

А.І. Купін, А.О. Сенько, Б.С. Мисько

УДК 681.51: 622.7
ББК 32.813
К 78

Ідентифікація та автоматизоване керування в умовах процесів збагачувальної технології на основі методів обчислювального інтелекту

Рекомендовано до друку вченою радою Криворізького національного університету (протокол №5 від 30.01.2018)

Рецензенти:

А.І. Жученко, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри автоматизації хімічних процесів НТУУ «КПІ» (м. Київ)

В.В. Ткачов, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри автоматизації та комп'ютерних систем НУ «Дніпровська політехніка» (м. Дніпро)

Г.Ф. Кривуля, д-р техн. наук, професор кафедри автоматизованого проектування засобів обчислювальної техніки ХНУРЕ (м. Харків)

Купін А.І., Сенько А.О., Мисько Б.С.

К 78 Ідентифікація та автоматизоване керування в умовах процесів збагачувальної технології на основі методів обчислювального інтелекту. – Кривий Ріг: Сінельников Д.А., 2019. – 298 с.

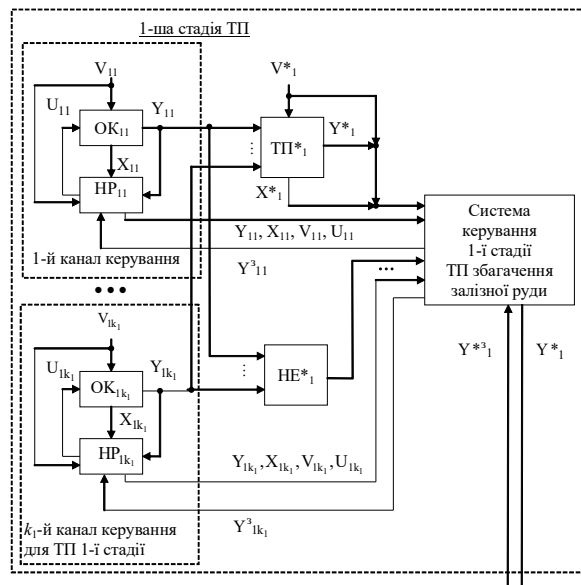
ISBN 978-966--97978-0-3

Друге видання монографії, перероблене та доповнене. Досліджено питання здійснення ідентифікації із застосуванням нейромережових підходів у складі інтелектуальних систем керування технологічними процесами збагачувальної технології. Запропоновано низку типових нейроструктур на основі авторегресійних предикторів та методику їх застосування в промислових умовах. Проведено комп'ютерне моделювання процедур ідентифікації із застосуванням програмного забезпечення сучасних нейроемулаторів.

Книга розрахована на широке коло науковців, спеціалістів та аспірантів, які цікавляться застосуванням методів нейрокібернетики в задачах автоматизованого керування складними системами на прикладі технологічних процесів збагачення магнетитових кварцитів, і є корисною для викладачів і студентів вищих навчальних закладів зі спеціальностей за галузями знань: “автоматика та приладобудування”, “інформаційні технології” тощо.

ББК 32.813

©А.І.Купін, А.О.Сенько, Б.С.Мисько, 2019



Кривий Ріг
2019

ЗМІСТ

Список скорочень.....	7
Передмова.....	11
Вступ.....	13
1. Аналіз проблеми застосування інтелектуальних технологій у галузі автоматизації процесів збагачення.....	17
1.1. Актуальність дослідження проблеми.....	17
1.2. Огляд поширених підходів щодо автоматизації ТП збагачення....	20
1.3. Обґрунтування застосування технологій штучного інтелекту для автоматизації ТП збагачення магнетитових кварцитів.....	22
1.3.1. Основні напрями досліджень та розробок в галузі ІСК.....	24
1.3.2. Загальні відомості про штучні нейронмережі.....	25
1.3.3. Базові архітектури нейронмереж.....	30
1.3.4. Навчання штучних нейронмереж.....	35
1.3.5. Властивості штучних нейронмереж.....	39
1.3.6. Застосування штучних нейронмереж для вирішення завдань керування.....	41
1.4. Обґрунтування необхідності застосування генетичних алгоритмів оптимізації.....	46
1.5. Постановка завдання для досліджень.....	48
1.6. Висновки до першого розділу.....	49
2. Концепція інтелектуального керування технологічними процесами магнітного збагачення.....	51
2.1. Загальна характеристика ТП збагачення як об'єкту автоматизації.....	51
2.2. Сімпліціальний аналіз інформаційних та керуючих потоків і зв'язків в умовах збагачувальної фабрики.....	51
2.3. Локальні технологічні процеси та стадії збагачення магнетитових кварцитів як об'єкти керування.....	57
2.4. Критерії керування технологічними процесами збагачення.....	60
2.5. Загальна методологія побудови АСК ТП збагачення залізної руди та місце в ній ІСК.....	63
2.6. Теоретичні підходи щодо застосування інтелектуальних технологій нейрокібернетики для керування секцією РЗФ.....	68

2.7. Принципи застосування нейрокерування в умовах нечіткого представлення вхідної інформації.....	73
2.8. Оцінка статистичних параметрів нейроструктур.....	77
2.9. Висновки до другого розділу.....	81
3. Інтелектуальна ідентифікація ТП магнітного збагачення на основі нейромережевого підходу.....	83
3.1. Аналіз основних альтернатив для інтелектуальної структурної ідентифікації ТП збагачення.....	84
3.2. Теоретичні основи інтелектуальної нейромережевої ідентифікації ТП збагачення як багатовимірних систем.....	89
3.3. Загальна методологія інтелектуальної нейромережевої ідентифікації ТП збагачення як багатовимірних систем.....	94
3.3.1. Проведення експерименту і попередня обробка отриманих даних.....	94
3.3.2. Вибір модельної структури.....	101
3.3.3. Структурна оптимізація моделі.....	103
3.3.4. Прийняття рішення про адекватність модельної структури.....	105
3.4. Методи навчання багатовимірних нейромережевих структур.....	106
3.4.1. Метод Гауса-Ньютона.....	107
3.4.2. Метод Левенберга-Маркардта.....	109
3.4.3. Метод сполученого градієнту.....	111
3.5. Дослідження багатовимірних моделей інтелектуальної нейромережевої ідентифікації ТП збагачення.....	112
3.5.1. Вибір методу навчання.....	112
3.5.2. Дослідження глибини регресії.....	115
3.5.3. Дослідження обсягу прихованого шару.....	117
3.5.4. Дослідження властивостей моделей.....	118
3.5.5. Тестування отриманих моделей на не лінійність.....	124
3.6. Перспективи застосування інтелектуальних моделей ідентифікації для ТП збагачення.....	126
3.7. Висновки до третього розділу.....	131
4. Синтез інтелектуальних систем для автоматизованого керування локальними процесами, стадіями та комплексом збагачення	133
4.1. Вибір стратегії реалізації інтелектуального нейромережевого керування на різних рівнях ієрархії	133
4.2. Обґрунтування вибору загального принципу параметризації однокана-	134

льних нейромережових систем інтелектуально-го керування	
4.3. Дослідження одноканальних нейромережових систем ін-телектуального керування на прикладі процесу подрібнення	135
4.3.1. Послідовні схеми інтелектуального керування	139
4.3.2. Паралельна схема керування з ПІД-нейроконтролером	145
4.3.3. Паралельні схеми нейромережових контролерів із само-налаштуванням коефіцієнтів	147
4.3.4. Система керування з емулятором і контролером	149
4.3.5. Екстремальне інтелектуальне керування	150
4.3.6. Система інтелектуального керування із застосуванням фільтрів, прямих та інверсних моделей	152
4.3.7. Комп'ютерне моделювання одноканальних схем нейрокерування	153
4.4. Нейрокерування локальним ТП магнітної сепарації	159
4.5. Розробка нейромережної структури для реалізації інтелектуального керування процесом збагачення в умовах багатовимірності	168
4.6. Розробка комбінованої багатоканальної інтелектуальної системи на основі нової класифікації та інверсно-прогнозуючого керування в умовах ТП збагачення	175
4.7. Висновки до четвертого розділу	181
5. Розробка, оптимізація та моделювання інтелектуальних алгоритмів для автоматизованого керування процесами збагачення	182
5.1. Розробка узагальненого алгоритму роботи ІСК	182
5.2. Дослідження властивостей обумовленості завдання оптимізації	188
5.3. Реалізація способу інтелектуального керування ТП із застосуванням оптимізації на основі еволюційних підходів	197
5.4. Реалізація способу інтелектуального керування із застосуванням процедур кластеризації та нейромережової класифікації	211
5.5. Комп'ютерне моделювання процесу прийняття рішення із застосуванням інтелектуальних процедур кластеризації та класифікації	218
5.6. Побудова імітаційної моделі роботи оптимізаційного алгоритму ІСК	224
5.7. Висновки до п'ятого розділу	229
6. Програмно-технічна реалізація інтелектуальної системи автоматизованого керування комплексом технологічних процесів збагачення залізної руди	231
6.1. Загальні принципи та структурна схема реалізації ІСК	231
6.2. Програмна реалізація ІСК	234
6.2.1. Вибір нейроеммуляторів	234

6.2.2. Реалізація прототипу ІСК із застосуванням нейросимуляторів	243
6.3. Апаратна реалізація ІСК	246
6.3.1. Огляд, класифікація та основні характеристики поширених нейрочипів	247
6.3.2. Оцінка можливостей застосування у складі ІСК нейро-сигнальних процесорів сімейства NeuroMatrix	252
6.3.3. Прототипи побудови ІСК із застосуванням сигнальних нейропроцесорів сімейства NeuroMatrix	259
6.4. Економічне обґрунтування застосування ІСК	261
6.5. Перспективи та напрями подальших досліджень	264
6.6. Висновки до шостого розділу	264
Підсумок	266
Список літератури	269

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

АСК – автоматизована система керування;
АСКП – автоматизована система керування підприємством;
АСК ТП – автоматизована система керування технологічним процесом;
БД – база даних;
БНЛ – блок нечіткої логіки;
ВАТ – відкрите акціонерне товариство;
ПАТ – публічне акціонерне товариство;
ПрАТ – приватне акціонерне товариство;
ГА – генетичний алгоритм;
ГЗК – гірничо-збагачувальний комбінат;
ЕОМ(ПЕОМ) – електронна обчислювальна машина (персональна);
ЗАТ – закрите акціонерне товариство;
ІАН – інтелектуальний аналіз даних;
ІСК – інтелектуальна система керування;
КІС – корпоративна інформаційна система;
КМОП – комплементарна логіка на транзисторах метал-оксид-напівпровідник;
КСКП – комплексна система керування підприємством;
КТУ – Криворізький технічний університет;
КНУ – Криворізький національний університет;
ЛОМ – локальна обчислювальна мережа;
МГР – млин гальково-рудний;
МГУА – метод групового урахування аргументів;
МЕК – міжнародний електротехнічний комітет;
ММС – млин мокрого самоподрібнення;
МШЦ – млин шаровий цикловий;
НЕ – нейромодулятор;
НМ – нейронна мережа;
НПР – нейромережа прямого розповсюдження;
ОЗП – оперативний запам'ятовуючий пристрій;
ОП – операційний пристрій;
ОК – об'єкт керування;
ОС – операційна система;
ПД-регулятор – пропорційний інтегральний та диференціальний ре-

гулятор;
ПЛІС – програмні логічні інтегральні схеми;
ПЗНМ – повністю зв'язна (або частково зв'язна) нейромережа;
ПК – персональний комп'ютер;
ПЛК – програмований логічний контролер;
ПрК – промисловий комп'ютер;
ПрС – промисловий сервер;
РБФ – радіально-базисна функція (функції);
РВЛ (РІЛ) – рудо-випробувальна (іспитова) лабораторія;
РЗФ – рудозбагачувальна фабрика;
САР – система автоматичного регулювання;
САК – система автоматизованого керування;
СКДБ – система керування базами даних;
СППР – система підтримки прийняття рішень;
ФН – функція належності;
ЦПС – цифровий послідовний стандарт (порт);
API – Applications Programming Interface (прикладний програмний інтерфейс);
CAD – Computer-Aided Design (система автоматизованого проектування);
CG – Conjugate Gradient methods (метод навчання на основі сполучених градієнтів);
GN – Gauss-Newton methods (метод Гауса-Ньютона);
DLL – Dynamic Link Library (бібліотеки, що динамічно підключаються);
DMA – Direct Memory Access (прямий доступ до пам'яті);
DCS – Distributed Control System (розподілена система керування);
DSP – Digital Signal Processor (цифровий сигнальний процесор);
DSS – Decision Support Systems (системи підтримки рішень);
DW – Data Warehouse (сховище даних);
ERP – Enterprise Resources Planning (планування ресурсів підприємства);
ES – Expert System (експертні системи);
IEC – International Electrotechnical Commission (міжнародна електротехнічна комісія із стандартизації);
ISA – Instrumentation, Systems and Automation society (апаратура, системи та комплекси для автоматизації - перелік стандартів);

JTAG – Joint Test Action Group (об'єднана група дій для тестування згідно зі стандартом IEEE 1149.1);
LM – Levenberg-Marquardt (LM) methods (метод Левенберга-Маркуардта);
MAE – Mean Absolute Error (усереднена абсолютна похибка прогнозування);
MES – Manufacturing Execution System (виконавча система виробництва);
MRP/MRP II – Management Resource Planning (керування плануванням ресурсів);
MS – Microsoft, Inc.;
MSE – Mean Square Error (середньоквадратична похибка прогнозування);
NC – нейроконтролер;
NE – нейромодулятор;
NN – Neural Network (нейронна мережа);
NMC – Neural Matrix Core (ядро нейронної матриці-процесора);
NMSE – Normalized Mean Square Error (нормалізована середньоквадратична похибка прогнозування);
NNARX – Neural Network based AutoRegressive eXogenous signal (нейромережева авторегресійна модель, екзогенний тип сигналів);
NNARMAX – Neural Network based AutoRegressive, Moving Average, eXogenous signal (нейромережева авторегресійна модель ковзного середнього, екзогенний тип сигналів);
NNOE – Neural Network Output Error (нейромережева модель помилки виходу);
NNT – Neural Network Toolbox (MATLAB);
OLE – Object Linking and Embedding (зв'язування та впровадження об'єктів);
OLAP – On Line Analytical Processing (обробка й аналіз даних у режимі реального часу);
OPC – OLE for Process Control (OLE для керування процесами);
PCI – Peripheral Component Interconnect (взаємозв'язок периферійних компонентів);
RAID – Redundant Array of Independent/inexpensive Disks (надлишковий масив незалежних дисків);
RAM/SRAM/DRAM/SDRAM – Random Access Memo-

ry/Static/Dynamic/ Synchronous (оперативна пам'ять/статична/динамічна/синхронна);
RISC – Reduced Instruction Set Computing (обчислення із скороченим набором команд);
ROM – Read-Only Memory (постійний запам'ятовуючий пристрій);
SISO – Single Input Single Output (об'єкти з одним входом та одним виходом);
SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition (засоби операторного або диспетчерського контролю й керування);
SGI – Silicon Graphics, Inc.;
SQL – Structured Query Language (мова структурованих запитів);
UDND – User Define Neural Dynamics (користувацький набір нейронних динамічних структур);
VLIW/SIMD – Very Long Instruction Memory/Single Instruction Multiple Data (програмна пам'ять з дуже великою довжиною команди /один потік інструкцій, множина потоків даних).

ПЕРЕДМОВА

Сучасна теорія автоматизованого керування пройшла декілька етапів свого розвитку. Спочатку від класичної детермінованої до стохастичної теорії автоматичного регулювання, а потім від теорії адаптивних до синтезу найбільш сучасних інтелектуальних систем. Появу останніх напряму пов'язують із бурхливим розвитком сучасних технологій штучного інтелекту (нейрокібернетики, нечіткої логіки, експертних систем, еволюційних методів, синергетики тощо).

Необхідність підвищення системності існуючих підходів шляхом урахування додаткових знань та факторів, що погано формалізуються (досвід, інтуїція), обумовило появу нових напрямів у сучасній кібернетичі. Для одного з таких напрямків в теорії керування Вербосом була уведена окрема назва - нейрокерування (neurocontrol). Це один з найбільш ефективних підходів, побудований на моделюванні розумової діяльності людини, яку було сформовано у результаті довгої еволюції та жорсткого природного відбору.

Зараз за допомогою нейрокерування, завдяки корисним властивостям нейронних мереж, які є спільними для різних типів нелінійних динамічних об'єктів, вирішуються завдання ідентифікації, аналізу, синтезу та апаратної реалізації складних систем керування в умовах нестаціонарності, неповноти та нечіткості інформації. Результати, отримані із застосуванням нейрокерування у рамках адаптивної постановки завдання теорії керування, створюють передумови для можливості застосування схожих принципів в умовах технологічних процесів (ТП) збагачення корисних копалин. Тому основною метою книги є доведення можливості застосування підходів нейрокібернетики для здійснення інтелектуальної ідентифікації та керування процесами збагачувальної технології (на прикладі ТП секції магнітозбагачувальної фабрики) в умовах вітчизняних гірничо-збагачувальних комбінатів (ГЗК).

Книга складається зі вступу, чотирьох розділів та підсумку.

У першому розділі на основі аналізу існуючого стану автоматизації ТП збагачення магнетитових кварцитів розглядається постановка завдання побудови інтелектуальної системи керування секцією РЗФ із застосуванням сучасних підходів.

У другому розділі викладено методологічні та теоретичні положення нової концепції інтелектуального керування технологічною лінією (секцією) рудозбагачувальної фабрики (РЗФ) із застосуванням нейромережевого підходу в умовах неповної та нечіткої інформації.

У третьому розділі досліджуються властивості одноканальних та багатоканальних моделей інтелектуальної ідентифікації параметрів ТП збагачення на підставі застосування нейромережевих авторегресійних предикторів.

Четвертий розділ описує синтез інтелектуальних систем для автоматизованого керування локальними процесами, стадіями та комплексом збагачення.

П'ятий розділ - розробка, оптимізація та моделювання інтелектуальних алгоритмів для автоматизованого керування процесами збагачення.

Шостий розділ присвячено питанням розробки та програмно-технічної реалізації інтелектуальної системи автоматизованого керування комплексом технологічних процесів РЗФ.

Основні наукові та практичні результати цієї роботи належать Купіну А.І. Сенько А.О. та Мисько Б.С. брали активну участь при розробці алгоритмічного та програмного забезпечення, практичній реалізації та впровадженні результатів роботи.

Автори висловлюють подяку професорам: Назаренку В.М., Моркуну В.С., Ступніку М.І., Ткачову В.В., Руденку О.Г., Михальову О.І., Кривулі Г.Ф., Жученку А.І., О.М.Різнику, Зубову Д.А. за їх цінні поради, конструктивну критику та слухні зауваження, які сприяли покращенню змісту книги. Також автор особисто вдячний співробітникам Криворізького національного університету: Вербицькому В.І., Чубарову В.А., Ефіменко Л.І., Тиханському М.П., Лобову В.Й., Савицькому О.І., Жосану А.А., Осадчуку Ю.Г., Гвозді-ку В.С., Басюк Л.Б., які допомагали практично реалізувати ідеї та наукові розробки. Особлива подяка представникам виробництва Шиповському Г.В., Нечитайло В.М., Дмитренку О.О., Хоменку О.М., Добровольському В.В., Андрейченку О.В., Невзорову В.В., Шепелю В.В. за співпрацю при впровадженні результатів роботи.

ВСТУП

Сталий розвиток економіки України протягом останніх років багато в чому обумовлений стабільною роботою підприємств гірничо-металургійного комплексу країни. Саме продукція вітчизняних металургійних та гірничо-збагачувальних комбінатів (ГЗК) складає переважну долю прибутків від експорту (приблизно 30-40%) та доволі значну частку внутрішнього валового продукту (ВВП).

При цьому, на конкурентоздатність вітчизняної продукції досить вагомий вплив, як і раніше, мають традиційні проблеми, зокрема: якість продукції менша ніж у потенційних конкурентів, велика питома енергомісткість, занадто високі втрати корисних компонентів у процесі переділу і т.д. [1-3] Також, що стосується вітчизняних ГЗК, більшість яких зосереджено у криворізькому регіоні (Кривбасі), слід зазначити низку стійких тенденцій негативного характеру. У першу чергу це постійне збільшення глибини кар'єрів, зниження запасів багатих руд та, відповідно, збільшення частки бідних та важкозбагачувальних різновидів в шихті. Все це разом призводить до поступового збільшення собівартості гірничих робіт та подальшого збагачення залізородної сировини.

Відомі різні шляхи кардинального вирішення цих питань: заміна застарілого обладнання (зношення основних фондів зараз на окремих підприємствах сягає 80-90%), впровадження сучасних більш ефективних технологій збагачення, вдосконалення існуючих схем ланцюгів апаратів тощо. Так, наприклад, на окремих вітчизняних гірничих підприємствах вже проводиться аналіз та навіть промислові випробування технологічних схем та обладнання для флотаційного доведення концентратів. У результаті цих робіт на Інгuleцькому ГЗК вже існує можливість отримувати концентрат у промислових умовах на якісному рівні близькому до 70% заліза загального, що відповідає світовим стандартам. Однак, такі заходи вимагають значних капіталовкладень та, як добре відомо, впровадження флотаційних методів збагачення супроводжується суттєвим погіршенням екологічного стану регіону в цілому.

Разом з цим, дослідження провідних закордонних та вітчизняних вчених доводять, що одним з найбільш перспективних заходів поліпшення зазначених технологічних показників залишається ком-

плексна автоматизація технологічних та інформаційних процесів виробництва на основі використання інтегрованих систем інтелектуального, оптимального та адаптивного керування [4-11 та ін.].

На сьогоднішній час відомо досить багато підходів з приводу автоматизації процесів збагачення. Слід зазначити, що в цьому напрямку вагомим є внесок робіт вітчизняних авторів: О.М.Марюти, В.П.Хорольського, Є.В.Кочури, В.О.Ульшина, В.О.Бунька, Ю.Г.Качана, В.А.Воронова, Б.І.Мокіна, В.М.Назаренка, В.С.Моркуна, І.Б.Сироджі, Є.К.Бабця, В.І.Архангельського, І.М.Богаєнко, Г.Г.Грабовського, Кондратця В.О. та ін. Але головною проблемою, яка виникає при реалізації таких систем, є відсутність надійних засобів контролю необхідної точності або досить значна вартість окремих давачів (понад 4 млн. грн.). Особливо це стосується приладів для визначення вмісту корисного (заліза загального або магнітного) у вихідній руді та у потоці пульпи. Наприклад, як показано в [12], для побудови системи екстремального керування вмістом заліза загального у хвостах першої стадії магнітного збагачення необхідна наявність давача-залізоміра (бажано в потоці пульпи) із класом точності 0,1-0,2% та дискретністю вимірювання не менш за 30 хвилин. Зараз таким вимогам відповідають тільки датчики рентгеноспектрального типу[13]. Вартість одного такого давача вітчизняного типу складає 150-500 тис. грн., для іноземних аналогів це 1-2,5 млн. грн. Крім цього, даний спосіб вимірювання вимагає попередньої підготовки проб (у середньому 20-30 хв). Усі ці фактори ускладнюють можливість реалізації таких систем в умовах скрутного фінансового становища вітчизняних гірничих підприємств.

У той же час, зараз досить активно розвивається альтернативний спосіб побудови автоматизованих систем керування на основі використання технологій штучного інтелекту (нейронні мережі, нечітка логіка, генетичні алгоритми тощо). На відміну від „класичних” детермінованих автоматизованих систем керування (АСК), які засновано на використанні жорстких алгоритмів (або чіткої логіки), системи із використанням штучного інтелекту мають властивості навчання та самонавчання (тобто накопичення та узагальнення досвіду). Причому такому узагальненню можуть підлягати фактори, що погано формалізуються із використанням звичайних математичних

методів (наприклад, власний досвід або інтуїція фахівців та т.ін.). Разом з цим, досвід свідчить, що на розробку та впровадження інтелектуальних систем керування витрачаються значно менші кошти за рахунок зменшення необхідності використання коштовного обладнання (давачі, телекомунікації).

Також відомо, що переважна більшість існуючих зараз в світі промислових систем автоматизованого керування реалізовано на основі пропорційних, інтегруючих, диференціальних регуляторів або їх комбінацій (П, І, Д - регулятори). Відносна простота реалізації та порівняльно висока надійність таких систем обумовлюють їх застосування приблизно у 80-90% систем промислової автоматизації [4, 14-18]. Разом з тим відомо, що Д - системи не завжди можуть забезпечувати необхідну якість керування, особливо в умовах складних ТП із властивостями нелінійності, нестаціонарності, інерційності, запізнення в часі, випадкових збурень, наявності нечіткої та неповної інформації. Саме до таких ТП належать більшість переділів збагачення корисних копалин [13, 19-46].

На відміну від зазначених підходів інтелектуальні системи за рахунок застосування окремих математичних моделей розумової діяльності людини, узагальнюючих властивостей, вбудованої нелінійності та адаптивності при забезпеченні певних умов дозволяють більш ефективно вирішувати такі завдання.

На теперішній час відомо вже досить багато наукових розробок та практичних реалізацій інтелектуальних систем керування технологічними процесами (ТП) у промисловості, як за кордоном, так і в Україні [14-18, 47]. У той же час слід відмітити, що саме у гірничій галузі промисловості спроб використання технологій штучного інтелекту для керування основними технологічними процесами ще досить мало.

Ураховуючи всі зазначені фактори, можна стверджувати, що проблема застосування технологій штучного інтелекту у гірничій справі зараз є відносно новою та досить актуальною. Зокрема, це стосується можливості використання нейронних мереж та нечіткої логіки для керування технологічними процесами збагачення корисних копалин. Тому достатньо актуальною залишається проблема підвищення ефективності функціонування АСКТП в умовах рудоз-

багачувальних фабрик (РЗФ) ГЗК на базі узагальнення і розвитку теорії інтелектуальних систем керування (ІСК).

На підставі цього у роботі в межах зазначеної проблеми були сформульовані такі завдання та напрямки досліджень:

- систематизація основних показників локальних ТП збагачення (подрібнення, класифікації та магнітної сепарації) з метою формалізації побудови концепції інтелектуального керування секцією магнітного збагачення залізної руди де, на відміну від існуючих, керування здійснюється кожною окремою секцією збагачення в цілому;
- інтелектуальна ідентифікація параметрів ТП збагачення магнетитових кварцитів з метою побудови математичної предикторної моделі для прямого і зворотного прогнозування в складі інтелектуальної системи керування.

1. АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ ЗАСТОСУВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ГАЛУЗІ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ЗБАГАЧЕННЯ

1.1. Актуальність дослідження проблеми

Сучасне збагачувальне виробництво, як об'єкт керування, характеризується складністю структурних зв'язків, розтягнутістю й аперіодичністю технологічних процесів у часі, наявністю великої кількості зворотних зв'язків (рециклів), властивостями нелінійності, стохастичності та нестационарності, наявністю нечіткої та неповної інформації [13-20, 24-37 та ін.]. Гірничо-збагачувальні комбінати (ГЗК) є великими промисловими об'єднаннями з розвинутою інфраструктурою. Основу виробництва становлять технологічні процеси видобутку, переробки й збагачення залізної руди (рис. 1.1).



Рис. 1.1. Узагальнена схема процесу видобутку та переробки (збагачення) залізної руди в умовах ГЗК

Збагачення залізної руди (магнетитових кварцитів) в умовах рудо-збагачувальних фабрик є заключною частиною всього технологічного процесу, кінцевою метою якого є отримання концентрату максимально високої якості при необхідній продуктивності. Саме заліззорудний концентрат вважається основним різновидом кінцевої

продукції ГЗК. Хоча більшість таких підприємств в Україні та Кривбасі мають додаткове виробництво окатишів та агломерату, де первинною сировиною все одно є концентрат.

Відомо, що збагачення руд чорних металів є достатньо енергоємним та матеріалоємним процесом. Про це свідчить аналіз найбільших статей витрат за технологічними переділами для ГЗК Кривбаса. Наприклад, для Інгулецького ГЗК (ІнГЗК) частка цих статей в собівартості 1т концентрату приблизно така: електроенергія – 18,3%, кулі – 6,7%, вода – 1,3% [12]. В умовах постійного зростання тарифів, особливо на енергоносії, достатньо актуальним є завдання зменшення частки цих статей в загальній собівартості.

Зараз збагачення магнетитових кварцитів на ГЗК Кривбасу здійснюється в декілька стадій. Як правило, це 3 стадії подрібнення та 4-5 стадій магнітної сепарації (рис. 1.2). Отже, кожна стадія включає основні технологічні процеси: подрібнення, класифікації та магнітної сепарації. Допоміжні технологічні процеси: декламація, фільтрація, зневоднення. Подрібнення може здійснюватися в кульових рудногальових млинах. Класифікація на перших стадіях здійснюється в спіральних класифікаторах, а в подальшому в гідроциклонах. Магнітна сепарація здійснюється за один або два прийоми в магнітних сепараторах.

Зараз в галузі дуже гостро стоїть завдання підвищення якості кінцевої продукції (концентрату) і зниження його собівартості. В першу чергу це пов'язано з тим, що при середній якості продукції вітчизняних ГЗК у 64-66% заліза загальної якості аналогічної продукції у потенційних конкурентів (Росія, Швеція, Бразилія) сягає 70%. При цьому собівартість та частка шкідливих домішок вітчизняних концентратів, як правило, більша ніж у конкурентів. Означені фактори знижують конкурентоздатність вітчизняних підприємств на міжнародному ринку.

Проблема також ускладнюється тим, що більшість родовищ (кар'єрів) Кривбасу розробляється вже понад 30-40 років. Глибина кар'єрів постійно зростає, частка відносно багатих та легко збагачувальних руд – зменшується. Це, в свою чергу, призводить до постійного ускладнення і дорожчення гірничих, буро-вибухових, транспортних робіт. Відповідно зростає собівартість ТП дроблення та збагачення.

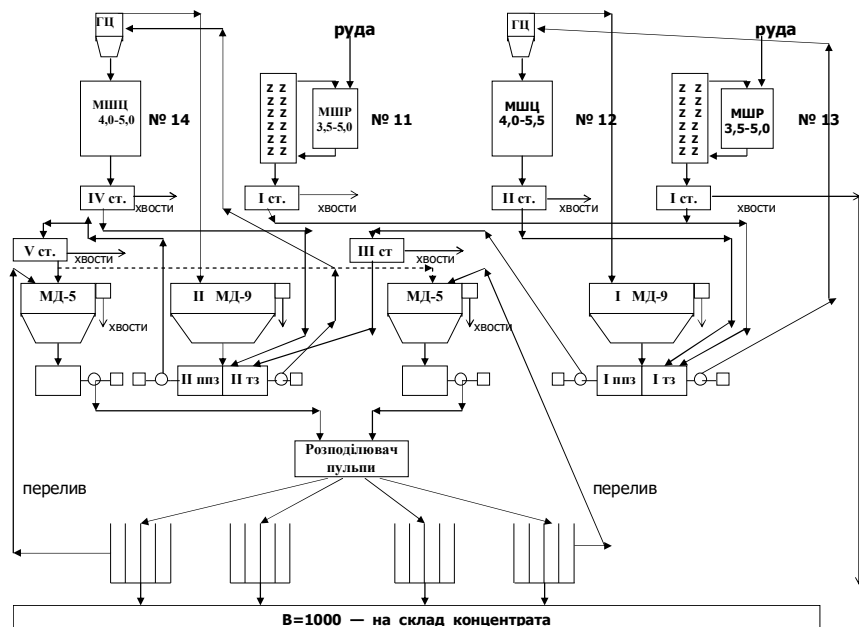


Рис. 1.2. Схема ланцюга апаратів рудозбагачувальної фабрики в умовах ГЗК (на прикладі РЗФ-1 ІнГЗК)

Вирішення цієї проблеми більшість вітчизняних підприємств бачить у технологічних інноваціях. Це запровадження сухої магнітної сепарації, спроби виготовлення власної вибухівки, випробування схем флотаційного доведення концентрату (Інгулецький ГЗК) тощо. Випробування флотаційних методів збагачення або наміри про них висловлюють також Південний, Центральний, Північний та Полтавський ГЗК. Промислові випробування цієї технології в умовах РЗФ-1 Інгулецького ГЗК дійсно довели, що можливе промислове отримання якісного концентрату світового рівня (до 70% заліза загального). Але слід зазначити, що такі заходи потребують вагомих інвестицій та утворюють значну небезпеку екологічному стану регіону. Тому, на думку багатьох фахівців, на даному етапі, в умовах нестачі оборотних коштів, цього можна досягнути за рахунок комплексної автоматизації [1-3, 19-31, 48-49 та ін.].

Світовий досвід показує, що на сьогоднішній день проблеми комплексної автоматизації ефективно вирішуються на основі технологій комп'ютерно-інтегрованих виробництв (КІВ) [49]. При цьому

під КІВ розуміється система на рівні цеху, підприємства, віртуального підприємства, у якій операції з інформаційними потоками на всіх етапах виробничої діяльності підприємства автоматизовані за допомогою комп'ютерних технологій.

Дослідження [12, 50] показують, що для оптимального керування технологічним процесом збагачення необхідно в режимі реального часу враховувати велику кількість різних параметрів (технологічних, економічних, технічних, організаційно-керуючих й ін.). Так, за оцінками, обсяги річних потоків керуючої інформації в умовах гірничо-збагачувальних комбінатів (ГЗК) Кривбасу досить великі (можуть досягати порядку 200-300 млн. різних показників у рік). Крім того, встановлено, що кожні 20 років обсяги оброблюваної інформації зростають, щонайменше, в 2-3 рази. Це породжує цілий ряд проблем при керуванні основними технологічними процесами та підприємством у цілому.

Роботи провідних вчених (зокрема, вітчизняних – Глушкова В.М., Івахненка О.Г. та ін.[51-55]) довели, що в таких умовах найбільш перспективним шляхом вирішення зазначених проблем є комплексна автоматизація виробництва і застосування інтелектуальних технологій.

1.2. Огляд поширених підходів щодо автоматизації ТП збагачення

Ретроспективний аналіз доступних автору джерел інформації (дисертації, монографії та спеціальна література, періодичні видання, патентний огляд та Internet) показує, що проблеми автоматизації процесів магнітного збагачення досліджуються досить давно. Існують різні підходи, але, разом з тим необхідно виділити декілька класичних напрямів [20-43].

Достатньо великого поширення одержали системи автоматичного регулювання щільності пульпи та стабілізації вмісту готового класу у зливні класифікації, керування подачею руди в завантаження млина для підтримки оптимального внутрішньомлинного навантаження подрібнювальним матеріалом, стабілізації транспортування матеріалу всередині барабану млина, регулювання циркулюючого (піскового) завантаження й інші [20, 24-27, 31].

Мають місце різноманітні системи спостереження та стабілізації технологічних параметрів або показників. Серед таких: співвід-

ношення оптимальне “руда-вода” або “тверде:рідке” (Т:Р) на вході млина й магнітного сепаратора при різній крупності вихідної руди й пісків; зв'язок з фізико-механічними властивостями й мінеральним складом вихідної сировини, а також їхній вплив на якість магнітного продукту (промпродукту) на стадіях збагачення й втрати магнетиту у хвостах [12, 24-27, 45, 56].

Однак, найбільш широкого розповсюдження дістали системи автоматизації початкових стадій збагачення (особливо першої). Саме вони є найбільш розповсюдженими в локальних системах автоматичного регулювання (САР). В першу чергу це обумовлено тим, що втрати магнетиту у хвостах на початковій стадії найбільші й становлять 30-55% [20]. Саме це дозволяє одержати найбільший ефект від автоматизації однієї стадії. В цьому напрямі слід особливо відзначити роботу Шмалія С.В. [57], де саме для автоматизації першої стадії застосовано прогресивну інтелектуальну технологію – метод групового урахування аргументів (МГУА [52-55], запропонований школою Івахненка О.Г.). Але такий інтелектуальний напрям поки не знайшов гідного застосування. При всіх перевагах автоматизації початкових стадій необхідно зазначити, що при цьому інші стадії надалі залишаються практично не автоматизованими [20].

Серед інших інтелектуальних систем у даній галузі відомі розробки Шупова Л.П. та ін. [20, 38, 58] 70-80-х рр. (т.зв. «порадники технолога»), системи прогнозування технологічних показників (наприклад, на основі регресійних моделей - роботи Назаренка М.В. [59]), ситуаційного керування із застосуванням теорій експертних систем та розпізнавання образів, а також евристичних підходів (роботи Козіна В.З., Хорольського В.П., Бабця Є.К., Сироджі І.Б., Прочуто В.С., Воронова В.А. [21, 45, 60-66]).

У галузі розробок нейро-нечітких систем з ідентифікації чи керування ТП збагачення (тобто найбільш близьких за темою книги) існують такі роботи: Моркуна В.С.[8, 67-70], Зарубина М.Ю.[71], Єрьоменка Ю.І.[72], Кулаєнка О. А. та Пермькова В.І. [73]. Але на момент аналізу всі ці роботи були в початковому стані (на рівні постановки завдання або вирішення окремих питань) і автору невідомо про більш менш вагомий кінцевий результат цих розробок у вирішенні означеної проблеми.

Серед подібних розробок у суміжних галузях промисловості необхідно відзначити внесок робіт вчених Київського інституту автоматики (КІА) та його структурних підрозділів (зокрема, Архангельського В.І., Богаєнко І.М., Грабовського Г.Г., Рюмшина М.О.[74-77]) за розробку та практичне застосування (впровадження) нейро-нечітких підходів для побудови інтегрованих автоматизованих систем керування в умовах вітчизняних металургійних підприємств. За кордоном подібні розробки ведуть Karr C. L., Stanley D. A., Weck B., Scheiner B. J. [78-84], Reuter M.A. [85-87] та інших [88-90 тощо].

Разом з тим, залишається не повністю вирішеною проблема побудови інтегрованої інтелектуальної системи керування комплексом технологічних процесів збагачення в умовах РЗФ сучасних ГЗК (особливо вітчизняних). Як показує аналіз, є тільки окремі рішення по локальним ТП. Разом з тим, ця проблема є досить актуальною й вимагає подальших досліджень [2, 13, 20, 59].

1.3. Обґрунтування застосування технологій штучного інтелекту для автоматизації ТП збагачення магнетитових кварцитів

Аналіз вищенаведених праць показує, що переважна більшість систем автоматизованого керування та регулювання локальними ТП збагачення реалізовано на підставі застосування класичних підходів теорії керування, адаптивних та оптимальних систем. У якості математичних моделей, як правило, застосовано 1-2 каналні лінійні системи. Більшість таких систем досить просто реалізується за допомогою класичних ПІД-регуляторів. Разом з тим відомо, такі системи не завжди можуть забезпечувати необхідну якість керування, особливо в умовах нестационарності, інерційності, запізнення в часі, випадкових збурень, наявності нечіткої та неповної інформації [13, 20-46, 48, 56-63]. Хоча доведено, що можливості лінеаризації математичних моделей для більшості переділів ТП збагачення досить обмежені. До того ж, ПІД-регулятори вимагають постійного переналаштування власних коефіцієнтів у випадку зміни технологічної ситуації (наприклад, коливання складу шихти, продуктивності, якості тощо). Але вибір їх коефіцієнтів у відповідності до структури й параметрів моделі об'єкта керування вимагає використання достатньо складних методик. Інтегральні ланки в складі регулятора ініціюють коливальні складові процесу, що часто є небажаним. При цьому багатьма дослідженнями (наприклад, [59]) доведено, що па-

раметри ТП збагачення коливаються в досить великих межах і ці коливання не завжди можливо компенсувати традиційними методами. Все це разом створює передумови для підвищення системності існуючих моделей шляхом урахування більшої кількості факторів і побудови багатовимірних (багатоканальних) та багатозв'язних моделей. Аналіз показує, що обчислювальні можливості сучасної комп'ютерної техніки вже дозволяють це робити [2, 6, 59, 91-95 та ін.].

Також досить суттєвою проблемою є відсутність надійних засобів контролю необхідної точності або досить значна їх вартість. Особливо це стосується приладів для визначення вмісту корисного (заліза загального або магнітного) у вихідній руді та у потоці пульпи. Наприклад, як показано в [12], для побудови системи екстремального керування за вмістом заліза загального у хвостах першої стадії магнітного збагачення необхідна наявність давача-залізоміра (бажано в потоці пульпи) із класом точності 0,1-0,2% та дискретністю вимірювання не менш чим за 30 хвилин. Зараз таким вимогам відповідають тільки датчики рентгеноспектрального типу [13]. Вартість одного такого давача вітчизняного типу складає 150-500 тис. грн., для іноземних аналогів це 1-1,5 млн. грн.

У той же час, зараз досить активно розвивається альтернативний спосіб побудови автоматизованих систем керування на основі використання технологій штучного інтелекту (експертні системи, нейронні мережі, нечітка логіка, генетичні алгоритми тощо). На відміну від „класичних” детермінованих АСУ, які засновано на використанні жорстких алгоритмів (або чіткої логіки), системи із використанням штучного інтелекту мають властивості навчання та самонавчання (тобто накопичення та узагальнення досвіду). Причому такому узагальненню можуть підлягати фактори, що погано формалізуються із використанням звичайних математичних методів (наприклад, власний досвід або інтуїція фахівців і т.ін.). Разом з тим, досвід свідчить, що на розробку та впровадження інтелектуальних систем керування витрачається значно менше коштів за рахунок зменшення необхідності використання коштовного обладнання (давачі, телекомунікації).

Саме інтелектуальні системи за рахунок застосування окремих математичних моделей розумової діяльності людини, узагальнюю-

чих властивостей, вбудованої нелінійності та адаптивності при забезпеченні певних умов дозволяють вирішувати такі завдання.

На теперішній час розроблено досить багато методів для синтезу регуляторів для лінійних систем (в т.ч. оптимальних та адаптивних). Наприклад, це класичні методи, засновані на варіаційному численні, динамічному програмуванні, принципі максимуму, теорії аналітичного конструювання регуляторів тощо [4, 96]. Спроби практичного здійснення подібних регуляторів для нелінійних систем зустрічають низку принципових труднощів, пов'язаних із відсутністю математичної моделі необхідної точності, надійних методів аналізу стійкості тощо. Виключенням з цього є релейні нелінійні системи, властивості яких вважаються добре вивченими. Разом з цим, відомо, що зміна управляючих впливів (дій) в цих системах є обмеженою і заздалегідь відомою. Це значно спрощує аналіз та синтез подібних систем. Однак, в реальних системах керування складними технологічними об'єктами таку властивість вже неможливо гарантувати. Такі передумови фактично призвели до появи нового наукового напрямку – інтелектуальних систем керування (ІСК) [14-17, 93 та ін.].

1.3.1. Основні напрями досліджень та розробок в галузі ІСК. Сучасний штучний інтелект містить декілька напрямів розвитку [93, 97-98]. Серед відомих напрямів слід відокремити: фреймові та предикатні моделі, логічне програмування тощо. Але найбільш поширеними на сьогодні є технології штучного інтелекту, що знайшли найбільше втілення в реальних базах знань та системах керування:

- експертні системи;
- нейромережеві підходи та нейрокерування;
- нечітка логіка.

Серед робіт близьких за тематикою до інтелектуального керування ТП збагачення корисних копалин слід відзначити такі дослідження.

З напрямку експертних систем відомі роботи Зубова Д.А. [6] стосовно автоматизації ТП вуглезбагачення, дослідження Хорольського В.П. [93] та Шупова Л.П. [38, 58] для збагачення руд чорних металів.

Істотний внесок у напрямку застосування нечітких систем керування в гірничій промисловості внесли дослідження Моркуна В.С.

та ін. [67-70] для ТП збагачення руд чорних металів, а також Щокіна В.П. [99-100] для ТП агломерації.

У напрямку застосування нейромережових (інтелектуальних) систем для ідентифікації та керування ТП, що є найбільш близькими до теми книги, слід вважати роботи Хорольського В.П., Бабця Є.К.[61-63] та Зарубіна М.Ю.[71] (досить схожі з точки зору постановки завдання). Серед закордонних робіт подібного спрямування необхідно відзначити таких авторів: Kan C. L., Stanley D. A., Weck B. [78-84].

Але аналіз цих робіт дозволяє стверджувати, що проблему побудови інтелектуальної системи керування ТП збагачення магнетитових кварцитів із застосуванням технології нейрокерування на сьогодні слід вважати не вирішеною.

1.3.2. Загальні відомості про штучні нейромережі (НМ). Загальновизнаним залишається той факт, що людина як ОПР, а точніше її мозок, значно краще поки вирішує складні завдання, що погано формалізуються [4-5, 14-18 й ін.]. Це в першу пов'язане з тим, що людина простіше й швидше адаптується в обстановці, що динамічно змінюється, має здатність до навчання, володіє інтуїцією й т.д.

У загальному випадку НМ - це машина, що моделює спосіб роботи мозку. Звичайно НМ реалізують у вигляді електронних пристроїв (нейропроцесорів) або комп'ютерних програм (нейроемуляторів). Штучна нейронна мережа - це істотно паралельно розподілений процесор, що має природну схильність до збереження досвідченого знання й можливість надання його нам. Вона подібна з мозком у двох аспектах:

1. Знання здобувається мережею в процесі навчання;

2. Для збереження знання використовуються сили міжнейронних з'єднань, що також мають назву синаптичних ваг.

Процедура, яка використовується для здійснення навчання, називається алгоритмом навчання. Її функція складається в модифікації синаптичних ваг НМ певним чином так, щоб вона набула необхідних властивостей.

Модифікація ваг є традиційним способом навчання НМ. Такий підхід близький до теорії адаптивних лінійних фільтрів, які вже давно й успішно застосовуються в керуванні. Однак, для НМ існує ще

й можливість модифікації власної топології, яка ґрунтується на тому факті, що в живому мозку нейрони можуть з'являтися, вмирати й змінювати свої зв'язки з іншими нейронами.

З наведеного вище відомо, що НМ реалізують свою обчислювальну потужність завдяки двом основним властивостям: істотно паралельно розподіленій структурі й здатності навчатися й узагальнювати отримані знання. Під властивістю узагальнення розуміється здатність НМ генерувати правильні виходи для вхідних сигналів, які не були враховані в процесі навчання (тренування). Ці дві властивості роблять НМ системою переробки інформації, що вирішує складні багатомірні завдання, непосильні самій потужній сучасній обчислювальній техніці.

Якщо опустити більш ніж піввікову історію розвитку технології НМ (наведене в [4-5, 14-18, 47, 93-95, 101-113]) необхідно відзначити вагомий внесок у її розвиток таких учених як Ramon y Cajal S., McCulloch W.S., Pitts W., Wiener N., Hebb D.O., Rochester N., Holland J.H., Haibt L.H., Duda W.L., Uttley A.M., Ashby W.R., Minsky M.L., Sutton R.S., Winograd S., Cowan J.D., Rosenblatt F., Widrow B., Hoff M.E., Papert, von der Malsburg, Willshaw D., Hopfield J.J., Kohonen T., Rumelhart D.E., Hinton G.E., Williams D.J., Parker D.B., Werbos P.J., Broomhead D.S., Lauriere D., Brawermann E.M., Haykin S., Cybenko G., Kosko B., Narendna K.S., Yusof R., Галушкіна А.І., Башкірова О.А., Круглова В.В., Руденка О.Г., Бодянського Є.В. й ін.

Штучний нейрон (або просто нейрон) є елементарним функціональним модулем, з безлічі яких будуються НМ. Він являє собою модель живого нейрона, однак лише в смислі здійснюваних ним перетворень, а не способу функціонування. Існують логічні, безперервні й імпульсні моделі нейрона. Логічні моделі нейрона активно досліджувалися в 60-70-х роках, але не одержали подальшого розвитку. Імпульсні моделі більше близькі до фізичної природи процесів, що відбуваються в нервовій клітині, однак їхня теорія не так розвинена як у безперервних, і вони усе ще не знаходять широкого застосування.

Безперервна модель нейрона працює в таким способом. Вхідні сигнали надходять на блоки, що реалізують функцію синапсів. Кожний з них характеризується своїм ваговим коефіцієнтом (синаптичною вагою). Позитивні значення ваг $w_{k,j}$ відповідають збуджуваль-

ним синапсом, негативні — гальмовим. Зважені вхідні сигнали подаються на лінійний суматор, після чого результат їхнього додавання надходить на блок активаційної функції. Звичайно активаційна функція обмежує вихідний сигнал нейрона в діапазоні $[0,1]$ або $[-1,1]$. Модель нейрона також містить у собі зсув b , що додається до вхідного сигналу блоку активаційної функції.

Математично модель нейрона описується такими залежностями:

$$v_k = \sum_{j=1}^l w_{jk} z_j; \quad (1.1)$$

$$s_k = v_k + b_k; \quad (1.2)$$

$$y_k = \varphi(s_k); \quad (1.3)$$

де z_1, z_2, \dots, z_l — вектор вхідних сигналів;

$w_{1k}, w_{2k}, \dots, w_{lk}$ — синаптичні ваги k -го нейрона;

s_k — вихід лінійного суматора;

b_k — зсув;

$\varphi(\cdot)$ — активаційна функція;

y_k — вихідний сигнал нейрона.

На рис. 1.3 зображено функціональну схему такої моделі штучного нейрона безперервного типу.

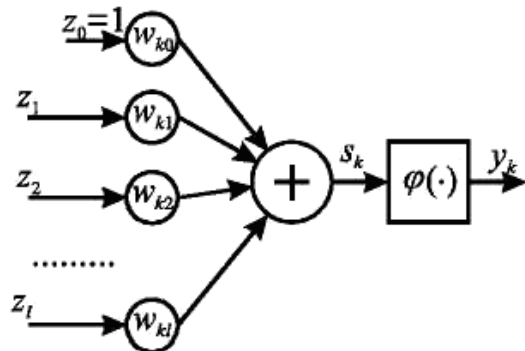


Рис. 1.3. Модель нейрона (де $z_0=1$ і $w_{k0}=b_k$)

Активаційна функція нейрона $\varphi(\cdot)$ визначає нелінійне перетворення, що здійснюється нейроном. Існує безліч видів активаційних функцій, але найбільше поширені наступні чотири:

1. Гранична функція. На рис. 1.4а наведений її графік.

$$\varphi(s) = \begin{cases} 1, & s \geq 0 \\ 0, & s < 0 \end{cases} \quad (1.4)$$

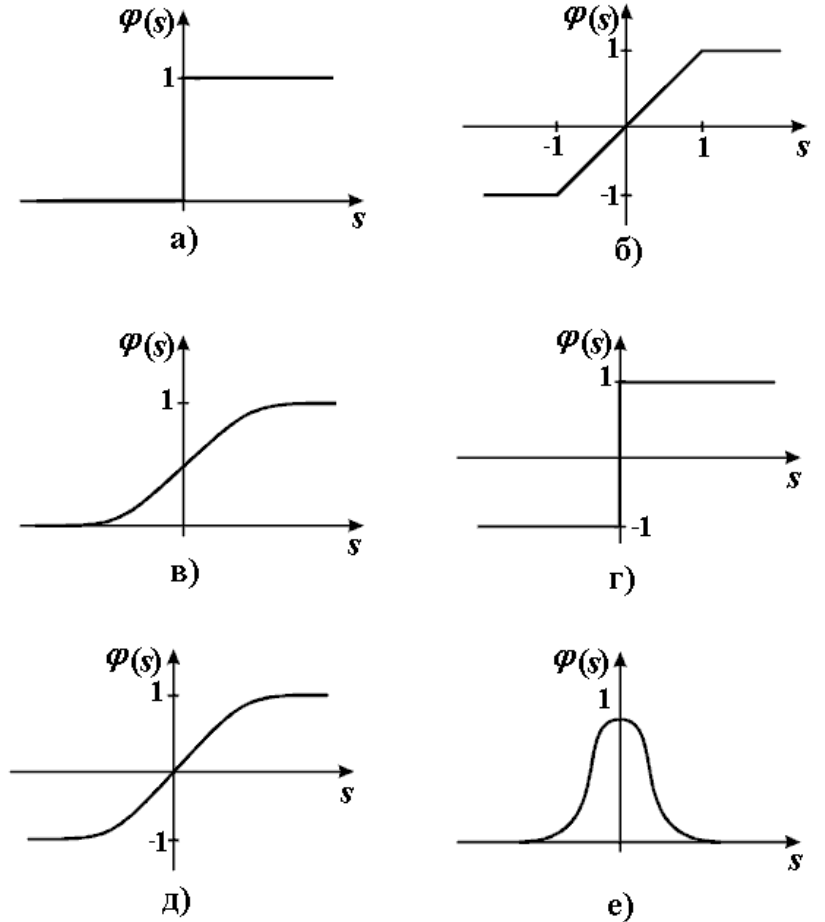


Рис. 1.4. Типи активаційних функцій:

а), г) - гранична; б) - лінійна; в) - сигмоїдальна; д) - тангенціальна; е) - радіально-базисна активаційні функції

2. Кусково-лінійна функція. Вона зображена на рис. 1.4б і описується наступною залежністю:

$$\varphi(s) = \begin{cases} 1, & s \geq a \\ s, & a > s > -a \\ -1, & a \leq -a \end{cases} \quad (1.5)$$

3. Сигмоїдальна функція. Це найбільш широко використовуваний тип активаційної функції. Вона була введена за аналогією із граничною функцією, але скрізь є строго монотонно зростаючою, безперервною й такою, що диференціюється (рис. 1.4в). Здатність до диференціювання є важливою властивістю для аналізу НМ і деяких методів їхнього навчання.

У загальному вигляді сигмоїдальна активаційна функція описується залежністю:

$$\varphi(s) = \frac{1}{1 + e^{-as}}, \quad (1.6)$$

де a — параметр, що визначає нахил функції.

Крім перерахованих функцій, що змінюються в діапазоні $[0,1]$, використовуються також їхні аналоги з областю значень $[-1,1]$. Наприклад, на рис. 1.4г гранична функція перевизначена як

$$\varphi(s) = \begin{cases} 1, & s > 0 \\ s, & s = 0 \\ -1, & s < 0 \end{cases} = \text{sign}(s). \quad (1.7)$$

Замість сигмоїдальної активаційної функції широко застосовується гіперболічний тангенс

$$\varphi(s) = \frac{e^s - e^{-s}}{e^s + e^{-s}}. \quad (1.8)$$

Властивості непарності цієї функції роблять її зручною для вирішення завдань керування.

4. Активаційна функція Гауса застосовується в мережах заснованих на радіально-базисних функціях (РБФ-мережах)

$$\varphi(s) = \text{Exp}\left(-\frac{s^2}{\sigma^2}\right). \quad (1.9)$$

Аргумент функції розраховується на основі залежності: