

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ВІННИЦЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**О.Д.Азаров      В.В.Байко      М.Р.Обертюх**

**ОСНОВИ ТЕОРІЇ  
ЛІНІЙНИХ ІНТЕГРАЛЬНИХ СХЕМ**

**Видання друге  
(стереотипне)**

Затверджено на засіданні Ученої ради Вінницького державного технічного університету як навчальний посібник для студентів спеціальності "Комп'ютерні системи та мережі" денної та заочної форми навчання. Протокол №12 від 30 травня 2002 року.

**Вінниця ВДТУ 2002**

УДК 621.382.8.(075)

A35

Рецензенти:

*В.С. Осадчук*, доктор технічних наук, професор

*В.П. Тарасенко*, доктор технічних наук, професор

*Є.Т. Володарський*, доктор технічних наук, професор

Рекомендовано до видання Ученою радою Вінницького державного технічного університету Міністерства освіти і науки України.

**Азаров О.Д., Байко В.В., Обертюх М.Р.**

A35 **Основи теорії лінійних інтегральних схем.**

Навчальний посібник – видання друге (стереотипне). Під загальною редакцією доктора технічних наук, професора О.Д.Азарова.- Зінниця: ВДТУ, 2002.- 225 с.

У даному посібнику наводяться відомості з лінійних інтегральних схем (ЛІС). Розглядаються основні аспекти електричних моделей біполярних, польових транзисторів, МОН-структур і основні співвідношення, що зв'язують електричні та фізико-технологічні параметри елементів. Опис подано у стислій формі і не перевантажено проміжними математичними викладами. Аналізуються схеми найбільш відомих джерел струму, джерел напруги, диференціальних і операційних підсилювачів, перетворювачів код-аналог і аналог-код. Аналізуються як загальні функціональні, так і принципів електричні схеми пристроїв. Навчальний посібник містить лабораторний практикум, який дозволить студентам краще засвоїти викладений в лекціях матеріал. Відомості, наведені в навчальному посібнику, можуть використовуватись при самостійній роботі студентів, а також можуть бути корисні при курсовому й дипломному проектуванні.

Навчальний посібник призначений для студентів спеціальностей 7.091501. “Комп’ютерні системи і мережі” курсу “Лінійні інтегральні схеми” і деякі його розділи можуть бути використані для вивчення курсів “Комп’ютерна електроніка”, “Аналого-цифрова техніка”, “Моделювання пристроїв та елементів”, “Основи автоматизації проектування засобів ОТ”, “Основи електротехніки”, “Схемотехніка ЕОМ”, “Пристрої зв’язку з об’єктами керування”, а також може бути рекомендований фахівцям в галузі розробки й застосування інтегральних лінійних аналогових схем.

УДК 621.328.8.(075)

© О.Д.Азаров, В.В.Байко, М.Р.Обертюх, 2002

## Вступ

В навчальному посібнику викладені сучасні методи аналізу, проектування та застосування деяких лінійних інтегральних схем.

Матеріал посібника побудований таким чином, що чітко проглядається зв'язок між окремими розділами. Поряд із загальними питаннями наводяться конкретні приклади, що ілюструють можливі варіанти технічної реалізації. Потрібно відзначити, що навчальний посібник не включає матеріали фізичних і фізико-технологічних основ напівпровідникових приладів. Автори обмежуються описом тих зовнішніх характеристик електронних приладів, які практично використовуються при розрахунку в розглянутих лінійних інтегральних схемах, тобто в матеріалах першого розділу наведені тільки ті відомості, які необхідні в подальшому для проектування й проведення дослідження джерел струму, напруги та операційних підсилювачів. Підходи, які можуть виявитись корисними при проектуванні та дослідженні, відзначаються в загальних положеннях, а найбільш важливі з обчислювальних процедур ілюструються прикладами розрахунку працездатності схем в лабораторних роботах. Дослідження джерел струму, джерел постійної напруги, підсилювачів постійного струму може проводитись вимірюванням параметрів схем, зібраних на дискретних компонентах, наприклад, у вигляді мікромакетів. Проте параметри схем, зібраних на дискретних компонентах і у вигляді інтегральних схем, можуть істотно відрізнятись. Слід також зауважити, що макетування інтегральної схеми за допомогою дискретних компонентів взагалі не має сенсу, оскільки інтегральні компоненти мають свої специфічні властивості. Сучасне проектування лінійних інтегральних схем (ЛІС) проводиться виключно за допомогою комп'ютерного моделювання з використанням сучасних бібліотек елементів. Дослідження ж параметрів пристроїв здійснюється вже для виготовлених мікросхем. Крім того, джерела струму, джерела напруги, як правило, є елементами більш великих мікросхем і у вигляді окремих інтегральних схем не випускаються. Викладені методичні аспекти використання пакету програм PSpice при проектуванні лінійних інтегральних схем. За їх допомогою моделюються перехідні процеси при дії різних вхідних сигналів, у режимі постійного струму, частотні характеристики та інші параметри за допомогою комп'ютерних моделей напівпровідникових приладів та операційних підсилювачів.

Навчальний посібник допоможе студентам глибше засвоїти розділ курсу "Лінійні інтегральні схеми" з питань проектування та дослідження лінійних інтегральних схем.

Весь матеріал розбито по розділах таким чином. У розділі 1 описано загальні теоретичні відомості і розрахункові співвідношення в напівпровідникових приладах і дано основні схеми їх вмикання. У розділах 2 і 3 більш докладно розглядаються джерела струму і напруги відповідно, а також ле-

які основні схеми їх побудови, і принципи проектування й розрахунку. Розділ 4 присвячено підсилювачам постійного струму (ППС), дається повний перегляд схемних рішень та їх функціонування. Досліджується внутрішня структура різноманітних схем диференційних підсилювачів. Питання проектування диференційних підсилювачів на біполярних транзисторах описані в першій частині цієї глави, потім розглядаються диференційні підсилювачі на польових транзисторах. Розглянуті операційні підсилювачі без зворотного і зі зворотним зв'язком та їх основні характеристики. Важливим є питання стійкості роботи підсилювача. Це питання також розглянуто у данному розділі поряд з викладенням методів коригування частотної характеристики, яка необхідна для забезпечення запасу стійкості. Представленні деякі приклади застосування операційних підсилювачів та їх схемна реалізація. У розділі 5 розглядаються цифроаналогові (ЦАП) та аналого-цифрові перетворювачі (АЦП), основні параметри цих пристроїв і алгоритми перетворення. Наведені основні схемні рішення, що застосовуються при реалізації ЦАП та АЦП, відзначаються переваги та недоліки пристроїв, побудованих на їх базі.

Автори хотіли б висловити подяку всім, хто допомагав їм при підготовці цього навчального посібника, і особливо допитливим і зацікавленим студентам, питання яких підштовхували нас шукати прості та зрозумілі пояснення.

## Література

1. Степаненко И. П. Основы микроэлектроники: Учебное пособие для вузов. -М.: Сов.радио,1980. - 424с.
2. Степаненко И. П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем, изд. 3-е, перераб. и доп.-М.: "Энергия", 1973.
3. Соклоф С. Аналоговые интегральные схемы : Пер. с англ. -М.. Мир, 1988. -583с, ил.
4. Достал И. Операционные усилители: Пер. с англ. -М.: Мир, 1982. -512с., ил.
5. Гринфилд Дж. Транзисторы и линейные ИС: Руководство по анализу и расчету: Пер. с англ. -М.: Мир, 1992. -560 с., ил.
6. Гребень А. Б. Проектирование аналоговых интегральных схем . Пер. с англ. М., "Энергия", 1976, 256 с. с ил.
7. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство Пер. с нем. -М.: Мир, 1982. -512 с., ил.
8. В. А. Поджаренко, А. Д. Азаров, В. А. Власенко, И. И. Коваленко Избыточные системы счисления, моделирование, обработка данных и системное проектирование в технике преобразования информации: Учеб пособие. -К.: Выща школа, 1990. -208 с., ил.
9. Азаров А. Д. Разработка теории аналого-цифрового преобразования на основе избыточных позиционных систем счисления.- Винница, 1994. - 438с.
10. Смоллов В. Б. и др. Микроэлектронные и аналого-цифровые преобразователи информации. -Л.: "Энергия", 1976. -336с. с ил.
11. П.Скаржепа В. А., Сенько В. И. Электроника и микросхемотехника: сб. задач / Под общ. ред. А. А. Краснопрощиной. -К.: Выща шк. 1989. -232 с.
- 12.Фолкенберри Л. Применения операционных усилителей и линейных ИС: Пер. с англ. -М.: Мир, 1985,-572с., ил.
- 13.Шило В. Л. Линейные интегральные схемы в радиоэлектронной аппаратуре. -2-е изд., перераб. и доп. -М.: Сов. радио, 1979. -368с , ил.
14. Иванов В. Н., Иванов В. В. Проектирование аналоговых систем на специализированных БИС. -Л.: ЦНИИ "Румб", 1988, - 139 с., ил.
15. Гнатек Ю. Р. Справочник по цифроаналоговым и аналогоцифровым преобразователям: Пер. с англ./ Под ред. Ю. А. Рюжина. -М.: Радио и связь, 1982, -552с., ил.
16. Марцинкявичус А.-Й.К. Быстродействующие интегральные микросхемы ЦАП и АЦП и измерение их параметров. -М.: "Радио и связь", 1988, - 222с., ил.
17. Коломбет Е. А. Микроэлектронные средства обработки аналоговых сигналов. -М.: "Радио и связь", 1991, -376с.
18. Мулявка Я. Схемы на операционных усилителях с переключаемыми конденсаторами. Пер. с польск. М П Шарапова -М.: "Мир". 1992, -416с.

19. Федорков Б. Г., Телец В.А. Микросхемы ЦАП и АЦП, функционирование, параметры, применение. -М.: “Энергоатомиздат” 1990,-320с.

20. Шлыков Г.П. Измерение параметров интегральных ЦАП и АЦП. -М.: “Радио и связь”. 1985, -129с., ил.

21. Орнатский П.П. Автоматические измерения и приборы (Аналоговые и цифровые). - 5-е изд. перераб и доп.-К.: “Вища школа”. 1986, -503с., ил.

22. Швецкий Б.И. Электронные цифровые приборы. - 2-е изд. перераб. и доп.-К.: Техніка. 1991, -190с., ил.

23. Интегральные микросхемы. Микросхемы для аналого-цифрового преобразования и средств мультимедиа. Выпуск 1 - М.:ДОДЭКА, 1996г., 384 с.

24. Высокопроизводительные преобразователи информации на основе избыточных систем счисления / О. Д. Азаров, А. П. Стахов, В. П. Марценюк, В. И. Моисеев В. Я. Стейскал // Учебное пособие для студентов специальности "Вычислительные машины, комплексы, системы и сети".- Киев: УМК ВО, 1988. - 160 с.

## ЗМІСТ

<b>Вступ</b> .....	3
<b>Розділ 1. Напівпровідникові прилади</b> .....	5
1.1. Теоретичні відомості та розрахункові відношення в біполярних транзисторах .....	5
1.1.1. Статичні характеристики .....	11
1.1.2. Складені транзистори .....	15
1.2. Теоретичні відомості та розрахункові співвідношення в польових транзисторах .....	18
1.2.1. Статичні характеристики .....	19
<b>Розділ 2. Джерела постійного струму</b> .....	24
2.1. Найпростіші джерела постійного струму .....	26
2.2. Відбивачі струму .....	35
2.3. Схеми джерел струму на базі підсилювачів постійного струму (ППС) .....	48
Лабораторна робота №1. Дослідження джерел струму .....	53
<b>Розділ 3. Джерела постійної напруги</b> .....	59
3.1. Найпростіші джерела напруги .....	60
3.2. Джерела напруги та опорної напруги, побудовані на транзисторах .....	65
3.3. Джерело опорної напруги, що визначається шириною забороненої зони .....	72
3.4. Джерела напруги з використанням підсилювачів постійного струму .....	78
3.5. Інтегральні схеми в приладах стабілізації напруги живлення .....	85
Лабораторна робота №2. Дослідження джерел напруги .....	88
<b>Розділ 4. Підсилювачі постійного струму</b> .....	95
4.1. Загальні теоретичні відомості та розрахункові співвідношення .....	95
4.2. Найпростіші підсилювачі постійного струму .....	100
4.2.1. Найпростіші підсилювачі постійного струму на біполярному транзисторі .....	100
4.2.2. Найпростіші підсилювачі на польових транзисторах .....	105
4.3. Диференційні підсилювачі .....	109
4.3.1. Диференційний підсилювальний каскад з резисторним навантаженням .....	110
4.4. Операційні підсилювачі напруги та струму .....	123
4.4.1. Основні відомості про операційні підсилювачі .....	123
4.4.2. Вплив від'ємного зворотного зв'язку (ЗЗ) на параметри й характеристики ОП .....	131
4.4.3. Практичні схеми операційних підсилювачів .....	134
4.4.4. Основні схеми вмикання ОП .....	138

Лабораторна робота №3. Вивчення та дослідження підсилювачів постійного струму.....	145
<b>Розділ 5. Цифроаналогові та аналого-цифрові перетворювачі.....</b>	<b>151</b>
5.1. Цифроаналогові перетворювачі.....	152
5.1.1. Параметри ЦАП.....	152
5.1.2. ЦАП з підсумовуванням еталонних величин. ....	156
5.1.2.1. ЦАП з використанням ланцюгів резисторів. ....	157
5.1.2.2. Струмові ключі.....	163
5.1.2.3. ЦАП з використанням ланцюгів конденсаторів. ....	165
5.1.3. Паралельні ЦАП на базі резистивних діляників. ....	167
5.1.4. ЦАП с проміжним перетворенням цифрового коду у часовий інтервал.....	168
5.1.5. Послідовний ЦАП.....	169
5.2. Аналого-цифрові перетворювачі.....	171
5.2.1. Параметри АЦП.....	171
5.2.2. Алгоритми аналого-цифрового перетворення.....	174
5.2.3. АЦП непрямого перетворення.....	175
5.2.3.1. Перетворювачі напруги в частоту.....	175
5.2.3.2. Інтегруючі АЦП.....	177
5.2.3.3. АЦП з двотактним інтегруванням.....	178
5.2.3.4. АЦП із зрівноваженням заряду.....	180
5.2.4. Сігма-дельта АЦП.....	181
5.2.5. АЦП послідовної лічби.....	183
5.2.6. АЦП послідовного наближення.....	185
5.2.6.1. Найпростіший АЦП послідовного наближення.....	185
5.2.6.2. Конвейєрні АЦП.....	186
5.2.7. Паралельні АЦП.....	188
<b>Додаток 1. Коротка довідка по PSpice.....</b>	<b>192</b>
<b>Додаток 2. Приклади вхідних файлів для дослідження схем джерел струму.....</b>	<b>203</b>
<b>Додаток 3. Приклади вхідних файлів для дослідження схем напруги.....</b>	<b>209</b>
<b>Додаток 4. Приклади вхідних файлів для дослідження схем підсилювачів постійного струму (ПІС).....</b>	<b>218</b>
<b>Список літератури.....</b>	<b>221</b>



**Навчальне видання**

**О.Д.Азаров    В.В.Байко    М.Р.Обертюх**

**ОСНОВИ ТЕОРІЇ  
ЛІНІЙНИХ ІНТЕГРАЛЬНИХ СХЕМ**

**Видання друге  
(стереотипне)**

**Навчальний посібник**

Оригінал-макет підготовлено авторами

Редактор С.А.Малішевська

Підписано до друку 10.09.2002р.

Формат 29,7x42¼.

Друк різнографічний

Тираж 75 прим.

Зам. № 2002 - 189

Гарнітура Times New Roman

Ум. друк. арк. 9.65

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі  
Вінницького державного технічного університету  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВДТУ, ГНК, 9-й поверх  
Тел (0432) 44-01-59