

ΚΟΜΠ'ΥΤΕΡΗΑ
ΣΧΕΜΟΤΕΧΝΙΚΑ

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

КОМП'ЮТЕРНА СХЕМОТЕХНІКА

Вінниця
ВНТУ
2018

УДК 004.31
К63

Автори:

О. Д. Азаров, В. А. Гарнага, Я. М. Клятченко, В. П. Тарасенко

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 8 від 29.03.2018)

Рецензенти:

І. А. Жуков, доктор технічних наук, професор

С. Д. Погорілий, доктор технічних наук, професор

О. І. Стасюк, доктор технічних наук, професор

Комп'ютерна схемотехніка : підручник / [Азаров О. Д., Гарнага В. А., Клятченко Я. М., Тарасенко В. П.]. – Вінниця : ВНТУ, 2018. – 230 с.
ISBN 978-966-641-736-0

Підручник охоплює двосеместровий курс «Комп'ютерна схемотехніка», який передбачений освітніми стандартами і відповідним навчальними планами для студентів бакалаврського рівня освіти та спеціальності «Комп'ютерна інженерія» в ЗВО України.

Матеріали підручника охоплюють навчальну тематику від фізико-технологічних основ створення електронних комп'ютерних компонент до формально-логічних методів проектування функціонально завершених структурних одиниць обладнання сучасних комп'ютерних систем. Для посилення когнітивного аспекту підручник містить багато прикладів реальних мікроелектронних комп'ютерних засобів і контрольних завдань.

УДК 004.31

ISBN 978-966-641-736-0

©ВНТУ, 2018

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	7
РОЗДІЛ 1 ЦИФРОВІ СИГНАЛИ ТА ЛОГІЧНІ ЕЛЕМЕНТИ	9
1.1 Сигнали та їх часові параметри.	9
1.2 Імпульсні та потенціальні сигнали	10
1.3 Скінченні автомати, логічні елементи та логічні схеми	11
1.4 Комбінаційні схеми.....	12
1.5 Автомати з пам'яттю.....	13
1.6 Теорія перемикальних функцій як логіко-математична основа комп'ютерної схемотехніки.....	15
1.6.1 Закони алгебри логіки	16
1.6.2 Алгоритми мінімізації логічних функцій за допомогою діаграм Вейча.....	19
1.7 Контрольні запитання і завдання.....	20
РОЗДІЛ 2 ОСНОВИ СХЕМОТЕХНІКИ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ЛОГІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТА ЇХ КОМПОНЕНТІВ	22
2.1 Базові елементи цифрових пристроїв.....	22
2.2 Резисторно-транзисторна логіка	24
2.3 Діодно-транзисторні логічні елементи (ДТЛ).....	24
2.4 Транзисторно-транзисторні логічні елементи (ТТЛ).....	25
2.4.1 ТТЛ з трьома станами виходу	27
2.4.2 ТТЛ з відкритим колектором.....	29
2.4.3 ТТЛ з розширювачами	30
2.5 Логічні елементи на транзисторах Шоттки (ТТЛШ)	31
2.6 Контрольні запитання і завдання.....	33
РОЗДІЛ 3 ЛОГІЧНІ ЕЛЕМЕНТИ НА БІПОЛЯРНИХ І ПОЛЬОВИХ ТРАНЗИСТОРАХ.....	34
3.1 Емітерно-зв'язані логічні елементи (ЕЗЛ).....	34
3.2 Інтегральна інжекційна логіка (ІІЛ)	40
3.3 Логічні елементи на МОН-транзисторах.....	43
3.3.1 Логічні елементи на p-МОН-транзисторах.....	43
3.3.2 Логічні елементи на n-МОН-транзисторах.....	46
3.3.3 Логічні елементи на комплементарних МОН-транзисторах (КМОН-логіка)	47
3.3.4 Динамічні логічні елементи.....	48
3.4 Перетворення рівнів логічних сигналів.....	52
3.4.1 Перетворювачі рівнів сигналів.....	52

3.4.2 Транслятори сигналів ВІС і НВІС.....	54
3.5 Контрольні запитання і завдання.....	58
РОЗДІЛ 4 ПЕРЕТВОРЮВАЧІ КОДІВ І КОМБІНАЦІЙНІ ФУНКЦІОНАЛЬНІ ПРИСТРОЇ.....	60
4.1 Перетворення прямого коду двійкових чисел в інверсний та обернений коди.....	61
4.2 Перетворення прямого коду двійкових чисел в доповняльний код.....	62
4.3 Різновиди перетворювачів кодів.....	67
4.4 Дешифратори і шифратори.....	68
4.4.1 Лінійні дешифратори.....	70
4.4.2 Прямокутні дешифратори.....	72
4.4.3 Пірамідальні дешифратори.....	73
4.4.4 Нарощування розмірності дешифраторів.....	74
4.5 Шифратори.....	75
4.6 Мультиплексори.....	77
4.7 Демультиплексори.....	80
4.8 Шини передачі даних.....	82
4.9 Пристрої порівняння (цифрові компаратори).....	83
4.9.1 Пристрої порівняння на рівність.....	84
4.9.2 Порівняння на «більше» («менше») однорозрядних слів.....	86
4.9.3 Порівняння багаторозрядних операндів.....	88
4.9.4 Порівняння слів з константами.....	89
4.9.5 Пристрої порівняння двійкових слів.....	90
4.9.6 Пристрої порівняння двох слів на «більше».....	92
4.9.7 Багаторозрядні пристрої порівняння на «більше».....	94
4.10 Контрольні запитання і завдання.....	94
РОЗДІЛ 5 КОМП'ЮТЕРНІ ПРИСТРОЇ НА ТРИГЕРАХ.....	96
5.1 Загальні відомості, характеристики та класифікації тригерів.....	96
5.2 Тригер як елементарний автомат Мура.....	102
5.3 Асинхронні та синхронні тригерні пристрої (ТП) зі статичним управлінням.....	104
5.3.1 RS-тригер та його різновиди.....	106
5.3.2 RS-тригер з синхронним записом (СЗ).....	111
5.3.3 JK-тригер.....	113
5.3.4 JK-тригер з синхронним записом.....	114
5.3.5 T-тригер.....	115
5.3.6 T-тригер з СЗ.....	116

5.3.7 D-тригер	117
5.3.8 D-тригер з СЗ.....	118
5.4 Синхронні тригери з динамічним записом інформації	121
5.4.1 D-тригер	121
5.4.2 RS-тригер з ДЗ.....	122
5.4.3 JK-тригер з ДЗ	125
5.5 Синхронні двоступеневі тригери за структурою MS	127
5.5.1 ТП типу MS з інвертором	129
5.5.2 ТП із двома інверторами	130
5.5.3 ТП на основі тригерів із заборонними зв'язками	131
5.5.4 ТП на основі тригерів з різнополярним управлінням	132
5.5.5 Схема тригера типу MS з комутуючими транзисторами.....	134
5.5.6 D-тригери типу MS	135
5.5.7 JK- тригер типу MS із заборонним зв'язком.....	136
5.6 Асинхронні входи синхронних тригерів.....	138
5.7 Контрольні запитання і завдання.....	138
РОЗДІЛ 6 РЕГІСТРИ.....	140
6.1 Паралельні регістри.....	140
6.2 Послідовні регістри (регістри зсуву).....	140
6.3 Послідовні регістри зі зворотними зв'язками (кільцеві лічильники).....	143
6.4 Контрольні запитання і завдання.....	144
РОЗДІЛ 7 ЛІЧИЛЬНИКИ	145
7.1 Двійкові лічильники з послідовним переносом	145
7.2 Двійкові лічильники з наскрізним і паралельним переносом	146
7.3 Декрементні та реверсивні лічильники.....	147
7.4 Лічильники з довільним коефіцієнтом лічби	148
7.5 Десяткові лічильники.....	151
7.6 Лічильники в коді Фібоначчі	152
7.7 Контрольні запитання і завдання.....	155
РОЗДІЛ 8 СУМАТОРИ.....	156
8.1 Однорозрядні напівсуматори і суматори	157
8.2 Накопичувальний послідовний суматор на базі лічильного тригера.....	162
8.3 Паралельний багаторозрядний суматор із послідовним переносом	164
8.4 Паралельний багаторозрядний суматор із паралельним переносом	165

8.5 Суматори з груповою структурою.....	168
8.6 Суматор з параллельно-паралельним переносом	170
8.7 Послідовний n–розрядний суматор	171
8.8 Десяткові і двійково-десяткові суматори	172
8.9 Суматори–віднімачі	175
8.10 Контрольні запитання і завдання.....	176
РОЗДІЛ 9 СХЕМОТЕХНІЧНІ КОМП'ЮТЕРНІ ПРИСТРОЇ	
І ВУЗЛИ ВИСОКОЇ ВИРОБНИЧОЇ СЕРІЙНОСТІ.....	177
9.1 Матричні перемножувачі.....	177
9.2 Арифметико-логічні пристрої.....	180
9.3 Пристрої технічної пам'яті.....	183
9.4 Елементи пам'яті на біполярних транзисторах.....	188
9.5 Елементи технічної пам'яті на МОН – транзисторах.....	190
9.6 Стекова і магазинна пам'ять	194
9.6.1 Асоціативна технічна пам'ять	195
9.6.2 Постійні та перепрограмовні засоби ТП	196
9.7 Контрольні запитання і завдання	201
РОЗДІЛ 10 СТРУКТУРНА ОРГАНІЗАЦІЯ ПРОГРАМОВНИХ	
ЛОГІЧНИХ ІНТЕГРАЛЬНИХ СХЕМ І ЇХ ВИКОРИСТАННЯ	
В КОМП'ЮТЕРНІЙ СХЕМОТЕХНІЦІ.....	
10.1 Загальні відомості щодо програмовних логічних	
інтегральних схем	202
10.2 Класифікація ПЛІС за архітектурними властивостями.....	203
10.3 Сучасні тенденції розвитку пристроїв із програмовною	
логікою	219
10.4 Обчислювальні системи на ПЛІС із soft-процесором	221
10.5 Контрольні запитання і завдання.....	227
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	228

У зв'язку з повторюваністю в тексті різнозначних скорочень і умовних позначень їх переліки, які ще не використовувались попередньо, наведені на початку кожного розділу, де вони вперше використані. Аббревіатури англійського походження розкриті контекстуально у відповідних розділах.

ПЕРЕДМОВА

У навчальних планах технічних ЗВО України дисципліна «Комп'ютерна схемотехніка» є нормативною професійно-орієнтованою дисципліною підготовки фахівців зі спеціальності «Комп'ютерна інженерія» і має основоположне значення для підготовки фахівців освітніх рівнів бакалавра і магістра як в межах «Комп'ютерної інженерії», так і низки суміжних спеціальностей, пов'язаних із комп'ютерною технікою, цифровим приладобудуванням, цифровими телебаченням і радіозв'язком, інформаційно-вимірною технікою, системами телекомунікацій та іншими електронними галузями людської діяльності. Очевидно, що означення «комп'ютерна» є цілком зрозумілим і окремого коментаря не потребує. Водночас термін «схемотехніка», зважаючи на його локальне (щодо географії) використання, вимагає певного попереднього пояснення. В українському науково-технічному лексиконі термін «схемотехніка» свого часу з'явився як пряма калька з російської мови, куди, в свою чергу, він проник із професійного жаргону розробників різних електронних засобів. Така ситуація є наслідком того, що в українській мові (як і в російській) кореневе поняття «схема» набуло двох самостійних значень: перше – це умовне графічне зображення деякого електричного кола (що, до речі, відповідає світовому контексту слова *scheme*); друге – це саме електричне коло деякого призначення. «Жаргонне» походження терміна підтверджується також тим, що у провідних науково-технічних лексиконах (наприклад, в британсько-американському) немає прямого відповідника поняттю «комп'ютерна схемотехніка». Як показує аналіз зарубіжних науково-технічних і офіційних джерел (наприклад, *Computer Engineering Curricula 2016, Curriculum Guidelines for Undergraduate Degree Programs in Computer Engineering*), там цьому терміну за змістом відповідають *Discrete Structures*, *Computer Circuitry* або *Digital and Analog Circuits*. Однак, незважаючи на такі «дефекти» в етимології терміна, він «вижив» і зараз досить широко використовується в освіті, в науковій та в проектній діяльності. Тому далі «комп'ютерною схемотехнікою» будемо називати науково-технічну дисципліну, яка вивчає методи аналізу, синтезу і оптимізації апаратних засобів (*hardware*) комп'ютерів і комп'ютерних систем, а також шляхи їх технічної реалізації. Разом з тим, будемо уникати, по можливості, розширеного трактування терміна «схема», замінюючи його вужчими поняттями «пристрій», «структура», «засіб» тощо, які мають прямих відповідників у провідних науково-технічних лексиконах.

Як науково-технічний напрям «Комп'ютерна схемотехніка» спирається на новітні технології виготовлення різноманітних електронних компонентів, що використовуються в цифровій, аналого-цифровій і аналоговій техніці. Причому саме характеристики електронних компонентів вирішальною мірою визначають можливості комп'ютерних систем і мереж. Водно-

час, покращення властивостей інтегральних транзисторів, діодів, резисторів, конденсаторів та іншого дає можливість вдосконалювати цифрові пристрої, мінімізувати їх масо-габаритні показники, збільшувати швидкодію і розширювати функціональні можливості. При цьому з'являються нові схемотехнічні і функціональні пропозиції щодо побудови апаратних блоків комп'ютерних систем і мереж, застосування їх в якісно новій комп'ютерній архітектурі. За останні десятиліття як в Україні, так і за кордоном з'явилися різноманітні підручники, присвячені комп'ютерній схемотехніці. Однак швидкий розвиток комп'ютерно-орієнтованих технологій і вимоги, що постійно зростають, до структурно-функціональних та техніко-економічних характеристик комп'ютерів і комп'ютерних систем вимагають регулярного оновлення тематики навчально-методичної літератури.

Обсяг і зміст підручника відповідають нормативним показникам, що вказані в освітньому стандарті спеціальності «Комп'ютерна інженерія», і тому є мінімально достатніми для засвоєння студентами. За необхідності глибшого вивчення деяких розділів чи тем це варто робити шляхом введення відповідних змін в варіативній частині навчальних планів. Для засвоєння матеріалу підручника необхідно мати підготовку з дисциплін «Основи теорії інформації і кодування», «Теорія електричних і магнітних кіл», «Комп'ютерна логіка» та «Комп'ютерна електроніка» в обсязі, передбаченому освітніми стандартами для студентів спеціальності «Комп'ютерна інженерія». З метою вирівнювання попередніх знань студентів перші два розділи книги містять інформацію «повторювально-втягувального» характеру. Наприкінці підручника наведено список основної сучасної літератури, опублікованої у цій галузі в Україні і за кордоном та рекомендованої для поглибленого вивчення певних розділів.

Матеріали підручника підготовлені викладачами профільних кафедр, що забезпечують спеціальність «Комп'ютерна інженерія» у Вінницькому національному технічному університеті та в Національному технічному університеті «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Крім власне програмних положень підручник містить практично всі методичні знахідки, породжені більш ніж двадцятирічним досвідом викладання цієї дисципліни (з назвами, які часом змінювалися) на вказаних кафедрах. Під час підготовки текстового матеріалу книги автори звертали особливу увагу на формування, вибір та застосування лексики, граматики і стилістики професійної української мови. Це дозволило мінімізувати вплив фахового жаргону на вміст підручника. У цьому плані плідно здійснювалися консультації з провідними фахівцями Інституту української мови НАН України. Підручник розраховано на студентів, аспірантів, науковців і фахівців-практиків, які вивчають комп'ютерну схемотехніку чи займаються розробкою комп'ютерних засобів. Автори будуть вдячні за відгуки щодо вдосконалення матеріалів книги.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Лехин С. М. Схемотехника ЭВМ / С. М. Лехин. – СПб. : БХВ-Петербург, 2010. – 672 с.
2. Бабич М. П. Комп'ютерна схемотехніка : навч. пос. / М. П. Бабич, І. А. Жуков. – К. : «МК-Прес», 2004. – 412 с.
3. Компьютерная схемотехника (краткий курс) / Процюк Р. О., Корнейчук В. И., Кузьменко П. В., Тарасенко В. П. – К. : «Корнійчук», 2006. – 433 с.
4. Гикавий В. А. Цифрова і аналогова схемотехніка : лабораторний практикум / В. А. Гикавий. – Вінниця : ВДТУ, 2001. – 99 с.
5. Бабич Н. П. Компьютерная схемотехніка. Методы построения и проектирования : учебное пособие / Н. П. Бабич, И. А. Жуков. – К. : МК-Пресс, 2004. – 576 с.
6. Угрюмов Е. П. Цифровая схемотехніка : учебное пособие / Угрюмов Е. П. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – СПб. : БХВ-Петербург, 2007. – 800 с : ил.
7. Рябенський В. М. Цифрова схемотехніка : навчальний посібник / Рябенський В. М., Жуйков В. Я., Гулий В. Д. – Львів : Новий Світ, 2000, 2009. – 736 с.
8. Білінський Й. Й. Цифрова схемотехніка : навч. посібник. Ч. 1. Базові поняття цифрової схемотехніки / Білінський Й. Й., Гикавий В. А., Мельничук А. О. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 133 с.
9. Бойт К. Цифровая электроника / К. Бойт ; пер. с нем. М. М. Ташлицкого. – М. : Техносфера, 2007. – 472 с.
10. Цифровая схемотехника и архитектура компьютера / Д. М. Харрис, С. Л. Харрис. – Morgan Kaufman, 2013. – 1662 с.
11. Теоретичні основи комп'ютерних напівпровідникових електронних компонентів : навч. пос. / Азаров О. Д., Гарнага В. А., Сапсай Т. Г., Тарасенко В. П. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – 134 с.
12. Азаров О. Д. Комп'ютерна електроніка. Елементи цифрових : навч. пос. / Азаров О. Д., Байко В. В., Обертюх М. Р. ; під загальною редакцією О. Д. Азарова. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2003. – 170 с.
13. Азаров О. Д. Комп'ютерна електроніка : лабораторний практикум. / Азаров О. Д., Байко В. В., Крупельницький Л. В. – Вінниця : ВДТУ, 2001. – 111 с.
14. Азаров О. Д. Комп'ютерна електроніка. Частина 2. Елементи цифрових схем : навчальний посібник / Азаров О. Д., Байко В. В., Обертюх М. Р. ; під загальною редакцією доктора технічних наук, професора О. Д. Азарова. – Вінниця, 2002. – 170 с.
15. Азаров О. Д. Комп'ютерна електроніка. Основи теорії транзисторів та транзисторних схем : навч. посібник / Азаров О. Д., Суприган О. І., Байко В. В. – Вінниця : ВНТУ, 2004. – 128 с.

16. Методичні вказівки до виконання курсової роботи з курсу «Комп'ютерна електроніка» для студентів бакалаврського напрямку 6.0915 «Комп'ютерна інженерія» спеціальності 7.091501 «Комп'ютерні системи та мережі» ступеневої підготовки спеціалістів з вищою технічною освітою / Уклад. : Азаров О. Д., Байко В. В., Крупельницький Л. В. – Вінниця : ВДГУ, 2001. – 46 с.

17. Методичні вказівки до виконання курсового проекту з дисципліни «Комп'ютерна електроніка» для студентів напряму підготовки 0915 «Комп'ютерна електроніка» / Уклад. : Азаров О. Д., Байко В. В., Крупельницький Л. В. – [2-ге вид., доповнене] – Вінниця : ВНТУ, 2004. – С. 1–75.

Навчальне видання

**Азаров Олексій Дмитрович
Гарнага Володимир Анатолійович
Клятченко Ярослав Михайлович
Тарасенко Володимир Петрович**

Комп'ютерна схемотехніка

Підручник для студентів ВНЗ

Рукопис оформлено В. Гарнагою

Науковий редактор В. Тарасенко

Редактор В. Дружиніна

Оригінал-макет виготовлено О. Ткачуком

Підписано до друку 19.06.2018.
Формат 29,7×42¹/₄. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. друк. арк. 13,8.
Наклад 500 (1-й запуск 1–100) пр. Зам. 2018-124.

Видавець та виготовлювач
інформаційний редакційно-видавничий центр.
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Хмельницьке шосе, 95,
м. Вінниця, 21021.
Тел. (0432) 65-18-06.
press.vntu.edu.ua;

E-mail: kivc.vntu@gmail.com.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.