

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ</b> .....	11
<b>ПРЕДИСЛОВИЕ</b> .....	13
<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	14
<b>1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ПРОГРАММАХ MICRO-CAP 9, 10</b> .....	17
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> .....	33
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
Контрольные вопросы .....	186
<b>5. МОДЕЛИ АНАЛОГОВЫХ КОМПОНЕНТОВ .....</b>	<b>187</b>
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 AC .....	303
6.2.5. Расчет уровня внутреннего шума .....	304
6.2.6. Дополнительная информация по проведению AC 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, AC 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
Контрольные вопросы .....	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
Контрольные вопросы .....	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 Cursor 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
Контрольные вопросы .....	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
Контрольные вопросы .....	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
Контрольные вопросы .....	491

<b>11. МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ И ВЫЧИСЛЕНИЕ ИХ ПАРАМЕТРОВ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ MODEL .....</b>	<b>492</b>
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 BJT .....	505
11.3.1. Модель биполярного транзистора BJT .....	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
Контрольные вопросы .....	552
<b>12. ТРАНСЛЯТОР IBIS .....</b>	<b>553</b>
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
Контрольные вопросы .....	565
<b>13. МОДЕЛИ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ .....</b>	<b>566</b>
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 состязаний .....	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
Контрольные вопросы .....	630
<b>ЛИТЕРАТУРА .....</b>	<b>631</b>



## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

**АЛУ** — арифметическо-логическое устройство  
**АЧХ** — амплитудно-частотная характеристика  
**АЦП** — аналого-цифровой преобразователь  
**ВАХ** — вольтамперные характеристики  
**ВУЗ** — высшее учебное заведение  
**ВЧ** — высокие частоты  
**ГЛИН** — генератор линейно изменяющегося напряжения  
**ДНФ** — дизъюнктивно нормальная форма записи логических выражений (логическая сумма логических произведений)  
**ЕСКД** — единая система конструкторской документации  
**ИИВЭП** — импульсный источник вторичного электропитания  
**ИМС** — интегральная микросхема  
**ИС** — интегральная микросхема  
**ИТУН** — источник тока, управляемый напряжением  
**КМОП** — комплиментарная логика на структуре металл-окисел-полупроводник  
**КНФ** — конъюнктивно нормальная форма записи логических выражений (логическое произведение логических сумм)  
**КПД** — коэффициент полезного действия  
**ЛАЧХ** — амплитудно-частотная характеристика с логарифмическим масштабом по 2-м осям: оси частот и оси амплитуд  
**МДП** — структура метал-диэлектрик-полупроводник  
**МОП** — структура метал-окисел-полупроводник  
**НЧ** — низкие частоты  
**ООС** — отрицательная обратная связь  
**ОС** — операционная система  
**ОУ** — операционный усилитель  
**ПЗУ** — постоянное запоминающее устройство  
**ПИД** — пропорционально интегрирующее дифференцирующее звено  
**ПЛМ** — программируемая логическая матрица  
**СГС** — система единиц измерения, которая широко использовалась до принятия международной системы единиц (СИ) и продолжает использоваться в физике и астрономии  
**СИ** — международная система единиц измерений  
**ТТЛ** — транзисторно-транзисторная логика  
**УГО** — условное графическое обозначение  
**ФВЧ** — фильтр верхних частот  
**ФК** — фазовый корректор  
**ФНЧ** — фильтр нижних частот  
**ФПЗ** — фильтр полосно-заграждающий  
**ФПП** — фильтр полосно-пропускающий  
**ФЧХ** — фазочастотная характеристика  
**ЦАП** — цифроаналоговый преобразователь  
**ШИМ** — широтно-импульсный модулятор  
**ЭДС** — электродвижущая сила  
**ЭСЛ** — эмиттерно-связанная логика

**3D** — трехмерный

**AC** — переменный ток

**AVG** — среднее значение

**BJT** — биполярный транзистор (Bipolar Junction Transistor)

**BW** — ширина полосы частот сигнала

**CM** — Current Mode, управление относительной длительностью проводящего состояния силового ключа в ИИВЭП с местной обратной связью по току силового ключа

**GaAsFET** — полевой транзистор с управляющим p-n переходом на основе арсенида галлия

**DC** — постоянный ток

**DFF** — синхронный D-триггер, переключающийся по фронту синхроимпульса

**DLTCH** — синхронный D-триггер, управляемый уровнем синхроимпульса (защёлка)

**FFT** — быстрое преобразование Фурье

**IBIS** — спецификация буфера ввода-вывода (*Input output Buffer Information Specification*)

**IFT** — обратное преобразование Фурье

**IGBT** — биполярные транзисторы с изолированным затвором

**IMD** — коэффициент интермодуляционных искажений

**JFET** — полевой транзистор с управляющим p-n переходом (Junction Field Effect Transistor)

**JKFF** — JK-триггер, переключающийся по срезу синхроимпульса

**MC10** — Micro-Cap 10

**MC9** — Micro-Cap 9

**MFB** — многопетлевая обратная связь

**MOSFET** — полевой транзистор со структурой металл-окисел-полупроводник (Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor)

**MS** — Microsoft

**NTSC** — один из стандартов телевизионного сигнала

**OPAMP** — операционный усилитель

**PLA** — программируемая логическая матрица

**PID** — пропорционально интегрирующее дифференцирующее звено

**PSS (Periodic Steady State)** — стационарный режим процесса с периодическими воздействиями

**PWM** — широтно-импульсный модулятор

**RLC** — звено второго порядка на основе соединения резистора, конденсатора и катушки индуктивности

**RMS** — среднеквадратичное значение

**SMPS** — импульсные источники питания

**SNR** — signal to noise ratio, отношение сигнал-шум

**SPICE** — язык моделирования электронных схем

**SRFF** — синхронный RS-триггер, управляемый уровнем синхроимпульса

**UCE** — напряжение коллектор-эмиттер

**URL** — Интернет-адрес

**VM** — Voltage Mode, управление относительной длительностью проводящего состояния силового ключа в ИИВЭП

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Программа схемотехнического анализа Micro-Cap пользуется достаточно большой популярностью. Она имеет удобный, дружелюбный интерфейс и предъявляет скромные требования к программно-аппаратным средствам персонального компьютера. Micro-Cap позволяет анализировать аналоговые, цифровые и смешанные (аналого-цифровые) устройства, осуществлять синтез пассивных и активных фильтров. Опытные пользователи могут в нестандартной ситуации создавать собственные модели и макромодели, облегчающие имитационное моделирование сложных электронных систем.

В книге дано подробное описание двух версий Micro-Cap, что позволяет использовать ее как при работе с версией 9, так и с версией 10.

Авторы более 20 лет используют программы этого семейства (начиная с Micro-Cap II) для проведения научных исследований в области силовой электроники, а также в процессе обучения студентов Смоленского филиала Московского энергетического института («НИУ «МЭИ»). За это время накоплен большой практический опыт и выявлены характерные особенности этой программы, многие из которых отражены в этой книге.

Программа Micro-Cap может представлять интерес для широкого круга людей, занимающихся электроникой или изучающих ее. Её можно рекомендовать студентам электротехнических и радиотехнических специальностей, а также радиолюбителям и инженерам-разработчикам.

Программа Micro-Cap интенсивно используется при изучении курсов «Математическое моделирование в электронике», «Методы математического моделирования», «Современные методы анализа и моделирования электронных устройств», изучаемых на кафедре «Электроника и микропроцессорная техника» Смоленского филиала «НИУ «МЭИ» при подготовке бакалавров и магистров по направлению 210100 «Электроника и нанoeлектроника». Студенты активно используют эту программу при выполнении выпускных работ и курсовых проектов. Кроме того, использование Micro-Cap позволяет студентам глубже осваивать некоторые аспекты таких курсов, как «Электронные цепи и методы их расчета», «Схемотехника», «Магнитные элементы электронных устройств», «Основы преобразовательной техники», «Электронные промышленные устройства» и т.п.

Помимо описания программ Micro-Cap версий 9 и 10, в книге приведены примеры моделирования основных типов электронных устройств, а также изложены приемы, позволяющие проводить моделирование сложных электронных схем с достаточной для инженерной практики точностью.

Все рассматриваемые в книге примеры моделирования доступны в виде исходных файлов по ссылке [book-mc.rar](http://book-mc.rar). Кроме того на сайте <http://microcap-model.narod.ru> размещены дополнительные библиотеки компонентов и их изображений, а также справочные и учебные материалы по моделированию и электронике.

Вопросы по использованию программы Micro-Cap можно задать на форуме <http://microcap.forum24.ru/>.

## ВВЕДЕНИЕ

Micro-Cap — это универсальная программа схемотехнического анализа, предназначенная для решения широкого круга задач. Характерной особенностью этой программы, впрочем, как и всего семейства Micro-Cap [1–4], является наличие удобного и дружелюбного графического интерфейса, что делает его особенно привлекательным для непрофессиональной аудитории. Несмотря на достаточно скромные требования к программно-аппаратным средствам ПК (процессор не ниже Pentium II, ОС Windows 95/98/ME или Windows NT4/2000/XP, память не менее 64 Мб, монитор не хуже SVGA), его возможности достаточно велики. С его помощью можно анализировать не только аналоговые, но и цифровые схемы. Возможно также смешанное моделирование аналого-цифровых электронных устройств, а также синтез фильтров.

Начать работать в Micro-Cap можно даже без глубокого освоения программы. Достаточно ознакомиться со встроенным демонстрационным роликом и посмотреть базовые примеры (их в комплекте около 300). Опытные пользователи, используя обширную библиотеку компонентов и собственные макромодели, могут анализировать сложные электронные системы. Грамотное использование упрощенных допущений позволяет проводить расчеты режимов работы сложных устройств с достаточно высокой степенью точности.

Micro-Cap 9, 10 отличаются от младших представителей своего семейства более совершенными моделями электронных компонентов и алгоритмами расчетов. По возможностям схемотехнического моделирования он находится на одном уровне с интегрированными пакетами ORCAD и PCAD2002 — достаточно сложными в освоении средствами анализа и проектирования электронных устройств, подразумевающими в первую очередь профессиональное использование. Полная совместимость со SPICE-моделями и SPICE-схемами в сочетании с развитыми возможностями конвертирования позволяет использовать в Micro-Cap все разработки и модели, предназначенные для этих пакетов, а полученные навыки моделирования позволят в случае необходимости быстро освоить профессиональные пакеты моделирования.

Micro-Cap 9, 10 предоставляют обширные возможности для анализа силовых преобразовательных устройств. Программа имеет настройки, включение которых оптимизирует алгоритмы для расчета силовых схем, библиотека компонентов содержит большое число обобщенных ШИМ-контроллеров и непрерывных моделей основных типов преобразователей напряжения для анализа устойчивости стабилизированных источников питания на их основе.

Перечисленные достоинства делают программу Micro-Cap весьма привлекательной для моделирования электронных устройств средней степени сложности. Удобство в работе, нетребовательность к ресурсам компьютера и возможность анализировать электронные устройства с достаточно большим количеством компонентов позволяют успешно использовать ее как радиолюбителям и студентам, так и инженерам-разработчикам. Кроме того, программы семейства Micro-Cap активно используются в научно-исследовательской деятельности.

Программа Micro-Cap была разработана в 1982 году фирмой Spectrum Software. Первой версии программы авторам увидеть не довелось, а вот Micro-Cap II уже начиная с 1989 года использовался при обучении студентов

Смоленского филиала МЭИ. За это время авторами накоплен достаточно большой опыт работы с различными версиями этой программы. По нашему твердому убеждению, несколько пренебрежительное отношение к этой программе в среде инженеров-разработчиков электронной техники абсолютно неоправданно. Micro-Cap давно уже вышел из «детского» возраста. Более того, по возможностям моделирования и обработки результатов он уже давно ничем не уступает, а даже превосходит аналогичные программы.

Первые версии Micro-Cap, действительно, были достаточно примитивными и малопригодными для решения реальных инженерных задач схемотехнического проектирования. Они позволяли рассчитывать лишь простые аналоговые схемы. Для расчета цифровых устройств использовалась другая программа той же фирмы – MicroLogic (позднее она была интегрирована в Micro-Cap). Но даже этого вполне хватало для обучения студентов основам электроники.

Более поздние версии программы позволяли решать уже достаточно сложные задачи. С каждой версией росла функциональность, совершенствовались модели и расчетные алгоритмы. На данный момент можно с уверенностью утверждать, что Micro-Cap позволяет проводить моделирование на том же качественном уровне, что и классическая программа схемотехнического моделирования — PSPICE. Более того, Micro-Cap полностью совместим с ней на уровне моделей и подсхем, что позволяет использовать при расчетах обширные SPICE-библиотеки, предлагаемые разработчиками электронных компонентов.

Особо хочется отметить интерфейс программы. Разработчики очень серьезно подходят к этому вопросу, начиная с младших версий. Достаточно сказать, что еще до повсеместного распространения Windows, версия Micro-Cap IV, выпущенная в 1992 году, уже имела очень удобный оконный графический интерфейс, который был совсем не характерен для программ того времени. Этот интерфейс позволял под DOS получать практически все удобства, которые имеют в настоящее время пользователи Windows.

В последующих версиях также много внимания уделялась повышению удобства использования программы. По мнению авторов книги, интерфейс Micro-Cap настолько интуитивно понятен, что позволяет человеку, имеющему базовые навыки работы с персональным компьютером, начать использование этой программы, даже не читая руководство. Разработчиками найден компромисс между простотой и функциональностью. В нем нет имитации «измерительных приборов», загромождающих Workbench [5]. При расчете не открывается большое число окон со сложными взаимосвязями между ними, как в DESIGNLAB [6]. Не зря его очень любят студенты — простенькую схемку им в большинстве случаев удается промоделировать в Micro-Cap и без прочтения громоздких руководств. А если учесть, что даже в демонстрационной версии Micro-Cap приведены примеры моделирования практически всех типов электронных устройств (как аналоговых, так и цифровых), то это существенно упрощает освоение программы и изучение приемов моделирования. Достаточно открыть пример и провести свой расчет «по образу и подобию». А полная версия содержит уже столько примеров, что изучение только тех схем, которые содержатся в библиотеке Micro-Cap, в состоянии заметно рас-

ширить знания, полученные в рамках базовых ВУЗовских курсов электроники и схемотехники.

Кроме того, в Micro-Cap имеется функция демонстрации основных возможностей программы, наглядно представляющая основные приемы работы с ней. На сайте разработчиков (<http://www.spectrum-soft.com>) доступно подробное описание в формате PDF (на английском языке), составленное очень просто и понятно. Для его изучения даже особого знания языка не требуется, поскольку все поясняется примерами и иллюстрациями. Поэтому Micro-Cap можно рекомендовать как одну из лучших программ для обучения основам электроники. Особенно, если учесть, что разработчики Micro-Cap бесплатно предлагают к свободному использованию демонстрационную версию программы. Она обладает практически всеми качественными возможностями полнофункциональной, а ограничения носят по большей части количественный характер (демонстрационная версия позволяет моделировать схемы, число компонентов в которых не превышает 50, расчеты ряда схем проходят несколько медленнее, чем в полнофункциональной версии, ограничена библиотека компонентов, нет встроенной программы подготовки собственных моделей и некоторых других дополнительных функций). Для процесса обучения эти ограничения не являются особо существенными. Достаточно сказать, что с использованием демонстрационной версии программы Micro-Cap IV авторами книги были проведены необходимые расчеты динамических процессов в преобразователях напряжения со сложной топологией силовой части, а также выполнено моделирование замкнутых систем стабилизации напряжения с использованием этих преобразователей, которые в дальнейшем стали основой диссертационных работ. Таким образом, даже демонстрационная версия программы может быть использована для серьезных научных исследований, не говоря уже об учебных задачах.

Использование программы Micro-Cap позволяет не только изучать работу электронных схем, но и приобретать навыки наладки электронных устройств. Основные приемы получения рабочей модели ничем не отличаются от методик введения в рабочий режим реальных электронных устройств. Именно эти свойства и позволяют рекомендовать его в первую очередь студентам и радиолюбителям. Как отметил один из радиолюбителей, использующих Micro-Cap, основная проблема при работе с ним — начинает ржаветь паяльник...

Важным плюсом можно считать и то, что в настоящее время в сети Internet можно найти достаточно большие библиотеки отечественных и зарубежных электронных компонентов.

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)