

О. Г. Руденко
О. О. Безсонов
С. П. Євсєєв
О. Б. Ахієзер
Ю. І. Зайцев

004.032.26
Ш 94



ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ. НЕЙРОМЕРЕЖЕВА ОБРОБКА ІНФОРМАЦІЇ : архітектури, навчання, застосування

**У 2-х частинах
Частина 1**

Навчальний посібник



СЕРІЯ «КІБЕРБЕЗПЕКА ТА ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ»

**За загальною редакцією
доктора технічних наук,
професора С. П. Євсєєва**





РУДЕНКО ОЛЕГ ГРИГОРІЙОВИЧ

доктор технічних наук, професор

Дата і місце народження: 1948 рік, м. Броди, Львівської обл.

Освіта: Харківський інститут радіоелектроніки, 1971

Посада: завідувач кафедри комп'ютерних інтелектуальних технологій та систем Харківського національного університету радіоелектроніки
Коло наукових інтересів: інтелектуальна обробка інформації, обчислювальний інтелект

Публікації: автор понад 450 наукових публікацій, з них: 21 монографія, понад

200 наукових статей, понад 10 навчальних посібників

Лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки

Контактні телефони: +380677770229, +380954752171.

ORCID: 0000-0003-0859-2015

Scopus Author ID: 7005837246



БЕЗСОНОВ ОЛЕКСАНДР ОЛЕКСАНДРОВИЧ

доктор технічних наук, професор

Дата і місце народження: 1982 рік,

м. Харків, Харківської обл.

Освіта: Харківський національний університет радіоелектроніки, 2004

Посада: професор кафедри комп'ютерних інтелектуальних технологій

та систем Харківського національного університету радіоелектроніки

Коло наукових інтересів: еволюційні обчислення, системи

комп'ютерного зору, штучні нейронні мережі.

Публікації: автор понад 150 наукових публікацій, з них: 4 монографій,

понад 100 наукових статей.

Контактний телефон: +380953078896.

ORCID: 0000-0001-6104-4275

Scopus Author ID: 57221227175



СВЕСІВ СЕРГІЙ ПЕТРОВИЧ

доктор технічних наук, професор

Дата і місце народження: 1969 рік, м. Харцизьк, Донецької обл.

Освіта: Харківський військовий університет, 2002

Посада: завідувач кафедри кібербезпеки Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут"

Коло наукових інтересів: постквантова криптографія, штучний інтелект

Публікації: автор понад 340 наукових публікацій, з них: 10 монографій,

понад 145 наукових статей, понад 30 навчальних посібників.

Контактні телефони: +380953606613, +380683986603.

ORCID: 0000-0003-1647-6444

Scopus Author ID: 57190440690



АХІЗЕР ОЛЕНА БОРИСІВНА

кандидат технічних наук, професор Національного технічного університету

"Харківський політехнічний інститут" (НТУ "ХПІ"), завідувач кафедри «Комп'ютерна математика і аналізу даних» НТУ "ХПІ", член «Східноєвропейського наукового товариства».

Автор понад 150 наукових та навчально-методичних праць,

керівник збірної команди НТУ «ХПІ» з математики для участі у

Всеукраїнських студентських олімпіадах з математики і програмування,

науковий консультант IT-компанії «Cloud Work»



Зайцев Юрій Іванович

кандидат технічних наук, професор НТУ «ХПІ», вчений секретар НТУ «ХПІ»,

професор кафедри «Комп'ютерна математика і аналізу даних» НТУ "ХПІ".

Автор понад 100 наукових та навчально-методичних праць,

науковий консультант IT-компанії «Cloud Work»

**Видавництво
ПП «Новий Світ-2000»**



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний технічний університет
Харківський політехнічний університет»

О. Г. Руденко
О. О. Безсонов
С. П. Євсєєв
О. Б. Ахієзер
Ю. І. Зайцев

**ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ.
НЕЙРОМЕРЕЖЕВА ОБРОБКА ІНФОРМАЦІЇ:
архітектури, навчання, застосування**

Навчальний посібник

У 2-х частинах
Частина 1

Серія «КІБЕРБЕЗПЕКА ТА ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ»

За загальною редакцією доктора технічних наук, професора С. П. Євсєєва

Львів
«Новий Світ-2000»
2025

УДК [004.032.26:004.048] :311.213.6

Н 46

Автори:

О. Г. Руденко — доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри Комп'ютерних інтелектуальних систем ХНУРЕ;
О. О. Безсонов — доктор технічних наук, професор, професор кафедри Комп'ютерних інтелектуальних систем ХНУРЕ;
С. П. Євсєєв — доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри Кібербезпеки НТУ «ХПІ»;
О. Б. Ахієзер — кандидат технічних наук, доцент, завідувачка кафедри Комп'ютерної математики і аналізу даних НТУ «ХПІ»;
Ю. І. Зайцев — кандидат технічних наук, доцент, вчений секретар НТУ «ХПІ».

Рецензенти:

С. Г. Удовенко — доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри Інформатики і комп'ютерної техніки ХНЕУ;
А. І. Купін — доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри Комп'ютерних систем та мереж Криворізьський національний університет.

Руденко О. Г. та ін.

Н 46 Штучний інтелект. Нейромережева обробка інформації : архітектури, навчання, застосування : навчальний посібник у 2-х ч. : Ч. 1 / О. Г. Руденко, О. О. Безсонов, С. П. Євсєєв, О. Б. Ахієзер, Ю. І. Зайцев.; за заг. ред. С. П. Євсєєва. — Харків : НТУ «ХПІ», — Львів : «Новий Світ-2000», 2025. — 426 с. — (Серія «Кібербезпека та штучний інтелект»),

ISBN 978-966-418-517-9

У першій частині посібника викладено основні принципи побудови штучних нейронних мереж (ШНМ) як самостійного напрямку в теорії інтелектуальних систем, біологічний аналог штучного нейрона і процеси обробки інформації в біологічних системах. Наведено різноманітні моделі штучних нейронів і розглянуто властивості традиційних мереж, побудованих на їх основі, починаючи від перцептрона і закінчуючи нейронною мережею СМАС. Значну увагу приділено методам навчання ШНМ, питанням раціонального вибору їх архітектури. Кожний розділ посібника матеріали щодо особливостей практичного застосування відповідних нейронних мереж.

Для студентів і магістрантів комп'ютерних спеціальностей вищих навчальних закладів, докторантів і науково-технічних співробітників, які займаються створенням сучасних способів обробки інформації.

УДК [004.032.26:004.048]:311.213.6

© Руденко О. Г., Безсонов О. О.,
Євсєєв С. П., Ахієзер О. Б.,
Зайцев Ю. І., 2025

© НТУ «ХПІ», 2025

© Видавництво ПП «Новий Світ-2000»,
ФОП Піча С. В., 2025

ISBN 978-966-418-517-9

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
Розділ 1. БІОЛОГІЧНІ ОСНОВИ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ.....	21
1.1 Нейрон.....	21
1.2 Передача інформації.....	22
Розділ 2. ШТУЧНИЙ НЕЙРОН.....	27
2.1 Структура штучного нейрона.....	27
2.2 Моделі штучних нейронів.....	30
2.2.1. Формальна модель нейрона Маккаллоха—Пітса.....	31
2.2.2 Модель нейрона — Адаліна.....	32
2.2.3 Модель нейрона Фукушіми.....	32
2.2.4 Модель штучного нейрона Хопфілда.....	33
2.2.5 Модель Гроссберга.....	33
2.2.6 Сігма-ПІІ нейрон.....	34
2.2.7 Стохастичний нейрон.....	35
2.3 Топологія ШНМ.....	36
2.4 Навчання ШНМ.....	37
2.4.1 Правило навчання Хебба (корелятивне, співвідносне навчання).....	38
2.4.2 Дельта правило.....	39
2.4.3 Розширене дельта правило.....	39
2.4.4 Конкурентне навчання.....	40
2.4.5 Стохастичне навчання.....	40
2.4.6 Градієнтні методи навчання.....	41
2.4.7 Підкріплене навчання.....	44
Розділ 3. РАННІ АРХІТЕКТУРИ ШНМ.....	47
3.1 Одношарові ШНМ.....	47
3.1.1 Одношаровий перцептрон.....	47
3.1.2 Навчання перцептрону.....	48
3.1.3 Адаліна.....	51

3.1.4 Вхідна зірка Гроссберга.....	53
3.1.5 Вихідна зірка.....	53
3.2 Лінійна роздільність.....	54
3.3 Багатошарові ШНМ.....	56
3.3.1 Багатошаровий персептрон.....	56
3.3.2 Мадаліна.....	57
3.4 Алгоритм зворотного розповсюдження помилки.....	58
3.4.1 Обчислення ваг нейронів вихідного шару.....	60
3.4.2 Обчислення ваги нейронів прихованого шару.....	61
Розділ 4. АЛГОРИТМИ НАВЧАННЯ	
БАГАТОШАРОВОГО ПЕРСЕПТРОНА.....	67
4.1. Аналіз алгоритмів навчання БП.....	67
4.1.1. Вибір критерію якості навчання БП.....	67
4.1.2. Алгоритм зворотного розповсюдження помилки.....	69
4.1.4. Квазиньютонівські методи.....	75
4.1.5. Методи сполучених градієнтів.....	78
4.1.6. Рекурентні методи найменших квадратів.....	78
4.2. Рекурентний багатокроковий алгоритм навчання, що базується на методі поточного регресійного аналізу.....	81
4.2.1. Синтез рекурентного алгоритму з експонентним зв'язуванням інформації.	81
4.2.2. Регулювання алгоритму навчання.....	85
4.3. Деякі рекомендації щодо вибору параметрів алгоритму навчання.....	88
4.3.1. Вибір ширини вікна.....	88
4.3.2. Вибір параметра зв'язування.....	89
4.3.3. Вибір параметра регуляризації.....	89
Розділ 5. РАДІАЛЬНО-БАЗИСНІ МЕРЕЖІ.....	93
5.1. Архітектура РБМ.....	93
5.2 Вибір базових функцій.....	96
5.2.1. Базисні функції на основі гауссівських функцій.....	97
5.2.2. Бірадіальні функції	99
5.2.3. Нормалізація базисних функцій.....	100
5.2.4 Кусково-лінійна апроксимація радіально-базових функцій.....	105
5.3. Вибір структури моделі.....	110
5.4. Навчання РБМ.....	114
5.4.1. Навчання у режимі off-line	115
5.4.2. Навчання у режимі on-line.....	116
5.4.3. Підвищення сталості процесу навчання.....	118
5.4.4. Особливості навчання мережі РБФ.....	122
5.4.5. Алгоритм навчання мережі РБФ на основі кластеризації.....	124

5.4.6 Вибір початкових розташувань центрів БФ за допомогою нейронної мережі Нейро-Газ.....	126
5.4.7 Способи вибору відхилень БФ алгоритмами <i>k-середніх та k-найближчих сусідів</i>	126
5.5 Гіпербазова мережа.....	128
5.5.1 Структура мережі.....	128
5.5.2 Навчання мережі.....	129
5.6 Розв'язання прикладних завдань за допомогою мережі РБФ.....	130
5.6.1 Реалізація функції «включне АБО».....	130
5.6.2 Апроксимація функції.....	132
5.6.3 Ідентифікація нелінійних динамічних об'єктів.....	135
5.6.4 Нейроуправління нелінійними об'єктами.....	140
5.6.5 Стиснення зображення за допомогою мережі РБФ.....	144
Розділ 6. РОБАСТНЕ НАВЧАННЯ ПІНМ ПРЯМОГО ПОШИРЕННЯ.....	150
6.1 Деякі підходи, які використовуються підчас робастного навчання	150
6.1.1 <i>LMedS (Least Median of Squares)</i>	150
6.1.2 Укорочений метод найменших квадратів <i>LTS (Least Trimmed Squares)</i>	151
6.1.3 <i>М-навчання</i>	151
6.2 Вибір критерію робастного навчання.....	153
6.2.1 Оптимальні алгоритми навчання.....	153
6.2.2 Традиційні критерії <i>М-навчання</i>	154
6.2.3 Вибір критерію навчання за несиметричного розподілу	159
6.3 Процедури робастного навчання.....	162
6.3.1 Оптимальні процедури навчання.....	162
6.3.2 Однокрокові робастні процедури навчання.....	163
6.3.3 Багатокрокові робастні процедури навчання.....	167
6.4 Модифікації багатокрокових алгоритмів, що містять зону нечутливості.....	169
6.4.1 Модифікація багатокрокових алгоритмів.....	169
6.4.2 Збіжність модифікованих багатокрокових алгоритмів.....	172
6.5 Робастні процедури Гауса-Ньютона і Левенберга-Марквардта.....	174
6.5.1 Рекурентні процедури Гауса-Ньютона і Левенберга-Марквардта.....	174
6.5.2 Робастні процедури Гауса-Ньютона і Левенберга-Марквардта із зоною нечутливості (з обмеженою точністю).....	176
6.6 Оцінювання параметрів функціоналів.....	179
6.6.1 Оцінювання параметра масштабу в режимі <i>offline</i>	179
6.6.2 Оцінювання параметрів перешкод у режимі <i>on-line</i>	180
6.6.3 Апроксимація асиметрично розподіленої перешкоди.....	181
6.7 Імітаційне моделювання.....	182

Розділ 7. АСОЦІАТИВНА ПАМ'ЯТЬ.....	194
7.1. Асоціативна мережа прямого розповсюдження.....	197
7.2 Алгоритми навчання асоціативної пам'яті.....	199
7.2.1 Правило навчання Хебба.....	199
7.2.2 Дельта- правило.....	202
7.2.3 Алгоритми навчання, що використовують операцію псевдообігу матриці вхідних сигналів.....	203
7.2.4 Розпізнавання спотвореного образу.....	204
7.3 Гетероасоціативна пам'ять.....	205
7.4 Автоасоціативна пам'ять.....	206
7.5 Двонаправлена асоціативна пам'ять.....	207
7.5.1 Синхронна ДАП.....	210
7.5.2 Безперервна ДАП.....	210
7.5.3 Адаптивна ДАП.....	211
7.5.4 Конкуруюча ДАП.....	211
7.6 Приклад роботи двонаправленої асоціативної пам'яті.....	211
Розділ 8. САМООРГАНІЗОВАНІ МЕРЕЖІ.....	215
8.1 Мережа векторного квантування.....	217
8.1.1 Структура мережі векторного квантування.....	217
8.1.2 Неконтрольоване навчання мережі ВК.....	219
8.1.3 Контрольоване навчання мережі ВК.....	221
8.2 Нейронна мережа Кохонена.....	225
8.2.1 Структура мережі Кохонена.....	225
8.2.2 Навчання мережі Кохонена.....	227
8.2.3. Алгоритм навчання мережі Кохонена.....	229
8.2.4 Вибір функції«сусідства».....	234
8.2.5 Побудова карти Кохонена.....	235
8.2.6. Стиснення зображення нейронною мережею Кохонена...	238
8.3. Нейронна мережа Нейро-Газ.....	240
8.4. Мережа зустрічного розповсюдження.....	243
8.4.1. Архітектура мережі зустрічного розповсюдження.....	244
8.4.2. Навчання шару Кохонена.....	245
8.4.3. Навчання шару Гроссберга.....	248
8.4.4 Повна мережа зустрічного розповсюдження.....	248
8.5 Застосування мереж для стиснення даних	249
8.5.1 Стиснення даних за допомогою мереж зустрічного поширення.....	249
8.4.4. Формат зберігання даних.....	250
8.5.2 Стиснення даних за допомогою модифікованої мережі Кохонена.....	252
8.5.3 Порівняльний аналіз результатів стиснення зображення модифікованою мережею Кохонена та мережею зустрічного поширення.....	256

Розділ 9. ДИНАМІЧНІ ШНМ ПРЯМОГО ПОШИРЕННЯ.....	259
9.1 КІХ-архітектура: просторово-часове подання.....	259
9.2 Структура нейронної КІХ-мережі.....	261
9.2.1 Структура КІХ-нейрону.....	261
9.2.2 Подання КІХ-мережі статичною мережею прямого поширення.....	262
9.3 Навчання динамічних ШНМ прямого поширення.....	265
9.3.1 Алгоритм миттєвого градієнтного спуску.....	266
9.3.2 Алгоритм тимчасового зворотного розповсюдження.....	266
9.3.3 Модифікований алгоритм навчання КІХ-мереж.....	270
9.4. Оптимізація навчання реку рентних динамічних нейронних мереж та структур.....	274
9.4.1 Настроювані параметри РШНМ.....	275
9.5. Еквівалентність ізоморфних РШНМ.....	281
9.5.1 Статична еквівалентність ізоморфних РШНМ.....	282
9.5.2 Динамічна еквівалентність ізоморфних РШНМ.....	283
9.6. Статична та динамічна еквівалентність довільних РШНМ.....	286
9.6.1 Еквівалентність РШНМ з довільною кількістю вихідних нейронів.....	286
9.6.2 Еквівалентність РШНМ з довільними функціями активації нейронів.....	287
9.6.2 Динамічна еквівалентність РШНМ з довільними алгоритмами навчання.....	287
9.6.4 Висновки про співвідношення між β і η для загального випадку РШНМ.....	290
9.7 Співвідношення між η і β для модульних ШНМ.....	290
9.7.1 Статична еквівалентність модульних ШНМ.....	291
9.7.2 Динамічна еквівалентність модульних ШНМ.....	291
9.8 Застосування динамічних ШНМ прямого поширення.....	295
Розділ 10. ПОВНОЗВ'ЯЗНІ НЕЙРОННІ МЕРЕЖІ.....	300
10.1 Мережа Гопфілда.....	300
10.1.1 Модель Гопфілда.....	300
10.1.2 Навчання мережі Гопфілда.....	304
10.1.3 Запам'ятовування образу в мережі Гопфілда.....	305
10.1.4 Виклик образу.....	306
10.1.5 Режим фільтрації роботи мережі Гопфілда.....	312
10.1.6 Синхронний режим роботи мережі Гопфілда.....	313
10.1.7 Асинхронний режим роботи мережі Гопфілда.....	314
10.2 Безперервна мережа Гопфілда.....	315
10.3 Асоціативна мережа BSB.....	316
10.4. Мережа Хеммінга.....	318
10.5. Машина Больцмана.....	321

10.5.1 Структура машини Больцмана.....	322
10.5.2 Навчання в машині Больцмана.....	323
10.5.3 Алгоритм навчання машини Больцмана.....	327
10.5.4 Обговорення алгоритму навчання.....	329
10.5.5 Алгоритм класифікації (розпізнавання).....	331
10.6 Обмежена машина Больцмана.....	333
10.7 Мережа глибокої довіри.....	336
10.8 Машина Гельмгольца.....	339
10.9 Машина Коші.....	340
10.10. Практичне застосування мереж.....	341
10.10.1 Відновлення пошкодженого зображення.....	341
10.10.2 Розв'язання задачі про комівояжера.....	342
Розділ 11. НЕЙРОННА МЕРЕЖА ART.....	347
11.1 Біологічні основи нейронної мережі ART.....	347
11.2 Структура нейронної мережі ART.....	348
11.3 Типи нейронних мереж ART.....	351
11.3.1 Мережа ART 1.....	351
11.3.2 Мережа ART 2 та її модифікації.....	358
11.3.4 Гауссівська ART.....	362
11.3.5 Мережа ART 3.....	364
11.4.1 Узагальнений алгоритм роботи мереж ART.....	364
11.4.2 Мережа ART 2A.....	366
11.4.3 Комплементарне кодування ART 2A (мережа ART 2A-C).....	368
11.4.4 Мережі ART 2A з евклідовою відстанню (ART 2A-E)	369
11.5 Нейронна мережа Fuzzy ART.....	371
11.5.1 Геометрична інтерпретація.....	372
11.5.2 Алгоритм роботи мережі Fuzzy ART.....	374
11.5.3 Мережа Fuzzy ARTMAP.....	376
11.6 Основні недоліки алгоритмів навчання та можливі шляхи їх вирішення.....	377
11.6.1. Основні недоліки алгоритмів навчання.....	377
11.6.2 Існуючі рішення.....	381
11.7 Функції вибору (ФВ).....	384
11.7.1 Основні вимоги до ФВ мереж Fuzzy ART.	384
11.7.2 Функції вибору мереж Fuzzy ARTMAP.....	386
11.8 Розв'язання практичних завдань на основі мереж ART.....	389
11.8.1 Алгоритми класифікації на основі мереж ART.....	389
11.8.2 Багатонаправлена асоціативна пам'ять.....	390
11.8.3 Стиснення зображень.....	392
11.8.4 Розв'язання задачі класифікації двовимірних образів.....	396