

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ДНІПРОДЗЕРЖИНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАПОРІЗЬКИЙ ІНСТИТУТ ЕКОНОМІКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

УДК 621.38

МОДЕЛЮВАННЯ В ЕЛЕКТРОНІЦІ

**Переверзєв А.В., Бойко В.І., Зорі А.А.,
Тарасюк В.П., Вовна О.В., Багрій В.В.**

Дозволено до друку з грифом:

«Рекомендовано Міністерством освіти і науки України
як підручник для студентів вищих навчальних закладів»,
/лист № 14/18.2-638 від 25.03.2005/

Донецьк – 2010

УДК 621.38
Б 77

Гриф надано Міністерством
освіти і науки України (лист
від 25.03.2005 р. № 14/18.2-638)

Автори: *А.В. Переверзєв, В.І. Бойко, А.А. Зорі,
В.П. Тарасюк, О.В. Вовна, В.В. Багрій*

Рецензенти: д-р техн. наук, проф. Башков Є.О. (Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет»), д-р техн. наук, проф. Каргін А.О. (Донецький національний університет), к-т техн. наук, проф. Співак В.М. (Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»).

Рекомендовано до видання Вченою радою ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» (Протокол № 10 від 18.12.2009 р).

Б 77 **Переверзєв, А.В.** Моделювання в електроніці: [підручник] / **А.В. Переверзєв, В.І. Бойко, А.А. Зорі, В.П. Тарасюк, О.В. Вовна, В.В. Багрій** – 2-ге вид., доповн. і переробл. – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2010. – 352 с.

УДК 621.38
Б 77

У підручнику розглянуто моделі пристроїв, які використовуються для напівавтоматизованих розрахунків або призначаються для застосування у програмах схемотехнічного моделювання. Враховуючи бурхливий розвиток «інтелектуальних» силових інтегральних модулів (ІСІМ), наведені фізико-топологічні та електричні моделі пристроїв, які використовуються в ІСІМ як ключові елементи. Розглянуто основні методи формування математичних моделей схем, сучасні методи розрахунку та загальні підходи по підвищенню ефективності моделювання засобами програм автоматизованого схемотехнічного проектування (АСхП).

Видання призначено для інженерів, наукових співробітників, аспірантів та студентів старших курсів напрямків «Електроніка» та «Приладобудування», які спеціалізуються у галузі проектування та моделювання електронних пристроїв.

Ілюстрацій 195. Таблиць 11. Бібліографій 64.

ISBN

© Переверзєв А.В., Бойко В.І., 2007.
© Переверзєв А.В., Бойко В.І.,
Зорі А.А., Тарасюк В.П., Вовна О.В.,
Багрій В.В., 2010, зі змінами.

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА.....	6
-----------------------	----------

ЧАСТИНА 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Розділ 1. Схемотехнічне моделювання електронних схем.....	9
1.1. Рівні, об'єкти та завдання моделювання.....	9
1.2. Класифікація параметрів електронних схем.....	14
1.3. Класифікація математичних моделей.....	15
1.4. Комп'ютерні програми моделювання електронних систем.....	22
Розділ 2. Алгоритми аналізу схем у комп'ютерних програмах....	28
2.1. Одноваріантний аналіз схем.....	28
2.2. Моделювання за постійним струмом.....	29
2.3. Моделювання у часовій області.....	30
2.4. Моделювання у частотній області.....	33
2.5. Спектральний аналіз.....	36
2.6. Багатоваріантний аналіз.....	37
2.7. Аналіз чутливості.....	37
2.8. Метод статистичних випробувань.....	39
2.9. Метод найгіршого випадку.....	41

ЧАСТИНА 2. МІКРОМОДЕЛЮВАННЯ

Розділ 3. Види моделей базових елементів електронних схем.....	43
3.1. Базовий набір елементів моделей. Резистивний, ємнісний та індуктивний елементи.....	43
3.2. Повні моделі пасивних компонентів.....	48
3.3. Моделі джерел живлення.....	57
3.4. Моделі трансформатору.....	65
Розділ 4. Моделі активних елементів електронних схем.....	73
4.1. Фундаментальна система рівнянь напівпровідника.....	73
4.2. Моделювання напівпровідникових діодів та стабілітронів.....	77
4.2.1. Моделі випрямляючих, імпульсних та універсальних діодів.....	77
4.2.2. Модель стабілітрону.....	98
4.3. Моделювання біполярного транзистору.....	109

4.3.1. Інжекційна модель Еберса-Молла БТ.....	110
4.3.2. Модель переносу Еберса-Молла БТ.....	113
4.3.3. Передавальна модель Логана.....	116
4.3.4. Модель Гуммеля-Пуна для біполярного транзистору.....	119
4.3.5. Малосигнальна модель транзистору.....	123
4.3.6. SPICE-модель біполярного транзистору.....	125
4.3.7. Визначення статичних параметрів моделі БТ.....	135
4.4. Моделювання тиристорів.....	153
4.5. Моделювання польового транзистору.....	162
4.5.1. Моделі польових транзисторів із керуючим р-n-переходом.....	166
4.5.2. Малосигнальна модель польового транзистору.....	169
4.5.3. SPICE-модель польового транзистору.....	170
4.5.4. Моделювання потужних високовольтних польових транзисторів.....	176
4.5.5. Визначення параметрів моделей польового транзистору..	182
4.6. Моделювання МДН-транзистору.....	188

ЧАСТИНА 3. МАКРОМОДЕЛЮВАННЯ

Розділ 5. Макромодель IGBT транзистору.....	205
5.1. Фізико-топологічна макромодель IGBT транзистору.....	205
5.2. Електрична модель IGBT транзистору.....	208
5.3. Визначення параметрів моделі IGBT транзистору.....	211
Розділ 6. Макромодель операційного підсилювача постійного струму.....	216
6.1. Параметри та характеристики операційних підсилювачів.....	216
6.2. Математична макромодель операційного підсилювача.....	226
6.3. Лінійна динамічна n -полюсна макромодель ОП.....	228
6.4. Нелінійна малосигнальна динамічна макромодель ОП.....	231
6.5. Визначення параметрів макромоделі ОП відповідно до технічних умов.....	232
6.6. Математичне моделювання типових схем включення ОП.....	236
Розділ 7. Математичні методи та моделі визначення чутливості	244
7.1. Загальні поняття та визначення.....	244
7.2. Багатопараметрична чутливість.....	250
7.3. Методи розрахунку чутливості на ЕОМ.....	253

Розділ 8. Моделювання аналого-цифрових та цифро-аналогових перетворювачів.....	260
8.1. Структура цифрової обробки сигналів.....	260
8.2. Характеристики та параметри АЦП.....	261
8.3. Характеристики та параметри ЦАП.....	269
8.4. Моделювання АЦП та ЦАП.....	274
8.5. Багатоваріантний порівняльний аналіз та інженерний синтез структур та експлуатаційних особливостей АЦП та ЦАП.....	285
Розділ 9. Моделювання цифрових фільтрів.....	289
9.1. Цифрова передавальна функція.....	289
9.2. Основні структури цифрових фільтрів.....	295
9.3. Моделювання цифрового фільтру типу КІХ.....	299
9.4. Моделювання цифрового фільтру типу НІХ.....	314
9.5. Порівняння цифрових фільтрів типів КІХ та НІХ.....	321
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	324
ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК.....	330
ДОДАТОК А – Методичні вказівки до використання пакетів прикладних програм комп'ютерного схемотехнічного моделювання.....	332

ПЕРЕДМОВА

Роль електроніки стає ключовою в інтенсифікації технологічних процесів, у вдосконаленні продукції промислового виробництва, у вирішенні проблем енерго- та ресурсозбереження, покращенні екологічного становища. В свою чергу, технічний рівень та техніко-економічні показники пристроїв електроніки визначаються досконалістю її елементної бази. За останні три десятиріччя створено повністю керовані напівпровідникові пристрої із параметрами, які близькі до ідеальних, але процес вдосконалення триває.

У теперішній час складність та відповідальність схем, що розробляються, вже давно перевищила рівень, який визначався можливостями так званого «ручного» розрахунку, тобто розрахунку, який здійснювався розробником на основі свого особистого досвіду та вміння. З підвищенням якості та функціональних можливостей приладів ускладнюється структура приладів до рівня великих інтегральних схем (ВІС) та надвеликих (НВІС), у наслідок чого зростають труднощі при дослідженні властивостей пристроїв.

Уявимо собі об'єм робіт, який вимагається для дійсно серйозного розрахунку електронної схеми високого ступеню складності. При виконанні типового розрахунку у схемі, яка має 5 – 6 елементів, необхідно розрахувати характер перехідних процесів. Для цього складалося характеристичне рівняння кола, проводився розрахунок початкових умов, записувалися аналітичні співвідношення для струму та напруги в окремих елементах схеми, і, нарешті, проводилася табуляція одержаних розрахункових співвідношень. На цю роботу витрачалось приблизно до 20 годин.

Реальна задача розробника набагато складніша. Навіть якщо проектується відносно простий пристрій, то необхідно додатково оцінити амплітудні та діючі значення струмів та напруг у схемі, для визначення меж застосування тих або інших елементів. Потім уточнити їх еквівалентні схеми, що приблизно у 3 – 4 рази підвищує порядок схеми, провести повторний уточнюючий розрахунок, знов перевірити застосування елементної бази та при необхідності внести корективи. Потім необхідно виконати конструкторське опрацювання вузлів пристрою, і, можливо, знов внести корективи у зв'язку із технологічними особливостями виготовлення пристрою. Та якщо до того ж врахувати, що всі реальні схеми як мінімум на порядок складніші, то створюється враження, що їх взагалі спроектувати не можливо. За-

звичай, у цьому випадку набагато допомагає інтуїція розробника, проте, покладаючись тільки на інтуїцію одержати в результаті проектування електронну схему адекватну початковим даним дуже складно. Це тим більше важко, якщо врахувати що для сучасних схем однією з основних вимог є висока надійність та постійне поліпшення вагогабаритних, енергетичних, економічних та інших, часто суперечливих показників. Виходом з такого положення може бути тільки автоматизація проектування, що дозволяє істотно скоротити час розробки та уникнути істотних помилок при проектуванні.

Автоматизація інтелектуальної діяльності у схемотехніці електронних систем можлива на базі комп'ютерного проектування схем за системою САД (Computer Aided Design) – в україно-російському варіанті: САПР (система автоматизованого проектування), або АСхП (автоматизоване схемотехнічне проектування). Остання назва найбільш детально відображає суть процесів схемотехніки електронних систем, а саме аналізу та синтезу за допомогою персональних комп'ютерів – комп'ютерне схемотехнічне проектування (КСП).

Математичне моделювання, також як в інформаційній мікроелектроніці, стає найважливішим інструментом на всіх етапах проектування та виробництва як самих приладів, так і силових пристроїв на їх основі. Ускладнення сучасних пристроїв та приладів електронної техніки вимагає автоматизації схемотехнічного проектування, що у свою чергу сприяє розвитку математичного забезпечення систем автоматизованого схемотехнічного проектування (АСхП), до складу яких входять бібліотеки математичних моделей елементів, методи формування математичних моделей схем (ММС) та чисельні методи розв'язання рівнянь, якими описуються ММС.

У підручнику розглянуті моделі електронних пристроїв, які використовуються для напіваавтоматизованих розрахунків або призначаються для застосування у програмах схемотехнічного моделювання. Враховуючи бурхливий розвиток «інтелектуальних» силових інтегральних модулів (ІСІМ), наведено фізико-топологічні та електричні мікро- та макромоделі елементів та пристроїв, які використовуються в ІСІМ як ключові елементи.

Розглянуто основні методи формування математичних мікро- та макромоделей схем (ММС), сучасні методи їх розв'язання та загальні підходи до підвищення ефективності моделювання засобами програм АСхП.

Підручник призначається для студентів напрямів «Електроніка»

та «Приладобудування» та буде корисним при вивченні курсів «Математичне моделювання електронних схем», «Методи аналізу електронних схем», «Моделювання в електроніці», «Моделювання на ЕОМ», «САПР» та інших дисциплін, які пов'язані із розв'язанням задач моделювання та проектування на схемотехнічному рівні. Видання також буде корисне для аспірантів, науковців та викладачів, роботи яких пов'язані із математичним моделюванням та автоматизованим проектуванням пристроїв електроніки.

Автори висловлюють щиру подяку рецензентам: д.т.н., проф. Башкову Є.О., д.т.н., проф. Каргіну А.О., к.т.н., проф. Співаку В.М. за доброзичливі та принципові зауваження, які сприяли поліпшенню викладення навчального матеріалу.