

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ і НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”**

**Бучма І.М.**

# **СИГНАЛЬНІ ПРОЦЕСОРИ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИКИ**

Рекомендовано науково-методичною радою Національного університету “Львівська політехніка” як навчальний посібник для студентів другого (магістерського) рівня галузі знань 17 “Електроніка, автоматизація та електронні комунікації” спеціальності 174 “Автоматизація, комп’ютерно-інтегровані технології та робототехніка” спеціалізації “Комп’ютеризовані системи автоматики”

Видавець ФОП Марченко Т.В.

**Львів 2024**

**УДК 621 391**  
**Б 90**

Автор: Бучма І.М., д.т.н., професор, професор кафедри КСА НУЛП

Рецензенти: Мичуда З.Р., д.т.н., професор, професор кафедри КСА НУЛП  
Джала Р.М., д.т.н., ст..н.с., зав. лабораторією №9-1 ФМІ НАНУ  
Лукенюк А.А., к.т.н., директор Львівського центру Інституту космічних досліджень НАН та ДКА України

Рекомендовано науково-методичною радою Національного університету “Львівська політехніка” (протокол № 81 від 26.09.2024 року)

Навчальний посібник «**Сигнальні процесори в системах автоматики**» з дисципліни “Сигнальні процесори в системах автоматики” для студентів другого (магістерського) рівня галузі знань 17 “Електроніка, автоматизація та електронні комунікації” спеціальності 174 “Автоматизація, комп’ютерно-інтегровані технології та робототехніка”, спеціалізації “Комп’ютеризовані системи автоматики”.

Автор Бучма І.М., – Львів: Видавець ФОП Марченко Т.В., 2024. – 164 с.

У посібнику викладено матеріал, що стосується сигнальних процесорів, їх розвитку в процесі використання. Розглядається процес вдосконалення систем перетворення сигналів від аналогових до цифрових, похибки такого перетворення, переваги цифрових систем перед аналоговими, становлення мікроелектронної бази цифрових систем опрацювання сигналів, зокрема інтегральних мікросхем, званих сигнальними процесорами, особливості їх структури, принципи побудови основних вузлів для забезпечення максимальної швидкодії при опрацюванні цифрових потоків, наведено приклади дискретних систем автоматики на сигнальних процесорах, методи побудови розпорошених цифрових систем. Розглянуто принципи побудови блок-схем дискретних систем, методи їх аналізу, специфіку проведення частотного аналізу методами дискретного перетворення Фур’є (ДПФ) та швидкого перетворення Фур’є (ШПФ), звернуто увагу на адаптацію структури сигнальних процесорів під виконання алгоритмів ШПФ.

Навчальний посібник призначений для студентів спеціальності “Автоматизація, комп’ютерно-інтегровані технології та робототехніка”, спеціалізації “Комп’ютеризовані системи автоматики”. Може бути корисним викладачам та інженерам близьких спеціальностей.

© Бучма І.М., 2024

**ISBN 978-617-8194-31-4**

© Видавець ФОП Марченко Т.В.

# Зміст

<b>ВСТУП.....</b>	<b>8</b>
<b>Розділ 1. ЗАГАЛЬНІ ПОНЯТТЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ.....</b>	<b>13</b>
1.1. Класифікація сигналів за формою. Типи сигналів.....	11
1.2. Варіанти подання інформації сигналами.....	14
1.3. Розвиток техніки перетворення сигналів.....	16
1.4. Поняття про цифрову фільтрацію сигналів.....	17
1.5. Послідовність дій при перетворенні аналогового сигналу в цифровий і навпаки.....	18
1.6. Класифікація систем перетворення сигналів.....	19
1.7. Вимоги до цифрових систем перетворення сигналів.....	22
1.8. Апаратурні реалізації систем перетворення сигналів.....	23
1.8.1. Способи порівняння апаратурних рішень.....	24
1.8.2. Можливості реалізацій фільтру FIR 10-го порядку.....	25
1.8.3 Багатопроцесорні системи.....	28
Контрольні запитання.....	30
<b>Розділ 2. СПЕЦИФІКА ПЕРЕТВОРЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ СИГНАЛЬНИМ ПРОЦЕСОРОМ.....</b>	<b>33</b>
2.1. Прогнози розвитку комп'ютерних систем з появою інтегральних мікросхем.....	33
2.2. Основні області застосування комп'ютерних засобів.....	34
2.3. Особливості завдань маніпулювання даними.....	35
2.4. Особливості завдань перетворення сигналів	37
2.5. Режими перетворення сигналів DSP's.....	39
2.6. Принцип реалізації колового буфера....	41
2.7. Основні кроки алгоритму програмної реалізації фільтру FIR.....	43
2.8. Приклади алгоритмів цифрового перетворення сигналів.....	44
2.9. Принципи дії робочих буферів, спрощена структура DSP.....	45
2.10. Деякі особливості DSP's різних фірм.....	48

Контрольні запитання.....	51
<b>Розділ 3. ФАКТОРИ ВПЛИВУ НА ШВИДКОДІЮ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ ЗАСОБІВ ТА ТЕХНІЧНІ СТРУКТУРИ З ЗАСТОСУВАННЯМ СИГНАЛЬНИХ ПРОЦЕСОРІВ.....</b>	<b>52</b>
3.1. Вплив мови програмування.....	52
3.2. Вплив технічних засобів.....	55
3.3. Вплив програмних алгоритмів.....	57
3.4. Загальні відомості про цифрову систему керування.....	58
3.5. Структура розподіленої цифрової системи керування.....	60
3.6. Приклад застосування DSP у сервоприводі багатоосьового транспортера.....	61
Контрольні запитання.....	64
<b>Розділ 4. АРХІТЕКТУРА DSP.....</b>	<b>65</b>
4.1. Узагальнені структури обчислювальних засобів і DSP's зокрема	65
4.2. Вплив особливостей SHARC структури на швидкість виконання завдань.....	67
4.2.1. Високошвидкісні порти вводу-виводу.....	69
4.2.2. Генератори адрес даних (DAG).....	70
4.2.3. Множина реєстрів даних.....	71
4.2.4. Елементи арифметичної обробки.....	72
4.3. Типові сигнальні процесори деяких фірм з використанням формату даних з плаваючою комою.....	73
4.3.1. Сигнальні процесори фірми ANALOG DEVICES сімейства ADSP- 210xx.....	75
4.3.2. Сигнальні процесори фірми AT&T сімейства DSP32C і DSP3210...	78
4.3.3. Архітектурні особливості сигнальних мікропроцесорів сімейства TMS320Cxx фірми Texas Instruments.....	83
4.4. Формати даних у сигнальних процесорах.....	85
Контрольні запитання.....	86

<b>Розділ 5. ДВОПОРТОВА ПАМ'ЯТЬ І ПРЯМИЙ ДОСТУП ДО НЕЇ.....</b>	<b>88</b>
<b>5.1 Двопортова пам'ять.....</b>	<b>88</b>
<b>5.2. Прямий доступ до пам'яті.....</b>	<b>89</b>
5.2.1. Контролер прямого доступу до пам'яті.....	90
5.2.2. Схема під'єднання контролера.....	91
Контрольні запитання.....	93
<b>Розділ 6. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ТЕОРІЇ ПЕРЕТВОРЕННЯ</b>	
<b>АНАЛОГОВОГО СИГНАЛУ В ЦИФРОВИЙ ТА ЙОГО ВІДНОВЛЕННЯ.</b>	<b>94</b>
<b>6.1. Процеси дискретизації та квантування сигналу.....</b>	<b>94</b>
6.1.1. Концепція дискретизації та спектр дискретного сигналу.....	94
6.1.2. Теорема про дискретизацію (Шеннона -Котельникова).....	97
<b>6.2. Підходи до відтворення (реконструкції) аналогового сигналу</b>	
<b>на основі дискретних відліків.....</b>	<b>99</b>
<b>6.3. Квантування сигналу.....</b>	<b>103</b>
<b>6.4. Похибка квантування і співвідношення сигнал/шум.....</b>	<b>104</b>
6.4.1. Закони розподілу похибки квантування.....	104
6.4.2. Складові похибки квантування.....	105
6.4.3. Співвідношення сигнал шум.....	106
6.4.4. Співвідношення сигнал шум в логарифмічному масштабі.....	107
Контрольні запитання.....	109
<b>Розділ 7. МЕТОДИ ЗМЕНШЕННЯ РОЗРЯДНОСТІ ПРИ ПОДАННІ</b>	
<b>ЦИФРОВОГО СИГНАЛУ.....</b>	<b>111</b>
<b>7.1. Компресія та експансія.....</b>	<b>111</b>
<b>7.2. Різницева імпульсно-кодова модуляція (РІКМ).....</b>	<b>112</b>
<b>7.3. Дельта модуляція.....</b>	<b>114</b>
<b>7.4. Вдосконалений дельта модулятор та сігма - дельта модулятор....</b>	<b>115</b>
<b>7.5. АЦП типу сігма-дельта.....</b>	<b>116</b>
<b>7.6. Властивості модулятора сігма-дельта.....</b>	<b>118</b>
<b>7.7. Методи покращення співвідношення сигнал-шум у сігма-дельта</b>	
<b>модуляторі.....</b>	<b>120</b>

7.8. Специфіка аналого-цифрового перетворення сігма-дельта.....	122
7.9. Порівняння характеристик сігма-дельта АЦП з характеристиками АЦП інших типів.....	123
Контрольні запитання.....	124
<b>Розділ 8. ЛІНІЙНІ ДИСКРЕТНІ ПРИСТРОЇ (LTI- LINEAR-TIME-INVARIANT) ТА ЇХ МОДЕЛІ.....</b>	<b>125</b>
8.1. Властивості лінійних дискретних пристроїв.....	125
8.1.1. Лінійність.....	125
8.1.2. Стаціонарність.....	126
8.1.3. Причинність.....	127
8.1.4. Стабільність.....	127
8.2. Блок схеми ДП на основі різницевого рівня.....	128
8.3. Математичні моделі дискретних лінійних пристроїв (математичний опис ДП).....	129
8.3.1. Модель на основі згортки.....	129
8.3.2. Модель на основі Z- перетворення.....	131
8.3.2.1. Приклад застосування Z - перетворення для аналізу стабільності ДП.....	132
8.3.3. Модель різницевого рівня.....	134
8.3.4. Модель простору станів.....	134
Контрольні запитання.....	136
<b>Розділ 9. ЧАСТОТНИЙ АНАЛІЗ ДЕТЕРМІНОВАНИХ СИГНАЛІВ.....</b>	<b>138</b>
9.1. Методи частотного аналізу сигналів.....	138
9.2. Перетворення Фур'є для неперервних сигналів.....	138
9.3. Ряд Фур'є для неперервних періодичних сигналів.....	139
9.4. Перетворення Фур'є для дискретних сигналів (англ. DFT – Discrete Fourier Transform).....	140
9.5. Дискретне перетворення Фур'є періодичних сигналів.....	142
9.6. Застосування DFT для відтворення сигналу на виході ДП (фільтру).....	142

Контрольні запитання.....	144
<b>Розділ 10. ШВИДКЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ ФУР'Є (ШПФ).....</b>	<b>145</b>
<b>10.1. Концепція ШПФ.....</b>	<b>145</b>
<b>10.2. Математичні основи алгоритму ШПФ “RADIX-2”.....</b>	<b>147</b>
10.2.1. Декомпозиція сигналу.....	147
10.2.2. Відновлення спектру сигналу (композиція).....	149
10.2.3. Методи перестановки відліків (тобто поділ їх на парні і непарні).....	151
10.2.4. Приклад процесу виконання 8-точкового ШПФ.....	153
Контрольні запитання.....	156
<b>ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА.....</b>	<b>157</b>
<b>ГЛОСАРІЙ.....</b>	<b>158</b>

## ВСТУП

Навчальний посібник з дисципліни “Сигнальні процесори в системах автоматики” призначений для студентів другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 174 “Автоматизація, комп’ютерно-інтегровані технології та робототехніка”.

Сигнальні процесори відносяться до одного з різновидів мікропроцесорів. Відомо, що за призначенням мікропроцесори поділяють на три основні типи:

- 1) мікропроцесори універсальні;
- 2) мікроконтролери;
- 3) сигнальні процесори.

*Універсальні мікропроцесорони* призначені в основному для побудови обчислювальних засобів, зокрема, таких як персональні комп’ютери, потужні сервери та робочі станції.

*Мікроконтролери* - це мікропроцесори, які призначені для вбудовування в різні об’єкти для керування ними. Вони являють собою мікрокомп’ютери з пам’яттю та інтерфейсом вводу/виводу на кристалі, призначені для використання в системах керування, управління та регулювання об’єктами, в тому числі і рухомими, такими як транспортні засоби, також літаки, ракети та інша зброя.

*Сигнальні процесори* – це мікропроцесори призначені для опрацювання цифрових потоків, отриманих при перетворенні аналогових сигналів в цифрові. Від них вимагається дуже висока швидкодія, зокрема, коли необхідно опрацьовувати сигнали зображень, такі як телевізійні сигнали, особливо рухомі зображення, як наприклад у гральних автоматах та спецтренажерах, використовуваних для підготовки та освоєння керування складними зразками цивільної та військової техніки в ручному та автоматичному режимах.

Сигнальні процесори, як елементи високої швидкодії, часто використовують в системах управління, які охоплені зворотним зв’язком. Такі системи дуже чутливі до запізнення між вхідним відліком сигналу і вихідним відліком, отриманим в результаті обчислювальних операцій. При збільшенні



цього запізнення такі системи можуть втрачати стійкість. Якщо в коло керування таких систем входять потужні механічні засоби, то втрата стійкості системи може призвести до великих руйнувань та значної шкоди. Тому в таких випадках замість мікроконтролерів використовують сигнальні процесори, як найбільш швидкодіючі елементи. Напівть був такий час, коли сигнальні процесори, що призначалися для використання в системах керування, називали *сигнальними мікроконтролерами*. Але з часом такий термін втратив свою актуальність.

Будь-який мікропроцесор здійснює опрацювання цифрової інформації. Оскільки більшість сигналів, що виникають в природному середовищі є аналоговими, то відліки цих сигналів треба спочатку перетворити в цифрову форму, щоб потім їх можна було опрацювати сигнальними процесорами. Для такого перетворення відліків аналогових сигналів в цифрову форму використовують аналого-цифрові перетворювачі (АЦП). Тому багато сучасних сигнальних процесорів мають вбудовані АЦП. Процесори, у яких в структурі АЦП відсутні, використовують зовнішні АЦП. Тому принцип дії АЦП, зокрема типу  $\sigma$ - $\delta$ , який найчастіше використовується в структурі сигнальних процесорів, похибки та шум квантування від такого перетворення, засоби відтворення аналогового сигналу, а також інші елементи структури сигнального процесора такі як коловий буфер, сама структура сигнального процесора, методи забезпечення високої швидкодії, особливості архітектури сигнальних процесорів відомих фірм, основні підходи та деякі найчастіше використовувані методи аналізу дискретних (цифрових) структур, зокрема, такі як згортка, метод простору станів, різницевих рівнянь, Z-перетворення, методи цифрового опрацювання сигналів, частотний аналіз цифрових сигналів, швидке перетворення Фур'є розглядаються в даному посібнику.

Посібник складається з десяти розділів.

Розділ перший містить основні поняття про сигнал, стадії які проходить сигнал при перетворенні від аналогової форми до цифрової, які сигнали виникають природним шляхом, як інформація захована в сигналі, як відбувався розвиток систем опрацювання аналогових сигналів до сучасних цифрових

систем, яка структура сучасної системи перетворення сигналів, як класифікують системи перетворення сигналів, які ставлять до них вимоги, які різновиди апаратурних реалізацій таких систем можуть бути.

Другий розділ присвячений розгляду специфіки перетворення сигналів комп'ютерними засобами, зокрема розглядаються їх області застосування, особливості завдань опрацювання сигналів, режими перетворення сигналів в часі, принципи реалізації робочого буфера, зокрема колового, основні кроки алгоритму реалізації фільтра FIR, інші приклади цифрового опрацювання сигналів, приклад структури арифметичного пристрою сигнальних процесорів фірми Motorola, характерні особливості сигнальних процесорів деяких інших фірм.

В третьому розділі розглянуто вплив на швидкодію мікропроцесорів таких факторів як їх структурні особливості, рівень використовуваних мов програмування, вплив деяких особливостей програмних алгоритмів, наведені загальні структурні схеми комп'ютерних систем керування, в яких використані або можуть бути використані сигнальні процесори.

Так розглядаються структури систем керування: об'єктом, в яких як обчислювальний пристрій може бути використано сигнальний процесор, зокрема, розподілена в просторі триступенева комп'ютерна система, в якій на локальних рівнях можуть бути використані сигнальні процесори; двоступенева система керування сервоприводом багатого осевого транспортера, що здійснює керування моментом руху кожного колеса, його швидкістю обертання та кутом повороту. В такій системі на локальному рівні керування використовується сигнальний процесор ADMC300 фірми Analog Devices, який має п'ять вбудованих АЦП типу сігма-дельта, на входи яких подають аналогові сигнали.

Четвертий розділ знайомить читача з архітектурою сигнальних процесорів. Розділ розпочинається з огляду варіантів структур обчислювальних засобів, детально знайомить читача з гарвардською структурою та її вдосконаленням, що є основою сигнальних процесорів. Проведено порівняльний аналіз за швидкодією сигнальних процесорів трьох фірм: Analog Devices, AT&T і Texas

Instruments. Розглянуто структури та ключові властивості двох сигнальних процесорів кожної зі згаданих вище фірм. Для розгляду вибрано сигнальні процесори з опрацюванням даних у форматі з плаваючою комою. Деякі з цих процесорів можуть опрацьовувати дані також і у форматі з фіксованою комою. Велика обчислювальна потужність розглянутих сигнальних процесорів дозволяє їм виконувати десятки мільйонів операцій за одну секунду. Розглянуто переваги та недоліки опрацювання даних у форматах з плаваючою та фіксованою комами.

П'ятий розділ надає інформацію про структуру та функціонування таких складових сигнального процесора як двопортова пам'ять та контролер прямого доступу до пам'яті, які є важливими складовими сучасних сигнальних процесорів з супергарвардською архітектурою.

У шостому розділі розглядаються теоретичні основи перетворення аналогового сигналу в цифровий на основі теореми Шеннона-Котельникова, умови та засоби відтворення аналогового сигналу з цифрового, аналізуються похибки квантування, співвідношення сигнал/шум (SNR – signal-to-noise ratio), а також SNR в логарифмічному масштабі та його застосування.

Сьомий розділ присвячений методам зменшення розрядності при поданні відліків аналогового сигналу в цифровій формі, зокрема, розглянуто методи компресії та експансії, різницевої імпульсно-кодової модуляції, дельта-модуляції та сігма-дельта модуляції. Розглядається сігма-дельта АЦП, його властивості і структурні особливості, завдяки яким досягається найвища роздільна здатність. Проведено порівняльний аналіз АЦП типу сігма-дельта з АЦП інших типів за роздільною здатністю та швидкодією.

У восьмому розділі описуються основні властивості лінійних дискретних (цифрових) пристроїв, які можуть бути реалізовані в тому числі і на сигнальних процесорах, їх структурні схеми та математичні моделі: на основі згортки, Z-перетворення, різницевих рівнянь та простору станів. Наведені приклади використання цих моделей.

Дев'ятий розділ присвячений частотному аналізу цифрових сигналів. Показано, як пряме та обернене перетворення Фур'є дискретних (ДПФ- DFT

англ.) сигналів виводиться з виразів Фур'є для аналогових сигналів, як на основі ДПФ сигналу та ДПФ імпульсної характеристики фільтру можна відтворити цифровий сигнал на виході фільтру. Розділ є основою для розуміння алгоритму швидкого перетворення Фур'є (ШПФ), до виконання якого адаптовані елементи структури сигнальних процесорів.

У десятому розділі розглянуто підходи до виконання швидкого перетворення Фур'є (ШПФ – FFT-Fast Fourier Transformation), звернуто увагу на адаптацію структури сигнальних процесорів до реалізації ШПФ, особливо до швидкого поділу часових відліків сигналу на парні і непарні, розглянуто математичні основи алгоритму ШПФ “RADIX-2”, зокрема, процес декомпозиції сигналу (тобто ділення часових відліків на парні і непарні), відновлення спектру сигналу, тобто методи перестановки частотних відліків (композиція), , наведено приклад процесу виконання 8-точкового FFT.

В даному посібнику виклад матеріалу ведеться з врахуванням поступального розвитку теорії та систем перетворення сигналів, розвитку засобів обчислювальної техніки та використання досягнень обчислювальної техніки в структурах сигнальних процесорів, їх адаптацію до завдань перетворення та опрацювання сигналів.

НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

**Бучма Ігор Михайлович**

# **СИГНАЛЬНІ ПРОЦЕСОРИ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИКИ**

Навчальний посібник з дисципліни “Сигнальні процесори в системах автоматки” для студентів другого (магістерського) рівня галузі знань 17 “Електроніка, автоматизація та електронні комунікації” спеціальності 174 “Автоматизація, комп’ютерно-інтегровані технології та робототехніка”, спеціалізації “Комп’ютеризовані системи автоматки”.

Підп. до друку 28.10.2024 року.

Формат 70×100/16. Папір друк. №2. Гарнітура Times New Roman. Умовн. друк. 13,33. Наклад 50 прим.

Видавець ФОП Марченко Т.В.

м. Львів-53, 79053, Україна, тел.: +38 (050) 370-19-57,

e-mail: [magnol06@ukr.net](mailto:magnol06@ukr.net)

<https://magnolia.lviv.ua>

Видавець Марченко Т. В.

Свідоцтво про внесення суб’єкта видавничої справи до  
Державного реєстру видавців,  
виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції:  
серія ДК № 6784 від 30.05.2019 року, видане Державним  
комітетом інформаційної політики,  
телебачення та радіомовлення України

Надруковано у друкарні видавця ФОП Марченко Т. В.