт меню EDIT (рис. 3.3) .....	104
3.3.5. Пункт меню COMPONENT .....	110
3.3.6. Пункт меню WINDOWS .....	119
3.3.7. Пункт меню OPTIONS .....	120
3.3.8. Пункт меню ANALYSIS .....	140
3.3.9. Пункт меню DESIGN .....	142
3.3.10. Пункт меню MODEL .....	142
Контрольные вопросы .....	143
<b>4. ФОРМАТЫ ЗАДАНИЯ КОМПОНЕНТОВ .....</b>	<b>144</b>
4.1. Общие сведения .....	144
4.2. Схемный текст .....	148
4.3. Числа .....	149
4.4. Переменные .....	149
4.5. Параметры моделей, внутренние узлы и компоненты схемных макро и подсхем .....	153
4.6. Примеры выражений, используемых в Micro-Cap .....	154
4.7. Математические выражения и функции .....	154
4.7.1. Арифметические операции .....	155
4.7.2. Операции с логическими переменными .....	155
4.7.3. Трансцендентные функции .....	155
4.7.4. Булевы операции и операции отношения .....	157
4.7.5. Предельные и условные операторы .....	157
4.7.6. Операторы обработки сигналов .....	158
4.7.7. Операторы численного интегрирования и дифференцирования .....	159
4.7.8. Специальные функции .....	160
4.7.9. Функции генерации случайных чисел RND .....	162
4.7.10. Функции статистического анализа Monte Carlo (MC10) .....	162
4.7.11. Примеры использования выражений с переменными в MC9, MC10 .....	162
4.8. Правила использования выражений и переменных .....	163
4.9. Текстовые директивы .....	165
.AC — малосигнальный частотный анализ схемы .....	165
.ARRAY — объявление массива чисел .....	166
.DC — анализ на постоянном токе .....	167
.DEFINE — присвоение значений и задание функций .....	167
.ELIF — условный оператор .....	168
.ELSE — условный оператор .....	169
.END — конец текстового файла .....	169
.ENDIF — окончание условного блока .....	169
.ENDS — конец определения подсхемы .....	170

.ENDSPICE — конец SPICE-текста .....	170
.FUNC — определение функции .....	170
.HELP — текстовая подсказка .....	170
.IC — задание начальных условий .....	171
.IF — условный оператор .....	171
.INCLUDE — включение текстового файла .....	172
.LIB — подключение файлов библиотек компонентов .....	172
.MACRO — задание определений макросов .....	174
.MODEL — описание модели компонента .....	174
.NODESET — задание начального приближения для режима по постоянному току .....	177
.NOISE — задание параметров режима анализа шумов .....	178
.OP — вывод результатов рабочей точки .....	178
.OPTIONS — установки значений глобальных параметров .....	178
.PARAM — задание параметров .....	178
.PARAMETERS — задание параметров схем .....	179
.PATH — указание путей расположения информации .....	179
.PLOT — построение графиков .....	180
.PRINT — управление файлом числового вывода .....	180
.SENS — установки анализа чувствительности .....	180
.SPICE — начало SPICE-текста .....	180
.STEP — параметры многовариантного анализа .....	181
.SUBCKT — директива определения подсхемы на языке SPICE .....	181
.TEMP — задание температуры анализа .....	183
.TF — установки анализа малосигнальных передаточных функций .....	183
.TIE — соединение одноименных выводов компонентов одного типа .....	183
.TR — задание максимальных шагов по времени в режиме TRANSIENT .....	183
.TRAN — установки анализа переходных процессов .....	184
.WARNING — вывод предупреждающих сообщений .....	184
.WATCH .....	185
<i>Контрольные вопросы</i> .....	186
<b>5. МОДЕЛИ АНАЛОГОВЫХ КОМПОНЕНТОВ</b> .....	187
5.1. Общие сведения о моделях компонентов .....	187
5.2. Пассивные компоненты .....	188
5.2.1. Резистор (Resistor) .....	189
5.2.2. Конденсатор (Capacitor) .....	193
5.2.3. Катушка индуктивности (Inductor) .....	197
5.2.4. Взаимная индуктивность и магнитный сердечник (K) .....	201
5.2.5. Трансформатор (Transformer) .....	205
5.2.6. Длинная линия (Tline) .....	206
5.3. Источники сигналов .....	209
5.3.1. Независимые источники постоянного напряжения и тока .....	209
Точка нулевого потенциала или общий провод (Ground) .....	209
Источник постоянного напряжения (Battery) .....	209
Фиксированное смещение для аналоговых цепей (Fixed Analog) .....	209
Источник постоянного тока (Isource) .....	209
5.3.2. Источники сигнала, зависящего от времени (в формате Micro-Cap) .....	210
Источник импульсного напряжения (Pulse source) .....	210
Источник синусоидального напряжения (Sine source) .....	211
Источник напряжения, задаваемый пользовательским файлом (User source) .....	213
Источник напряжения, задаваемый WAV-файлом (MC10) .....	215
5.3.3. Независимые источники напряжения и тока сложной формы формата SPICE .....	216

Источник импульсного сигнала (PULSE) .....	217
Источник синусоидального сигнала (SIN) .....	218
Источник одиночного импульса с экспоненциальными фронтами (EXP) .....	219
Источник синусоидального сигнала с частотной модуляцией (SFFM) .....	221
Источник кусочно-линейного сигнала (PWL) .....	222
Источник шумового сигнала (NOISE) .....	223
Источник импульсов Гаусса (Gaussian) .....	224
5.4. Линейные и нелинейные зависимые источники .....	226
5.4.1. Линейные и полиномиальные зависимые источники .....	226
5.4.2. Линейные управляемые источники, задаваемые преобразованием Лапласа и Z преобразованием .....	230
5.4.3. Функциональные источники сигналов .....	235
5.5. Специальные компоненты .....	237
5.5.1. Ключи типа Switch .....	237
5.5.2. S-ключ (V-switch), управляемый напряжением (рис. 5.46) .....	238
5.5.3. W-ключ (I-switch), управляемый током (рис. 5.47) .....	241
5.5.4. Устройство выборки-хранения (Sample and Hold) (рис. 5.49) .....	242
5.5.5. Таймер (Timer) (рис. 5.51) .....	244
5.5.6. Стрелки (Arrow) и контакты (Bubble) (рис. 5.52) .....	245
5.6. Макромодели .....	245
5.6.1. Макромодели в виде схемы формата Micro-Cap (MACRO circuit) .....	245
5.6.2. Макромодели в виде текстовой подсхемы на языке SPICE .....	247
5.7. Элементы анимации .....	253
5.7.1. Аналоговая индикаторная линейка (Animated analog bar) (рис. 5.54) .....	253
5.7.2. Цветные светодиоды (Animated analog LED) (рис. 5.55) .....	254
5.7.3. Двигатель постоянного тока (Animated DC motor) (рис. 5.56) .....	254
5.7.4. Ключи типа DPST, SPDT, SPST (Animated DPST Switch, Animated SPDT Switch, Animated SPST switch) (рис. 5.57) .....	255
5.7.5. Вольтамперметр (Animated meter) (рис. 5.58) .....	256
5.7.6. Электромагнитное реле (Animated relay) (рис. 5.59) .....	257
5.7.7. Трехцветный индикатор (Animated traffic light) (рис. 5.60) .....	258
5.7.8. Цифровой сигнальный ключ (Animated Digital switch) (рис. 5.61) .....	258
5.7.9. Цифровой индикатор (Animated Digital LED) (рис. 5.62) .....	258
5.7.10. Семисегментный индикатор (Animated Seven segment) (рис. 5.63) .....	259
5.8. N-полюсники .....	260
5.9. IBIS-компонент .....	262
5.10. Встроенные схемные макромодели и подсхемы .....	262
Контрольные вопросы .....	271
<b>6. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ .....</b>	<b>272</b>
6.1. Анализ переходных процессов .....	272
6.1.1. Краткие теоретические сведения .....	272
6.1.2. Задание параметров моделирования Transient Analysis Limits .....	274
6.1.3. Меню режимов расчета переходных процессов Transient .....	282
6.1.4. Задание начальных значений и редактирование переменных состояния .....	285
6.1.5. Использование команды печати данных (P) .....	287
6.1.6. Использование числового (табличного) вывода данных .....	288
6.1.7. Методы расчета режима по постоянному току (Operating Point Methods) .....	289
6.1.8. Использование при моделировании движковых регуляторов (Sliders) .....	291
6.2. Анализ по переменному току на малом сигнале .....	292
6.2.1. Краткие теоретические сведения .....	292
6.2.2. Правила составления задания для частотного анализа .....	294
6.2.3. Задание параметров моделирования AC Analysis Limits .....	295

6.2.4. Меню режимов расчета частотных характеристик АС .....	303
6.2.5. Расчет уровня внутреннего шума .....	304
6.2.6. Дополнительная информация по проведению АС анализа .....	311
6.3. Анализ передаточных функций по постоянному току .....	313
6.3.1. Задание параметров моделирования DC Analysis Limits .....	313
6.3.2. Меню режимов расчета передаточных функций DC .....	319
6.3.3. Использование табличного вывода данных .....	320
6.3.4. Проблемы сходимости .....	320
6.4. Динамический анализ режима по постоянному току .....	320
6.4.1. Особенности использования кнопок отображения режима по постоянному току в Transient, АС и DC анализе .....	322
6.4.2. Окно Dynamic DC Limits .....	323
6.5. Динамический анализ малосигнальных передаточных функций в частотной области .....	325
6.5.1. Установки диалогового окна Dynamic AC Limits .....	325
6.6. Анализ чувствительностей на постоянном токе .....	329
6.6.1. Установки диалогового окна Sensitivity Analysis .....	330
6.6.2. Пример использования анализа чувствительности .....	332
6.7. Анализ малосигнальных передаточных функций на постоянном токе .....	332
6.7.1. Диалоговое окно анализа Transfer Function .....	333
6.8. Анализ нелинейных искажений в MC9 .....	334
6.9. Анализ искажений в MC10 .....	338
6.9.1. Анализ гармонических искажений Harmonic Distortion .....	339
6.9.2. Анализ интермодуляционных искажений Intermodulation Distortion .....	350
6.10. Проблемы сходимости при выполнении моделирования .....	363
6.10.1. Определение сходимости .....	363
6.10.2. Что вызывает проблемы сходимости методов расчета .....	364
6.10.3. Контроль сходимости на этапе постановки задачи .....	365
<i>Контрольные вопросы</i> .....	370
<b>7. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОСНОВНЫХ ВИДОВ АНАЛИЗА</b> .....	<b>371</b>
7.1. Многовариантный анализ (Stepping) .....	371
7.1.1. Алгоритм работы режима Stepping .....	372
7.1.2. Диалоговое окно Stepping .....	372
7.2. Статистический анализ по методу Монте-Карло .....	377
7.2.1. Основные сведения об анализе Монте-Карло .....	378
7.2.2. Диалоговое окно Monte Carlo Options .....	384
7.2.3. Использование функций Performance и построение гистограмм .....	387
7.3. Параметрическая оптимизация .....	389
7.3.1. Принцип работы оптимизатора Micro-Cap .....	390
7.3.2. Диалоговое окно Optimize .....	390
7.4. Спектральный анализ (анализ Фурье) .....	397
7.4.1. Принцип работы функций спектрального анализа .....	397
7.4.2. Функции на основе быстрого преобразования Фурье (FFT-функции) .....	399
7.4.3. Пример использования FFT функций .....	402
7.4.4. Закладка FFT диалогового окна Plot Properties .....	405
7.4.5. Окно для построения спектральных функций FFT window .....	408
7.5. Нахождение стационарного режима работы схем с периодическими воздействиями (опция PSS) .....	410
<i>Контрольные вопросы</i> .....	413
<b>8. ПРОСМОТР И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ</b> .....	<b>414</b>

8.1. Дополнительные возможности при построении графиков .....	414
8.1.1. Окно отображения результатов моделирования .....	414
8.1.2. Панорамирование и масштабирование окна результатов моделирования .....	415
8.1.3. Нанесение на графики размерных линий и координат отдельных точек .....	416
8.1.4. Режим Cursog mode .....	418
8.2. Режим электронной лупы Scope .....	419
8.2.1. Возможности меню Scope .....	419
8.2.2. Использование буфера графиков .....	424
8.3. Диалоговое окно Properties .....	425
Plot .....	425
Scales and Formats .....	426
Colors, Fonts, and Lines .....	428
SCOPE .....	429
FFT .....	429
Header .....	430
Numeric Output .....	430
Save Curves .....	430
Tool Bar .....	431
8.4. Использование функций Performance .....	431
8.4.1. Обработка результатов моделирования в режиме Go to Performance .....	432
8.4.2. Использование функций Performance и построение их графиков .....	433
8.4.3. Функции Performance .....	435
8.5. Вывод графиков характеристик в режиме Probe .....	438
8.5.1. Принципы работы постпроцессора Probe .....	439
8.5.2. Команды режима Probe .....	440
8.6. Анимация .....	445
8.6.1. Действия, производимые программой в процессе анимации .....	446
8.6.2. Диалоговое окно Animate Options .....	446
8.7. Трехмерные графики .....	447
<i>Контрольные вопросы</i> .....	451
<b>9. СИНТЕЗ АКТИВНЫХ И ПАССИВНЫХ ФИЛЬТРОВ</b> .....	<b>452</b>
9.1. Математическое описание различных типов фильтров .....	452
9.1.1. Нормированные частотные характеристики для различных фильтров 2-го порядка .....	453
9.2. Синтез активных фильтров .....	454
9.2.1. Окно диалога синтеза активных фильтров. ....	455
9.2.2. Списки компонентов (Component lists) .....	466
9.2.3. Задание параметров фильтра в режиме Mode 1 .....	468
9.2.4. Задание параметров фильтра в режиме Mode 2 .....	471
9.3. Синтез пассивных фильтров .....	472
9.3.1. Математическое описание фильтров .....	473
9.3.2. Диалоговое окно синтеза пассивных фильтров .....	475
<i>Контрольные вопросы</i> .....	479
<b>10. ПРОГРАММА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛЕЙ     АНАЛОГОВЫХ КОМПОНЕНТОВ MODEL</b> .....	<b>480</b>
10.1. Общие сведения о программе MODEL .....	480
10.2. Интерфейс программы MODEL .....	480
10.2.1. Панель инструментов и меню программы MODEL .....	481
10.3. Работа с программой MODEL .....	484
<i>Контрольные вопросы</i> .....	491

<b>11. МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ И ВЫЧИСЛЕНИЕ ИХ ПАРАМЕТРОВ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ MODEL</b> .....	492
11.1. Магнитный сердечник .....	492
11.1.1. Модель магнитного сердечника .....	492
11.1.2. Параметры модели нелинейного магнитного сердечника .....	496
11.1.3. Основные уравнения модели нелинейного магнитного сердечника .....	496
11.1.4. Определение параметров модели в программе MODEL .....	498
11.2. Диод и стабилитрон .....	500
11.2.1. Модель диода (Diode) и стабилитрона (Zener) .....	500
11.2.2. Параметры модели диода .....	500
11.2.3. Основные уравнения работы диода в программе .....	502
11.2.4. Нахождение параметров модели диода .....	504
11.3. Биполярные транзисторы ВJT .....	505
11.3.1. Модель биполярного транзистора ВJT .....	505
11.3.2. Параметры модели биполярного транзистора .....	506
11.3.3. Основные уравнения работы биполярного транзистора в MC9,10 .....	508
11.3.4. Нахождение параметров модели биполярного транзистора .....	513
11.4. Полевые транзисторы JFET .....	516
11.4.1. Модель полевого транзистора JFET .....	516
11.4.2. Параметры модели полевого транзистора .....	516
11.4.3. Основные уравнения математической модели JFET .....	518
11.4.4. Определение параметров модели полевого транзистора JFET .....	520
11.5. МОП-транзисторы MOSFET .....	521
11.5.1. Модель транзистора с изолированным затвором MOSFET .....	521
11.5.2. Параметры модели транзистора с изолированным затвором MOSFET .....	524
11.5.3. Основные уравнения модели MOSFET .....	526
11.5.4. Определение параметров модели МОП-транзистора .....	531
11.6. Операционные усилители OPAMP .....	533
11.6.1. Модель операционного усилителя .....	533
11.6.2. Параметры модели операционного усилителя .....	534
11.6.3. Уравнения модели операционного усилителя .....	537
11.6.4. Определение параметров модели операционного усилителя .....	540
11.7. Арсенид-галлиевые полевые транзисторы GaAsFET .....	541
11.7.1. Модель арсенид-галлиевого полевого транзистора .....	541
11.7.2. Параметры модели арсенид-галлиевого полевого транзистора .....	542
11.7.3. Уравнения математической модели GaAsFET .....	544
11.8. Биполярный транзистор с изолированным затвором IGBT .....	547
11.8.1. Модель IGBT-транзистора .....	547
11.8.2. Уравнения математической модели IGBT .....	548
<i>Контрольные вопросы</i> .....	552
<b>12. ТРАНСЛЯТОР IBIS</b> .....	553
12.1. Что такое IBIS-транслятор .....	553
12.2. Использование IBIS-транслятора .....	553
12.3. Пример трансляции IBIS-файла .....	556
12.4. Пример использования компонентов IBIS .....	560
<i>Контрольные вопросы</i> .....	565
<b>13. МОДЕЛИ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ</b> .....	566
13.1. Основные понятия цифрового моделирования .....	566
13.1.1. Цифровые узлы .....	568
13.1.2. Цифровые состояния .....	568



13.1.3. Временные модели (Timing models) .....	571
13.1.4. Задержки распространения сигналов (Propagation delays) .....	573
13.1.5. Цифровые задержки и интервалы неоднозначности сигналов .....	575
13.1.6. Паразитные импульсы вследствие логических соотязаний .....	576
13.1.7. Интерфейсная модель .....	577
13.2. Модели цифровых компонентов .....	581
13.2.1. Общий формат цифровых примитивов .....	581
13.2.2. Структура модели цифрового компонента .....	585
13.2.3. Цифровые SPICE-примитивы, используемые в Micro-Cap .....	585
13.2.4. Логические вентили (Gates) .....	587
13.2.5. Триггеры .....	591
13.2.6. Подтягивающие резисторы Pullup и Pulldown .....	597
13.2.7. Цифровая безынерционная линия задержки Dlyline .....	598
13.2.8. Программируемые логические матрицы .....	598
13.2.9. Многоразрядные аналого-цифровые преобразователи .....	603
13.2.10. Многоразрядные цифроаналоговые преобразователи .....	606
13.3. Функциональные цифровые блоки .....	607
13.3.1. Логические выражения (Logic Expressions) .....	608
13.4. Генераторы цифровых сигналов (Stimulus generators) .....	611
13.4.1. Генераторы сигналов типа STIM .....	611
13.4.2. Цифровые файловые генераторы сигналов FSTIM .....	616
13.5. Интерфейсная модель (I/O model) .....	619
13.5.1. Цифроаналоговый интерфейс .....	621
13.5.2. Аналого-цифровой интерфейс .....	624
13.5.3. Интерфейсные модели основных серий цифровых интегральных схем .....	626
Интерфейсная модель ТТЛ .....	626
Интерфейсная модель высокоскоростной ТТЛ-серии .....	628
Интерфейсная модель микросхем ТТЛШ .....	628
Интерфейсная модель микросхем КМОП-серии .....	628
Интерфейсная модель микросхем улучшенной КМОП-серии .....	629
Интерфейсная модель микросхем низковольтной КМОП-серии .....	629
Интерфейсная модель микросхем ЭСЛ-серии .....	629
<i>Контрольные вопросы</i> .....	630
<b>ЛИТЕРАТУРА</b> .....	631