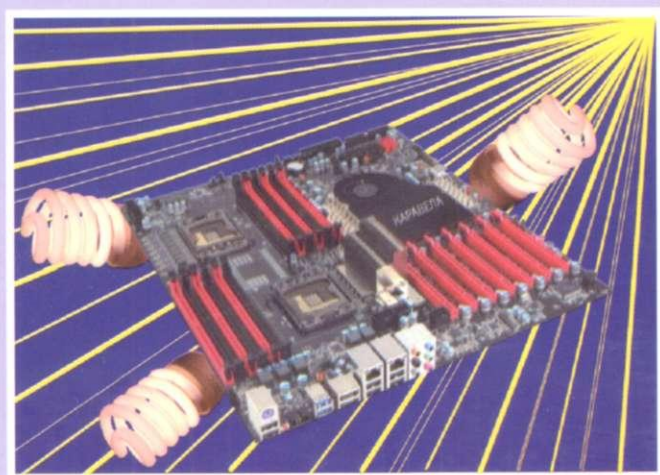


А.Г. СОСКОВ, Ю.П. КОЛОНТАЄВСЬКИЙ

# ПРОМИСЛОВА ЕЛЕКТРОНІКА

Теорія і практикум

ПІДРУЧНИК



ВИДАВНИЦТВО "КАРАВЕЛА"

**А.Г. Сосков, Ю.П. Колонтаєвський**

# **ПРОМИСЛОВА ЕЛЕКТРОНІКА**

## **Теорія і практикум**

## **Теорія і практикум**

**За редакцією**  
**доктора технічних наук, професора**  
**А.Г. Соскова**

*Затверджено*  
*Міністерством освіти і науки України*  
*як підручник*  
*для студентів вищих навчальних закладів*

**Київ «Каравела» 2013**

УДК 621.38(075.8)  
ББК31.2  
К45

Гриф надано  
Міністерством освіти і науки України  
(лист № 14/18.2-2321 від 22.01.2008 р.)

**Рецензенти:**

**Жемеров Г.Г.**, доктор технічних наук, професор кафедри промислової і біомедичної електроніки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»;

**Кононов Б.Т.**, заслужений діяч науки і техніки України, доктор технічних наук, професор кафедри електропостачання Харківського військового університету;

**Батигін Ю.В.**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри фізики Харківського національного автомобільно-дорожнього університету.

**К45 Сосков А.Г., Колонтаєвський Ю.П.**

**Промислова електроніка: Теорія і практикум:** Підручник. / За ред. А.Г. Соскова. - К.: Каравела, 2013. - 496 с.

**ISBN 978-966-2229-48-6**

Розглянуто принцип дії, характеристики, параметри та області застосування електронних напівпровідникових приладів; побудову та роботу пристроїв інформаційної електроніки: підсилювачів напруги змінного та постійного струмів, імпульсних і цифрових пристроїв, виконаних на основі дискретних елементів та інтегральних мікросхем; пристроїв енергетичної електроніки: вентильних ведених мережею та автономних перетворювачів; наведено методики розрахунку основних вузлів електронних пристроїв та відомості про новітні тенденції розвитку приладів і схемотехніки електроніки.

Теоретичні положення підкріплено прикладами виконання практичних завдань. Для забезпечення можливості формування завдань для курсових та контрольних робіт посібник містить сто варіантів восьми розрахунково-графічних робіт.

Для студентів, які навчаються за напрямками «Електротехніка і електротехнології» та «Електромеханіка». Може бути корисним неспеціалістам у галузі електроніки для самоосвіти.

**УДК 621.38(075.8)**  
**ББК 31.2**

**ISBN 978-966-2229-48-6**

© Сосков А.Г., Колонтаєвський Ю.П., 2013  
© Видавництво «Каравела», 2013

# ЗМІСТ

|  |    |
|--|----|
| ПЕРЕДМОВА.....   | 9  |
| ВСТУП.....   | 10 |
| РОЗДІЛ 1. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ РОБОТИ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИБАДІВ.....   | 17 |
| 1.1. Напівпровідники. Загальні відомості.....  | 17 |
| 1.2. Фізичні основи роботи електронно-діркового переходу ( <i>p-n</i> переходу).....                         | 20 |
| Контрольні запитання.....  | 23 |
| РОЗДІЛ 2. НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПРИБАДИ ТА ЇХ СТИСЛА ХАРАКТЕРИСТИКА.....   | 24 |
| 2.1. Класифікація напівпровідникових приладів.....   | 24 |
| 2.2. Напівпровідникові резистори.....  | 24 |
| 2.3. Напівпровідникові діоди.....  | 25 |
| 2.4. Біполярні транзистори.....  | 31 |
| 2.4.1. Побудова та принцип дії транзистора.....  | 31 |
| 2.4.2. Основні схеми вмикання і статичні характеристики біполярного транзистора.....                         | 34 |
| 2.4.3. Біполярний транзистор як активний чотириполюсник ( <i>h</i> -параметри).....                          | 39 |
| 2.4.4. Основні режими роботи біполярного транзистора.....  | 41 |
| 2.4.5. Складені транзистори.....   | 44 |
| 2.4.6. Одноперехідний транзистор.....  | 46 |
| 2.5. Уніполярні (польові) транзистори.....   | 47 |
| 2.5.1. Загальні відомості.....   | 47 |
| 2.5.2. Польові транзистори з керуючим <i>p-n</i> переходом.....  | 47 |
| 2.5.3. СІТ-транзистори.....  | 51 |
| 2.5.4. Польові транзистори з ізольованим затвором (МДН-транзистори).....                                     | 52 |
| 2.5.5. Біполярні транзистори з ізольованим затвором (БПЗ).....   | 54 |
| 2.6. Перемикаючі напівпровідникові прилади (тиристори).....  | 56 |
| 2.6.1. Диністори.....  | 57 |
| 2.6.2. Триністор (керований діод).....   | 59 |
| 2.6.3. Спеціальні типи тиристорів (симістор, фототиристор, двоопераційний тиристор, оптронний тиристор)..... | 63 |
| 2.6.4. Електростатичні тиристори.....  | 65 |
| 2.6.5. Запірний тиристор з МОН-керуванням.....   | 66 |
| 2.7. Інтегральні мікросхеми.....   | 66 |
| 2.7.1. Загальні відомості.....   | 66 |
| 2.7.2. Гібридні ІМС.....   | 67 |

|  |    |
|--|----|
| 2.7.3. Напівпровідникові ІМС.....  | 69 |
| 2.7.4. Призначення і параметри ІМС.....  | 69 |
| 2.8. Сучасний стан і тенденції розвитку керованих силових напівпровідникових приладів..... | 72 |
| Контрольні запитання.....  | 81 |

### РОЗДІЛ 3. ПІДСИЛЮВАЧІ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИГНАЛІВ.

|   |     |
|---|-----|
| ПІДСИЛЮВАЧІ НАПРУГИ ЗМІННОГО СТРУМУ.....  | 83  |
| 3.1. Загальні відомості про підсилювачі та їх класифікація.....                       | 83  |
| 3.2. Основні параметри і характеристики підсилювачів.....                             | 85  |
| 3.3. Принципи побудови підсилювачів.....  | 87  |
| 3.4. Основні режими (класи) роботи підсилювачів.....                                  | 89  |
| 3.5. Кола зміщення підсилюючих каскадів.....  | 90  |
| 3.6. Температурна стабілізація підсилювачів.....                                      | 92  |
| 3.7. Каскади попереднього підсилення.....   | 94  |
| 3.7.1. Каскад попереднього підсилення на біполярному транзисторі з СЕ.....            | 94  |
| 3.7.2. Підсилюючий каскад з СК (емітерний повторювач).....                            | 99  |
| 3.7.3. Підсилюючий каскад з СБ.....   | 101 |
| 3.8. Каскади попереднього підсилення на польових транзисторах.....                    | 103 |
| 3.8.1. Підсилюючий каскад з СВ.....   | 103 |
| 3.8.2. Підсилюючий каскад з СС.....   | 105 |
| 3.8.3. Зворотні зв'язки у підсилювачах.....   | 107 |
| 3.9. Багатокаскадні підсилювачі.....  | 111 |
| 3.9.1. Багатокаскадні підсилювачі з резистивно-ємнісними міжкаскадними зв'язками..... | 111 |
| 3.9.2. Багатокаскадні підсилювачі з трансформаторними зв'язками ...                   | 114 |
| 3.9.3. Безтрансформаторні вихідні каскади підсилення.....                             | 118 |
| 3.9.4. Вибіркові підсилювачі.....   | 120 |
| Контрольні запитання.....   | 122 |

|   |     |
|---|-----|
| РОЗДІЛ 4. ПІДСИЛЮВАЧІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ.....    | 123 |
| 4.1. Загальні відомості.....                    | 123 |
| 4.2. Підсилювач прямого підсилення.....         | 124 |
| 4.3. Балансні ППС.....                          | 126 |
| 4.4. Диференційний ППС.....                     | 128 |
| 4.5. Підсилювачі з подвійним перетворенням..... | 129 |
| 4.6. Операційні підсилювачі.....                | 129 |
| 4.6.1. Загальні відомості.....                  | 129 |
| 4.6.2. Інвертуючий підсилювач.....              | 136 |
| 4.6.3. Неінвертуючий підсилювач.....            | 138 |
| 4.6.4. Перетворювач струму у напругу.....       | 139 |
| 4.6.5. Інвертуючий суматор.....                 | 140 |

|  |            |
|--|------------|
| 4.6.6. Неінвертуючий суматор.....  | 140        |
| 4.6.7. Інтегруючий підсилювач (інтегратор).....  | 142        |
| 4.6.8. Диференціюючий підсилювач (диференціатор).....                                    | 143        |
| 4.6.9. Компаратори (схеми порівняння).....   | 143        |
| 4.6.10. Підсилювач змінного струму на ОП<br>з однополярним живленням.....                | 144        |
| 4.6.11. Збільшення потужності вихідного сигналу ОП.....                                  | 145        |
| 4.6.12. Прецизійний випрямляч.....   | 145        |
| Контрольні запитання.....  | 147        |
| <b>РОЗДІЛ 5. ІМПУЛЬСНІ ПРИСТРОЇ.....</b>   | <b>148</b> |
| 5.1. Загальні відомості про імпульсні пристрої. Параметри імпульсів ....                 | 148        |
| 5.2. Електронні ключі та найпростіші схеми формування імпульсів. ....                    | 151        |
| 5.3. Мультивібратори.....  | 154        |
| 5.3.1. Загальні відомості.....   | 154        |
| 5.3.2. Мультивібратор з колекторно-базовими зв'язками<br>у автоколивальному режимі.....  | 155        |
| 5.3.3. Мультивібратор на ОП.....   | 160        |
| 5.3.4. Одновібратор з колекторно-базовими зв'язками<br>(чекаючий мультивібратор).....    | 162        |
| 5.3.5. Одновібратор на ОП.....   | 164        |
| 5.4. Блокінг-генератори.....   | 165        |
| Контрольні запитання.....  | 170        |
| <b>РОЗДІЛ 6. ЛОГІЧНІ ЕЛЕМЕНТИ.....</b>   | <b>171</b> |
| 6.1. Алгебра логіки.....   | 171        |
| 6.2. Реалізація простих логічних функцій. Логічні елементи.....                          | 173        |
| Контрольні запитання.....  | 178        |
| <b>РОЗДІЛ 7. ТРИГЕРИ.....</b>  | <b>179</b> |
| 7.1. Загальні відомості про тригери та їх призначення.....                               | 179        |
| 7.2. Тригер на біполярних транзисторах<br>(симетричний тригер з лічильним запуском)..... | 179        |
| 7.3. Тригери на логічних елементах.....  | 182        |
| 7.3.1. RS-тригер.....  | 183        |
| 7.3.2. Тригер D-типу (D-тригер).....   | 185        |
| 7.3.3. Тригер T-типу (T-тригер).....   | 186        |
| 7.3.4. JK-тригер.....  | 186        |
| Контрольні запитання.....  | 187        |
| <b>РОЗДІЛ 8. ЦИФРОВІ МІКРОЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ.....</b>                                   | <b>188</b> |
| 8.1. Поняття про цифрові мікроелектронні пристрої.....                                   | 188        |
| 8.2. Реалізація складних логічних функцій.....   | 188        |

|   |            |
|---|------------|
| 8.3. Дешифратори.....   | 192        |
| 8.4. Мультиплексори.....  | 193        |
| 8.5. Лічильники імпульсів.....  | 194        |
| 8.6. Регістри.....  | 198        |
| 8.7. Цифро-аналогові (ЦАП) і аналого-цифрові (АЦП) перетворювачі... 199   |            |
| 8.7.1. Будова і робота ЦАП.....   | 199        |
| 8.7.2. АЦП послідовного наближення.....   | 204        |
| 8.8. Мультивібратори і одновібратори на логічних елементах і тригерах   | 207        |
| 8.9. ІМС таймера К1006ВИ1 (555).....  | 210        |
| 8.10. Мікропроцесорні пристрої.....   | 212        |
| 8.10.1. Загальні положення. Дещо з історії процесорів.....  | 212        |
| 8.10.2. Особливості роботи і використання мікропроцесорів. Двійкова система числення. Структура мікропроцесорної системи.....             | 215        |
| 8.10.3. Структура мікропроцесора.....   | 219        |
| 8.10.4. Запам'ятовуючі пристрої. Загальні відомості.....  | 220        |
| 8.10.5. Запам'ятовуючі пристрої для зберігання оперативної інформації (ОЗП).....  | 221        |
| 8.10.6. Запам'ятовуючі пристрої для зберігання постійної інформації (ПЗП).....  | 222        |
| 8.10.7. Алгоритм. Способи представлення алгоритму.....  | 224        |
| 8.10.8. Завдання і виконання програм МПП.....   | 224        |
| 8.10.9. Шістнадцяткова система числення.....  | 226        |
| 8.10.10. Асемблер.....  | 227        |
| 8.10.11. Програмовані логічні контролери.....   | 229        |
| 8.10.12. Мікроконтролери.....   | 232        |
| 8.10.13. Структура мікроконтролера.....   | 235        |
| 8.10.14. Співставлення основних етапів створення пристроїв керування на основі цифрових автоматів з жорсткою логікою і програмованих..... | 237        |
| Контрольні запитання.....   | 238        |
| <b>РОЗДІЛ 9. ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНІ ПРИСТРОЇ. ВИПРЯМЛЯЧІ.....</b>  | <b>241</b> |
| 9.1. Загальні відомості та класифікація.....  | 241        |
| 9.2. Експлуатаційні параметри і характеристики випрямлячів.....   | 244        |
| 9.3. Робота однофазного двопівперіодного випрямляча з нульовим виводом на активне навантаження.....                                       | 246        |
| 9.4. Робота однофазного мостового випрямляча на активне навантаження.....   | 250        |
| 9.5. Трифазні випрямлячі.....   | 252        |
| 9.5.1. Схема Міткевича.....   | 252        |
| 9.5.2. Схема Ларіонова.....   | 255        |
| 9.6. Згладжуючі фільтри.....  | 258        |
| 9.6.1. Основні поняття про фільтри.....   | 258        |

|  |     |
|--|-----|
| 9.6.2. Робота однофазних двопівперіодних випрямлячів на активно-ємнісне навантаження.....    | 260 |
| 9.6.3. Робота однофазних двопівперіодних випрямлячів на активно-індуктивне навантаження..... | 263 |
| 9.6.4. Деякі особливості роботи фільтрів.....  | 267 |
| 9.7. Зовнішні характеристики випрямлячів.....  | 269 |
| 9.8. Стабілізатори напруги.....  | 271 |
| 9.8.1. Параметричні стабілізатори.....   | 271 |
| 9.8.2. Компенсаційні стабілізатори.....  | 273 |
| 9.9. Стабілізатори струму.....   | 276 |
| 9.10. Керовані випрямлячі.....   | 279 |
| 9.10.1. Методи і пристрої регулювання напруги постійного струму ....                         | 279 |
| 9.10.2. Однофазний двопівперіодний керований випрямляч з нульовим виводом.....               | 286 |
| 9.10.3. Робота керованого випрямляча на активно-індуктивне навантаження .....                | 288 |
| 9.11. Системи імпульсно-фазового керування (СІФК).....                                       | 291 |
| 9.11.1. Загальні положення.....  | 291 |
| 9.11.2. СІФК з горизонтальним керуванням.....  | 292 |
| 9.11.3. СІФК з вертикальним керуванням.....  | 294 |
| 9.12. Побудова типових вузлів СІФК з вертикальним керуванням.....                            | 295 |
| 9.12.1. Генератор лінійно змінюваної напруги (ГЛН).....                                      | 296 |
| 9.12.2. Вузол порівняння (ВП).....   | 299 |
| 9.12.3. Імпульсний підсилувач потужності.....  | 300 |
| 9.12.4. Приклади реалізації СІФК.....  | 301 |
| 9.13. СІФК з цифровим керуванням.....  | 304 |
| Контрольні запитання.....  | 306 |

## РОЗДІЛ 10. ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНІ ПРИСТРОЇ.

|  |     |
|--|-----|
| РЕГУЛЯТОРИ (ПЕРЕРИВАЧІ) ЗМІННОГО СТРУМУ.....   | 309 |
| 10.1. Загальні відомості і класифікація.....   | 309 |
| 10.2. Однофазні регулятори змінного струму.....                                      | 311 |
| 10.3. Трифазні регулятори змінного струму.....                                       | 318 |
| 10.4. Схеми запуску керованих напівпровідникових приладів у регуляторах напруги..... | 324 |
| Контрольні запитання.....  | 336 |

## РОЗДІЛ 11. ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНІ ПРИСТРОЇ. ІНВЕРТОРИ.

|  |     |
|--|-----|
| ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ЧАСТОТИ.....                           | 338 |
| 11.1. Автономні інвертори.....                       | 338 |
| 11.1.1. Призначення та класифікація.....             | 338 |
| 11.1.2. Однофазний інвертор струму.....              | 340 |
| 11.1.3. Півмостовий однофазний інвертор напруги..... | 342 |



|   |            |
|---|------------|
| 11.1.4. Інвертори напруги на повністю керованих напівпровідникових приладах.....                                      | 345        |
| 11.1.5. Випрямлячі з багатократним перетворенням.....   | 351        |
| 11.2. Інвертори, ведені мережею.....  | 352        |
| 11.3. Приклади застосування інверторів із використанням мікроелектронних пристроїв.....                               | 355        |
| 11.4. Перетворювачі частоти.....  | 359        |
| Контрольні запитання.....   | 362        |
| <b>РОЗДІЛ 12. ВПЛИВ ВЕНТИЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ НА МЕРЕЖУ. ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ.....</b>                          | <b>363</b> |
| 12.1. Загальні відомості про електромагнітну сумісність.....  | 363        |
| 12.2. Коефіцієнт потужності вентильних перетворювачів та основні шляхи його зниження.....                             | 365        |
| 12.3. Некеровані джерела реактивної потужності.....   | 370        |
| 12.4. Керовані джерела реактивної потужності.....   | 375        |
| 12.4.1. Принцип керування параметрами змінного струму у чотириквadrантних перетворювачах з імпульсною модуляцією..... | 375        |
| 12.4.2. Регулювання неактивної потужності.....  | 382        |
| 12.4.3. Регульований повний опір.....   | 386        |
| 12.4.4. Комбінований фільтр змінного струму.....  | 388        |
| Контрольні запитання.....   | 391        |
| <b>ПРАКТИКУМ.....</b>   | <b>393</b> |
| Вправи.....   | 393        |
| 81. Попередній (ескізний) розрахунок підсилювача низької частоти.....   | 394        |
| 82. Остаточний розрахунок каскаду попереднього підсилення ПНЧ, виконаного за схемою з СЕ.....                         | 403        |
| 83. Розрахунок та аналіз роботи підсилюючих каскадів на операційних підсилювачах (ОП).....                            | 419        |
| 84. Побудова та аналіз роботи комбінаційних логічних пристроїв.....   | 425        |
| 85. Розрахунок імпульсних пристроїв та побудова лічильників імпульсів.....  | 430        |
| 86. Розрахунок однофазного випрямляча малої потужності.....   | 439        |
| 87. Застосування інтегральних стабілізаторів напруги.....   | 453        |
| 88. Розрахунок однофазного регулятора змінної напруги и.....  | 462        |
| Додаток А. Зміст пояснювальної записки до розрахунку електронного пристрою.....                                       | 471        |
| <b>ПІСЛЯМОВА.....</b>   | <b>473</b> |
| <b>РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА.....</b>  | <b>474</b> |
| <b>ПРИЙНЯТІ СКОРОЧЕННЯ.....</b>   | <b>477</b> |
| <b>ОСНОВНІ ЛІТЕРНІ ПОЗНАЧЕННЯ.....</b>  | <b>479</b> |
| <b>ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК.....</b>   | <b>488</b> |