

УДК 621.382.2/.3 (075.8)
ББК 32.844.1я73
С92

Гриф надано Міністерством
освіти і науки України
(протокол від 7 квітня 2003 р.
№ 1/11-1366)

Автори: В. І. Бойко, А. М. Гуржій, В. Я. Жуйков, А. А. Зорі,
В. М. Співак, Т. О. Терещенко, В. В. Багрій

Рецензенти: д-р техн. наук, проф. А. А. Щерба (Національ-
ний технічний університет України «КПІ») і канд. техн. наук, проф.
Ю. Є. Кулешов (Київський національний університет технологій
та дизайну)

Редактор Т. Ю. Ходирева

Схемотехніка електронних систем: У 3 кн. Кн. 2. Циф-
рова схемотехніка: Підручник / В. І. Бойко, А. М. Гуржій,
В. Я. Жуйков та ін. — 2-ге вид., допов. і переробл. — К.:
Вища шк., 2004. — 423 с.: іл.
ISBN 966-642-200-X (кн. 2)
ISBN 966-642-193-3

Викладено основні теоретичні та практичні відомості про цифрові
схеми пристроїв сучасних електронних систем. Розглянуто математичні
основи алгебри логіки, синтезу цифрових логічних розширників, пере-
творювачів рівнів, генераторів та одновібраторів, інтегральних таймерів,
цифрових автоматів тощо. Описано напівпровідникові мікросхеми опе-
ративних і постійних запам'ятовувальних пристроїв. Наведено особли-
вості розрахунку перехідних процесів у логічних схемах, гонок, різних
систем синхронізації. Розглянуто проектування цифрових схем, зокре-
ма зі зворотними зв'язками, з урахуванням потрібної завадостійкості.
Подано рекомендації щодо монтажу інтегральних мікросхем та конст-
руювання цифрових пристроїв. Друге видання (1-ше вид. — 2002 р.)
доповнено матеріалами та прикладами для самостійного вивчення ма-
теріалу.

Для студентів технічних спеціальностей вищих навчальних закладів.

УДК 621.382.2/.3 (075.8)
ББК 32.844.1я73

ISBN 966-642-200-X (кн. 2)
ISBN 966-642-193-3

© В. Я. Жуйков, В. І. Бойко, А. А. Зорі,
В. М. Співак, 2002
© В. І. Бойко, А. М. Гуржій,
В. Я. Жуйков, А. А. Зорі,
В. М. Співак, Т. О. Терещенко,
В. В. Багрій, 2004, із змінами

ЗМІСТ

Передмова	8
Вступ	13
Розділ 1. Математичні основи	15
1.1. Системи числення. Правила переведення з однієї системи числення в іншу	15
1.2. Коди з виявленням помилок	19
1.3. Коди з виправленням помилок	21
1.4. Двійкова арифметика	24
1.5. Форми подання чисел	25
Розділ 2. Алгебра логіки і теоретичні основи синтезу цифрових пристроїв	30
2.1. Елементи математичної логіки	30
2.2. Основні закони алгебри логіки	32
2.3. Форми логічних функцій та їх використання для синтезу логічних схем	34
2.4. Логічні елементи і схеми. Принцип двоїстості	40
2.5. Класифікація логічних пристроїв	43
Розділ 3. Методи мінімізації булевих функцій	46
3.1. Мета мінімізації логічних пристроїв	46
3.2. Метод безпосередніх перетворень	47
3.3. Метод Карно – Вейча	47
3.4. Мінімізація методом Квайна і Мак-Класкі	51
Розділ 4. Логічні елементи цифрових пристроїв	56
4.1. Класифікація елементів і їх порівняльна характеристика	56
4.2. Загальні характеристики елементів цифрових пристроїв	59
4.3. Базовий логічний елемент транзисторно-транзисторної логіки	68
4.3.1. Склад, схемотехніка і принцип дії базового логічного елемента (БЛЕ)	68
4.3.2. Різновиди схемотехніки елементів ТТЛ	71
	5

4.3.3. Підвищення швидкодії TTL-схем	75
4.4. BLE емітерно-зв'язаної логіки	78
4.4.1. Особливості схемотехніки	78
4.4.2. Принцип дії та функціональні можливості BLE ЕЗЛ	79
4.4.3. Способи підвищення швидкодії	82
4.5. BLE на МДН-транзисторах	83
4.5.1. Особливості використання МДН-транзистора	83
4.5.2. Схемотехніка BLE КМОН-типу	85
4.6. BLE інтегрально-інжекційної логіки	87
Розділ 5. Синтез комбінаційних схем	91
5.1. Етапи побудови логічної схеми	91
5.2. Синтез логічних пристроїв у заданому базисі ЛЕ	92
5.3. Особливості побудови логічних пристроїв на реальній елементній базі	93
5.4. Логічні елементи для реалізації складних функцій	97
5.5. Мультиплексори і демюльтиплексори	99
5.6. Синтез комбінаційних схем на мультиплексорах	102
5.7. Дешифратори, дешифратори-демультиплексори і шифратори	106
5.8. Суматори	115
5.9. Десяткові суматори	119
5.10. Компаратори	122
5.11. Перетворювачі двійково-десятькового коду на двійковий код	128
5.12. Перетворювачі двійкового коду на двійково-десятьковий код	136
5.13. Взаємне перетворення двійкового коду і коду Грея	143
Розділ 6. Тригерні елементи цифрових пристроїв	146
6.1. Основні поняття. Класифікація тригерів та їх загальні характеристики	146
6.2. Асинхронний RS-тригер і його різновиди	152
6.3. Асинхронні тригери з одним входом	160
6.4. Синхронні тригери	163
6.5. Синтез довільних тригерних структур на універсальних D- та JK-тригерах	168
6.6. Приклади використання тригерів	171
Розділ 7. Синтез цифрових автоматів	180
7.1. Регістри зсуву	180
7.2. Лічильники за mod M	184
7.3. Лічильники на регістрах зсуву	196
7.4. Реверсивні лічильники	202
7.5. Лічильники зі змінним коефіцієнтом перерахування і цифрові фазообертачі	208
7.6. Послідовні двійкові суматори та цифрові інтегратори	213
7.7. Послідовна схема рівнозначності кодів	216
7.8. Послідовна схема порівняння двійкових чисел	218

Розділ 8. Спеціальні елементи цифрових пристроїв	221
8.1. Логічні розширники	221
8.2. Перетворювачі рівнів	223
8.3. Генератори та одновібратори	233
8.4. Різницеві перетворювачі і детектори подій (фронтів)	264
8.5. Інтегральні таймери	270
Розділ 9. Напівпровідникові оперативні запам'ятовувальні пристрої	278
9.1. Мікросхеми статичних ОЗП	278
9.2. Мікросхеми динамічних ОЗП	298
9.3. Застосування мікросхем ОЗП	309
Розділ 10. Мікросхеми постійних запам'ятовувальних пристроїв	322
10.1. Мікросхеми маскових ПЗП	322
10.2. Мікросхеми ППЗП	329
10.3. Мікросхеми РПЗП	333
Розділ 11. Особливості проектування цифрових схем	367
11.1. Перехідні процеси в логічних схемах	367
11.2. Гонки	372
11.3. Гонки за входом	378
11.4. Система двофазної синхронізації	379
11.5. Часові співвідношення двофазної синхронізації	382
11.6. Однофазна синхронізація	391
11.7. Проектування схем зі зворотними зв'язками	398
Розділ 12. Застосування цифрових інтегральних мікросхем	401
12.1. Завади та завадостійкість цифрових пристроїв	401
12.2. Рекомендації щодо монтажу інтегральних мікросхем	408
Список рекомендованої літератури	422

ПЕРЕДМОВА

Електроніка — галузь сучасної фізики та електротехніки. Вона займається вивченням і використанням явищ, приладів і систем, основою яких є проходження електричного струму у вакуумі, газі та твердому тілі, дослідження, розроблення електронних засобів і систем та принципів їх використання. Обмін інформацією в електронних системах відбувається за допомогою сигналів, носіями яких можуть бути різні фізичні величини — струми, напруги, магнітні стани, світлові хвилі. Розрізняють аналогові (безперервні) і дискретні сигнали. Є два типи дискретних сигналів: перший отримано за рівнем або за часом дискретизації безперервних сигналів, другий — у вигляді набору кодових комбінацій знаків.

Перевагами цифрових пристроїв і систем порівняно з аналоговими є підвищена завадостійкість, висока надійність, можливість тривало зберігати інформацію без її втрати, економічна й енергетична ефективність, сумісність з інтегральною технологією, висока технологічність і повторюваність, а недоліками — мала швидкодія та точність.

Основа розвитку електроніки — безперервне ускладнення функцій. На сучасному етапі стає неможливим вирішувати нові завдання старими електронними засобами з використанням існуючої елементної бази. Виникають об'єктивні умови для подальшого удосконалення елементної бази. Основними факторами є підвищення надійності, зменшення габаритних розмірів, маси, вартості та споживаної потужності.

Важливе завдання вищої освіти — правильна орієнтація майбутнього фахівця на стадії вивчення фундаментальних і професійно-орієнтованих дисциплін фаху, де поєднується як глибина важливих фізичних процесів, так і їхній розумний обсяг. Більшість випущених підручників і навчальних посібників з аналогової та цифрової схемотехніки або присвячені викладу лише окремих розділів цієї дисципліни, або дають за-

гальні відомості з основних розділів чи недостатньо відображають тенденції розвитку сучасної електроніки. У пропонованому підручнику автори зробили спробу ліквідації зазначених вище недоліків.

Підручник складається з трьох книг: перша книга — «Аналогова схемотехніка та імпульсні пристрої», друга — «Цифрова схемотехніка», третя — «Мікропроцесори та мікроконтролери».

Перша книга — «Аналогова схемотехніка та імпульсні пристрої» містить 12 розділів з аналогової схемотехніки та 5 розділів з імпульсних пристроїв, у яких розглянуто такі питання:

основні компоненти електронних систем, підсистем і вузлів, підсилювачі;

RC -підсилювачі напруги на біполярних і польових транзисторах за різними схемами підключення зі спільними емітером, базою, колектором, стоком, витоком;

частотні характеристики RC -підсилювачів звукових частот, робота підсилювача в області низьких, середніх та високих частот; логарифмічні амплітудно-частотні характеристики, приклади розрахунків;

узгодження джерела сигналу з навантаженням, класифікація одно- і двотактних підсилювачів потужності та підсилювачів без трансформаторів;

наскрізні характеристики каскадів, вплив температури на характеристики біполярних транзисторів, причини та методи розрахунку нелінійних спотворень;

класифікація паралельних і послідовних зворотних зв'язків: за струмом і напругою, жорстких і гнучких, їхній вплив на схемні функції, показники роботи, умови стійкості системи;

підсилення постійного струму, способи зменшення дрейфу нуля, підсилювачі на несівній частоті, з безпосередніми зв'язками, паралельні балансові та диференціальні схеми;

класифікація аналогових мікроелектронних структур, операційні підсилювачі на інтегральних мікросхемах, елементи їх схемотехніки;

побудова вирішальних структур на базі операційних підсилювачів, лінійні та нелінійні функціональні перетворювачі, суматори, інтегратори, диференціатори, частотна корекція, логарифмування, помножувачі, подільники, випрямлячі, детектори;

загальні положення теорії селективних підсилювачів різних типів;

LC -генератори періодичних коливань на польових і біполярних транзисторах;

основи теорії *RC*-генераторів з різними типами фазообертачів і без них;

проходження імпульсів через ланки інтегрування, диференціювання, розділові; фіксатори рівня;

формівники прямокутних імпульсів, ключі, обмежувачі, моделі великого сигналу;

мульти- та одновібратори; регулювання частоти, термостабілізація і поліпшення форми вихідної напруги схем; генератори лінійно змінюваної напруги, блокінг-генератори в автоколебальному режимі та режимі очікування;

аналіз кодувальних пристроїв, АЦП та ЦАП, пристрої вибірки збереження;

імпульсні джерела живлення, елементна база силової електроніки та перспективи розвитку.

Друга книга — «Цифрова схемотехніка» — охоплює 12 розділів, у яких розглянуто такі питання:

математичні основи цифрової схемотехніки, системи числення, коди, двійкова арифметика та форми подання чисел;

теоретичні основи синтезу цифрових автоматів та алгебра логіки;

аналіз методів мінімізації булевих функцій, методи Карно — Вейча, Квайна, Мак-Клаксі;

класифікація логічних елементів цифрових пристроїв (базові логічні елементи);

синтез комбінаційних схем, мульти- та демультіплексори, суматори, шифратори, дешифратори, компаратори, перетворювачі кодів;

асинхронні, синхронні тригерні елементи, *RS*-, *D*-, *JR*-тригери; синтез цифрових автоматів, регістри зсуву, лічильники, цифрові фазообертачі;

логічні розширники, перетворювачі рівнів, таймери; статичні, динамічні оперативні та мікросхеми постійних запам'ятовувальних пристроїв;

проектування логічних схем, перехідні процеси, гонки, одно- та двофазова синхронізація;

застосування цифрових інтегральних мікросхем, завади і завадостійкість, монтаж цифрових інтегральних мікросхем.

Третя книга — «Мікропроцесори та мікроконтролери» — складається з 9 розділів, у яких розглянуто такі питання:

загальні принципи побудови мікропроцесорних систем, організація шин, поняття про архітектуру мікропроцесорів та основні принципи побудови мікропроцесорних систем, основи програмування мовою асемблер;

однокристалні 8- та 16-розрядні мікропроцесори, відомості про систему команд мікропроцесора *i8086*;

старші моделі однокристальних універсальних мікропроцесорів (i80286, i386, i486, архітектура мікропроцесорів Pentium);

системи пам'яті: класифікація постійних та оперативних запам'ятовувальних пристроїв, побудова модулів пам'яті, принципи організації стекової та кеш-пам'яті;

інтерфейс пристроїв введення-виведення — паралельний та послідовний інтерфейс, контролер клавіатури та індикації, програмовний таймер, контролер прямого доступу до пам'яті, контролер переривань;

архітектура, функціональні можливості та система команд однокристальних мікроконтролерів з *CISC*-архітектурою, розширення можливостей, приклад застосування для керування двигуном постійного струму;

однокристальні мікроконтролери з *RISC*-архітектурою: *PIC*-контролери, *AVR*-мікроконтролери;

сигнальні мікропроцесори оброблення даних у форматі з фіксованою та плаваючою комою, їхні характеристики і функціональні можливості;

нейронні обчислювачі та їхні функції, основи побудови нейронних мереж, алгоритми навчання, апаратна реалізація.

У підручнику в стислому вигляді та доступній формі викладено всі розділи програми підготовки бакалаврів, інженерів та магістрів напряму «Електроніка» спеціальності «Електронні системи» і «Фізична та біомедична електроніка» згідно з вимогами державного стандарту України. Це може підвищити ефективність не лише аудиторних занять, а й самостійної роботи студентів. Матеріал скомпонований так, що кожний наступний розділ є логічним продовженням попереднього.

У результаті вивчення курсу студенти засвоюють принципи функціонування, вибору, практичної реалізації пристроїв та систем електроніки різного призначення, методи їх аналізу і розрахунку за заданими статичними й динамічними параметрами та принципи розроблення систем керування електронними системами. Студент має знати: принципи побудови та функціонування пристроїв аналогової і цифрової схемотехніки; принципи вибору методів аналізу і розрахунку електронних пристроїв із заданими характеристиками; принципи побудови і функціонування мікропроцесорних та мікроконтролерних систем, а також уміти: розраховувати електронні ланки; узагальнити динамічні показники електронних пристроїв; виконати розрахунки різних електронних пристроїв з організацією банку даних, розробити структурні та принципові схеми, а також програмне забезпе-

чення мікропроцесорних систем керування пристроями електроніки.

Підручник написано на основі досвіду викладання дисциплін згідно з програмами підготовки бакалаврів, інженерів та магістрів напряму «Електроніка» в Національному технічному університеті України «КПІ», Донецькому національному технічному університеті та Дніпродзержинському державному технічному університеті.

Курс забезпечується основними дисциплінами: математика, фізика, теоретичні основи електротехніки, твердотіла електроніка.

Автори висловлюють вдячність співробітникам кафедр «Промислова електроніка» Київського НТУУ «КПІ», «Електронна техніка» Донецького НТУ і «Електроніка та автоматика» Дніпродзержинського ДТУ за допомогу під час підготовки оригіналу-макета та обговорення навчального матеріалу.

Автори щиро вдячні рецензентам за цінні зауваження та рекомендації щодо вдосконалення окремих розділів рукопису, які вони врахували під час його доопрацювання, що сприяло поліпшенню змісту підручника.

ВСТУП

Обмін інформацією в електронних системах відбувається за допомогою сигналів. Носіями сигналів можуть бути різні фізичні величини — струми, напруги, магнітні стани, світлові хвилі. Вирізняють аналогові (безперервні) та дискретні сигнали.

Дискретні сигнали простіше зберігати й обробляти, вони менше зазнають спотворень під дією завад. Такі спотворення простіше виявити та виправити. Тому дискретні сигнали частіше застосовують на практиці, ніж безперервні. Є два типи дискретних сигналів. Перший отримано за час дискретизації за рівнем або за часом безперервних сигналів; другий — у вигляді набору кодових комбінацій знаків, чисел або слів.

Перетворення безперервної інформаційної множини аналогових сигналів на дискретну множину називається *дискретизацією*, або *квантуванням*, за рівнем. Друге подання у вигляді кодових слів є більш універсальним і поширеним. Його використовують для кодування людської мови на папері (письма), у математиці, у цифровій електроніці.

Найімовірніше, що в недалекому майбутньому цифрова електроніка займе монополічне становище на ринку електронних систем та пристроїв. Сьогодні цифрові персональні комп'ютери і контролери практично витиснули аналогові електронні обчислювальні машини. Те саме відбувається з апаратурою радіозв'язку, радіомовлення і телебачення (телевізорами, радіоприймачами, відеомагнітофонами, звукозаписом, фотоапаратурою).

Повністю витиснути аналогову техніку цифрова в принципі не зможе, тому що фізичні процеси, від яких електронна система отримує інформацію, мають аналогову природу; в цьому випадку на вході та виході потрібні цифроаналогові та аналого-цифрові пристрої.

Цифрова схемотехніка — галузь науки, техніки і виробництва, яка пов'язана з розробленням, дослідженням, проек-

туванням та виготовленням електронних систем, де перетворення та оброблення інформації відбувається за законом дискретної функції. Промисловий розвиток цифрової схемотехніки має два напрями: енергетичний (силовий), пов'язаний з перетворенням постійного та змінного струмів для потреб металургії, електротяги, електроенергетики, та інформаційний, до якого належать аудіо- та відеоапаратура, засоби телекомунікації, вимірювання, контролю та регулювання технологічних процесів виробництв наукових досліджень у технічних і гуманітарних сферах.

Із сучасних публікацій найпоширеніша монографія американських фахівців П. Хоровіца та У. Хілла (Искусство схемотехники: В 3 т.: Пер. с англ. — М.: Мир, 1993). У ній обсяг матеріалу значно перевищує вимоги програм, проте мало інформації щодо сучасного розвитку схемотехніки, особливо цифрової.

Для аналізу сучасних мікропроцесорних систем знання технічної реалізації алгоритмів надзвичайно важливе. Наприклад, у напівпровідникових цифрових мікросхемах, на яких побудовані контролери та персональні комп'ютери, широко використовують логічні вентиля на TTL- (TTL-) та КМОН- (CMOS)-структурах. Стандартні мікросхеми серій K155 і K133 характеризуються середнім енергоспоживанням та швидкодією 10 нс. Мікросхеми з меншими витратами енергії серії K134 мають знижену швидкодію. Мікросхеми серії K131 мають підвищену вихідну потужність. Мікросхеми з діодами Шоттки (ТТЛШ) серії K531 при більших (порівняно зі стандартними) витратах мають швидкодію в три рази вищу (3 нс). Серія малопотужних мікросхем ТТЛШ (K555) при тій самій швидкодії, що і стандартні, вживає потужність у кілька разів меншу. Перспективними є серії KP1531 з швидкодією 3 нс та KP1533 з швидкодією 4 нс. Причому остання має в два рази менше енергоспоживання.

У результаті вивчення курсу «Цифрова схемотехніка» студент повинен **знати**: принципи побудови та функціонування пристроїв цифрової схемотехніки; принципи вибору методів аналізу та розрахунку електронних пристроїв із заданими характеристиками, а також **вміти**: розрахувати електронні ланки; узагальнити динамічні показники електронних пристроїв; виконати розрахунки різноманітних електронних пристроїв з організацією банку даних.

1.1. Системи числення.

Правила переведення з однієї
системи числення в іншу

Системою числення називають систему прийомів і правил, що дають змогу встановлювати взаємно однозначну відповідність між будь-яким числом і його зображенням у вигляді сукупності скінченного числа символів. Залежно від способу зображення чисел за допомогою цифр системи числення поділяють на позиційні і непозиційні.

У непозиційних системах будь-яке число визначають як деяку функцію від числових значень сукупності цифр, що зображують це число. Цифри в непозиційних системах числення відповідають деяким фіксованим числам. Приклад непозиційної системи — римська система числення. В електронних цифрових пристроях застосовують позиційні системи числення. Систему числення називають позиційною через те, що значення кожної вхідної у число цифри залежить і змінюється від її положення в запису числа.

Будь-яку позиційну систему числення з основою q можна подати у вигляді полінома

$$A_{(q)} = r_n q^n + r_{n-1} q^{n-1} + \dots + r_1 q^1 + r_0 q^0 + r_{-1} q^{-1},$$

де $A_{(q)}$ — число в позиційній системі числення з основою q ; r_i — коефіцієнт; n — степінь та індекс.

Позиційні системи числення можуть бути різними залежно від основи: десяткові — за основою десять, вісімкові — за основою вісім, двійкові — за основою два і т. д. Надалі, щоб явно зазначити систему числення, що використовується, візьмемо число в дужки і в індексі вкажемо основу системи числення.

За двійковою системою числення коефіцієнтами r_i є цифри 0 і 1, а основою — число 2. У загальному вигляді число за двійковою системою числення можна записати так:

$$A_2 = r_n 2^n + r_{n-1} 2^{n-1} + \dots + r_1 2^1 + r_0 2^0 + r_{-1} 2^{-1}.$$