

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ МОРСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматики

МОНІТОРИНГ ПРОЦЕСІВ ТА ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ

Конспект лекцій

для підготовки магістрів

Спеціальність 271 «Морський та внутрішній водний транспорт»

Спеціалізація 271.03 «Експлуатація суднового електрообладнання та засобів
автоматики»



Одеса - 2023

Укладачі: С.М.Дранчук, к.т.н., доцент

Методичні вказівки схвалено на засіданні кафедри «Експлуатація суднового електрообладнання і засобів автоматики», протокол № 10-22/23 від 25.05.2023 року.

Зав. кафедрою, д.т.н., професор

В.О.Яровенко

Моніторинг процесів та штучний інтелект.: Конспект лекцій для підготовки магістрів спеціальності 271 «Морський та внутрішній водний транспорт», спеціалізація 271.03 «Експлуатація суднового електрообладнання і засобів автоматики» / Укл. С.М. Дранчук, – Одеса: ОНМУ, 2023– 132 с.

Зміст

1. Інтегрована система судна.....	5
1.1. Основні терміни та визначення.....	5
1.2. Структура інтегрованої системи судна.....	11
1.3. Захист інформаційних систем судна.....	14
1.4 Моніторинг судових систем.....	16
1.5 Основні типи датчиків в системах суднового моніторингу	20
1.5.1 Датчиків частоти обертання:	20
1.5.2 Датчики для виміру зусиль і обертового моменту.....	22
1.5.3 Датчики для вимірювання деформацій корпусу судна.....	25
1.6 Приклади систем моніторингу енергетичного обладнання судна	27
1.6.1 Система моніторингу енергетичного обладнання судна fleetECO.....	27
1.6.1.1 Описання WEB-інтерфейсу система моніторингу енергетичного обладнання судна fleetECO.....	28
1.6.2. Система моніторингу енергетичного обладнання судна ShipMonitoring.....	33
1.7. Суднові реєстратори даних рейсу.....	36
1.7.1 Головні причини появи на судах реєстратора даних рейсу.....	36
1.7.2 Основні нормативні документи по судових реєстраторах даних рейсу.....	39
1.7.3. Основні вимоги до реєстраторів даних рейсу.....	41
1.7.4 Вимоги до записуючого пристрою VDR.....	41
1.7.5. Вимоги до записуваних даних рейсу для VDR.....	42
1.7.6. Вимоги до записуваних даних рейсу для S – VDR.....	50
1.7.7. Структурні схеми VDR і S – VDR.....	50
1.7.8 Базовий блок збору даних (DCU).....	51
1.7.9 Захищений накопичувач інформації.....	55
1.7.9.1. Основні вимоги.....	55
1.7.9.2 Структурна схема DRU.....	59
1.7.9.3 Загальні характеристики DRU.....	61
1.7.9.4 Орієнтовний розрахунок необхідного об'єму записуючого пристрою DRU.....	62
Контрольні питання до розділу 1.....	65
2. Основні поняття штучних нейронних мереж.....	67
2.1 Біологічний нейрон.....	69
2.2. Штучний нейрон.....	71
2.3 Активаційна функція.....	73
2.4 Стохастична модель нейрона.....	76
2.5 Пересептрон.....	76
2.6 Уявлення нейронних мереж за допомогою орієнтованих графів.....	78
2.7 Зворотній зв'язок.....	80
2.8 Архітектура мереж.....	82
2.8.1 Одношарові мережі прямого розповсюдження.....	82

2.8.2 Багатошарові мережі прямого розповсюдження.....	82
2.8.3 Рекурентні мережі.....	84
2.8.4 Нейронні мережі на основі радіально-базових функцій.....	86
Контрольні питання до розділу 2.....	89
3. Процеси навчання.....	90
3.1 Навчання з вчителем.....	92
3.1.1 Метод зворотного поширення похибки (Error Back Propagation).....	92
3.1.2. Метод випадкового пошуку (random search).....	96
3.1.3. Навчання нейронних мереж за допомогою генетичних алгоритмів.....	96
3.2 Навчання без вчителя (unsupervised training).....	97
3.2.1 Метод Хебба.....	98
3.2.2. Конкурентне навчання.....	101
3.3. Перспективи використання нейронних мереж інтегрованих системах судна.....	103
Контрольні питання до розділу 3.....	106
4. Нейронні мережі нечіткої логіки в системах управління.....	107
4.1 Нечітка логіка та нечіткі множини.....	107
4.2. Види функцій належності та їх побудова.....	109
4.3. Операції над нечіткими множинами.....	112
4.4 Методи нечіткого висновку	113
4.4.1 Нечіткий логічний висновок за методом Мамдані.....	121
4.4.2 Нечіткий логічний висновок за методом Сугено.....	122
4.5. Нечіткі нейронні мережі.....	125
4.5.1 Використання нечітких нейронних мереж для систем управління.....	127
4.5.1.1 Послідовна схема нейромережевого управління.....	127
4.5.1.2 Паралельна схема нейромережевого управління.....	129
Контрольні питання до розділу 4.....	130
Список використаних джерел.....	131

1 Інтегрована система судна

1.1. Основні терміни та визначення

Наведемо основні визначення, якими ми будемо користуватися при вивченні дисципліни.

Під *системою* в загальному випадку розуміють сукупність частин, які сумісно виконують необхідну задачу, і що має властивості, яких немає у частин системи окремо. Наважливе що визначає систему – це взаємодія і взаємний зв'язок окремих частин системи в межах роботи в системі, що задає характерні властивості системі у цілому.

Існує багато різних систем, але для нас найбільш приваблива технічна електрона система, яка штучно утворена людиною для рішення конкретних задач, і їх функціонування направлено на досягнення визначної мети. Наприклад, система підтримки життєдіяльності судна приймає данні з зовнішнього середовища о температурі, вологості повітря, тиску в приміщенні та ін., і згідно алгоритму роботи системи підтримує в заданому приміщенні умови по забезпеченню оптимальних умов життєдіяльності людини, впливаючи на зміну зовнішніх факторів – температуру, вологість повітря, тиск та ін.

Зовнішнім середовищем для системи називають множину зовнішніх елементів природи, які оказують вплив на систему або знаходяться під впливом системи в умовах вирішення конкретної задачі.

В залежності від алгоритму вирішення необхідної задачі для досягнення бажаної мети всі технічні електронні системи підрозділяються на автоматичні та автоматизовані.

Система називається *автоматичною*, якщо в процеси отримання, перетворення, передавання та використанні енергії чи інформації виконуються системою без посередньої участі людини. Автоматичні системи частіше виконують локальні задачі. Наприклад, досить поширено використовують автоматичну систему пожежогасіння. Ця система регулярно отримує інформацію від пожежних датчиків (теплових, диференційно-теплових, димових, відкритого вогню, газоаналізаторних) і в залежності від заданого алгоритму самостійно приймає рішення про початок пожежі в заданому приміщенні, а також самостійно виконує дії, необхідні для ліквідації пожежі (включає систему аварійного пожежогасіння).

Для виконання своєї задачі автоматичні системи працюють на основі визначеного алгоритму. *Алгоритм* – це логічна схема вирішення визначеної задачі системи. Запис цього алгоритму на тій чи іншій формалізованій мові (C++, Java, Бейсик та ін.) зветься програмою. Виконання автоматичною системою поставленою задачі в першу чергу залежить від якості програми, у який необхідно урахувати усі можливі варіанти роботи обладнання та можливі відхилення при роботі обладнання.

Автоматизованими (ергатициними чи людина - машинними) системами звать ті системи, в яких одні функції виконують технічні засоби, а інші вимушена виконувати людина. Це найбільш поширена електрона технічна система на судні. Частіш за все функції отримання інформації від датчиків,

необхідна обробка сигналів від них (аналогово-цифрове перетворення, фільтрація та ін.) та передавання цих сигналів – моніторинг, виконуються технічними частками системи, а прийняття рішення виконується людиною.

Моніторинг (monitoring – відслідкування) – це систематичне спостереження з визначною періодичністю за будь-яким процесом в системі управління за допомогою одного і того ж обладнання з метою його відповідності необхідному результату.

Інформаційна система – це автоматична чи автоматизована система, яка призначена для збору, зберігання, передачі чи обробки інформації. Для систем управління *інформація* – це данні, які характеризують систему управління, зовнішнє середовище системи і використовуються в процесі прийняття рішень. Яскравим прикладом інформаційної системи є система реєстрації даних рейсу (VDR, SVDR), яка з заданою періодичністю отримує інформацію з різноманітних суднових датчиків і зберігає її в визначеному форматі в пам'ятовуючому пристрої з метою послідуного аналізу цієї інформації.

Таким чином основні умови здійснення управління наступні:

- керованість – здібність об'єкту управління виконувати необхідні команди за визначений кінцевий проміжок часу;
- спостережуваність – можливість контролю за станом об'єкту управління командною системою;
- здібність до управління – наявність у командної системи достатній кількості засобів для прийняття рішень і проведення їх у необхідному обсязі.

В теорії управління прийняття рішення розглядають як циклічний процес, кожний цикл якого реалізує виконання наступних функцій:

1. Отримання інформації о стані системи управління та зовнішнього середовища системи, обробки цієї інформації, аналізу та прогнозування стану системи на деякий час уперед.
2. Формування мети о деякому іншому стані, у який необхідно перевести систему. На цьому етапі важливо розглянути усі можливі варіанти рішення з яких необхідно виділити найбільш допустимі.
3. Визначення можливих шляхів для досягнення системою нової встановленої мети.
4. Вибір з множини можливих шляхів досягнення нового стану системи найкращого. Це основний етап, але його виконання без попередніх трьох етапів неможливо.
5. Реалізація прийнятого рішення.

Перших три етапи називають *підготовкою рішення*, а четвертий – *прийняття рішення*. В автоматичних системах всі етапи управління виконуються технічними засобами, а в автоматизованій системі – етап прийняття рішення виконується людиною.

Таким чином під *системою прийняття рішень* розуміють комп'ютерну інформаційну систему, данні якої використовуються для прийняття рішень в ситуації коли неможливо чи не бажано мати автоматичні системи, які виконують увесь процес прийняття рішень. Систему прийняття рішень

можливо розглядати як комплекс засобів, які автоматизують інформаційні процеси підготовки рішення при управлінні, і які допомагають керівнику в ході виконання поставленої задачі. Ця система призначена забезпечити можливість урахування усієї необхідної для управління інформації, скоротити до мінімуму час її обробки, виділити основні данні, які необхідні для прийняття рішення та рекомендувати по закладеному критерію найкращій чи найкращі з них.

Для обміну між підсистемами чи системами використовують інформаційні канали та мережі.

Під *інформаційною мережею* розуміють сукупність взаємодіючих інформаційних об'єктів (систем) з виділеними зв'язками (каналами) між ними, яка призначена для передавання, зберігання та обробки даних. Часто інформаційні мережі звать *комп'ютерними мережами*.

Інформаційний канал уявляє собою засіб (комунікаційне середовище), по якому передаються данні чи сигнали. Такий канал може бути дводротовим, коаксіальним, витим чи іншим типом кабелю, або ефір.

Сукупність інформаційних каналів за допомогою яких виникає інформаційна мережа, зветься комунікаційною підмережою.

Інформаційні мережі можуть бути локальними і територіальними (регіональними, глобальними чи галузевими).

Локальна мережа – LAN (Local area net) характеризується тим, що усі інформаційні об'єкти (системи), які входять до неї, розташовані на незначних відстанях друг від друга (до 10 км). Інформаційні об'єкти *територіальної мережі* знаходяться на відстані до десятків тисяч кілометрів.

Суднові багатокомп'ютерні системи відносять до локальних мереж. Використовують дві архітектури таких мереж:

- архітектура «клієнт-сервер», яка дозволяє ефективно використовувати ресурси серверів;
- одноранговая архітектура, яка визначає рівноправність абонентських систем.

По технології локальні мережі підрозділяються на:

- з маршрутизацією даних, коли дані передаються тільки однієї системі – адресанту;
- з селекцією даних, коли данні передаються усім системам.

В залежності від фізичних засобів локальні мережі розподіляють на:

1. Кабельні, в яких передавання сигналів виконується за допомогою дротових чи оптокабелів.

В дротових кабелях по дротам передаються електричні сигнали, які кодуються зміною електричного струму.

В оптокабелях по оптичним каналам передаються сигнали, які закодовані зміною випромінювання світлом. Кожний оптокабель складається з джерела світла (звичайно це лазерний діод), який перетворює електричні сигнали у випромінювання світлом ІЧ-діапазону), світловоду (оптичне волокно діаметром 10...150 мкм, яке виготовлено з кварцової ниті), який передає кодовані світлові сигнали на значні відстані та приймачу цих оптичних сигналів (фотодіод), який перетворює

оптичні сигнали в електричні. Оптиелектронні канали дозволяють передавати данні зі швидкістю 100...10000 Мбіт/с на відстань до декілька сотен кілометрів. Крім того він добре захищений від електромагнітних перешкод та пожежобезпечний.

2. Бездротові, в яких передавання сигналів виконується за допомогою радіохвиль, чи оптичним шляхом.

Інформаційний канал, за допомогою якого об'єкти мережі обмінюється інформацією, складається безпосередньо з каналу та блоків доступу до нього (інтерфейс них пристроїв), які забезпечують під'єднання систем до мережі. Під *інтерфейсом* звичайно розуміють засоби (апаратні та програмні), які забезпечують взаємодію об'єктів мережі. Задачею інтерфейсу є визначення та реалізація параметрів, процедур та характеристик спілкування будь яких об'єктів мережі.

Документи, які визначають правила та процедури підключення систем до мережі зветься *протоколами*.

Магістральний канал призначений для передаванню даних для значної кількості систем. Такий канал має високу надійність та значну пропускну здібність. Магістральні канали будуються як правило на основі оптичних кабелів чи ефіру.

В суднових інформаційних локальних мережах звичайно використовують інтерфейси типу RS-485 та Ethernet.

Мережа, яка побудована на **інтерфейсі RS-485**, уявляє собою з'єднання передавачів та приймачів за допомогою виті пари – двох скручених дротів. У основі інтерфейсу RS-485 лежить принцип диференціальної (балансної) передачі даних. Суть його полягає в передачі одного сигналу по двох дротах. Причому по одному дроту (умовно А) йде оригінальний сигнал, а по іншому (умовно В) - його інверсна копія. Іншими словами, якщо на одному дроті "1", то на другому "0" і навпаки. Таким чином, між двома дротами виті пари завжди є

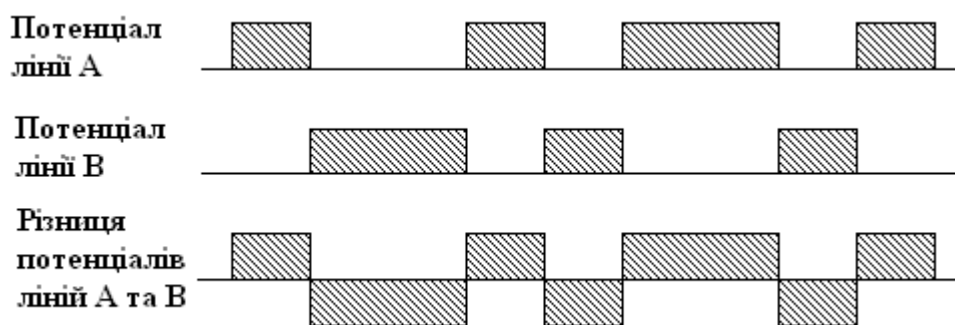


Рис.1.1 Диференціальна передача даних за інтерфейсом RS-485

різниця потенціалів: при "1" вона позитивна, при "0" - негативна. Цією різницею потенціалів і передається сигнал (рис.1.1). Такий спосіб передачі забезпечує високу стійкість до синфазної перешкоди. Всі пристрої підключаються до однієї виті пари однаково: прямі виходи (А) до одного дроту, інверсні (В) – до іншого. При великих відстанях між пристроями, зв'язаними по витій парі і високих швидкостях передачі починають виявлятися

так звані ефекти довгих ліній. Причина цьому - скінченність швидкості розповсюдження електромагнітних хвиль в провідниках. Якщо відстань достатньо велика, фронт сигналу, що відобразився в кінці лінії і повернувся назад, може спотворити поточний або наступний сигнал. У таких випадках потрібно якимсь чином пригнічувати ефект віддзеркалення. Хвильовий опір для звичайно вживаних в лініях інтерфейсу RS-485 витих пар складає 120 Ом, тому якщо на видаленому кінці лінії, між провідниками виті пари включити резистор R_t з номіналом рівним хвильовому опору лінії, то електромагнітна хвиля поглинається на такому резисторі (рис.1.2). Великий мінус узгодження на

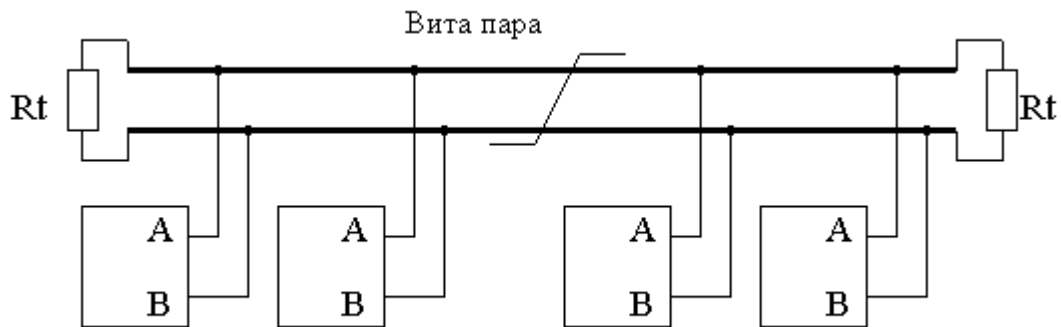


Рис.1.2 Підключення до мережі об'єктів за інтерфейсом RS-485

резисторах - підвищене споживання струму від передавача, адже в лінію включається низькоомне навантаження. Тому рекомендується включати передавач тільки на час відправки посилки.

Інтерфейс RS-485 забезпечує обмін даними між декількома об'єктами по дводротовій лінії зв'язку в півдуплексному режимі (прийом і передача йдуть по одній парі дротів, але розділені у часі), тобто одночасно повинен передавати тільки один об'єкт.

Стандартні параметри інтерфейсу RS-485 приведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Стандартні параметри інтерфейсу RS-485

Допустима кількість передавачів / приймачів	32 / 32
Максимальна довжина кабелю	1200 м
Максимальна швидкість зв'язку	10 Мбіт/с
Діапазон напруг "1" передавача	+1.5...+6 В
Діапазон напруг "0" передавача	-1.5...-6 В
Діапазон синфазної напруги передавача	-1...+3 В
Допустимий діапазон напруг приймача	-7...+12 В
Пороговий діапазон чутливості приймача	±200 мВ
Максимальний струм короткого замикання драйвера	250 мА
Допустимий опір навантаження передавача	54 Ом
Вхідний опір приймача	12 кОм

Якщо одночасно в інформаційний канал почнуть передавати хоча б два об'єкта, то виникне накладання їх сигналів друг на друга і приймачі інших об'єктів не зможуть розібрати передану інформацію. Така ситуація зветься

колізією, а частка мережі, вузли в якій конкурують за загальний канал передачі – *доменом колізій*.

В інтерфейсі **Ethernet** для того щоб розпізнати колізію, об'єкт, який передає інформацію, постійно слідкує за сигналами у каналі, і якщо власний передаваний сигнал не співпадає з прийнятим сигналом з каналу, то фіксується колізія. В такому випадку усі об'єкти мережі припиняють передачу сигналів, і повторюють її через деякий випадковий проміжок часу.

Але якщо два об'єкта мережі одночасно почнуть коротку передачу, яка закінчиться раніш ніж вони приймуть сигнали друг від друга, що можливо при значної довжині мережі, оскільки швидкість розповсюдження електричних сигналів кінцева. В цьому випадку кожний об'єкт отримує інформацію від іншого, а факт колізії не буде встановлений. Тобто прийнятий сигнал буде сумішшю накладених сигналів від двох об'єктів, тоді як факт колізії не встановлений. Ось чому в інтерфейсі Ethernet встановлюється мінімальний розмір пакету даних, що передаються. Якщо необхідно передати кількість даних, яка менш розміру пакету, то додають «заповнювачі» (pad), які доповнюють необхідну кількість даних до повного розміру пакету. Звичайно в інтерфейсі Ethernet мінімальним розміром пакету встановлюється 64 байта.

Виявлення факту колізії та завдання мінімального розміру пакету даних дає змогу організувати безперервний півдуплексний режим роботи мережі.

В версії Gigabit Ethernet можливий повно дуплексний режим роботи одного каналу. Тобто одночасно в каналі можуть працювати на передачу два

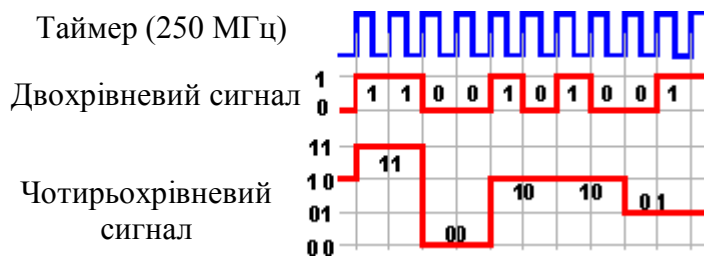


Рис.1.3 Чотирьохрівневе кодуванні інформації

об'єкту. В цьому інтерфейсі інформація кодується не двома рівнями (0 та 1), а чотирма (00, 01, 10, 11) (рис.1.3). Тобто рівень напруги одночасно кодує не один біт, а одразу два біта. Частота модуляція знижується з 250 МГц до 125 МГц. Таким чином мережевий адаптер вичитає з

загального сигналу свій власний переданий сигнал, та таким чином отримує сигнали від другого об'єкту.

Існує різні модифікації інтерфейсу Ethernet, які кодуються стандартним позначенням XBaseY, де X – швидкість передачі, Мбіт/с (10, 100, 1000...); Y – умовне позначення середовища передачі та дальності зв'язку. Наприклад,

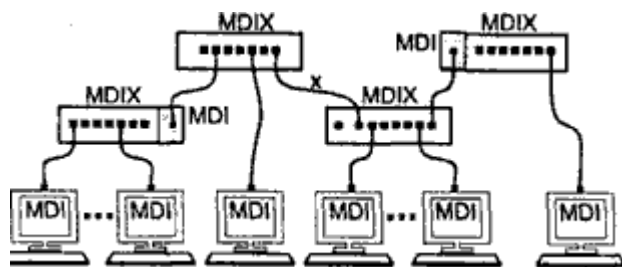


Рис.1.4 Зіркоподібна мережа на основі 10BaseT/100BaseTX інтерфейсу Ethernet

100BaseFX – мережа на оптоволоконному кабелі з використанням одномодових трансиверів (1,31 мкм) та багатомодових трансиверів з дальністю зв'язку в півдуплексному режимі до десятків кілометрів (одномодові трансивери) чи до 2 км (багатомодовий трансивер).

Усі сучасні версії Ethernet використовують кабель «вита пара» чи оптоволоконний кабель та зіркоподібну топологію з'єднання мережі (рис.1.4).

Основою локальної мережі **Ethernet** є магістральний канал, яркий може з'єднувати до 1024 об'єкти. Цей тип інтерфейсу отримав поширене розповсюдження в суднових інтегрованих системах. По інтерфейсу Ethernet передаються зображення електронних карт та цифрових радіолокаційних систем на периферійні персональні комп'ютери. Це дає змогу капітану та старшому помічнику з свої кают на екрані персонального комп'ютера контролювати прокладку курсу по електронній карті та вести радіолокаційне спостереження.

1.2. Структура інтегрованої системи судна

Морське судно є плавучим об'єктом, який призначений для виконання визначеної доцільної функції – перевезення вантажів, пасажирів, лову риби, прокладання різного роду кабелів та трубопроводів, виконання гідрографічних робіт та ін. Для виконання цієї функції судно оснащують спеціальним обладнанням. Основне суднове обладнання наступне:

- обладнання для забезпечення рухом та маневруванням;
- обладнання для визначення місцеположення судна;
- обладнання для забезпечення зовнішнього та внутрішнього зв'язку;
- обладнання для постачання енергією різних суднових споживачів;
- обладнання для підтримання на судні умов життєдіяльності екіпажу та функціонування суднових механізмів;
- обладнання для боротьби за живучість судна та попередження втрат експлуатаційних властивостей;
- інше обладнання.

Сукупність суднового обладнання, яке виконує вказані функції зветься *судновими технічними засобами*. До них відносять механізми рухо-рульового комплексу, джерела добування різних видів енергії, механізми та агрегати усіх суднових систем та пристроїв.

Комплекси, які управляють судновими технічними засобами уявляють з себе складні ергатичні (людина – машина) системи. Як і будь яка ергатична система, такі комплекси мають в себе дві частини: «людину» та штучну систему (засоби автоматики). В останній частині значну роль відіграють засоби мікропроцесорної техніки.

Інтегрована мікропроцесорна система, яка управляє судновими процесами з метою виконання задач оптимального функціонування судна зветься *інтегрованою системою судна*. Об'єктом цієї системи є сукупність всіх суднових технічних засобів.

В наступний час інтегрована система судна є багатоконтурною системою, включає до себе різні типи управляючих пристроїв та систем, які працюють на різних рівнях і виконують функції збору та обробки інформації (моніторинг) о стані різних суднових об'єктів і зовнішнього середовища, а також прийняття рішень по дії на об'єкти управління та їх виконання. З початку значну частину ергатичної системи управління судном виконувала людина (від збору даних та

їх обробки, прийняття рішень, до виконання цих рішень об'єктом управління). По мірі поетапної автоматизації суднових процесів від простіших процесів до інтегрованих систем управління на базі розвитку електроніки та мікропроцесорних систем, простіші операції складали підсистеми управління для виконання необхідних функцій, які потім інтегрувалися в системи для рішення більш складних задач. В свою чергу розроблені інтегровані системи об'єднувалися в проблемно-орієнтовані управляючі системи більш високого рівня. Таким чином роль людини в ергатичній системі управління судном постійно зменшується, а зростає доля штучної системи. З появою нейронних систем та мереж часткове прийняття рішення по управлінню об'єктом виконує автоматична система (штучний інтелект) і доля штучного інтелекту постійно зростає.

На сучасних судах електронні проблемно-орієнтовані підсистеми об'єднуються в єдину інтегровану систему судна, яку звать *судновим інтегрованим управляючим комплексом* (рис.1.5).

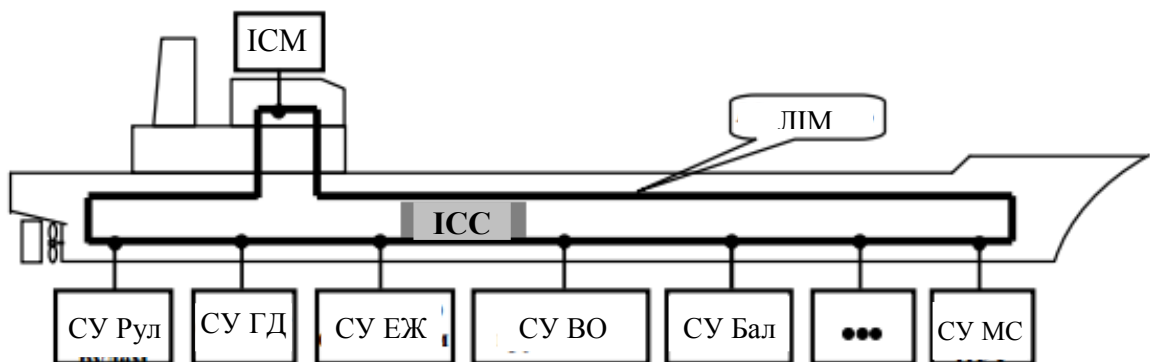


Рис.1.5 Схема типової інтегрованої системи судна

Типова інтегрована система судна включає до себе:

- адміністративну систему;
- інтегровану систему ходового мостика (Integrated Bridge System) (ICM);
- систему управління електрозабезпеченням (Power supply system) (СУ ЕЖ);
- систему дистанційного управління головним двигуном (Main engine control system) (СУ ГД);
- систему дистанційного управління рулем судна (Rudder control system) (СУ Рул);
- систему дистанційного управління підрульовуючими пристроями (Thruster control system);
- систему управління вантажними операціями (наприклад для танкерів Tank handling system) (СУ ВО);
- систему управління баластування судна (Anti heeling system) (СУ Бал);
- систему реєстратора даних рейсу (VDR - Voyage Data Recorder);
- інтегровану систему радіозв'язку (Integrated Radio Communication System);

- централізовану систему моніторингу та сигналізації (Centralized Monitoring and Alarm System) (CY MC)
- та ряд інших систем.

Об'єднання названих систем в інтегровану систему судна виконується за допомогою магістрального кільцевого інформаційного каналу. Фактично інтегрована система судна уявляє собою локальну інформаційну мережу (ЛІМ), все частіше засновану на фібро-оптичній технології. Деякі окремі системи інтегрованої системи судна можуть мати свою структуру локальної мережі. Вихід з ладу однієї з систем в мережі інтегрованої системи судна не впливає на працездатність інших систем, якщо виконання її функцій не залежить на пряму від інформації системи, яка вийшла з ладу.

Інтегрована система ходового мостика є головною в інтегрованої системі судна і виконує роль її управляючого центру.

Інтегрована система ходового мостика – це програмно-апаратний комплекс, який включає до себе декілька систем, і в якому використовується системний підхід до автоматизації процесів отримання, обробки, відображення інформації, до виконання функцій навігації, управління судном, радіозв'язку та забезпечення безпеки з метою досягнення максимальної ефективності вахти на мостіку персоналом з відповідною кваліфікацією.

Інтегрована система ходового мостика відноситься до класу інформаційно-управляючих систем. Використання інтегрованої системи ходового мостіку дозволяє:

1. Автоматизувати виконання комплексних задач судноводіння;
2. Створити єдине інформаційне середовище, як основу ефективної підтримки рішень для вахтового помічника;
3. Організувати централізований контроль роботи усіх підсистем та пристроїв судна, від яких залежить безпека судна та вантажу;
4. Забезпечити централізоване управління силовим та іншим обладнанням судна.

Основою функціонування інтегрованої системи ходового мостіка є параметри, характеристики та зміст зовнішніх та внутрішніх інформаційних взаємодій. Це визначає побудову інтегрованої системи ходового мостіка, як інформаційну мережу, у якій взаємодія між окремими частками (системами) виконується згідно спеціального протоколу.

З р а з к и інтегрованої системи ходового мостіка, які випускаються різними фірмами, мають деякі відзнаки, як по складу, функціям, які виконуються, так і по дизайну (рис. 1.6). Типова інтегрована система ходового мостіка включає до себе наступні системи:

- систему навігаційних датчиків (Navigation Sensors);
- навігаційно-інформаційну систему (Navigation and Information System);
- систему попередження зштовхування (Collision Assessment and Avoidance System);
- систему оцінювання та оптимізації морехідності (Vessel Seaworthiness Assessment and Optimization System);

- систему планування та оптимізації шляху (Voyage Planning and Route Optimization System);
- станцію управління рухом судна (Maneuvering Control Station);
- централізовану систему моніторинга та сигналізації (Centralized Monitoring and Alarm System);
- інтегровану систему радіозв'язку (Integrated Radio Communication System);
- систему реєстратора даних рейсу (VDR - Voyage Data Recorder);
- консоль управління рухом з крила мостика (Bridge Wing Console).
- систему нічного бачення (Night vision system) – тільки для високошвидкісних паромів.

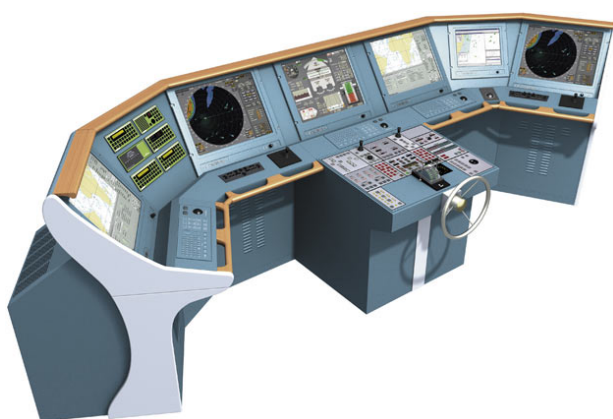


Рис.1.6 Приклади зовнішнього дизайну інтегрованої системи ходового мостика

1.3 Захист інформаційних систем судна

Оскільки інтегрована система ходового мостика є інформаційною системою, а судноводіння відноситься до процесів з підвищеною небезпекою дуже важливим є питання надійності програмного забезпечення, достовірності даних, їх цілісності, конфіденційності, захисту від навмисного чи ненавмисного перекривлення інформації та її аутентичності.

Безпека даних інформаційних систем судна має три основні складові:

- конфіденційність – захист інформації від несанкціонованого доступу;
- цілісність – захист точності та повноти інформації та програмного забезпечення;
- доступність – забезпечення отримання інформації і загальних послуг для користувача у будь який час.

Захист даних інформаційних систем судна забезпечується сукупністю стандартних дій, які включають до себе – криптографічне кодування, використання паролів, специфічних ідентифікаторів, електронних цифрових підписів, кодуванням інформації апаратними засобами та ін. Наприклад, для захисту інформації офіційних векторних мап розроблений спеціальний стандарт S63: “ІНО Data Protection Scheme”, 2002 г., який визначає перелік мір з метою:

- запобігання піратського використання електронних навігаційних карт;
- обмеження доступу тільки до тих мап, на які користувач отримав дозвіл;
- забезпечення гарантії, що дані електронних навігаційних карт прийшли від уповноваженого джерела.

Використання супутникового зв'язку VSAT на судах є слабким місцем в безпеці судна. Суднові станції, за допомогою яких судна ведуть обмін даними, включаючи підключення до Інтернету, потенційно можуть стати об'єктом хакерських атак.

З початку при відсутності супутникового зв'язку, ризики хакерських атак не ураховувалися розробниками систем моніторингу судна, оскільки хакер повинен був знаходитися на судні, а значить теж підпадав до ризику небезпеки судна. З появою супутникового зв'язку та доступу до Інтернету можливо нанести пошкодження судну знаходячись на березі. Офіційно доки що спроб злому інформаційних систем судна не зареєстровано, але така можливість не виключена. Віддалений доступ до судових систем може привести до порушення графіку руху судна, підвищеному ризику затоплення судна чи його крадіжки.

Наведемо два приклади.

1 приклад. [<https://www.securitylab.ru/analytics/492393.php>]

При навантаженні суховантажного судна були розроблені спеціалізовані системи моніторингу завантаження судна (hull stress monitoring system – HSMS) які автоматично розраховують загрузку на корпус судна і фіксують її перевищення. В цілому у системи є дві задачі: моніторинг завантаження судна в порту і моніторинг навантаження у морі. Якщо завантажити відсіки судна нерівномірно, то можливий вигин корпусу судна, який може підсилюватися при штормі (рис.1.7 а,б). При цьому на дисплеї відображається реальне навантаження судна, а при його перевищенні подається сигнал Alarm (рис.1.7 в). Для визначення навантаження на корпус судна та його деформації використовують датчики – електронні тензометри та акселерометри. Якщо підмінити данні цих датчиків, то в системі моніторингу перевищення навантаження не виявиться (крива 3), тоді як реальні навантаження (крива 2)

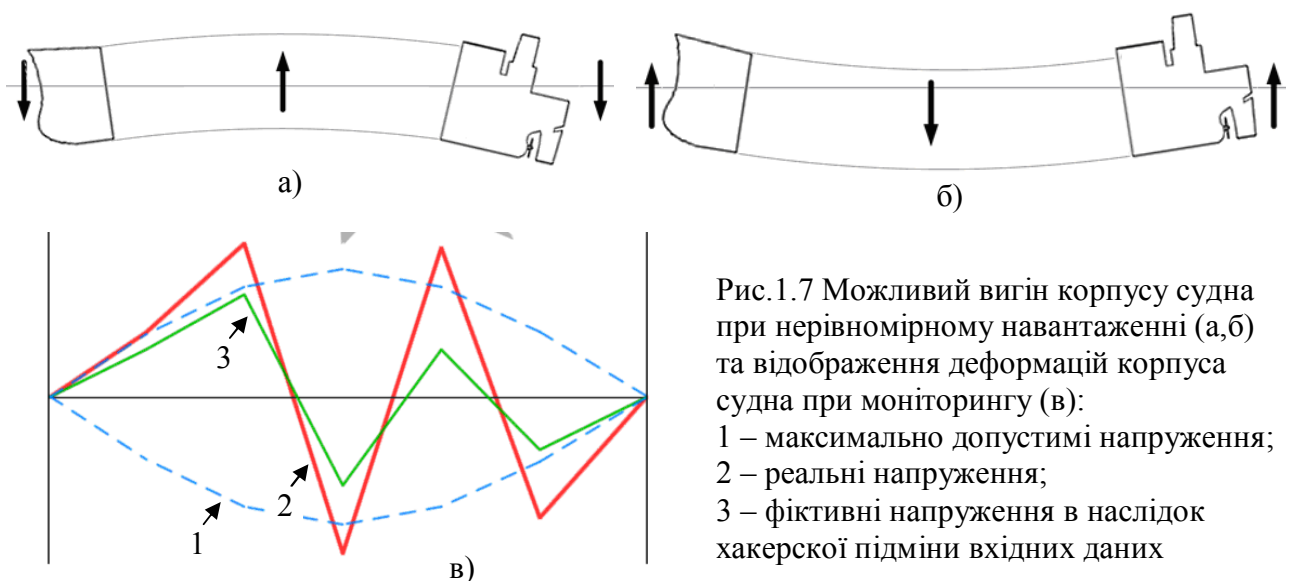


Рис.1.7 Можливий вигин корпусу судна при нерівномірному навантаженні (а,б) та відображення деформацій корпусу судна при моніторингу (в):
1 – максимально допустимі напруження;
2 – реальні напруження;
3 – фіктивні напруження в наслідок хакерської підміни вхідних даних

будуть значно вище і можуть привести до розлому корпусу судна.

2 приклад. [<https://tjournal.ru/47628-gps-hijack>]

Команда дослідників з інженерної школи Кокрелла (Остин, штат Техас) в червні 2013 року зі згоди екіпажу яхти «White Rose of Drachs», довжиною 85 м



Рис.1.8 Можливе втручання на датчики GPS навігаційної системи яхти

провела випробування самодільного пристрою за допомогою якого вони підмінили GPS сигнал від супутникової системи навігації та змінили курс яхти на 3^0 . Коли навігаційна система реагувала на відхилення від курсу, то команда яхти повертала її на попередній курс. Після декількох незамінних для навігаційної системи маневрів яхта стала рухатися паралельним старому курсу, але з відхилення в сторону на декілька сотнів метрів.

Наведені приклади доводять важливість надійного захисту суднових інформаційних систем для підвищення безпеки судноплавства.

1.4 Моніторинг судових систем

Виходячи з визначення поняття моніторингу, як систематичного спостереження за заданими параметрами якось системи з визначеною періодичністю, будь яка система моніторингу повинна мати наступні основні структурні одиниці (рис.1.9):



Рис.1.9 Структурна схема моніторингу судових систем

- об'єкт моніторингу, наприклад суднове енергетичне обладнання, дизель-генератори, гребний вал, корпус судна, судно в цілому та ін.;

- датчики основних параметрів об'єкту моніторингу, наприклад, для дизель-генератора це можуть бути – обороти, потужність, момент на валу, температура обмоток та ін. При моніторингу положення судна датчиками є – сигнали систем GPS, ГЛОНАСС, GNSS – за якими визначаються час, координати, курс та швидкість відносно курсу, гірокомпас (магнітний компас) – за яким визначається курс, відносний лаг за яким визначається швидкість відносно води, ехолот за яким визначається глибина під кілем, датчик кутової швидкості повороту та ін.;
- контролер сигналів датчиків, задача якого перетворювати аналогові вихідні сигнали датчиків у цифровий код, який узгоджений з параметрами даної локальної мережі;
- мікропроцесорну систему (контролер), задача якого виконувати необхідні обробки сигналів від датчиків для візуалізації поточної інформації о параметрах системи моніторингу, порівняння цих параметрів з максимально можливими та формування при необхідності сигналів Alarm, а також бажано формувати рекомендації по оптимізації роботи об'єкту моніторингу;
- локальну мережу, за допомогою якої ці дані будуть передані в інтегровану систему мосту, де і відображаються на дисплеях та зберігаються в базі даних для наступного аналізу (при необхідності).

З наведеної структурної схеми проведення моніторингу судових систем слідує, що для отримання повної інформації об об'єкті необхідне аналізувати достатньо багато різноманітних параметрів об'єкту, що ускладнює систему (а також здорожує її) та утруднює сприйняття інформації в цілому. З іншого боку, якщо обмежити кількість контролюємих параметрів об'єкту до мінімуму, то можливо виникнення небезпечної ситуації з об'єктом внаслідок неврахування допоміжних параметрів, які можуть вплинути на виникнення критичної ситуації на об'єкті.

Розглянемо це на прикладі моніторингу параметрів головного двигуна. Основними експлуатаційними параметрами його параметрами є:

- частота обертання валу;
- розрахункова ефективна потужність, яка виробляється двигуном;
- момент на валу;
- розхід палива за визначений період;
- час роботи двигуна (для визначення терміну поточного ремонту).

Але при визначенні тільки цих параметрів виникають складності. Наприклад, існує проблема визначення розходу палива за допомогою різного роду розходомірів, оскільки на більшості дизелів існує зворотна відсічна магістраль, що потребує встановлення двох розходомірів, робота яких проходить в середовищі значних гідравлічних пульсацій. Практично не можливо пояснити коливання розходу палива не ураховуючи зовнішні умови (погода, осадки, глибина під кілем, течія, пошкодження чи дефекти корпусу та ін.), експлуатації судна, фактор обростання корпусу та технічний стан двигуна. Фіксування тільки часу роботи двигуна не дозволяє своєчасно визначити

механічний зношення окремих деталей двигуна (поршневих кілець, підшипників), а значить своєчасно визначити необхідність його поточного ремонту.

Для усунення цього необхідне аналізувати додаткові процеси, тобто встановлювати додаткові датчики (вібраційні датчики, температурні датчики, датчики тиску, наявності в мастилі металевих осадків та ін.), що ускладнює систему моніторингу, та аналіз її результатів, а також здорожує систему. Для аналізу даних також потребується єдиний критерій оцінки ефективності роботи головного двигуна. Одним з таких критеріїв може бути питомий ефективний розхід палива (розхід палива на одиницю потужності двигуна за одиницю часу його роботи).

Іншим прикладом, є моніторинг стану механічних напружень в корпусі судна. Для підвищення безпеки та ефективності роботи транспортних судів необхідна об'єктивна інформація про механічні навантаження на корпус судна в будь-яких експлуатаційних режимах. На підставі цієї інформації з'являється можливість управляти судном в штормових умовах, не допускаючи перевантаження корпусу, в той же час, працюючи на гранично безпечному рівні.

Дані про навантаження на корпус необхідні також для автоматизації вантажних операцій на судах, оскільки рівномірність розподілу вантажу (особливо балкарів) сприяє підвищенню безпеки мореплавання.

В наступний час в інтегровану систему судна входить моніторинг навантажень на корпус судна (Hull stress monitoring) мета якого в реальному часі забезпечувати інформацією о навантаженнях в корпусі в процесу рейсу та в процесі виконання вантажно-розвантажувальних робіт. По результатам моніторингу виробляються застереження (аларми) о приближенні контрольованих параметрів до критичних значень.

В даний час на деяких судах (в першу чергу на балкарах) вже встановлені системи контролю напруженого стану корпусу.

Аналіз систем показує, що існують три основних напрямки в створенні систем визначення напруженого стану корпусу судна: обчислення навантаження на корпус, вимір навантаження, одночасне обчислення і вимірювання навантажень.

Системи, які побудовані на обчисленні навантаження, застосовуються, головним чином, на танкерах і балкарах, і призначені для визначення напруженості корпусу під час вантажних операцій. Це пов'язано з тим, що для них простіше, ніж для інших типів суден, визначити загальну картину навантаження судна в даний момент часу. Системи моніторингу навантажень на корпусі судно ІМО рекомендує для встановлення на балкарах з дедвейтом 20 тис. тон та більше.

Згідно документам ІМО система моніторингу деформацій корпусу судна повинна мати наступну конфігурацію:

- Датчики навантажень на корпусі судна (палубі);

- Акселерометри для визначення прискорень в носу та центральній частині судна для вимірювання вертикальних прискорень в носу судна та бортової качки;
- Мікропроцесорний блок для обробки отриманої інформації від датчиків та передачі результатів в інтегровану систему судна по магістральному інформаційному каналу;
- Пристрій зберігання отриманих даних.

За допомогою інтегрованої система судна отримана інформація по системі моніторингу навантажень на корпус судна, згідно з міжнародним стандартом IEC 61996-1:2007, повинна зберігатися у повних реєстраторах даних рейсу (VDR). Сигнали від відповідних датчиків, контролюючих напругу корпусу судна повинні записуватися з проміжком не менше 1 секунди і з відмітками часу.

На рисунку 1.10 наведений приклад розташування датчиків для системи моніторингу навантажень на корпус судна. Як датчики механічних напружень використовують тензорезистори та магніто-пружні датчики.

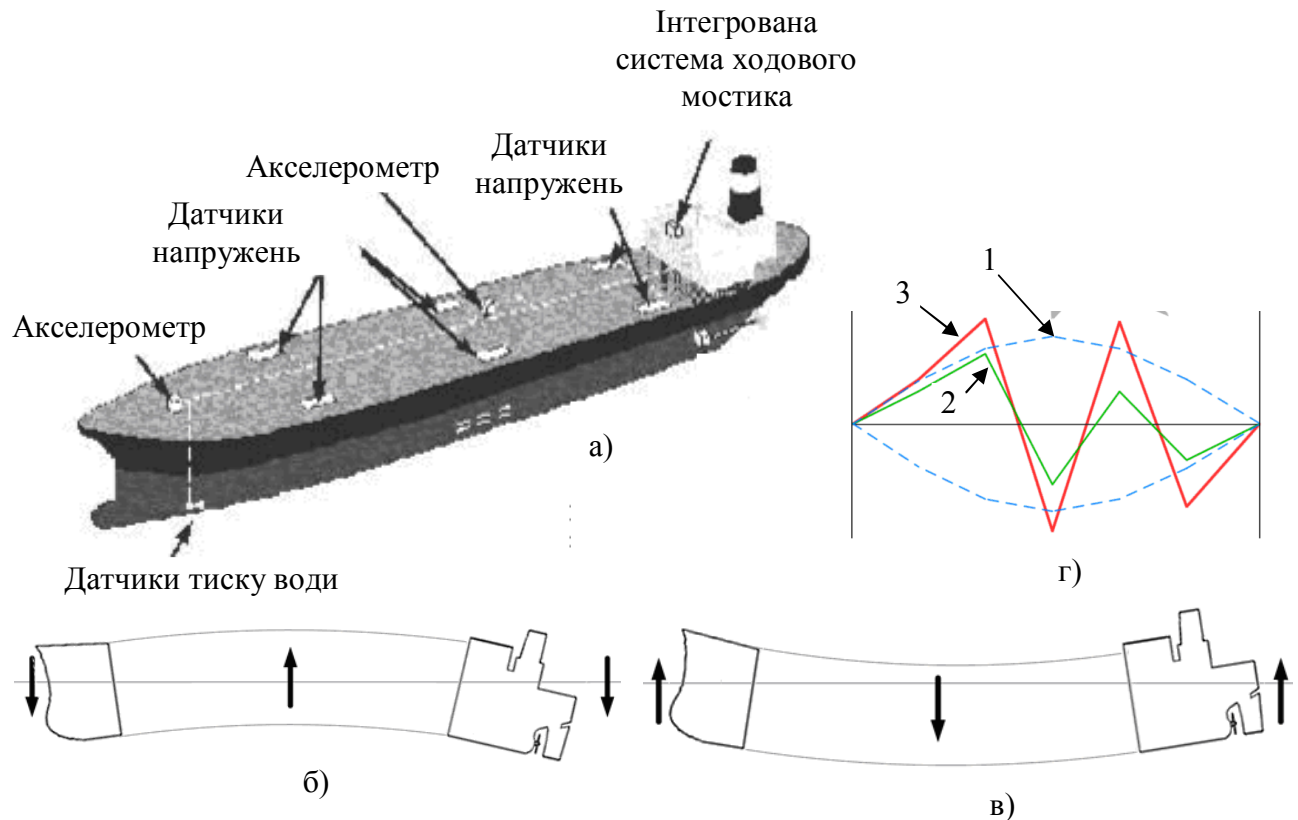


Рисунок 1.10 – Система моніторингу напружень в корпусі судна фірми “Scimar” (а), можливий вигін корпусу судна при нерівномірному навантаженні (б,в) та відображення деформацій корпусу судна на дисплеї при моніторингу (г):

- 1 – максимально допустимі напруження;
- 2 – реальні можливі напруження при нерівномірному навантаженні;
- 3 – фатальні напруження в корпусі судна, які є небезпечними

1.5 Основні типи датчиків в системах суднового моніторингу

Розглянемо основні типи датчиків, які використовуються в судновому обладнанні для моніторингу основних параметрів двигунів.

1.5.1 Датчиків частоти обертання

Датчики частоти обертання колінчастого валу, також звані датчиками оборотів, застосовують для:

виміру частоти обертання колінчастого валу;
визначення положення колінчастого валу (чи положення поршня циліндра двигуна).

Частота обертання розраховується за часом періоду сигналів датчика. Сигнал датчика частоти обертання – одна з найважливіших величин для системи електронного управління роботою дизеля.

Індуктивний датчик частоти обертання колінчастого валу

Принцип дії такого датчика наступний (рис.1.11). Датчик змонтований безпосередньо навпроти закріпленого на колінчастому валу феромагнітного імпульсного колеса 7 і відокремлений від нього повітряним проміжком 6. Датчик містить сердечник 4 (полюсний наконечник), зроблений з магнітом'якого матеріалу, та який оточений котушкою індуктивності 5. Поліусний наконечник сполучений з постійним магнітом 1. Магнітне поле проходить через полюсний наконечник всередину імпульсного колеса. Інтенсивність магнітного потоку, що проходить через котушку, залежить від

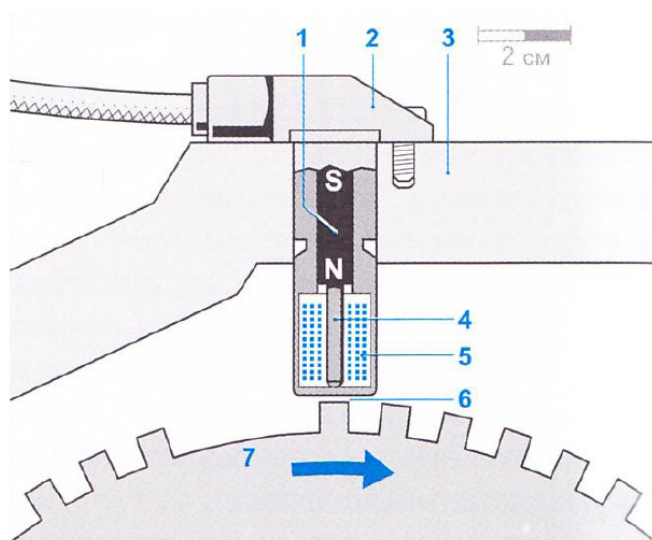


Рис.1.11. Індуктивний датчик частоті обертання колінчастого валу:

- 1- постійний магніт; 2 – корпус датчика;
- 3 – картер двигуна; 4 – полюсний наконечник;
- 5 котушка індуктивності; 6 – повітряний зазор;
- 7 – імпульсне колесо з опорною міткою

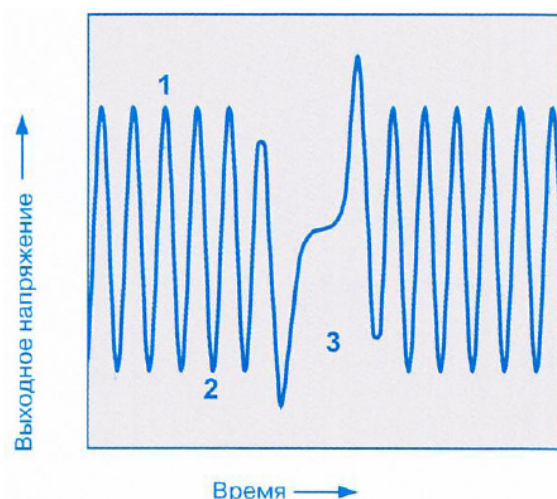


Рис.1.12. Вигляд вихідного сигналу

- індуктивного датчика частоти обертання колінчастого валу:
- 1- зуб; 2 – зазор між зубцями;
 - 3 – опорна мітка

того, що знаходиться навпроти датчика: зуб або проміжок між зубами імпульсного колеса. Зуб викликає посилення, а проміжок, навпаки, послаблення інтенсивності магнітного потоку. Ці зміни індукують в котушці е.р.с., яка виражається в синусоїдальній вихідній напрузі (рис 1.12), та яка в свою чергу пропорційна частоті обертання колінчастого валу. Амплітуда змінної напруги сильно росте із збільшенням частоти обертання (від декількох мВ до 100 В). Достатня для реєстрації датчиком амплітуда виникає, починаючи з частоти, яка дорівнює 30 об/хв..

Кількість зубів імпульсного колеса залежить від мети застосування. У системах управління роботою дизеля з електромагнітними клапанами використовуються імпульсні колеса, що мають 60 ділень, причому число зубів складає 58. Великий проміжок на місці відсутніх зубів є опорною міткою, яка відповідає певному положенню колінчастого валу і служить для синхронізації блоку управління.

Датчик частоти обертання/кута повороту валу дизеля на основі магніторезисторів

Датчик частоти обертання або інкрементний датчик кута повороту встановлюється на розподільних дизелях з електромагнітними клапанами. Його сигнали служать для:

- виміру дійсної частоти обертання валу-розподільного дизеля;
- визначення миттєвого кутового положення розподільного валу двигуна;
- визначення миттєвого положення механізму випередження уприскування.

Дійсна частота обертання валу-розподільника - одна з вхідних величин для блоку управління розподільним дизелем. Вона визначає в той же час тривалість сигналу, що управляє, для електромагнітних клапанів високого тиску і випередження уприскування.

Тривалість сигналу, що управляє, для електромагнітного клапана високого тиску необхідно перетворити у величину циклової подачі. Миттєве кутове положення встановлює момент управління для електромагнітного клапана високого тиску. Точне управління забезпечує оптимальний момент початку уприскування і правильну подачу палива.

Необхідне для регулювання кута випередження уприскування положення визначається порівнянням сигналів датчика частоти обертання колінчастого валу/кута повороту.

Принцип дії датчика наступний (рис.1.13). Датчик частоти обертання/кута повороту фіксує положення імпульсної шайби з 120 зубами, яка монтується на приводному валу розподільного дизеля. Між зубами є рівномірно розподілені проміжки (опорні мітки), кількість яких відповідає числу циліндрів двигуна. В якості датчика застосовують подвійний диференціальний магніторезистивний датчик.

Магнітні резистори є магнітоуправляємими напівпровідниковими резисторами, виконаними як датчик Холу. Чотири резистори подвійного диференціального датчика сполучено в єдиний вимірювальний міст.

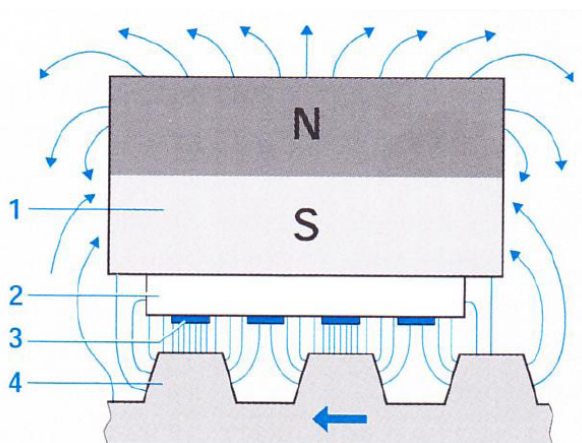


Рис.1.13. Принцип дії датчика частоти обертання валу/куту обертання на основі магніторезисторів:

- 1- постійний магніт; 2 – феромагнітні пластини; 3 – магніторезистори;
4 – зубчата імпульсна шайба

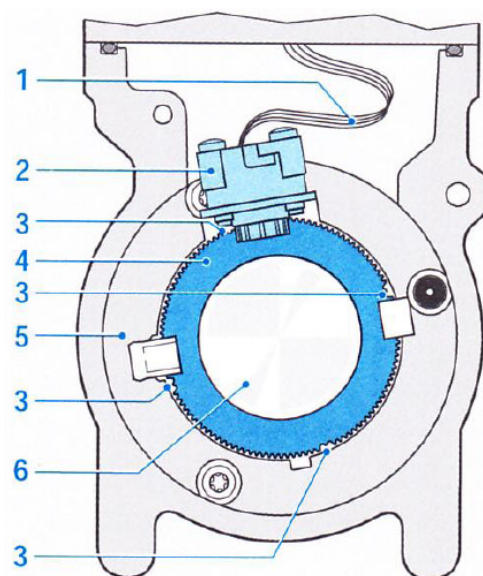


Рис.1.14. Розміщення датчика частоти обертання валу/куту обертання на основі магніторезисторів:

- 1- шлейф датчика; 2 – датчик;
3 – опорна мітка; 4 – зубчата імпульсна шайба; 5 – з'ємне опорне кільце; 6 – вал приводу

Датчик має постійний магніт 1, який за допомогою тонких феромагнітних пластинок 2 усереднює робочу поверхню зубчастої імпульсної шайби 4. Чотири магніторезистора 3 датчика розташовано на відстані половини кроку зубів. В той же час два магніторезистора поперемінно знаходяться навпроти проміжку між зубами, а два інших - навпроти зубів. Магніторезистори витримують температуру до 170 °З (короткочасно до 200 °С).

Вихідний сигнал датчика уявляє імпульси, підрахунок яких за визначений час дозволяє визначити частоту обертання валу, а їх підрахунок від опорної метки – кут обертання валу. Приклад розміщення такого датчика наведений на рис. 1.14.

1.5.2 Датчики для виміру зусиль і обертового моменту

У суднових умовах часто виникає завдання визначення зусиль, обертового моменту на валу і потужності. Для цієї мети використовуються прилади, які звать **торсиометрами**. В якості вимірників моменту в них застосовують фотоелектричні, індуктивні і тензометричні датчики.

До датчиків виміру обертового моменту пред'являють наступні вимоги:

- 1) область виміру повинне відповідати робочому діапазону значень обертового моменту;
- 2) зміна частоти обертання не повинна впливати на виміри;
- 3) має бути виключений вплив додаткової напруги стискування, вигину і відцентрових сил.

Такі датчики виготовляють на декільках фізичних принципах.: фотоелектричні, на незорезисторах та індуктивні. Розглянемо принцип дії таких датчиків.

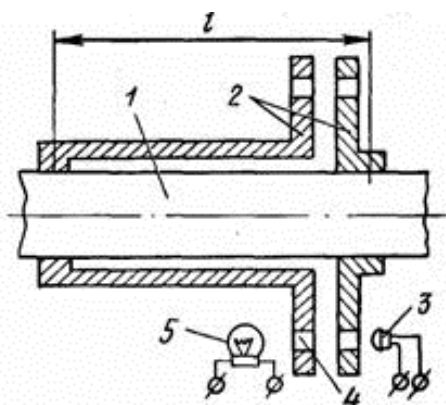


Рис.1.15 Схема фотоелектричного датчика виміру зусиль та обертового моменту

Принцип дії фотоелектричних датчиків заснований на вимірі інтенсивності світлового потоку, що йде від джерела 5 (рис.1.15) до фотоелемента 3. Інтенсивність пучка світла, що потрапляє на приймач 3, залежить від кута скручування валу і моменту, що крутить. Відбувається це таким чином: на валу 1 на відстані l насаджено два диски 2, отвори 4 в яких співпадають, якщо вал не випробовує скручування. Інакше співісність отворів порушується, і потік світла, що йде від лампи 5 до фотоелемента 3, зменшується. Внаслідок чого змінюється сила струму на виході фотоелемента. Вихідний сигнал з

елемента 3 поступає в підсилювач. З підсилювача вихідний сигнал напруги пропорционален обертовому моменту.

Робота тензодатчика для вимірювання механічних зусиль та орбітального моменту на основі тензорезисторів заснована на властивості металевого дроту або фольги при розтягуванні або стискуванні змінювати свій електричний опір, тензодатчик наклеюється на вал машини і сприймає її деформацію. Окремий тензодатчик вимірює розтягування тільки в одному напрямі.

Для виміру чотири тензодатчики включаються за схемою моста так, щоб було складання електричних опорів. Тоді при відсутності кручення валу на виході датчика буде нульова напруга. Мостова схема дає змогу не враховувати вплив зовнішніх факторів (температури, напруги на мосту), якщо параметри тензорезисторів однакові.

Для збільшення чутливості тензорезисторів вибирають матеріали з високим коефіцієнтом тензочутливості, великим питомим опором і малим поперечним перерізом. Найчастіше в тензорезисторах застосовують константан. Він має незначний температурний коефіцієнт опору, що зменшує похибку, викликану коливаннями температури. У тензорезисторах, виготовлених з константану, в широкому діапазоні зберігається лінійна залежність між відносною деформацією і зміною опору. Для роботи при підвищених температурах рекомендується виготовляти тензорезистори з ніхромом.

Тензорезистори можуть бути виконані з дроту і фольги. Конструктивно дротяний тензорезистор (рис.1.16) є ґратами з дроту діаметром 0,01-0,05 мм, укладену зигзагоподібно на довжині S2 і ширині S1 між двома електроізоляційними підкладками. До кінців дроту приєднані вивідні кінці. Електроізоляційні підкладки виконують з цигаркового паперу, лакової плівки або цементу, що скріплюються між собою клеєм, лаком або цементом.

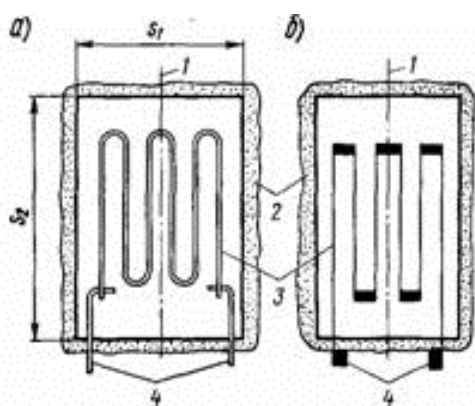


Рис.1.16 Схема тензодатчика для виміру механічних зусиль та обертального моменту

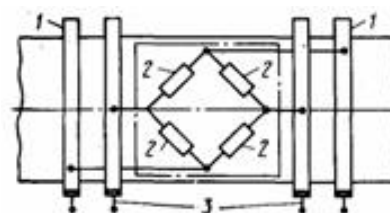


Рис.1.17 Схема встановлення тензорезисторів на валу двигуна для виміру механічних зусиль та обертального моменту

Зигзагоподібну частину тензорезистора називають ґратами. Дротяні тензорезистори виконують опором 10-100 Ом. Вони мають розміри 2-100 мм.

Тензодатчики з'єднуються в схему моста, точки живлення і діагоналі якого виведені через колекторні кільця 1 з щітками (рис.1.17). Розташування тензодатчиків 2 під кутом 45° до осі валу практично компенсує спотворюючий вплив вигину, стискування і температури. Напруга в діагоналі моста 3 пропорційна обертальному моменту. Якщо одночасно вимірювати частоту обертання і ввести результати обох вимірів в схему помножувача, то можна набути значень потужності на валу.

У **індуктивних датчиках** зміна опору котушок залежно від кута скручування є вихідним сигналом приладу. На рис.1.18 показана схема такого пристрою. Разом з валом 1 обертаються закріплені на ньому магнітопроводи 2,5,6. Індуктивні котушки 4 укладені в нерухомому сердечнику 3. Якщо вал не випробовує скручування, то індуктивності L_1 і L_2 котушок, що живляться змінним струмом, однакові. При передачі валом 1 моменту, що крутить, проміжки між магнітопроводами 6 і 2 з одного боку і магнітопроводами 6 і 5 - з іншою стають неоднаковими, внаслідок чого з'являється різниця індуктивностей $L_1 - L_2$, що і є вихідним сигналом напруги.

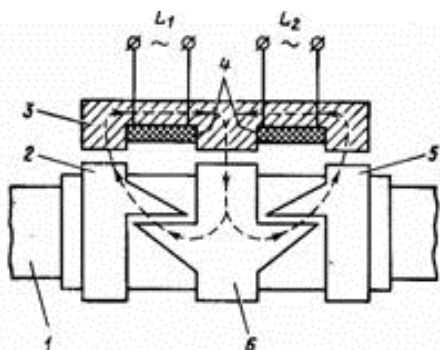


Рис.1.18 Схема індуктивного датчика для виміру механічних зусиль та обертального моменту

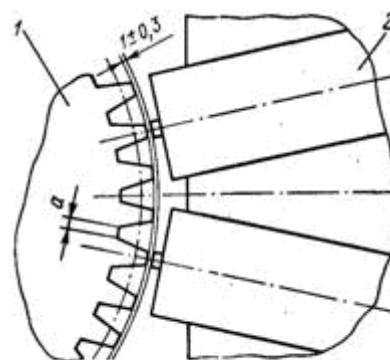


Рис.1.19 Схема встановлення безконтактного індуктивного датчика для виміру механічних зусиль та обертального моменту

Вимір обертального моменту при безконтактному знятті сигналів з валу застосовується в індуктивних датчиках наступної конструкції. (рис. 1.19). Дві шестерні з феромагнітного матеріалу закріплюють на валу на відстані l один від одного. У статорах знаходяться постійні магніти з обмотками, полюсні наконечники яких мають форму зубців. Послідовно сполучаючи обмотки декількох датчиків, встановлених по периметру шестерень (рис. 30), отримують підсумовування напруги, яка індукцірується при обертанні шестерень. Потім сумарна напруга перетворюється в імпульси прямокутної форми. Ці імпульси від обох шестерень подаються в схему віднімання. В результаті виходять прямокутні імпульси, ширина яких пропорційна фазовому куту, тобто моменту, що крутить. У схемі множення виробляється напруга, пропорційна потужності.

Перевага пристроїв з великою довжиною вимірювальної ділянки полягає в тому, що вплив модуля пружності враховується на великій ділянці.

Вихідний сигнал датчиків буває:

1. У вигляді постійної напруги, яка пропорційна кількості обертань у часі, або обертальному моменту. Звичайно діапазон напруги встановлюється 0...10 В чи 0...5 В. Недоліком є вплив перешкод, які викривлюють вихідні данні.
2. У вигляді струмової петлі, коли вихідний струм пропорційний кількості обертань у часі, або обертальному моменту. Звичайно використовують діапазон 4...20 мВ, 0...5 мА, 0...24 мА. Така система більш захищена від перешкод.
3. У вигляді частотного сигналу, коли частота вихідного сигналу пропорційна кількості обертань у часі, або обертальному моменту.

1.5.3 Датчики для вимірювання деформацій корпусу судна

Традиційними датчиками механічних напружень є пристрої, що засновані на властивості провідників і напівпровідників змінювати свій опір при деформаціях стиску і розтягування. Ці прилади називаються тензорезисторами (від лат. Tensus - напружений плюс резистор).

Як відомо, опір провідника R пропорційно його довжині L і обернено пропорційно площі поперечного перерізу S . Таким чином, якщо провідник під дією сил розтягується, його довжина стає більше, а площа поперечного перерізу зменшується. Це призводить до зростання його опору. Коли провідник стискається, картина зворотна. Довжина провідника зменшується, а його діаметр стає більше. Опір провідника знижується.

Тензорезистивні перетворювачі застосовуються для вимірювання механічних деформацій деталей і конструкцій. Як правило, вони приклеюються до цих деталей і відчують деформують зусилля, такі ж, як і самі деталі. Крім того, тензорезисторні перетворювачі застосовуються для вимірювання механічних величин, таких, як сила, тиск, прискорення, при яких деформація є проміжною величиною перетворення.

В даний час для вимірювання лінійних деформацій застосовуються дротові, фольгові і інші тензорезистори. Вони вимірюють статичні і динамічні деформації з частотами зміни до десятків кілогерц.

Недоліком тензорезисторних перетворювачів є великий розкид параметрів і характеристик, залежність характеристик від зовнішніх впливів (температура, тиск). Для забезпечення високої точності тензорезисторних вимірювань потрібні спеціальні заходи: екранування, стабілізація режимів, коригування та компенсація похибок.

Зниження рівня похибок в датчиках напруження виконується конструктивно або аналітично. При збільшенні довжини L провідника чутливість тензодатчика поліпшується. Тому він виготовляється у вигляді гребінки (рисунок 1.20 а). Гребінчаста структура тензорезистора (металевого дроту або фольги) максимізує його довжину, схильну до натягу в поздовжньому напрямку. Гребінка встановлюється на спеціальній основі та захищається кожухом. Основа прикріплюється до конструкції (палубі,

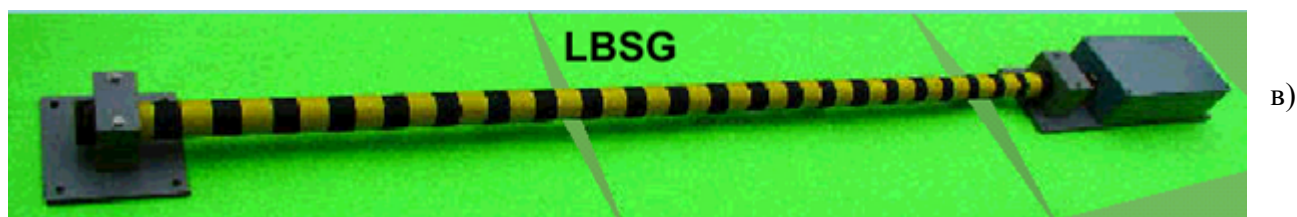
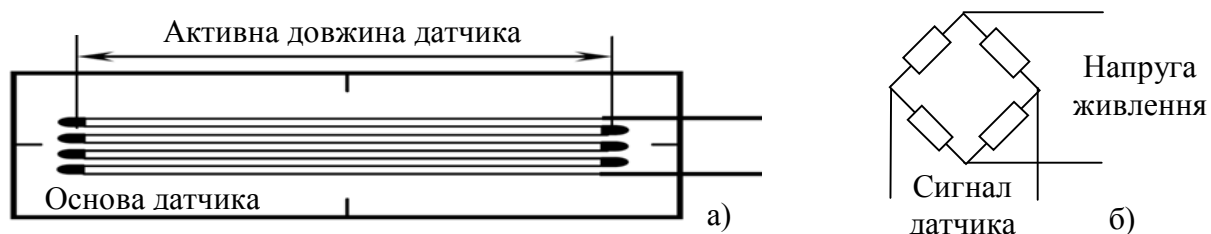


Рисунок 1.20 – Дротові тензорезистора для вимірювання напружень в корпусі судна:

- а – гребінчаста структура дротового тензорезистора; б – мостова схема включення тензорезистора; в – тензорезистор типу LBSG з довжиною 2 м;
- г – тензорезистор типу SBSG з довжиною 15 см; д – приклад встановлення тензорезистора типу LBSG на палубі судна (ліворуч захисний кожух датчика)

стрингеру і ін.), напруга якої вимірюється.

Для типових датчиків механічних напружень, опір дорівнює 120, 350, 400 або 1000 Ом. Такі тензодатчики мають роздільну здатність близько 1..2-мікрострейна. На практиці напруги металевих конструкцій рідко перевищують кілька мілістрейнів. Тому потрібно вимірювати дуже малі зміни опору (0,1...0,4 Ом), ось чому тензорезистори включаються у мостові схеми (рисунок 1.20 б).

На судах для вимірювання деформацій палуби, при загальному поздовжньому вигині застосовуються тензорезистивні датчики напружень з довгою (LBSG - long base strain gauge) (рисунок 1.20 в) і короткою (SBSG - short base strain gauge) (рисунок 1.20 г) основою. Довжина LBSG може бути від 150 до 240 см, а SBSG - від 8 до 15 см.

1.6 Приклади систем моніторингу енергетичного обладнання судна

1.6.1 Система моніторингу енергетичного обладнання судна fleetECO

Дана система моніторингу (рис.1.21) базується на технології визначення пропульсивних характеристик суден засобами обчислювальної гідродинаміки з високою точністю та сучасних технологій збору, передавання та обробки інформації [<http://www.fleeteco.com>]. Ця технологія робить систему повністю автономною та незалежною від фактора «людини».

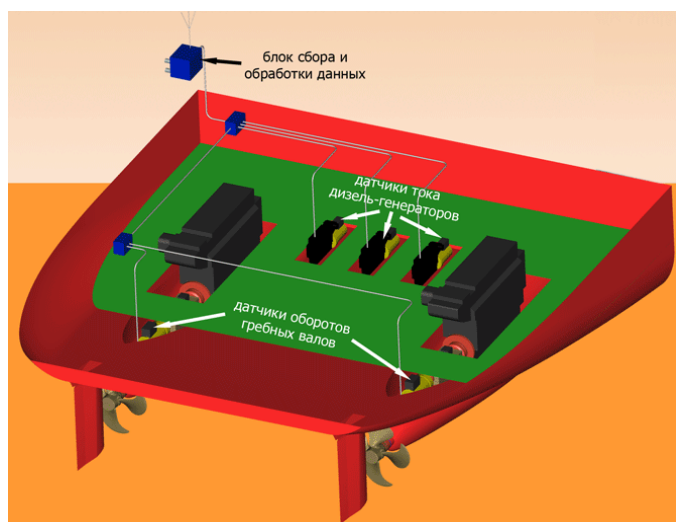


Рис.1.21 Структурна схема моніторингу енергетичного обладнання судна

Система fleetECO дозволяє:

- проводити постійний моніторинг характеристик пропульсивного комплексу судна;
- з високою точністю визначати розхід палива відповідно з режимом руху судна, станом погоди, станом корпусу, а не фіксувати фактичних розхід палива, пояснити природні коливання якого в широких діапазонах практично неможливо, як позначалося раніш, а визначати яким він повинен бути;

- проводити аналіз споживання палива при різних режимах руху судна по рейсам та між бункеруваннями;
- на основі статистики споживання палива проводити оптимізацію розходу палива;
- проводити моніторинг розходу мастильних матеріалів на основі фактичної наробітки механізмів за оборотами та потужності;

Ядро системи моніторингу fleetECO складається з наступних основних блоків:

- реєстратори даних роботи двигунів (основна інформація – кількість оборотів кожного головного двигуна, додаткові – температура двигуна та потужність на валу);
- реєстратори даних навантаження суднової електромережі;
- дані по швидкості судна, які залучені з GPS та лагу;
- дані о погоді – дані датчиків, які дозволяють оцінювати погодні умови переходу судна (темпера тура, сила та напрямлення вітку, хвилювання водного середовища);
- пристрій збору, первинної обробки та передавання даних.

Доступ до системи організований за допомогою WEB-інтерфейсу, що дозволяє цілодобово отримувати наступну інформацію з будь який точці світу:

- місцеположення судна;
- швидкість руху та погодні умови;
- режими роботи головних та допоміжних механізмів;
- статистику розходу палива за будь який проміжок часу.

Система fleetECO може бути розширена, якщо підключити додаткові підсистеми, що дозволяє визначати технічний стан:

- стану корпусу судна (необхідне встановлення тензодатчиків);
- стану гвинтів судна (необхідне встановлення тензодатчиків);
- режимі та стан основних агрегатів головного двигуна (турбін, форсунок, кілець та ін.) при встановленні відповідних датчиків.

1.6.1.1 Описання WEB-інтерфейсу система моніторингу енергетичного обладнання судна fleetECO

До інтерфейс системи входять наступні розділи:

1. Розділ «Position» – електрону мапу з положенням вибраного судна (рис.1.22). Масштаб мапи можливо змінювати. Маршрут судно

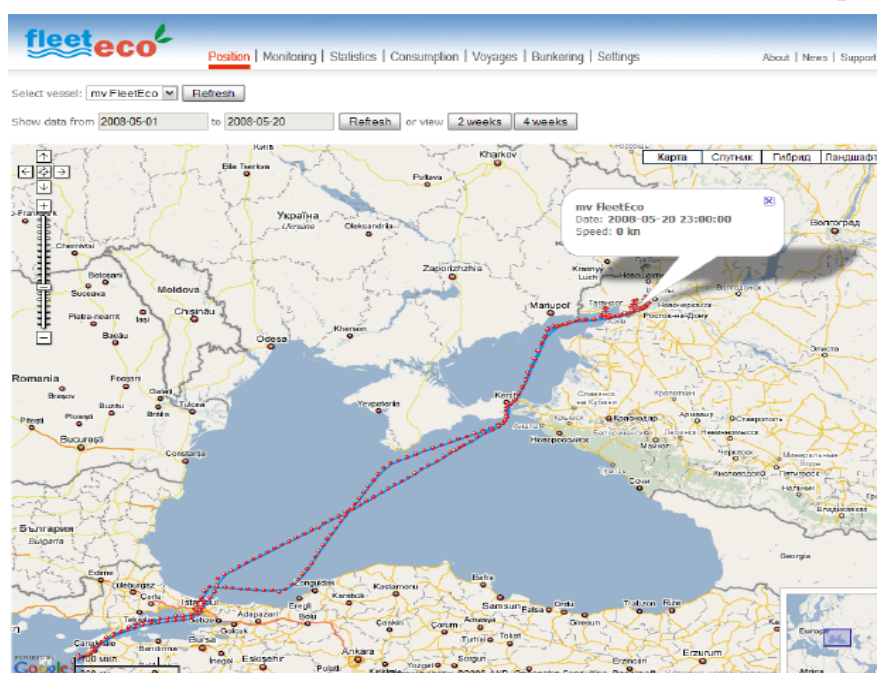


Рис.1.22 Розділ «Position» - моніторинг положення судна

показується синій лінією, на якій розташовані точки, які відповідають положенню судна кожний час. Міста стоянок помічаються якорем. Необхідний діапазон часу руху судна можливо вибирати, але не більш 60 діб.

2. Розділ «**Monitoring**» - графіки моніторингу швидкості руху судна та



Рис.1.23 Розділ «**Monitoring**» - графіки моніторингу руху судна та параметрів головних двигунів:

параметрів головних двигунів.(рис.1.23)

Цей розділ має сторінку з трьома графіками. Вертикальні лінії на цих графіках відповідають нулю годин кожного діапазону дат. Горизонтальні лінії відповідають дням місяця. Період часу моніторингу можливо задавати, але не більш 60 діб.

На першому графіку наведені швидкість руху судна за лагом (червона лінія) та по GPS (зелена лінія), а також стан погоди (темно-сіра лінія).

На другому графіку наведені обороти головних двигунів: першого зеленим кольором, другого – жовтим.

На третьому графіку наведена потужність (у відсотках від максимальній) дизель-генераторів судна: першого зеленим кольором, другого – жовтим, третього – червоним.

3. Розділ «Statistics» – таблиці розходу палива .(рис.1.24).

Цей розділ має сторінку з таблицями розходу палива та додаткову

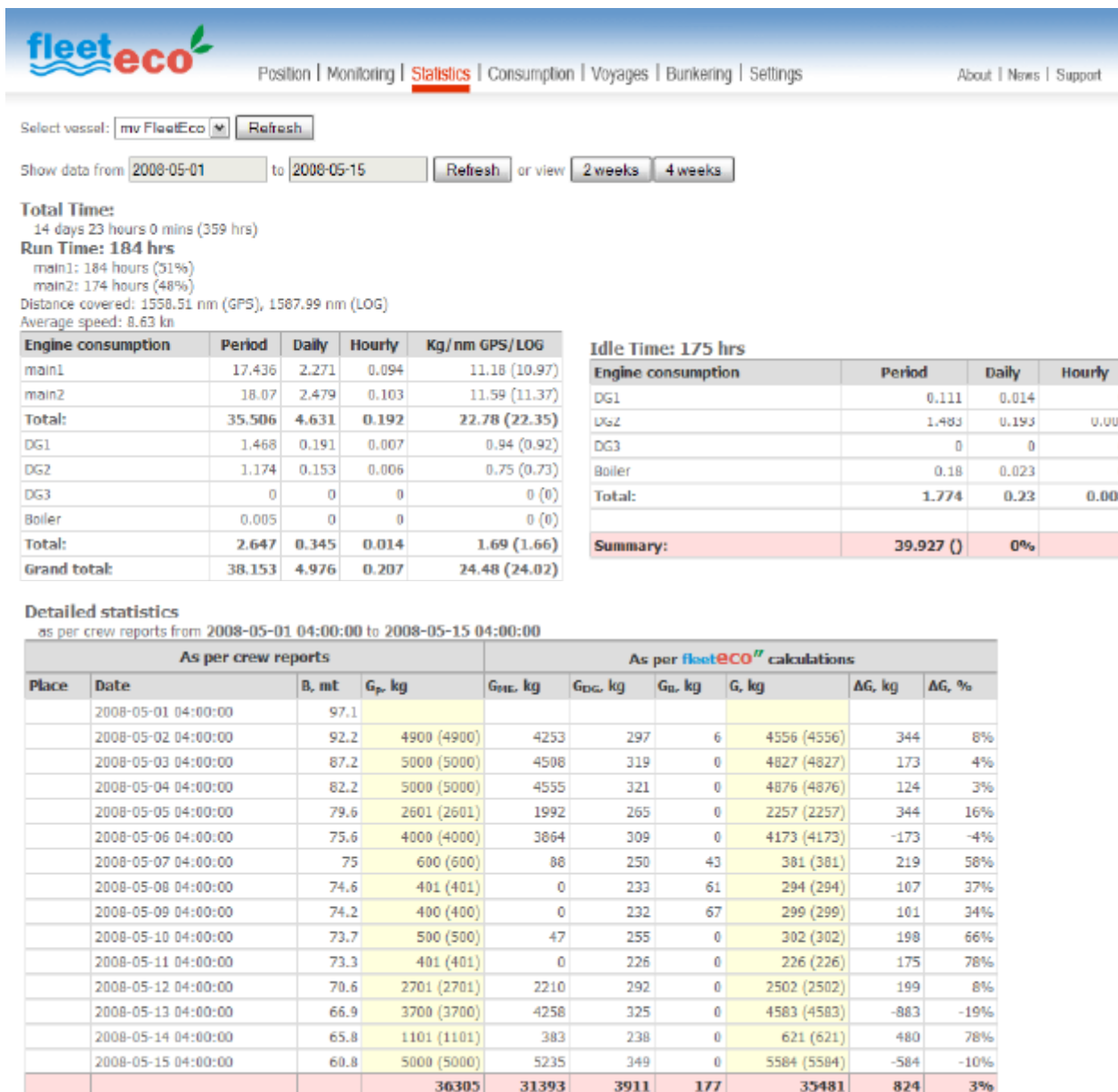


Рис.1.24 Розділ «Statistics» – таблиці розходу палива:

інформацію про рух судна за визначений період часу, пройденою дистанцією (у милях) за GPS і по лагу, середньої швидкості, загальним часом роботи головних двигунів та часом простою головних двигунів.

Перша таблиця показує розхід палива за ходовий час головними двигунами (загальний розхід за визначений період, середньодобовий розхід та почасовий розхід) та дизель-генераторами. Остання колонка показує розхід палива в кг на одну милю пройденого шляху (по GPS і по лагу).

Друга таблиця показує розхід палива за час стоянки дизель-генераторами (середньодобовий розхід та почасовий розхід). Остання строчка червоного кольору показує сумарний розхід палива судном за визначений час.

Третя таблиця показує різницю в розході палива між даними, які отримані від екіпажу та даними, розрахованими системою. Позначення в цій таблиці наступні:

Place – місце заміру чи бункеровки; **Date** – дата та час заміру; **B, mt** – залишок палива на борту за інформацією екіпажу; **Gp, kg** – розрахований розхід палива за період між замірами залишків; **Gdg, kg** – розрахований розхід палива допоміжними двигунами за період між замірами залишків; **Gb, kg** –

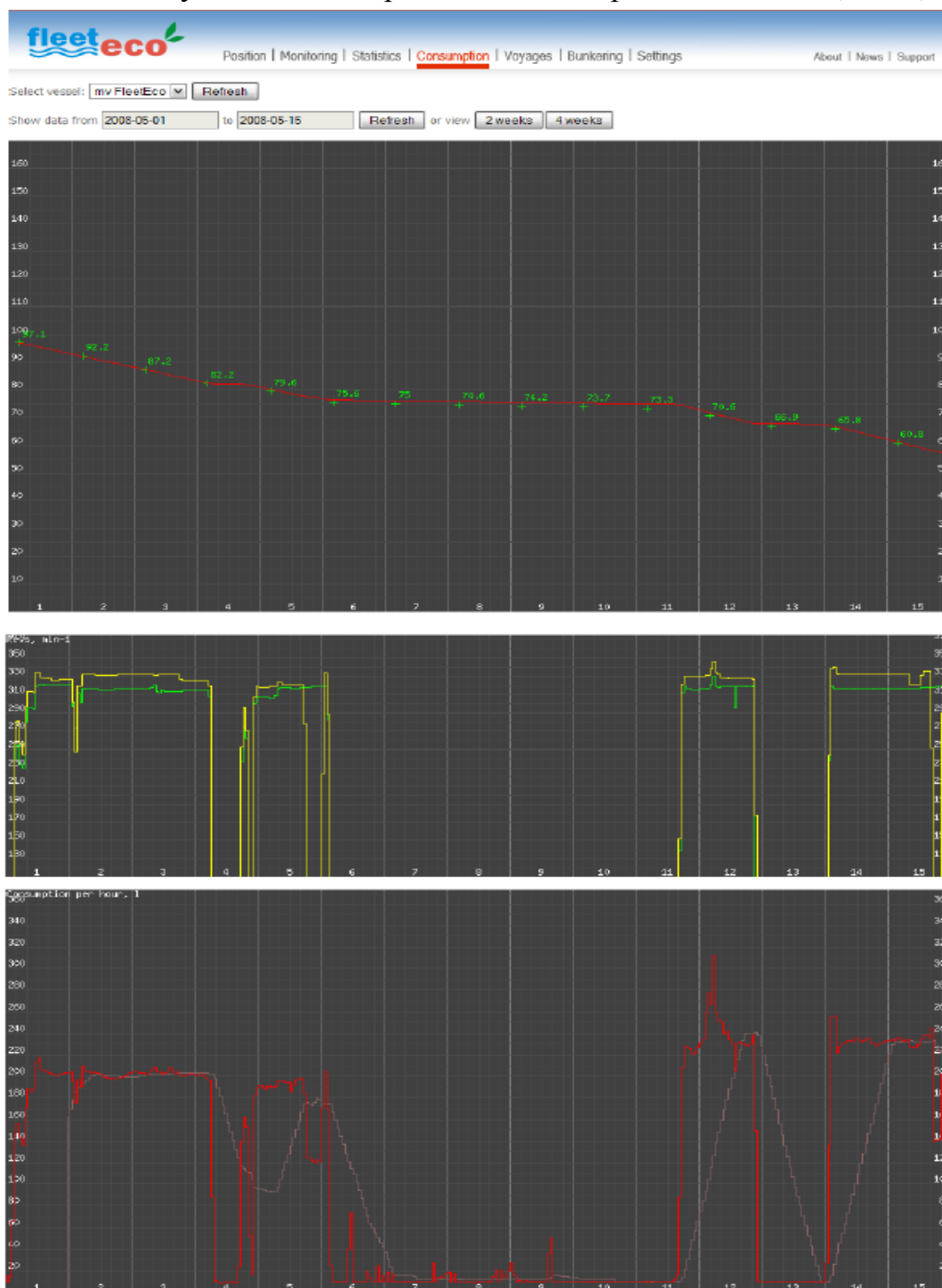


Рис.1.25 Розділ «Consumption» – графіки залишку палива та почасового розходу палива.

розрахований розхід палива бойлером за період між замірами залишків; **G, kg** - сума усіх розрахованих розходів; **$\Delta G, kg$** - різниця між G_p (даними екіпажу) та G (розрахованими значеннями) в кг; **$\Delta G, \%$** - різниця між G_p (даними екіпажу) та G (розрахованими значеннями) в %. Необхідний діапазон часу моніторингу розходу палива судном можливо вибирати.

4. Розділ «Consumption» – графіки залишку палива та почасового розходу палива (рис.1.25).

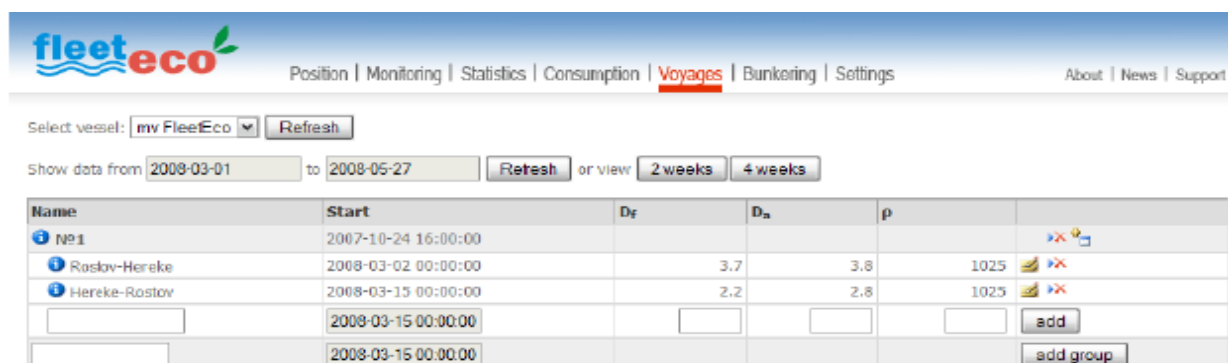
На першому графіку наведена інформація о замірах залишків палива, зроблених екіпажем (зелені точки та цифри), а також графік залишку палива, який розрахований системою (червона лінія). Бункеровка позначається жовтими квадратами.

На другому графіку наведені обороти головних двигунів: першого зеленим кольором, другого – жовтим.

На третьому графіку наведений часовий розхід палива (червона лінія) та усереднений часовий розхід палива (рожева лінія)

Період часу моніторингу можливо задавати, але не більш 60 діб.

5. Розділ «Voyages» – інформація о рейсах судна (рис.1.26).

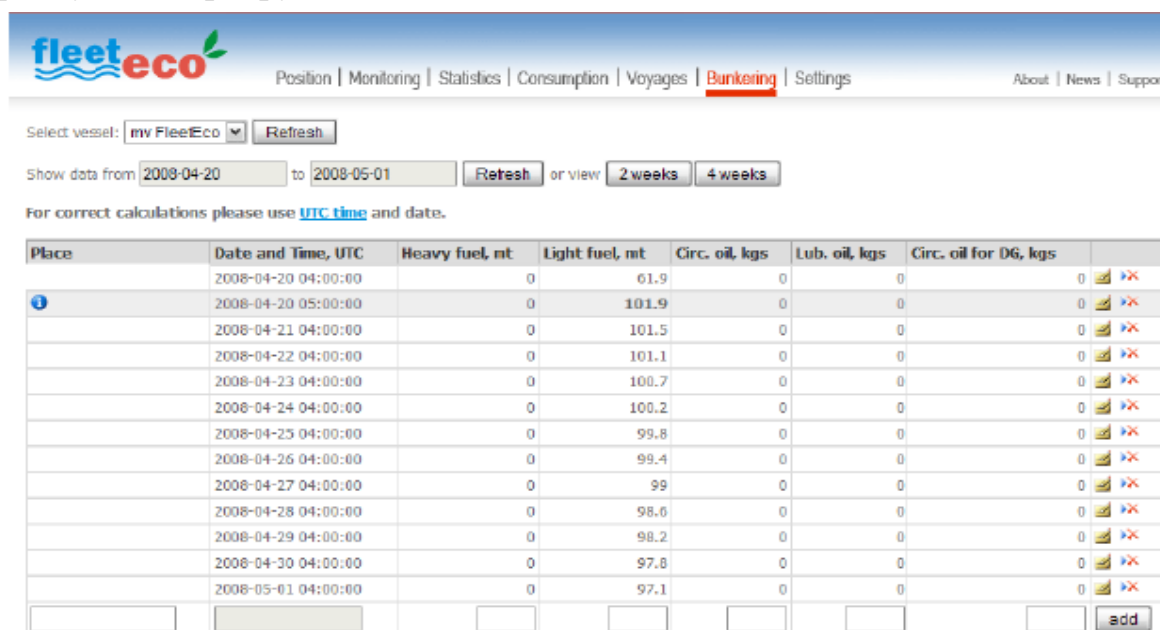


The screenshot shows the 'Voyages' section of the fleeteco interface. It includes a navigation bar with 'Voyages' highlighted. Below the navigation bar, there are filters for 'Select vessel' (mv FleetEco) and 'Show data from' (2008-03-01 to 2008-05-27). The main table displays trip data with columns: Name, Start, D_f, D_a, p, and actions. The table contains several rows of trip data, including '№1', 'Rostov-Hereke', and 'Hereke-Rostov'.

Name	Start	D _f	D _a	p	
№1	2007-10-24 16:00:00				
Rostov-Hereke	2008-03-02 00:00:00	3.7	3.8	1025	
Hereke-Rostov	2008-03-15 00:00:00	2.2	2.8	1025	
	2008-03-15 00:00:00				add
	2008-03-15 00:00:00				add group

Рис.1.26 Розділ «Voyages» – інформація о рейсах судна..

В цьому розділі наведена інформація о рейсах судна, яка заводиться уповноваженим представником судновласника. Рейси заносяться у довільному порядку, але сортируються за датою.



The screenshot shows the 'Bunkering' section of the fleeteco interface. It includes a navigation bar with 'Bunkering' highlighted. Below the navigation bar, there are filters for 'Select vessel' (mv FleetEco) and 'Show data from' (2008-04-20 to 2008-05-01). The main table displays bunkering records with columns: Place, Date and Time, UTC, Heavy fuel, mt, Light fuel, mt, Circ. oil, kgs, Lub. oil, kgs, Circ. oil for D6, kgs, and actions. The table contains several rows of bunkering data, including '2008-04-20 04:00:00', '2008-04-20 05:00:00', and '2008-04-21 04:00:00'.

Place	Date and Time, UTC	Heavy fuel, mt	Light fuel, mt	Circ. oil, kgs	Lub. oil, kgs	Circ. oil for D6, kgs	
	2008-04-20 04:00:00	0	61.9	0	0	0	
	2008-04-20 05:00:00	0	101.9	0	0	0	
	2008-04-21 04:00:00	0	101.5	0	0	0	
	2008-04-22 04:00:00	0	101.1	0	0	0	
	2008-04-23 04:00:00	0	100.7	0	0	0	
	2008-04-24 04:00:00	0	100.2	0	0	0	
	2008-04-25 04:00:00	0	99.8	0	0	0	
	2008-04-26 04:00:00	0	99.4	0	0	0	
	2008-04-27 04:00:00	0	99	0	0	0	
	2008-04-28 04:00:00	0	98.6	0	0	0	
	2008-04-29 04:00:00	0	98.2	0	0	0	
	2008-04-30 04:00:00	0	97.8	0	0	0	
	2008-05-01 04:00:00	0	97.1	0	0	0	

Рис.1.27 Розділ «Bunkering» – інформація о залишках палива та мастил, терміни бункерування..

6. Розділ «Bunkering» – інформація о залишках палива та мастил, терміни бункерування (рис.1.27).

В цьому розділі наведена інформація о залишках палива та мастил на судні, яка заводиться уповноваженим представником судновласника. Інформація заноситься у довільному порядку, але сортирується за датою. Якщо введений залишок більше попереднього, приймається, що була бункеровка (строчка виділяється сірим кольором).

7. Розділ «Settings» – для занесення первинних даних.

Цей розділ дозволяє налаштовувати деякі параметри системи: мову, часовий пояс, початковий масштаб мапи, висоту мапи, режим переглядання за умовчанням та ін.

1.6.2. Система моніторингу енергетичного обладнання судна ShipMonitoring

Система моніторингу енергетичного обладнання судна **ShipMonitoring** дозволяє проводити (рис.1.28) [<http://www.shipmonitoring.org>]:

- контроль параметрів роботи енергетичного обладнання судна;
- контроль та облік розходу палива судном;
- розрахунок споживання палива судном;
- порівняння звітних даних (по замірам екіпажу) з розрахунком даних розходу палива.

Контролер головного двигуна **кГД** виконує наступні функції:

- визначення частоти обертання колінчатого валу за сигналами від індуктивного датчика;
- визначення частоти обертання ротора турбокомпресора;
- розрахунок ефективної потужності, яка виробляється двигуном.

Контролер допоміжного дизель-генератора **кВДГ** виконує наступні функції:

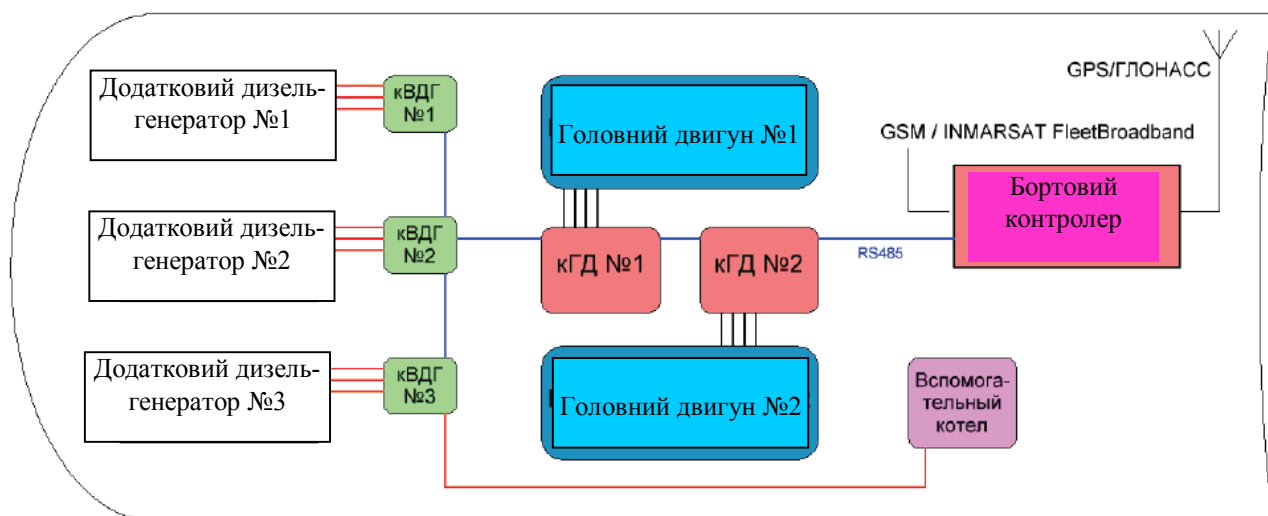


Рис.1.28 Структурна схема системи моніторингу енергетичного обладнання судна
ShipMonitoring

- визначення електричної потужності за струмом 3 фаз;
- визначення часу роботи допоміжного котла.

Бортовий комп'ютер, побудований на базі промислового контролера, має вбудовані GPS/ГЛОНАСС – приймач, модульний GSM-модем та енергонезалежну пам'ять. Цей блок об'єднує контролери головних двигунів та додаткових дизель-генераторів в мережу типу RS485. Також він проводить систематичний збір інформації та накоплення в енергонезалежну пам'ять бази даних по поточному стану робочих параметрів силового енергетичного обладнання..

Система моніторингу енергетичного обладнання судна ShipMonitoring реєструє наступні параметри:

- частоти обертання колінчатих валів головних двигунів;
- розраховану ефективну потужність, яка виробляється головними



Рис.1.29 Відображення маршруту судна по мапі Google maps в системі моніторингу енергетичного обладнання судна ShipMonitoring

Отчетный период, сутки:	2011-03-23 00:00 – 2011-03-24 23:59
Пройденный путь, мили (км):	193 (357)
Средняя скорость по GPS, узлы (км/ч):	6.9 (12.7)
Частота КВ ГД1 (левый) / ГД2 (правый), мин ⁻¹ :	271.0 / 271.0
Чс ГД1 (левый) / ГД2 (правый), э.л.с.:	434.0 / 443.8
Чс ГД сумм, э.л.с.:	877.8
Время работы ГД1 (левый) / ГД2 (правый), часы:	37.7 / 37.5
Расход топлива ГД1 (левый) / ГД2 (правый), кг:	2571.0 / 2612.0
Расход масла ГД1 (левый) / ГД2 (правый), кг:	23.0 / 23.0
Нагрузка ДГ1 / ДГ2 / ДГ3, кВт:	92.3 / 38.1 / 0.0
Время работы ДГ1 / ДГ2 / ДГ3, час:	0.1 / 48.0 / 0.0
Расход топлива ДГ1 / ДГ2 / ДГ3, кг:	3.0 / 556.0 / 0.0
Расход масла ДГ1 / ДГ2 / ДГ3, кг:	0.0 / 4.0 / 0.0
Время работы котла, час:	14.9
Расход топлива котлом, кг:	745.0
Суммарный расход топлива за отчетный период ГД+Котел / ДГ, кг:	5928.0 / 559.0
Суммарный расход масла за отчетный период, кг:	50.0

Стоянка: 23-03-2011 00:02 --- 23-03-2011 07:05
Ход: 23-03-2011 07:17 --- 23-03-2011 12:56
Ход: 23-03-2011 13:20 --- 23-03-2011 13:32
Ход: 23-03-2011 13:59 --- 24-03-2011 11:59

* ход – скорость по GPS больше 1 узла (1.852 км/ч)

Рис.1.30 Представлення зведених даних експлуатаційних характеристик енергетичного обладнання судна в системі моніторингу ShipMonitoring

двигунами з системою наддуву;

- час роботи головного двигуна;
- розрахований та замірний розхід палива головними двигунами;
- електричне навантаження допоміжних дизель-генераторів;
- розрахований розхід палива допоміжними дизель-генераторами;
- час роботи допоміжного котла та його розхід;
- положення та переміщення судна (час, координати, швидкість по GPS, пройдений шлях).

Звіти мають вигляд карт (рис.1.29), таблиць (рис.1.30), діаграм (рис.1.31), які містять дані за визначений період. При розрахунку розходу палива використовують значення питомого ефективного розходу та частоти обертання

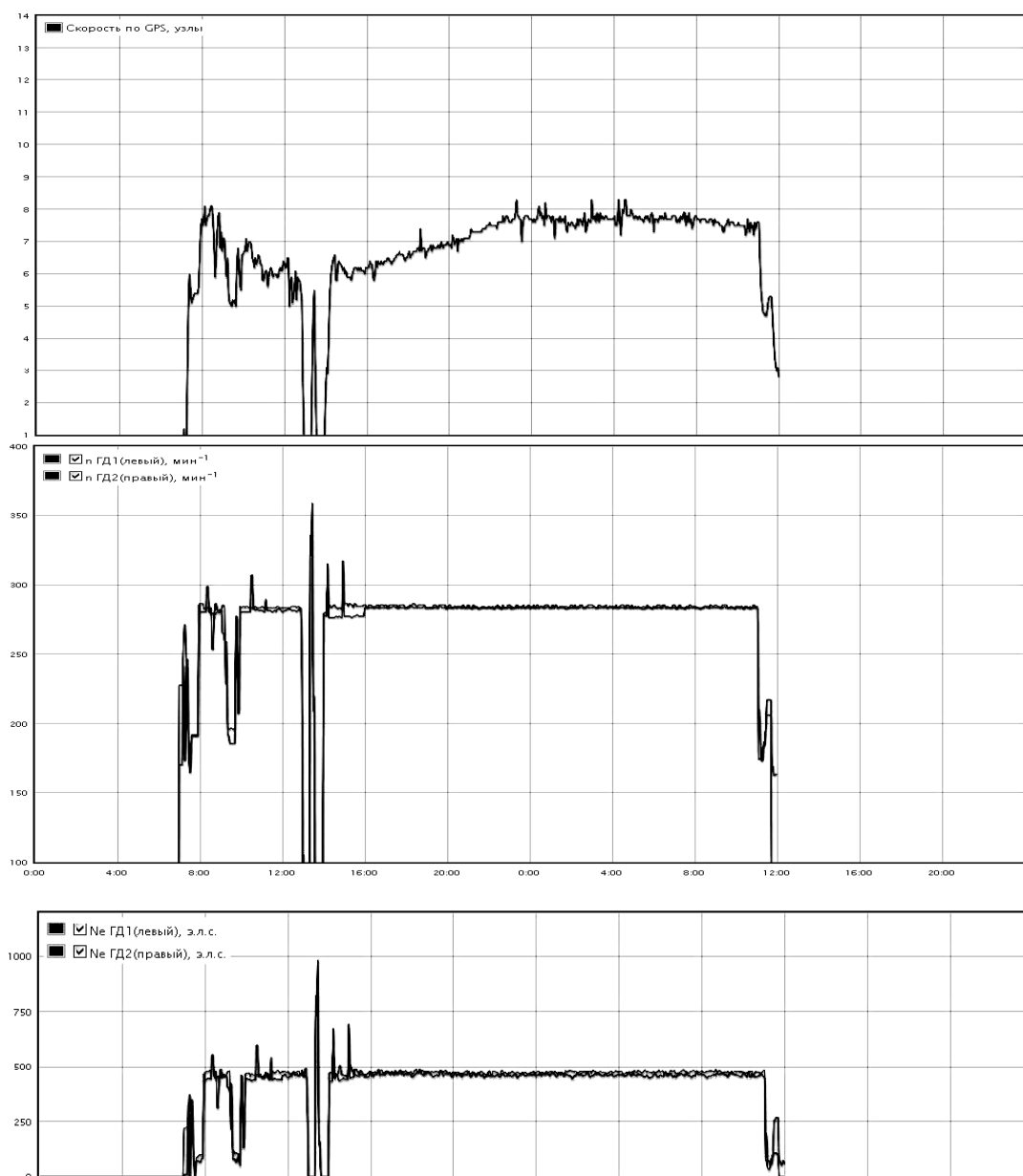


Рис.1.31 Зміна швидкості судна, оборотів та потужності головних двигунів за визначений період в системі моніторингу **ShipMonitoring** турбокомпресора. Дана методика розрахунку має похибку в межах 5 %.

Як слідує з наведених прикладів функціональні можливості таких систем моніторингу значно ширше, але судновласники та екіпаж використовують тільки обмежену кількість функцій моніторингу. Проблема приховується в відсутності аналізу замріяних параметрів. Якщо в систему монітор інка вбудувати поглиблений аналіз параметрів, то можливе не тільки їх порівняння з еталонними значеннями, але складати прогноз на залишковий ресурс двигунів, пропонувати рекомендації по зміні режиму двигуна та проведенню незапланованого технічного обслуговування.

Найбільш перспективним направлення такого аналізу даних є методи, які засновані на нейромережових технологіях. Результатом впровадження таких технологій можуть бути рекомендації по зміні режиму двигуна, по термінам технічного обслуговування, зниженню рівня аварійних ситуацій на судні та підвищення економічної ефективності експлуатації судна..

1.7. Суднові реєстратори даних рейсу

1.7.1 Головні причини появи на судах реєстратора даних рейсу

Людство з давніх пір стикається з питаннями безпеки мореплавання, а так само з питаннями встановлення причин тих або інших подій на морі. Пройшли віки, збільшувалися розміри, складність і вартість кораблів. Але, не дивлячись на технічну революцію, на морі продовжують відбуватися нещасні випадки і у кінці 20-го і початку 21-го століття.

Так згідно з щорічними доповідями міжнародної страхової групи Allianz свідчить, що:

- з 26 листопада 2011 року по 25 листопада 2012 року у світі в результаті різного роду аварій і подій загинуло 106 морських судів місткістю більше 100 брт;
- з 26 листопада 2012 року по 25 листопада 2013 року у світі в результаті різного роду аварій і подій загинули 94 морські судна місткістю більше 100 брт;

За попереднє десятиліття (з 2001 по 2011 роки), згідно з даними Allianz, у світі загинуло 1457 морських судів, або в середньому 146 судів в рік, при цьому в 2001-2002 звітному році загинуло 177 судів.

При аваріях і подіях велика кількість судів пропадала з невідомих причин, часто аварії супроводжувалися загибеллю великого числа людей, більше того, далеко не завжди вдавалося з'ясувати причини виникнення аварійної ситуації.

В той же час, як показує практика, повністю виключити вірогідність нещасних випадків на морі виявилось неможливо.

Найбільш значні аварії за останні 50 років сталися з наступними судами: **Балкер "M.V. Derbyshire" (Великобританія)**, який безслідно пропав 7 вересня 1980 року в Тихому океані, маючи на борту 42 людини екіпажа. Проведене розслідування причин загибелі судна не виявило і на цьому зупинилося, оскільки занурення на велику глибину для дослідження уламків,

точне місце розташування яких було невідомо, вимагало величезних грошей. Не задоволені таким рішенням родичі моряків 20 років домагалися справедливості, врешті-решт тільки до 2000-го року після декількох глибоководних занурень, а також двох подібного ж роду катастроф, що сталися з кораблями цього типу було доведено, що провина за загибель танкера лежить не на команді, а на конструкторах і фірмі, що спустила корабель з верфей.

Пароплав "Адмірал Нахимов" (СРСР), який вийшовши з Новоросійська 31 серпня 1986 року і маючи на борту 897 пасажирів і 346 членів екіпажа, зіткнувся за межами акваторії порту з балкером "Петро Васев". В результаті цього зіткнення пароплав "Адмірал Нахимов" затонув із-за великої пробоїни в правому борту. Машинне відділення було заповнене через півхвилини після зіткнення. Пароплав став валитися на правий борт. Основне освітлення через деякий час згасло, і людей охопила паніка. Через короткий проміжок часу запустився аварійний дизель-генератор (АДГ) на шлюпочній палубі - запрацювало аварійне освітлення, яке працювало всього 2 хвилини. Ці декілька хвилин багатьом пасажирам врятували життя. "Адмірал Нахимов" тонує поштовхами. Крен на правий борт досягав 45°. Через 8 хвилин після зіткнення, маючи крен на правий борт близько 60°, "Адмірал Нахимов" повністю пішов під воду. На місці краху на поверхні води одночасно залишилося близько 1000 чоловік. В результаті аварії загинули 423 людини, з них 359 пасажирів. Винними в аварії визнали обох капітанів, хоча точно причина зіткнення остаточно встановлена не була із-за різночитання в судових записах.

Автомобільно-пасажирський пором Herald of Free Enterprise здійснював регулярні рейси через англійський канал поблизу Бельгії. Це один з самих судноплавних районів, що вважається найбезпечнішим. 6 березня 1987 року в 18:05 пором відійшов від причалу з порту Дувр (Великобританія) і попрямував в порт Зебрюггес (Бельгія) з невеликим запізненням. Щоб надолужити час капітан запустив відразу три двигуни. Усередині теплохода знаходилося 459 пасажирів. Незабаром при виході з гавані капітан збільшив швидкість до 18 вузлів, що було максимально допустимим ходом. При виході в холодні води Північного моря "Herald of Free Enterprise" почав збиватися з курсу. Капітан спробував це виправити, але усе було марно, він миттєво повідомив сигнал лиха. Один з матросів вже докладав по радіостанції, що на нижню палубу поступає вода, що стікає по сходах з палуби вище. Теплохід відчув сильний поштовх, капітан впав на підлогу і втратив свідомість. До цього часу пором відхилився від курсу на 30 градусів. Несподівано теплохід різко накренився на лівий борт і видав жакливий скрегіт металу. Сильна хвиля хлинула всередину судна. Через декілька секунд теплохід став тонути в Північному морі. Але за щасливим збігом обставин судно сіло на мілині і над водою залишився лише правий борт. Трагедія шокувала весь світ - як сучасне судно могло перекинутися за 90 секунд за ідеальних погодних умов. При розслідуванні обставин аварії на затонулому судні виявили відкритими носову апарель. Під час розслідування було встановлено, що перший помічник капітана не проконтролював дії свого асистента, в обов'язки якого входило закриття дверей,

використовуючи важелі гідравлічного управління на автомобільній палубі. В цей час він спав у своїй каюті і прогавив сигнал застережливий відправку судна. У гонитві за часом перший помічник капітана майже завжди йшов з нижньої автомобільної палуби першим, а капітан зі свого робочого місця взагалі не бачив рампи із-за специфічної конструкції судна. По ув'язненню комісії в цій трагедії фатальну роль зіграли людський чинник і вади в конструкції теплохода. При русі під корпусом судна, тиск води знижується, що сприяє просіданню носа небагато вниз. На глибині це не так очевидно, але на мілководді корпус від дна відділяє невеликий об'єм води, від чого потік води з-під корпусу виходить швидше і відповідно ніс судна просідає глибше. Це і сталося з теплоходом "Herald of Free Enterprise". Цього виявилось досить, щоб вода каскадами вливалася на автомобільну палубу. Це явище дістало назву "Ефект мілководдя", який посилюється при збільшенні швидкості - ефект просідання корпусу судна на мілководді полягає в збільшенні опади судна при русі на мілководних ділянках і залежить від швидкості ходу, характеру обводів корпусу судна, глибини під кілем і форми каналу. Число загиблих склало 193 людини, включаючи 7 членів екіпажа.

Estonia – естонський пором судноплавної компанії **Estline**, був побудований в 1979 році в Німеччині на судноверфі Meyer Werft в Папенбурге. Затонув в ніч з 27 вересня на 28 вересня 1994 року. В результаті краху пропали без вісті 757 чоловік і загинули 95 чоловік з що 989 знаходилися на борту пасажирів і членів екіпажа. Це найбільша в Європі корабельна аварія в мирний час. Опівночі Estonia розминулася в морі з поромом компанії Viking Line Mariella (Мариєлла), на якому швидкість порома Estonia визнали занадто високою. У половині другого ночі з судна було відправлено коротке повідомлення про допомогу, незабаром судно пропало з радару порома Mariella. Відправником повідомлення вважають імовірно другого або четвертого штурмана. З повідомлення зрозуміло, що крен судна в той момент дуже небезпечний – 20-30 градусів, і чуто, що на кораблі включена протитуманна сирена, щоб розбудити пасажирів. Пором затонув між 00:55 і 01:50 (UTC+02). На сучасних навігаційних картах вказано місце загибелі порома 59°22'с.ш. 21°40' в.д. (глибина 83 м). Офіційна слідча комісія, складена з експертів Фінляндії, Швеції і Естонії, дійшла висновку, що "Естонію" згубив носовий визор - надводна частина порома, яка піднімається для прийому на борт судна автомашин і інших вантажів. В умовах сильного шторму і при високій швидкості "Естонії" її визор не витримав ударів зустрічних хвиль, що привело до його зриву. Після цього штормові хвилі стали захльостувати вантажний відсік. Впродовж декількох хвилин це викликало наростаючий крен на правий борт. Коли команда зрозуміла усю небезпеку що відбувається і подала сигнал лиха, було вже пізно - судно лягло на правий борт, а ще через декілька хвилин пішло на дно. "Естонія" загинула усього за півгодини.

Аналіз причин цих катастроф, також зростання тоннажу морських судів і об'ємів перевезень змусило звернути пильну увагу на забезпечення безпеки мореплавання і на детальний аналіз позаштатних ситуацій на кораблях. Назріла необхідність використання на флоті приладів, аналогічних літаковим "чорним

ящикам", оскільки фіксація обставин рейсу в судових (вахтових) журналах не гарантувала їх повноту і достовірність.

У 1974 році Міжнародна конвенція по охороні людського життя на морі (SOLAS/СОЛАС) Міжнародної морської організації (ІМО) визнала важливість установки на судах самописців, аналогічних авіаційним "чорним ящикам". Це послужило початком тривалого процесу вироблення міжнародних стандартів і вимог до реєстраторів даних рейсу. Впродовж 90-х років ІМО розробила вимоги до морського реєстратора, який записував би поточні параметри судна і дозволяв би аналізувати поведінку екіпажа в нештатних ситуаціях.

1.7.2 Основні нормативні документи по судових реєстраторах даних рейсу.

У травні 1999 року ІМО ухвалила резолюцію А.861 (20) "Експлуатаційні вимоги до судових приладів реєстрації даних про рейс", згідно якої усі спущені на воду пасажирські і вантажні судна з водотоннажністю більше 3000 тонн, а також усі судна, побудовані після 1 липня 2002 року, мають бути обладнані реєстраторами даних рейсу РДР (VDR - voyage data recorder).

У серпні 2000 року була опублікована на специфікація стандарту МЭК 61996 "Судновий реєстратор даних рейсу. Вимоги до робочих характеристик. Методи і необхідні результати випробувань" (IEC 61996 Maritime navigation and radiocommunication equipment and systems. Shipborne voyage data recorder (VDR). Part 1. Voyage data recorder (VDR). Technical and performance requirements, methods of testing and required test results), в якій описаний процес збору і зберігання інформації.

У прийнятій в грудні 2000 року новій редакції глави V "Безпека мореплавання" Конвенції СОЛАС-74 РДР включений в розряд обов'язкового навігаційного устаткування. Згідно цієї редакції:

1. Для надання допомоги при розслідуванні, судна, що виконують міжнародні рейси, для забезпечення вимог розпорядження 1.4, мають бути оснащені Реєстратором Даних Рейсу (voyage data recorder - VDR) наступні судна:

- пасажирські судна побудовані після 1 липня 2002;
- пасажирські пороми, побудовані до 1 Липня не пізніше першого огляду після 1 липня 2002;
- інші пасажирські судна, побудовані до 1 Липня 2002, не пізніше 1 січня 2004.
- інші судна, водотоннажністю більше 3,000 тонн і побудовані після 1 Липня 2002.

На тій, що відбулася у кінці 2004 року 79-й сесії Комітету з безпеки мореплавання (КБМ) були введені поправки до Правила 29 Глав V (V/20) Конвенції СОЛАС - 74 "Реєстратори даних рейсу". Згідно з цими поправками вантажні судна, що знаходяться в експлуатації, мають бути оснащені спрощеними реєстраторами даних про рейс У-РДР (S - VDR - simple voyage data

recorder), які повинні забезпечити фіксацію регламентованих параметрів даних рейсу впродовж певного часу.

Вимоги до У-РДР розроблялися з урахуванням необхідності мінімізації їх вартості, зважаючи на труднощі, пов'язані з їх установкою на існуючі судна, згідно з вимогами судновласників і суднобудівельних компаній.

Поправки набули чинності з 1 липня 2006 року. Для виконання цієї вимоги визначені різні терміни залежно від валової місткості судів, проте ця робота має бути повністю завершена до 1 липня 2010 року (таблиця.1.1).

Таблиця 1.1 Вимоги по оснащенню реєстраторами РДР і У-РДР судів залежно від їх типу, вантажопідйомності і року будови

Типи судів	Нові судна, побудовані після 1 липня 2002 року	Існуючі судна, побудовані до 1 липня 2002 року
Пасажирські	РДР	РДР
Пасажирські пороми	РДР	РДР
Вантажні судна вантажопідйомністю більше 20000 тонн	РДР	У-РДР при першому документуванні після 1 липня 2006 року, але не пізніше за 1 липня 2009 року
Вантажні судна вантажопідйомністю від 3000 до 20000 тонн	РДР	У-РДР при першому документуванні після 1 липня 2007 року, але не пізніше за 1 липня 2010 року

У 2007 році був введений в дію міжнародний стандарт IEC 61996-1:2007 "Maritime navigation and radiocommunication equipment and systems - Shipborne voyage data recorder (VDR) - Part 1: Voyage data recorder (VDR) - Performance requirements, methods of testing and required test results", який розроблений з урахуванням Резолюції ІМО А.694(17) і МЭК 60945. і встановлює мінімальні вимоги до експлуатаційних характеристик, технічних параметрів і методів випробування, а також необхідних результатів випробувань для суднових реєстраторів даних рейсу відповідно до Глави V Міжнародної Конвенції про охорону людського життя на морі (SOLAS) з доповненнями.

Цей стандарт став основним нормативним документом і установці, експлуатації і періодичній перевірці суднових реєстраторів рейсу.

РДР і спрощений РДР обов'язково повинен проходити щорічний огляд відповідно до Припису 18.8 Глав V SOLAS :

- Системи Реєстрації Даних Рейсу, включаючи усі датчики, повинні підлягати щорічному огляду.
- Перевірки повинні виконуватися схваленою перевіркою службою для визначення точності, тривалості і відновлюваності зареєстрованих даних.
- Перевірки і огляди повинні проводитися для визначення придатності усього захисного устаткування і допоміжних приладів. Копія сертифікату, виписаного перевіркою службою, з датою перевірки і відміткою відповідності стандартам, повинна залишатися на борту судна.

- Сертифікат виписується тільки компанією виробником конкретної моделі Реєстратора Даних Рейсу. Щорічний огляд робиться фахівцями визнаної виробником і РМРС компанії. Потім акти огляду висилаються виробникові. На підставі актів виробником виписується сертифікат.

1.7.3. Основні вимоги до реєстраторів даних рейсу.

Призначення будь-якого Реєстратора даних рейсу (РДР) - забезпечити запис і безпечно збереження з можливістю витягання даних про місце розташування, пересування, фізичний стан і управління судном за період часу перед нештатною ситуацією, що мала небажані наслідки для судна, в час і після неї. Інформація, що зберігається в реєстраторові, має бути доступна як для адміністративних органів, так і для власника судна. Ця інформація призначена для будь-яких наступних розслідувань з метою встановити причини нештатної ситуації. Основні завдання РДР наступні:

- РДР дозволяє з'ясувати причини корабельних аварій в морі і допомагає запобігти їх появі в майбутньому.
- РДР реєструє ці плавання і корпуси судна, на якому він встановлений.
- РДР записує різну інформацію про стан і працездатність життєво необхідного устаткування на судні. Ця інформація підрозділяється на обов'язкову і необов'язкову, яка може зажадатися покупцем. Після якого-небудь інциденту, дані можуть бути витягнуті для аналізу відповідною владою, або іншою загальновизнаною установою.

Деякі дані можуть бути в необробленому форматі або розрізнятися залежно від виробника, внаслідок чого вимагатиметься устаткування цього виробника для того, щоб декодувати і відобразити інформацію

Мінімальні вимоги до експлуатаційних характеристик, технічним параметрам і методам випробування випробувань для суднових реєстраторів даних рейсу обумовлені в міжнародному стандарті IEC 61996-1:2007 "Maritime navigation and radiocommunication equipment and systems - Shipborne voyage data recorder (VDR) - Part 1: Voyage data recorder (VDR) - Performance requirements, methods of testing and required test results".

Розглянемо основні положення цього стандарту.

1.7.4 Вимоги до записуючого пристрою VDR.

Запис необхідних даних повинен робитися безперервно з моменту відходу судна від причалу до закінчення рейсу. Проміжок часу, за який мають бути збережені усі елементи даних, має бути не менше 12 ч. Елементи даних, які зареєстровані після цього періоду, можуть затиратися новішими даними.

Відключення запису може робити тільки при наступних обставинах:

- при виконанні процедур технічного обслуговування, коли судно знаходиться в порту;
- коли судно поставлене на прикіл;

- по запиту слідчого органу, наприклад, якщо судно було залучене в аварійну ситуацію на морі.

У нормальному робочому режимі реєстратор повинен функціонувати повністю автоматично. Необхідно передбачити засоби для того, щоб яким-небудь методом зберегти записані дані кінцевий носій після нештатної ситуації при мінімальному перериванні процесу запису, причому не повинно бути необхідності у відкритті захисної капсули. Для цього:

- Засоби управління, вживані для цього процесу збереження, мають бути простими у використанні.
- В процесі збереження запис на кінцевий носій не повинна уриватися більш ніж на 10 хв. Дані, записані на кінцевий носій запису, не мають бути стерті.
- Збережені дані повинні автоматично перевірятися на предмет їх ідентичності даним, записаним на кінцевому носії запису. Кожен збіг повинен позначатися.
- Коли процес збереження завершений, необхідно за допомогою спеціального засобу перенести записаний набір даних на інший пристрій, що запам'ятовує, щоб дістати можливість зберігати дані, що відносяться до наступних нештатних ситуацій.

Для того, щоб гарантувати, що реєстратор продовжуватиме фіксувати інформацію і під час самої нештатної ситуації, повинна бути передбачена можливість його роботи від суднового аварійного джерела електроживлення.

У разі відмови суднового аварійного джерела електроживлення реєстратор повинен продовжувати запис сигналу аудіосистеми ходового містка впродовж 2 ч, працюючи від спеціалізованого резервного джерела живлення. Після закінчення цих 2 ч увесь запис має бути автоматично зупинений.

1.7.5. Вимоги до записуваних даних рейсу у VDR

Згідно з міжнародним стандартом ІЕС 61996-1:2007 повний реєстратор даних рейсу повинен зберігати інформацію про наступні параметри рейсу.

Дата і час. Еталонна дата і час (по універсальному всесвітньому координованому часу - UTC) повинні виходити від джерела, зовнішнього по відношенню до судна (наприклад, від електронної системи визначення місцезнаходження (EPFS) або радіосигналів точного часу), якщо такий доступний, або від внутрішнього годинника, щонайменше, один раз в годині В записі повинно бути позначено, яке джерело використовується. Метод запису має бути таким, щоб при відтворенні можна було отримати відмітки часу усіх записаних елементів даних з дозволом, достатнім для детального відтворення передісторії нештатної ситуації, - не меншим 1 с.

Наприклад, в VDR типу VR - 5000 (фірми Furuno Electric - Японія) сигналб точного часу виходять від приймача GPS і зберігаються в наступному форматі:

```
$ ZDA, hhmmss.ss, xx, xx, xxxx, xx, xx*hh<CR><LF>
```

| | | | |
 | | | | | хвилини мають ти ж самий знак що і місцеві години
 | | | | | Місцевий зональний опис 00 годин ±13 годин (примітка)
 | | | | | Рік
 | | | | | Місяць, від 01 до 12
 | | | | | День, від 01 до 31
 | UTC

\$ – мітка початку записі;

ZDA – заголовок формату «час, дата»;

* – - мітка закінчення запису;

<CR> код переводу каретки; <LF> - код переходу до початку стрічки.

Примітка: При Зональному описанні вказується число, яке додається до цілого значення годин до місцевого часу, щоб отримати час за Гринвічем. Зональний час негативний для східних довгот.

Місце розташування судна. Широта і довгота, а також використовувана точка відліку повинні виходити від заданої електронної системи визначення місцезнаходження або інтегрованої навігаційної системи судна (при її наявності). Спосіб запису повинен забезпечувати, щоб ідентичність і стан цього джерела завжди можна було визначити при відтворенні. Наскільки це можливо для цього судна, місце розташування повинне записуватися з дозволом до 0,0001'

Наприклад, в VDR типу VR - 5000 (фірми Furuno Electric - Японія) широта, довгота можуть поступати від приймачів GPS, Лорана-С або іншої навігаційної системи через послідовний інтерфейс і зберігаються в наступному форматі:

\$ GNS, hhmmss.ss, llll.ll, a, yyyyy.yy, a, cc, d, xx, x.x, x.x, x.x, x.x, x.x, *hh<CR><LF>
a b c d e f g h I j

а: UTC позиції;

b: широта, N/S;

с: довгота, E/W;

d: індикатор режиму:

1.=GPS; 2.=GLONASS; 3.=інша супутникова система.

N= нема визначення; F=РТК з плаваючою точкою; А= Автономний;

E= Засіб обчислення шляху; D=Диференційний; M= ручний режим вводу;

P= Точний; S=Режим імітатору; R= Реальний час кінематичний.

е: загальна кількість супутників;

f: HDOP;

g: висота антени, м, відносно середнього рівня моря (геонід);

i: вік диференційних даних;

j: ідентифікатор диференційної станції.

\$ – мітка початку записі;

GNS – заголовок формату «розташування судна»;

* – - мітка закінчення запису;

hh – контрольна сума; <CR> код переводу каретки; <LF> - код переходу до початку стрічки.

Швидкість. Швидкість відносно води або ґрунту (у обох випадках - поперечна і подовжня, якщо це можливо для цього судна) з вказівкою, від якого суднового устаткування для виміру швидкості і відстані вона поступає. Швидкість повинна фіксуватися, наскільки це можливо для цього судна, з дозволом до 0,1 вузла.

Наприклад, в VDR типу VR - 5000 (фірми Furuno Electric - Японія) швидкість відносно води STW) або ґрунту SOG) реєструється з інтервалом в 1 хв з дозволом в 0,1 вузла і зберігаються в наступному форматі:

\$	VBW	x.x	x.x	A	x.x	x.x	A	x.x	A	x.x	A*	hh<CR><LF>
												Статус ² , кормова швидкість, A= допустимі дані; V=недопустимі дані;
												Кормова поперечна наземна швидкість ^{1,2} , вузли;
												Статус ² , кормова водна швидкість, A= допустимі данні
												Кормова поперечна водна швидкість ^{1,2} , вузли;
												Статус, наземна швидкість, A= допустимі данні
												Поперечна наземна швидкість ¹ ,вузли;
												Повздовжня наземна швидкість ¹ ,вузли;
												Статус, водна швидкість, A= допустимі данні
												Поперечна водна швидкість ¹ ,вузли;
												Повздовжня водна швидкість ¹ ,вузли;

Примітка: 1:Поперечна швидкість:«←» = лівий борт. Повздовжня: :«←» = назад

\$ – мітка початку записі;

VBW – заголовок формату «швидкість»;

* – - мітка закінчення запису;

hh – контрольна сума; <CR> код переводу каретки; <LF> - код переходу до початку стрічки.

Курс. У тому виді, в якому він видається судновим компасом. Наскільки це можливо для цього судна, його курс повинен записуватися з дозволом до 0,1°. Наприклад, в VDR типу VR - 5000 (фірми Furuno Electric - Японія) курс зберігається в наступному форматі:

\$ HDT, x.x, T*hh<CR><LF>
| Реальный курс, градуси

\$ – мітка початку записі;

HDT – заголовок формату «курс»;

* – - мітка закінчення запису;

hh – контрольна сума; <CR> код переводу каретки; <LF> - код переходу до початку стрічки.

Звукозапис на ходовому містку. На ходовому містку необхідно розмістити один або декілька мікрофонів так, щоб забезпечити можливість досить чіткого запису розмов на посту управління судном, у екранів радіолокаторів, штурманських столів і тому подібне (тобто на основних робочих місцях). Наскільки це практично можливо, положення мікрофонів повинне також охоплювати входи і виходи систем внутрішнього зв'язку і місцевого сповіщення, а також звукову аварійну сигналізацію устаткування, встановленого на ходовому містку. Звукові сигнали на усіх робочих місцях повинні записуватися безперервно. Додатково можна передбачити засоби ідентифікації робочих місць в сигналах, які записуються у цих місцях, щоб це можна було бачити при аналізі записаної інформації.

Збереження звукозапису на жорсткому диску може відбуватися в стислому виді (з компресією звукових сигналів, наприклад, в стандарті MP3).

Наприклад, в VDR типу VR - 5000 (фірми Furuno Electric - Японія) для звукозапису на ходовому містку поставляються 6 мікрофонів для їх установці на командному посту, у радарного дисплея, штурманського столу, звукові сигнали від гучномовного зв'язку і аварійних сигналів, шум з машинного відділення, звукові сигнали від устаткування. Мікрофон генерує випробувальний сигнал кожні 12 годин, які теж реєструється. Робочий діапазон мікрофонів складає від 150 Гц до 6000 Гц.

Звукозапис системи зв'язку. Передачі в метровому (УКВ) діапазоні, що мають відношення до операцій управління судном, повинні записуватися незалежно від запису аудіосистеми ходового містка. Записуватися повинні звукові сигнали, як ті, які передаються, так і такі, що приймаються; запис повинен вестися безперервно за допомогою приєднаного безпосередньо до приймача метрового діапазону, визначеного при установці системи. Приймач повинен мати рівномірну АЧХ в діапазоні частот від 150 до 3500 Гц з нерівномірністю характеристики 6 дБ.

За відсутності сигналів на УКВ - порту відтворний сигнал має бути мінімум на 48 дБ нижче, ніж рівень виходу при додатку на вхід сигналу еталонного рівня. Відношення відтворного сигналу до шумів і спотворень має бути щонайменше 24 дБ по усьому вказаному частотному діапазону, і при рівнях входу в діапазоні від 0 до мінус 20 дБ по відношенню до рівня еталонного сигналу

Наприклад, в VDR типу VR - 5000 (фірми Furuno Electric - Японія) для запису звуку радіозв'язку використовується дві незалежні УКВ станції із стискуванням запису за допомогою стандарту MP3.

Дані радіолокатора, вибрані для відтворення. Сюди включаються дані електронних сигналів однієї з суднових установок радіолокації; записується інформація, яка реально відображується на основному екрані цього радіолокатора у момент запису. Сюди повинні включатися будь-які кільця дальності або маркери, електронні символи прокладення, карти радіолокації, будь-які частини вибраної системної електронної навігаційної карти (SENC) або іншої електронної схеми або карти, план рейсу, навігаційні дані, навігаційні аварійні сигнали і дані про стан радіолокатора, які видимі на екрані. Метод запису має бути таким, щоб при відтворенні була можливість представити точну копію усього екрану радіолокатора, як він відображується у момент запису, хоча і з обмеженнями, що накладаються технологіями стискування смуги частот, які істотні для роботи реєстратора. Стискування відеозображення екрану радара повинне відбуватися по алгоритмах без втрати якості з коефіцієнтом стискування не менше 20.

Реєстратор повинен записувати послідовність поодиноких і повних відеокадрів розміром в екран із спеціалізованого буферного вихідного порту радіолокатора. Один повний відеокадр екрану радіолокатора повинен

записуватися з інтервалом 15 с або менш. Буферні виходи повинні відповідати електричним технічним вимогам VESA DMTS в тій частині, в якій VESA DMTS торкається моніторів з дозволом екрану між 640x350 і 1280x1024 і частотами оновлення між 60 і 85 Гц, а також моніторів 1600x1200 з частотою оновлення 60 Гц.

Наприклад, в VDR типу VR - 5000 (фірми Furuno Electric - Японія) радарне зображення, включаючи круги дальності, електронний пеленг, маркер дальності, символи прокладення, карти частини, частини SENC реєструються кожні 15 сек з дозволами між 640x350 і 1280x1024 і при відтворенні має вигляд:



Ехолот. Сюди повинна включатися глибина під кілем з дозволом до 0,1 м, наскільки це можливо для цього судна. За наявності повинні записуватися шкала глибин, що виводиться на екран у нинішній момент, і інша інформація про стан устаткування.

Наприклад, в VDR типу VR - 5000 (фірми Furuno Electric - Японія) глибина під кілем записується з дозволом 0,1 м і реєструється кожні 1 сек в наступному виді:

\$ DPT, x.x, x.x*hh<CR><LF>

| | Зміщення вібратору, м = відстань від нього до ватерлінії;
| Водна глибина відносно вібратора, м.

\$ – мітка початку записі;

DPT – заголовок формату «глибина»;

* – – мітка закінчення запису;

hh – контрольна сума; <CR> код переводу каретки; <LF> - код переходу до початку стрічки.

Позитивні числа відображаються від вібратора до ватерлінії, а негативні – від вібратора до кіля.

Основні аварійні сигнали. Сюди відноситься стан усіх аварійних сигналів ходового містка, обов'язкових згідно з вимогами ІМО. Обов'язкові аварійні сигнали повинні також записуватися через аудіосистему ходового містка і як інформаційний параметр, якщо це практично здійснено.

Статус усіх обов'язкових аварійних сигналів повинен реєструватися індивідуально з проміжком не менше 1 сек, з вказівкою індивідуального коду і відміткою про час.

Наприклад, в VDR типу VR - 5000 (фірми Furuno Electric - Японія) статус обов'язкових аварійних сигналів кожні 1 сек в наступних форматах:

[illegible]

\$ – мітка початку записі;

ALA – заголовок формату «стан Аларма»;

* – - мітка закінчення запису;

hh – контрольна сума; <CR> код переводу каретки; <LF> - код переходу до початку стрічки.

[illegible]

\$ – мітка початку записі;

ALR – заголовок формату «умови попереджувальної сигналізації»;

* – - мітка закінчення запису;

hh – контрольна сума; <CR> код переводу каретки; <LF> - код переходу до початку стрічки.

[illegible]

\$ – мітка початку записі;

FIR – заголовок формату «стан Аларма»;

* – - мітка закінчення запису;

hh – контрольна сума; <CR> код переводу каретки; <LF> - код переходу до початку стрічки.

Команди, що видаються на кермо, і реакції керма. Командне значення кута перекладання керма і реакція керма повинні записуватися з

дозволом до 1°, наскільки це реалізовується і дозволене для цього судна. Також повинні фіксуватися стан і налаштування пристрою управління судном по курсу або траєкторії, якщо такий встановлений. Якщо передбачено більш, ніж 1 кермо, то формат запису має бути продубльований.

Наприклад, в VDR типу VR - 5000 (фірми Furuno Electric - Японія) положення керма записується кожні 1 сек в наступному форматі:

\$ RSA, hhmmss.ss, x.x.A, x.x.A, *hh<CR><LF>

				Датчик лівого борту. A= допустиме значення;
				Датчик правого борту. A= допустиме значення;
	час запису			

\$ – мітка початку записі;

RSA – заголовок формату «положення руля»;

* – - мітка закінчення запису;

hh – контрольна сума; <CR> код переводу каретки; <LF> - код переходу до початку стрічки.

Примітка: Відносне вимірювання куту руля без одиниць вимірювання. Знак «-» обертання наліво.

Вихід датчика пропорційний куту руля.

Команди, що видаються на двигун, і реакції двигуна. Сюди відносяться положення усіх машинних телеграфів або пристроїв прямого управління двигуном/грібним гвинтом, включаючи обороти валу (чи еквівалентний параметр) і сигнали зворотного зв'язку (за наявності), включаючи індикатори "передній/задній хід". Сюди також відноситься стан допоміжних гвинтів на носі і кормі судна, якщо вони встановлені. Обороти повинні записуватися з дозволом до 1 об/хв, а крок гвинта - з дозволом до 1° з проміжком не менше 1 сек.

Наприклад, в VDR типу VR - 5000 (фірми Furuno Electric - Японія) команди на двигун і реакції записуються кожні 1 сек з дозволом оборотів двигуна 1 об/хв, кроку гвинта 10 в наступному форматі:

\$ RPM, hhmmss.ss, A, x, xx.xx, A *hh<CR><LF>

					Стан. A= допустимі значення
					Крок гвинта в відсотках від максимуму. «-» = назад;
					Швидкість, об/хв.. «-» = проти годинної стрілки
					Номер двигуна валу згідно діаметральної лінії;
		Джерело Вал/Двигун;			
	Час запису;				

\$ – мітка початку записі;

RPM – заголовок формату «команди двигуна»;

* – - мітка закінчення запису;

hh – контрольна сума; <CR> код переводу каретки; <LF> - код переходу до початку стрічки.

Стан отворів (дверей) в корпусі. Сюди включається уся обов'язкова, згідно з вимогами ІМО, інформація стану, що відображується на ходовому містку. Входить до складу обов'язкових аварійних сигналів формату ALR і FIR, описаних раніш.

Стан водонепроникних і протипожежних дверей. Сюди включається уся обов'язкова, згідно з вимогами ІМО, інформація стану, що відображується

на ходовому містку. Входить до складу обов'язкових аварійних сигналів формату ALR і FIR, описаних раніш.

Прискорення і навантаження на корпус судна. Якщо судно оснащено обов'язковим, згідно з вимогами ІМО, устаткуванням контролю напруженості і реакції корпусу, то підлягають запису усі елементи даних, які були заздалегідь вибрані для цього устаткування і є в наявності.

Сигнали від відповідних датчиків, контролюючих напруженість корпусу судна повинні записуватися з проміжком не менше 1 сек і з відмітками часу.

Наприклад, в VDR типу VR - 5000 (фірми Furuno Electric - Японія) сигналів від датчиків, контролюючих напруженість корпусу судна записуються кожні 1 сек в наступному форматі:

\$ HSS, hhmmss.ss, c-c, x.x, A, *hh<CR><LF>

					Стан даних датчиків. A= допустиме значення;
					Значення вимірювання;
	час запису				

\$ – мітка початку записі;

HSS – заголовок формату «навантаження на корпус судна»;

* – мітка закінчення запису;

hh – контрольна сума; <CR> код переводу каретки; <LF> - код переходу до початку стрічки.

Примітка: VDR реєструє ці данні тільки якщо це відповідає класифікації судна.

Швидкість і напрям вітру. Ці дані записуються, якщо судно оснащено відповідним датчиком. Можуть фіксуватися або відносні, або істинні швидкості і напрями вітру з вказівкою, який з цих варіантів записується. Сигнал від відповідного датчика швидкості і напрямку вітру повинен реєструватися з проміжком не менше 1 сек і з відмітками часу.

Наприклад, в VDR типу VR - 5000 (фірми Furuno Electric - Японія) сигналів від датчика напрям і сила вітру записуються кожні 1 сек в наступному форматі:

\$ MWV, hhmmss.ss, x.x, a, x.x, a, A, *hh<CR><LF>

					Статус. A= допустиме значення;
					Одиниці швидкості вітру;
					Швидкість вітру;
					Посилання. R= відносний. T= абсолютний;
	Кут вітру від 0 до 359°;				
	час запису				

\$ – мітка початку записі;

MWV – заголовок формату «навантаження на корпус судна»;

* – мітка закінчення запису;

hh – контрольна сума; <CR> код переводу каретки; <LF> - код переходу до початку стрічки.

Примітка: Коли посилання встановлені R= відносний, то кут вітру записується відносно курсу судна. Якщо посилання встановлені T= абсолютний, то кут вітру записується відносно води, яка рухається.

1.7.6. Вимоги до записуваних даних рейсу для S - VDR

У спрощених реєстраторах даних про рейс У-РДР (S - VDR - simple voyage data recorder) кількість записуваних параметрів, що регламентуються, згідно поправки до Правила 29 Глав V (V/20) Конвенції СОЛАС - 74 "Реєстратори даних рейсу" і Резолюції ІМО MSC.163(78) істотно менше, що спрощує конструкцію реєстратора і значно здешевлює його.

Згідно цієї поправки обов'язковими є тільки 7 перших обов'язкових параметрів повного РДР. У таблиці 1.2 приведено порівняння обов'язкових параметрів, що зберігаються, для VDR і S - VDR.

Таблиця 1.2. Порівняння обов'язкових реєстрованих параметрів повного в спрощеного реєстратора даних рейсу.

Інтерфейс	VDR	S-VDR
Дата, час	+	+
Координати судна	+	+
Швидкість	+	+
Курс	+	+
Переговори та інша звукова інформація на мостіку	+	+
Радіопереговори	+	+
Данні від РЛС	+	По можливості
AIS	+	Без РЛС
Ехолот	+	Тільки при наявності цифрових даних відповідно до стандарту ІЕС 61162
Усі аварійно – попереджувальні сигнали на мостіку	+	
Команди на руль та відпрацювання	+	
Команди машинного телеграфу та виконання	+	
Стан заборотних отворів в корпусі	+	
Стан водонепроникних та протипожежних дверей	+	
Прискорення та напруги в корпусі судна	+	
Швидкість та напрямлення вітру	+	

З цієї таблиці видно, що в S-VDR відсутні більшість обов'язкових записуваних параметрів, пов'язаних зі значними грошовими витратами на установку різних датчиків на судні для збору необхідної інформації. Поява S-VDR пов'язана в основному з компромісом ІМО і судновласниками для забезпечення достатньої безпеки мореплавання.

Вимоги до збереження вказаних параметрів для S-VDR такі ж, як і для VDR і описані в 1.7.5.

1.7.7. Структурні схеми VDR і S – VDR

До складу як спрощеного (S-VDR), так і повного (VDR) реєстраторів повинні входити два обов'язкові блоки:

1. Базового блоку збору даних (БСД або DCU - data control unit) – це пристрій збору і перетворення параметричної, радіолокації і мовної інформації із зовнішніми роз'ємами для підключення необхідних пристроїв джерелом безперебійного живлення і батареями ;

2. Защищенный накопитель информации (ЗНИ або DRU - data registration unit) – блок, який зберігає в зовнішній пам'яті дані, які поступають з БСД .

1.7.8 Базовий блок збору даних (DCU)

Розглянемо типову структурну схему реєстратора даних рейсу (рис.1.32)

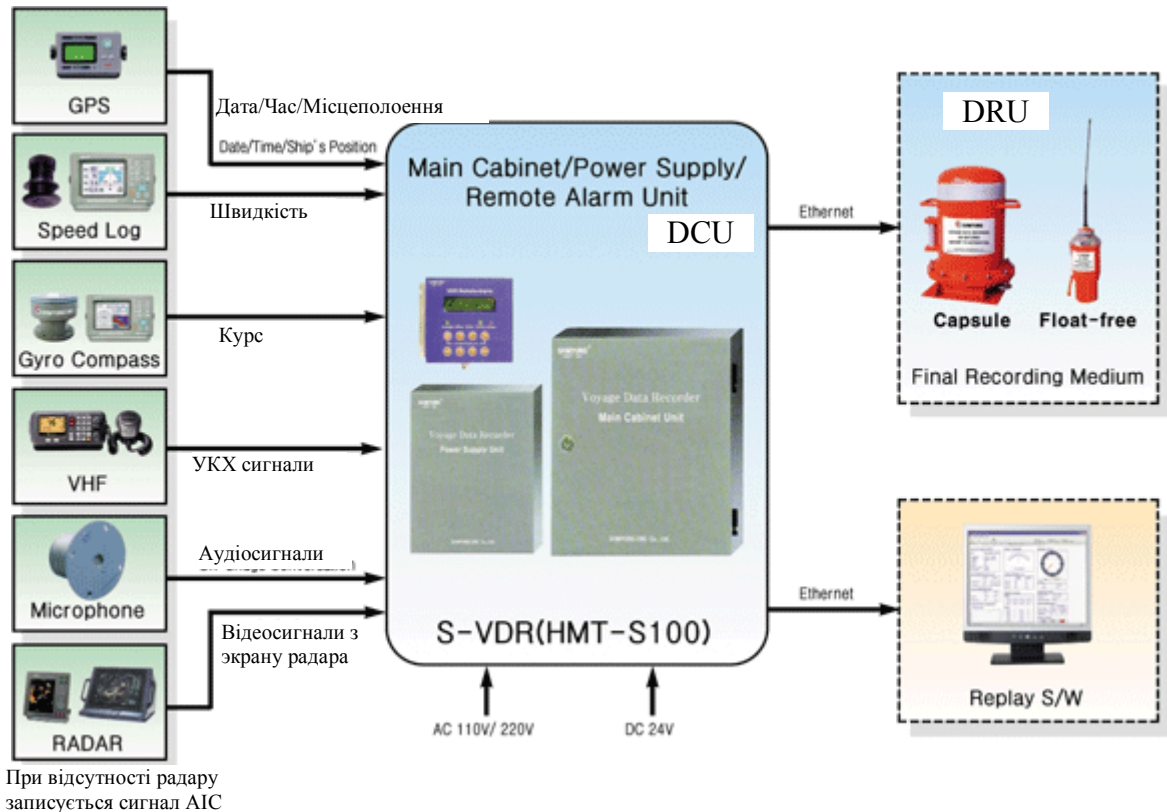


Рис.1.32 Структурна схема типового S-VDR на прикладі реєстратора даних рейсу типа HMT-S100.

Як видно з цієї структурної схеми S-VDR типу HMT - S100 містить базовий блок збору даних (DCU), який збирає інформації трьох видів, :

1. Цифрову – дата/час/місце розташування, швидкість, курс. Сигнали передаються по послідовному інтерфейсу за стандартом МЭК 611621, RS - 422 або Internet.
2. Аналогову аудіоінформацію – УКХ переговори, переговори на містку . від одного мікрофону, що входить до складу У-РДР і встановленого на містку, в смузі частот від 150 до 6000 Гц; і від однієї УКХ-радіостанції відповідно до стандарту МЭК 61097_7 (при цьому передбачені окремі входи для сигналів, що передаються і приймаються УКХ станцією з мікшуванням) в діапазоні частот 150.3500 Гц.
3. Відеоінформацію – екран радара. інформації, що містить повне зображення екрану РЛС відповідно до специфікації VESA DMTS для екранів з дозволом від 640x350 до 1280x1024 і частотою кадрів 60.85 Гц (цикл опитування - 15 з, кількість входів - один, вид сигналу - RGB, розрядність по кожному кольору - 8 біт).

Завдання базового блоку збору даних (DCU) полягає в перетворення цих отриманих сигналів, формування з них необхідного потоку інформації, який записується потім в блоці реєстрації інформації DRU, що знаходиться в захисній капсулі за принципом "кільця" з періодом 12 годин із збереженням до 3-х резервних копій. Для виконання цього завдання до складу базового блоку збору даних входить процесорний модуль, блок пам'яті і блок інтерфейсів. Базовий блок збору даних поводить пасивно по відношенню до підключених до ними джерелам сигналів і не порушує їх роботу.

До складу базового блоку збору даних входить також пристрій безперебійного живлення, який підключається до основного суднового джерела електропостачання з напругою 220 В змінного струму (50 Гц) і до аварійного суднового джерела з напругою 18...36 В постійного струму. При повному знеструмленні судна цей пристрій забезпечує подачу електроживлення в систему впродовж 2 годин. У основному режимі пристрій безперебійного живлення виконує функції фільтру стабілізатора, компенсуючи відхилення напруги і частоти суднового джерела живлення.

Реєстратор постійно зберігає інформацію за останні 12 годин, стираючи застарілі дані і замінюючи їх оновленими.

Отримана інформація передається через послідовний інтерфейс за стандартом МЭК 611621, USB або Internet в записуючий пристрій, що знаходиться із захисній капсулі стаціонарного або спливаючого типу (DRU).

Для контролю записаної інформації і налаштувань реєстратора використовується додатковий пристрій (Replay), який пов'язаний з блоком збору даних послідовним інтерфейсом по протоколу Internet.

Згідно з міжнародним стандартом IEC 61996-1:2007 "Maritime navigation and radio communication equipment and systems - Ship borne voyage data recorder (VDR) - Part 1: Voyage data recorder (VDR) - Performance requirements, methods of testing and required test results", реєстратор має бути оснащений інтерфейсом для витягання збережених даних на зовнішній комп'ютер. Це має бути або інтерфейс Ethernet, або інтерфейс USB.

Інтерфейс повинен передбачати щонайменше 3-метровий кабель для з'єднання із зовнішнім комп'ютером. Якщо інтерфейс - типу Ethernet, він повинен відповідати протоколу IEEE 802.3u, роз'єм типу RJ 45. Якщо інтерфейс - типу USB, він повинен відповідати специфікації USB 2.0, гніздо типу A

Дані цифрових датчиків і конфігураційна інформація мають бути представлені в роздрукованому форматі ASCII у вигляді текстових файлів, відповідних ІСО/МЭК 8859-1:1998. Формат даних стандарту МЭК 61162-1 - це один з прикладів прийнятного формату ASCII.

Відеодані мають бути представлені в одному з наступних форматів :

1. ".bmp" - (Microsoft GDI - растровий еталон)
2. ".png" - (ІСО/МЭК 8859-1);
3. ".jpg" - (JPEG 2000 - ІСО/МЭК 15444).

Відеодані можуть бути запаковані в ".zip" формат.

Аудіодані мають бути представлені у форматі ".wav"(EBU 3858) або .mp3 і можуть бути запаковані в ".zip" формат.

Структурна схема повного реєстратора даних рейсу подібна до структурної схеми спрощеного реєстратора, але містить більше вхідних сигналів для реєстрації усіх необхідних за стандартом параметрів (рис.1.33).

Як видно із структурної схеми в повному VDR значно збільшено число каналів для зчитування первинної інформації: так кількість мікрофонів на містку змінюється зазвичай від 4 до 8, для запису переговорів виділяється зазвичай 2...4 каналу, а для запису параметрів від датчиків і суднового устаткування виділяється до 16 аналогових каналів, до 32 цифрових каналів, до

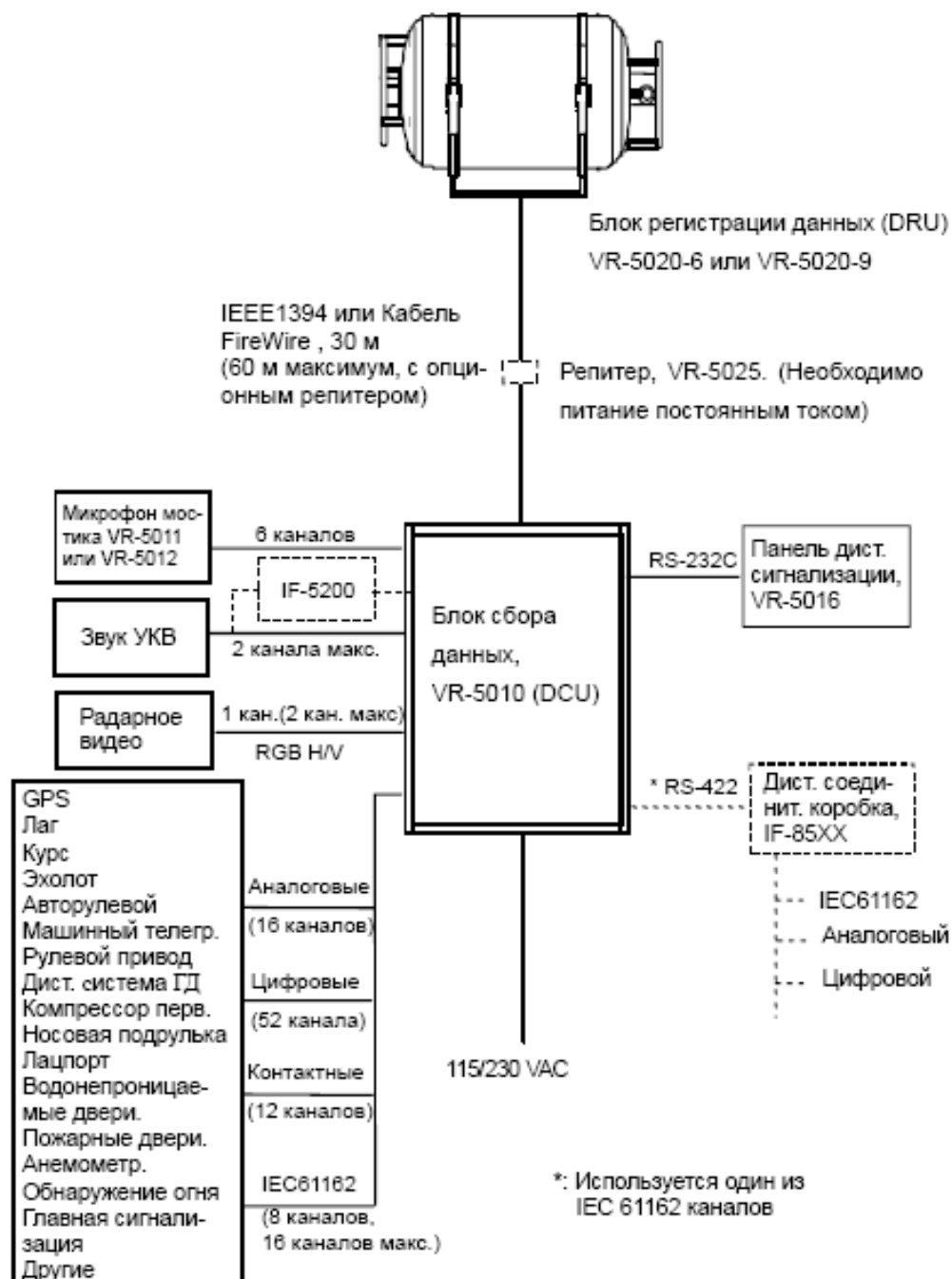
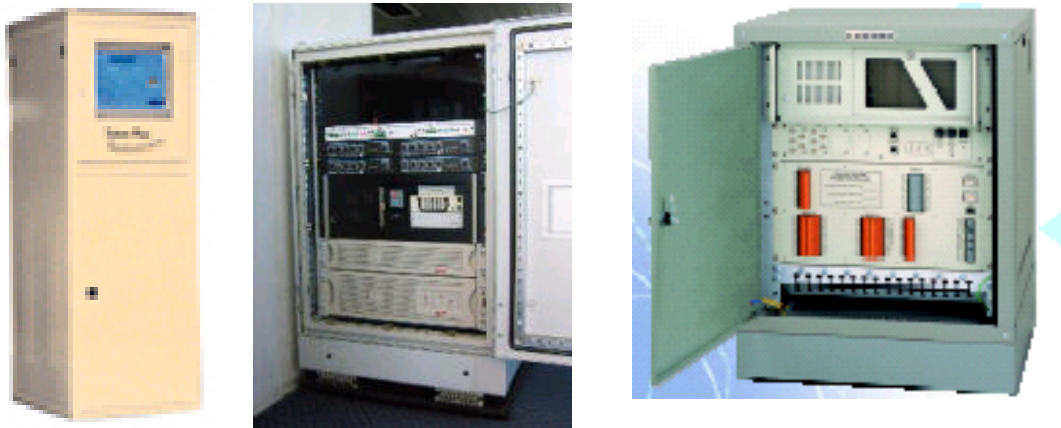


Рис.1.33 Структурна схема типового VDR на прикладі реєстратора даних рейсу типа VR-500.

16 послідовних каналів і до 16 дискретних каналів. Така різноманітність каналів обумовлена вихідними сигналами наявного цифрового устаткування:

1. **Аналогові сигнали** - можуть видаватися машинним телеграфом, авторульовим, датчиком напрямку і сили вітру і тому подібне. Вони можуть мати стандарт "струмової петлі" із зміною вихідного струму від 4.20 мА або від 0 до 5 мА. Від деяких пристроїв такі сигнали передаються значенням напруги, зазвичай від 0 до 10 В або від - 24 до +24 В.



a)



б)

Рис.1.34 Зовнішній вигляд DCU реєстраторів даних рейсу різних виробників (а) та приклад розташування блока DCU на мості (б)

Аналогові сигнали в блоці збору даних перетворюються в стандарти послідовних інтерфейсів.

2. **Цифрові сигнали** - можуть передаються по послідовному інтерфейсу за стандартом МЭК 611621, RS - 422 або Internet і поступають з виходів датчиків, забезпечених такими інтерфейсами, наприклад від адресних цифрових протипожежних датчиків.
3. **Контактні сигнали** - можуть передаватися від різних датчиків наближення, які показують стани протипожежних перегородок, водонепроникних перегородок, лацпорта, протипожежних датчиків і тому подібне. Такі сигнали мають тільки 2 стани: "замкнено" або "розімкнено"

Вимоги до конструкції відповідають вимогам до радіонавігаційного устаткування, що працює в морських умовах (міра захисту повинна відповідати класу не нижче IP21, діапазон робочих температур від - 40 до +55°C).

Встановлюється блок збору даних зазвичай на містку, що дозволяє зменшити довжину дротів, що підводять, і полегшити експлуатацію реєстратора. Приклад установки блоку збору даних на містку наведений на рис.1.34.

Допуск до блоку збору інформації має обмежене коло осіб: капітан і декілька чоловік, призначених судновласником або компанією, тому блок збору інформації надійно закривається, а часто і опечатується. Судновласник має право на отримання інформації з реєстратора даних рейсу в будь-який час.

1.7.9 Захищений накопичувач інформації

Другим основним блоком реєстратора даних рейсу є захищений накопичувач інформації - блок, який зберігає в зовнішній пам'яті дані, які поступають з базового блоку збору даних (**DRU - data registration unit**).

1.7.9.1. Основні вимоги

Згідно з міжнародним стандартом IEC 61996-1:2007 кінцевий носій запису має бути поміщений в спеціальну захисну капсулу. Ця капсула має бути сконструйована так, щоб вона залишалася на судні за будь-яких обставин. Альтернативний варіант конструкції - її можна зробити автоматично спливаючою в місці затоплення судна, якщо це сталося.

Капсула повинна дозволити доступ до себе після нештатної ситуації, але бути захищеною від несанкціонованого проникнення всередину її.

Капсула повинна містити в собі кінцевий носій запису. Кінцевий носій запису не має бути доступний в ході виконання звичайних операцій в ході експлуатації судна. Необхідно передбачити засоби для витягання записаної інформації за допомогою зовнішнього пристрою без відкриття захисної капсули.

Конструкція капсули, що містить кінцевий носій запису, повинна передбачати установку її на відкритій палубі судна. Капсула може бути сконструйована так, щоб ні за яких обставин не відділятися від судна, або її

можна зробити автоматично спливаючою в місці затоплення судна, якщо це сталося.

Конструкція капсули повинна забезпечувати захист записаних даних від наступних дій (міра захисту не нижче IP56) :

- **ударного навантаження** - зазвичай напівсинусоїдальний удар при прискоренні до 50 g і тривалість 11 мс. (МЭК 60068-2-27);
- **проникнення всередину (пробій)** - звичайне проникнення з силою 250 кг з штирем діаметром 100 мм, що падає з висоти 3 м (стандарт ED56A);
- **вогню** - зазвичай випробовується при пожежі 60 хвилин при температурі 1100°C і при пожежі 10 ;годин при температурі 260°C
- **тиски на глибині при зануренні** - зазвичай при глибоководному зануренні в море на 6000 м (60 МПа) впродовж 24 годин (тільки для



а)



б)



Рис.1.35 Вигляд захищеного накопичувача інформації та модуля FLASH-пам'яті цього пристрою після низькотемпературної (а) та високотемпературної пожежі (б).
Модуль зберіг свою працездатність

стаціонарної захисної капсули), і мілководе занурення в море на 3 м (3 кПа) впродовж 30 діб.

Вказані вимоги досить жорсткі. На рис.1.35 приведений DRU стаціонарної конструкції після високотемпературної пожежі, що зберегла свою працездатність.

Капсула, а також будь-яка її зовнішня оболонка мають бути забарвлені в добре видимий флуоресцентний помаранчевий колір і мати маркування світловідбиваючими матеріалами, що відповідає відповідним вимогам Резолюції IMO A.658, а також мати наступний напис:

"VOYAGE DATA RECORDER - DO NOT OPEN - REPORT TO AUTHORITIES" (РЕЄСТРАТОР ДАНИХ РЕЙСУ - НЕ ВІДКРИВАТИ - ПОВІДОМИТЕ ОРГАНИ ВЛАДИ) (рис.1.36).



Рис. 1.36 Розташування попереджувального надпису на блоці DCU, який спливає (ліворуч) та стаціонарного (праворуч) типу

Капсула має бути оснащена пристроєм, що допомагає визначити її місце розташування. Як зафіксована, так і вільно спливаюча конструкція повинна включати акустичний підводний маяк. У разі захисної капсули, призначеної для вільно спливаючого режиму роботи, вона також повинна мати відповідний радіопередавач і джерело світла.

Для повних VDR використовується стаціонарна захисна капсула, а для S-VDR може використовуватися як стаціонарна так і спливаюча (float free) захисна капсула (взаємозамінні).

Вимоги до захисної капсули можуть дещо змінюватися в залежності від конструкції захисної капсули і типу реєстратора даних рейсу (таблиця 1.3).

Таблиця 1.3 Порівняння захисних капсул VDR та S-VDR

Вимоги до аварійного модулю	VDR	S-VDR закріплений	S-VDR вільно спливаючий
Удар	+	+	+
Руйнування	+	X	X
Тривала дія високої температури	+	+	X
Максимальна температура	+	+	X
Занурення в солону воду	Вільно спливаюча	X	+
Глибоководний тиск	Закріплена	+	X

Захисна капсула має бути обладнана гідроакустичним підводним маяком, що працює в частотному діапазоні 25-50 кГц, має батарею ємністю на 30 днів роботи і вимогам стандарту SAE AS 8045, що відповідають. Наприклад, гідроакустичний маяк захисної капсули VR - 5000 повинен включатися автоматично при попаданні у воду і випромінювати імпульси тривалістю 10 мс на частоті 37,5 кГц в протязі не менше 30 діб кожні 50 сек.

Капсули вільно спливаючого виконання повинні також бути оснащені радіопередавачем, відповідним міжнародним вимогам і передавальним сигналами, вживані для визначення положення (наприклад, ІМО А.810, ІМО А.812, МСЭ-R М.632-3 і МСЭ-R М.633-1). Капсула також має бути обладнана джерелом світла, згідно відповідним вимогам ІМО А.689. Термін служби батареї при живленні радіопередавача і джерела світла має бути не менше 7 днів. Характеристики плавучості захисної капсули у вільно спливаючому виконанні мають бути достатніми для того, щоб радіоантена випромінювала в основному півсферичний і вертикально поляризований сигнал. Вільно спливаюча захисна капсула має бути сконструйована так, щоб необхідний сигнал забезпечувався при хвилюванні відкритого моря до 7 балів (що еквівалентно 10 балам за вітровою шкалою Бофорта). Наприклад, спливаюча захисна капсула S - VDR KH MantaDigital має радіомаяк, що працює на частоті 121,5 МГц, випромінюючи аварійний сигнал кожні 50 сек впродовж 10 діб.

Конструкції захисних капсул стаціонарного і спливаючого типу різних виробників приведені на рис.1.37.



Рис.1.37. Конструкції захисної капсули стаціонарного типу різних виробників

Варіанти установки на судні захисних капсул стаціонарного і спливаючого типу приведені на рис.1.38.



Рис. 1.38 Встановлення захисної капсули стаціонарного типу на судні

1.7.9.2 Структурна схема DRU

З вимог ІМО, що пред'являються до записуючого пристрою можна представити структурну схему цього блоку як показано на рис.1.39.

Функціонально блок записуючого пристрою ЗН_МС_1 складається з трьох вузлів:

- модуля центрального процесора (наприклад, CML27686HX формату PC/104_Plus), що містить вбудовувану флеш_пам'ять (наприклад, DiskOnChip 2000 фірм SanDisk) об'ємом 256.1024 Мбайт зі встановленою робочою програмою блоку ЗН_МС_1;
- модуля інтерфейсного модуля центрального процесора, що забезпечує сполучення, із захищеним модулем пам'яті ЗМП1_2;
- захищеного модуля пам'яті ЗМП1_2, що містить звичайні 8 мікросхем флеш-пам'яті ємністю 256.1024 М 16_розрядних слів кожна), які забезпечують зберігання такою, що поступає в ЗН_МС_1 інформації, а також запис/прочитування інформації по командах від модуля центрального процесора.

В якості операційної системи зазвичай використовується Windows XP Embedded.

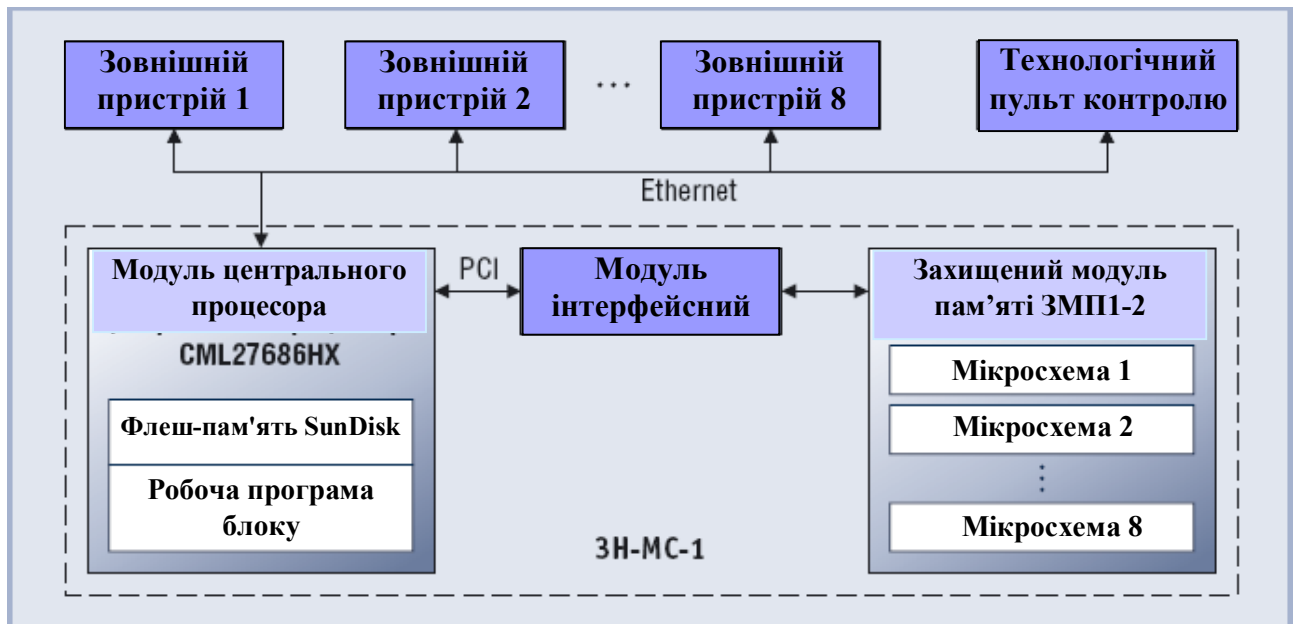


Рис.1.39 Структурна схема записуючого пристрою DRU

Встановлений в ЗН_МС_1 модуль центрального процесора CML27686HX PC/104_Plus фірми RTD Embedded Technologies, Inc. працює в розширеному температурному діапазоні (- 40.+85°C) і містить:

- мікропроцесор Geode GX1 MMX з тактовою частотою 300 МГц;
- ОЗУ ємністю 128 Мбайт;
- SSD - роз'їм для встановлення зовнішнього пристрою (в якості зовнішнього пристрою, що запам'ятовує, використовується флеш-диск DiskOnChip 2000), що запам'ятовує;
- порт Ethernet 10/100Base_T/TX;
- два порти USB 1.0;
- два послідовні порти RS_232/422/485, що конфігуруються;
- 16_бітовий програмований цифровий порт введення/виводу;
- 8_бітовий програмований цифровий порт введення/виводу;
- стандартний порт клавіатури;
- порт PS/2 маніпулятори "миша";
- порт виходу на стандартний динамік;
- годинник реального часу;
- сторожовий таймер.

Модуль має достатню швидкодію, великим об'ємом вбудованої і зовнішньої пам'яті (що, до речі,, розвиненою периферією і забезпечує:

- прийом/видачу інформації по шині Ethernet 100Base_TX (протокол TCP/IP);
- обробку прийнятої інформації;
- видачу команд на запис інформації в захищений модуль пам'яті ЗМП1_2;
- видачу команд на зчитування інформації із захищеного модуля пам'яті ЗМП1_2;

- організацію самоконтролю працездатності ЗН_МС_1 з видачею відповідних повідомлень при відмові блоку.

1.7.9.3 Загальні характеристики DRU

Об'єм пам'яті ЗН_МС_1 складає 4.8 Гбайт. Увесь об'єм пам'яті може бути розбитий на окремі зони (від 1 до 8) довільної довжини із статусом запису "масив" або "кільце".

Зона із статусом запису "масив", як правило, використовується для зберігання різного роду ідентифікаційних даних і припускає одноразовий запис в неї певного структурованого набору інформації, який в наступному не оновлюється і використовується тільки в режимі прочитування. При записі нового масиву попередня інформація автоматично стирається.

Зони із статусом запису "кільце" є основними зонами реєстрації даних рейсу і припускають безперервний, не обмежений в часі запис інформації, що поступає, при чому після заповнення усього об'єму такої зони подальший запис здійснюється "поверх" найстарішого запису з попереднім її стиранням.

ЗН_МС_1 забезпечує прийом і реєстрацію наступної інформації :

- набір даних ідентифікації (ДИ), який постійно залишається на носіїв ЗН_МС_1 увесь час експлуатації і захищений паролем від внесення змін з боку кого-небудь, окрім уповноваженої особи; масив ДИ реєструється (записується) при пуско-налагоджувальних або регламентних роботах;

- набір службової інформації, який формується у міру вступу службової інформації від БСПИ_МС_1 під час штатної роботи У_РДР, (дані про факт і час спроб несанкціонованого втручання в роботу У_РДР

дані про факт і час створення копії даних на жорсткому диску БСПИ_МС_1 і так далі);

- набір даних рейсу, який повинен формуватися у міру вступу даних від БСПИ_МС_1 в режимі "кільце" і забезпечувати накопичення інформації за останні 12 годин; дані рейсу поступають на ЗН_МС_1 у вигляді інформаційних кадрів і реєструються в порядку вступу, об'єм пам'яті для реєстрації даних рейсу складає 3,5 Гбайт.

Перший з перерахованих наборів даних має статус "масив", два інших - статус "кільце". Після повного або часткового зчитування даних будь-якого з цих трьох наборів представляються у вигляді файлу, з яким можна працювати як стандартними засобами операційної системи, так і за допомогою спеціальних технологічних програм.

Втрати (спотворення) реєстрованої ЗН_МС_1 інформації не перевищують 1 біт на 108 біт. ЗН_МС_1 здійснює постійний контроль кількості збоїв і при перевищенні допустимого рівня видає повідомлення на БСПИ_МС_1. Також накопичувач здійснює автоматичний вбудований контроль працездатності з видачею сигналу "Відмова" в БСПИ_МС_1 при визначенні несправності. ЗН_МС_1 забезпечує читання будь-якого набору зареєстрованої інформації при вступі команди від БСПИ_МС_1 або від зовнішнього комп'ютера (КПА) і

передачу його до БСПИ_МС_1 або до зовнішнього комп'ютера. При цьому забезпечується захист від несанкціонованого доступу до записаних даних.

1.7.9.4 Орієнтовний розрахунок необхідного об'єму записуючого пристрою DRU

Із сказаного вище виходить, що об'єм записуваної інформації можна розділити на 3 різні потоки:

1. Потік мовних сигналів, які записуються з мікрофонів і УКХ радіостанцій.
2. Потік відеосигналів, які записуються з екрану радару.
3. Потік інформаційних сигналів, які записуються в послідовному коді у форматі ASCII (інші параметри).

Визначимо орієнтовно об'єм записуючого пристрою для кожного з вказаних потоків.

Розрахунок об'єму записуючого пристрою потоку мовних сигналів

Згідно з міжнародним стандартом IEC 61996-1:2007 мовні сигнали від мікрофонів і УКХ радіостанцій повинні записуватися безперервно за типом "кільце" з періодом запису не менше 12 годин, при цьому рекомендується формат запису мовних сигналів у форматі .wav (зберігання нестислих аудіо-записів).

З урахуванням того, що частотний діапазон мікрофонів рекомендується в межах від 150 Гц до 5000 Гц, частота вибірки має бути не менше $5000 \cdot 2 = 10\,000$ Гц. Згідно із стандартом частота вибірки для таких сигналів складає 11 025 Гц.

З урахуванням того, що частотний діапазон УКХ радіостанцій рекомендується в межах від 150 Гц до 3500 Гц, частота вибірки має бути не менше $3500 \cdot 2 = 7\,000$ Гц. Згідно із стандартом частота вибірки для таких сигналів складає 8820 Гц. Для орієнтовних розрахунків виберемо однакову частоту вибірки для мовних сигналів з мікрофонів і УКХ радіостанцій яка буде дорівнювати 11 025 Гц.

Динамічний діапазон обох типів мовних сигналів має бути не менше 48 дБ для якісного запису мовних сигналів дискретизації 256 рівнів (1 байт) недостатньо, тому зазвичай використовується дискретизація 65536 рівнів (2 байти) (рис.1.40).

Тоді для збереження 1 сек записи мовних сигналів від одного джерела звуку потрібний об'єм $11\,025 \cdot 2 = 22\,050$ байт, а для збереження 12 годинного запису у форматі .wav знадобиться об'єм $22\,050 \cdot 3600 \cdot 12 = 952\,560\,000$ байт $= 0,887$ Гбайт.

У мінімальному комплекті S-VDR записуються 2 джерела мовних сигналів : від мікрофону – 1 шт, від УКХ-радіостанції – 1 шт. Тоді мінімальний об'єм пам'яті повинен складати $0,887 \cdot 2 = 1,77$ Гбайт.

У максимальному комплекті VDR записуються 8 джерел мовних сигналів: від мікрофону – 6 шт, від УКХ-радіостанції – 2 шт. Тоді максимальний об'єм пам'яті повинен складати $0,887 \cdot 8 = 7,097$ Гбайт.

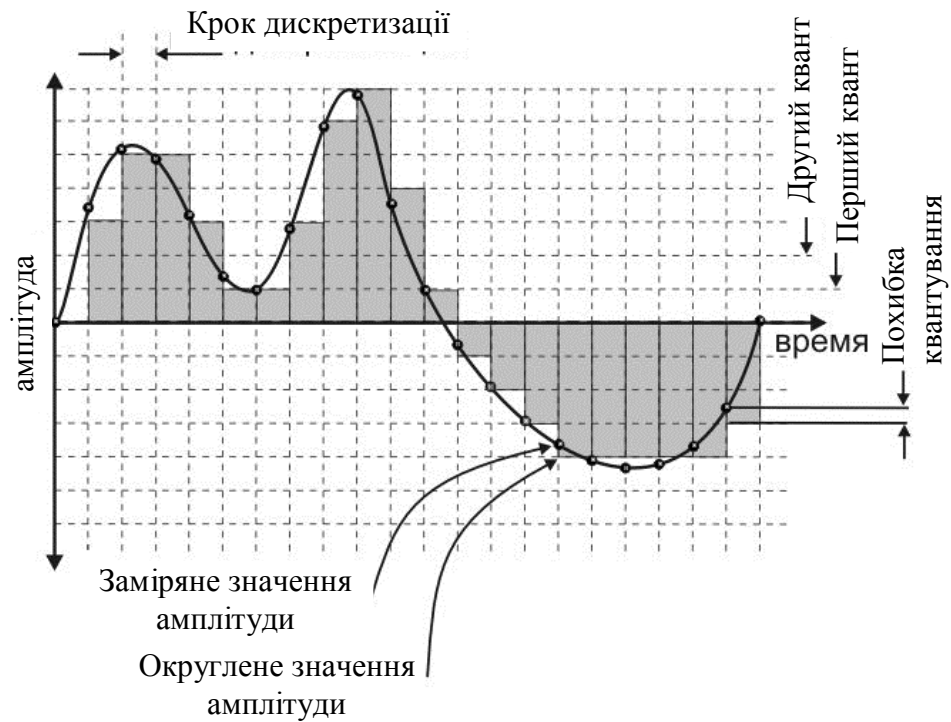


Рис.1.40 До пояснення переводу аналогового мовного сигналу у цифрову форму

Таким чином, при використанні формату .wav (зберігання нестислих аудіо-записів) об'єм записуючого пристрою від 1, 77 до 7, 097.

При використанні стискування цих сигналів без втраті якості цей об'єм буде зменшений в середньому на 30 % і складе від 1,36 до 5,459 Гбайт.

При використанні стискування згідно з форматом MP3 (з втратою якості) об'єм буде зменшений в середньому в 10 разів (від 7 до 30 разів), тоді необхідний об'єм запису мовного сигналу складе від 0,177 до 0,7097 Гбайт.

Розрахунок об'єму записуючого пристрою потоку відео сигналів

Згідно з міжнародним стандартом ІЕС 61996-1:2007 відео сигнали від радара повинні записуватися кожні 15 секунд за типом "кільце" з періодом запису не менше 12 годин, при цьому рекомендується формат запису відео сигналів у форматі .bmr (зберігання нестислих відео-записів).

З урахуванням того, що розмір картинки екрану радара може складати 640x350 або 1280x1024 пікселів, а градація рівнів складатиме 256 (1 байт), можна розрахувати об'єм пам'яті, необхідний для збереження одного екрану зображення.

1. Дозвіл екрану 640x350 пікселів (низька якість).

Об'єм одного екрану для чорно-білого зображення, що зберігається у форматі .bmr (зберігання нестислих відео-записів), складе: $640 \times 350 = 224000$ байт. Тоді для 12 годинного періоду запису цей об'єм складе: $224000 \times 4 \times 60 \times 12 = 645120000$ байт = 0,601 Гбайт. Для кольорового зображення об'єм буде в 3 рази більше і складе $0,601 \times 3 = 1,803$ Гбайт.

2. Дозвіл екрану 1280x1024 пікселів (висока якість).

Об'єм одного екрану для чорно-білого зображення, що зберігається у форматі .bmr (зберігання нестислих відео-записів), складе: $1280 \times 1024 = 1310720$ байт.

Тоді для 12 годинного періоду запису цей об'єм складе: $1310720 \times 4 \times 60 \times 12 = 3774873600$ байт = 3,52 Гбайт. Для кольорового зображення об'єм буде в 3 рази більше і складе $3,52 \times 3 = 10,56$ Гбайт.

Якщо зберігати відеоінформацію в стислому виді згідно з форматом .jpeg, то об'єм інформації, що зберігається, зменшується в середньому в 10 разів (від 7 до 50 разів) і складе:

1. Дозвіл екрану 640x350 пікселів (низька якість).

$0,0,601$ Гбайт: $10 = 0,0601$ Гбайт для чорно-білого зображення або $1,803$ Гбайт: $10 = 0,1803$ Гбайт для кольорового зображення

2. Дозвіл екрану 1280x1024 пікселів (висока якість).

$3,52$ Гбайт: $10 = 0,352$ Гбайта для чорно-білого зображення або $10,56$ Гбайт: $10 = 1,056$ Гбайт для кольорового зображення.

Таким чином, мінімальний об'єм записуючого пристрою (дозвіл 640*350, чорно-біле зображення) при збереженні у форматі .bmp (зберігання нестислих відео-записів) складе 0,601 Гбайт, а максимальний об'єм (дозвіл 1280*1024, кольорове зображення) досягне 10,56 Гбайт, а при збереженні у форматі .jpeg відповідно складе 0,0601 Гбайт і 1,056 Гбайт.

Розрахунок об'єму записуючого пристрою потоку інформаційних сигналів

Потік інформаційних сигналів, які записуються в послідовному коді у форматі ASCII визначається числом послідовно записуваних байт (від 24 до 48 байт) з середнім значенням 32 байти. Кількість записуємих параметрів таких сигналів в S-VDR складає мінімум 5 шт, а в повному VDR досягає 13 шт. Дискретність виміру параметрів складає 1 секунда за типом "кільце" з періодом запису 12 годин.

Тоді для S-VDR мінімальної конфігурації об'єм записуваних даних складе: $32 \times 5 \times 3600 \times 12 = 6912000$ байт = 0,0064 Гбайт, а для повного VDR максимальної конфігурації об'єм записуваних даних складе: $32 \times 13 \times 3600 \times 12 = 17971200$ байт = 0,0167 Гбайт.

Розрахунок повного об'єму записуючого пристрою

Виходячи із сказаного, можна визначити мінімальний і максимальний об'єм записуючого пристрою блоку DRU (таблиця 1.4), враховуючи вимогу необхідності мати 3 незалежних копії даних.

Таблиця 1.4 Розрахунок об'єму записуючого пристрою, в Гбайт

Тип сигналу	Тип реєстратора даних рейсу			
	S - VDR		VDR	
	Без компресії	З компресією в 10 разів	Без компресії	З компресією в 10 разів
Мовні сигнали	1,77	0,177	7,097	0,7097
Відео сигнали	1,803	0,1803	10,56	1,056
Інформаційні сигнали	0,0064		0,0167	
Об'єм 1 екз. запису	3,58	0,3637	17,67	1,767
Об'єм 3 екз. запису	10,74	1,09	53,01	5,34

Аналіз даних цієї таблиці показує, що запис даних без компресії вимагає істотного об'єму пам'яті (від 10 до 50 Гбайт), що знижує надійність пристрою запису і збільшує його вартість. Зберігання записів в стислому виді дозволяє істотно понизити необхідний для зберігання об'єм пам'яті (від 1,1 до 5,35 Гбайт), а також вартість записуючого пристрою і, тому, поширено застосовується.

Контрольні питання до розділу 1

1. Приведіть визначення та пояснить поняття автоматичної та автоматизованої системи. Визначить роль процесу моніторингу в них.
2. Опишіть алгоритм прийняття рішення в системі автоматичного управління. Наведіть приклад такої системи на судні.
3. Опишіть алгоритм прийняття рішення в системі автоматизованого управління. Наведіть приклад такої системи на судні.
4. Приведіть визначення інтерфейсу системи. Які типи інтерфейсів використовують в судових системах. Опишіть принцип їх роботи.
5. Опишіть структуру інтерфейсу RS485. Які у нього переваги та недоліку?
6. Що таке інтерфейс Ethernet. Як вирішується в ньому колізії? Як організується напівдуплексний режим роботи?
7. Опишіть інтегровану систему судна. Наведіть приклади її основних підсистем.
8. Що таке інтегрована система ходового мостика? Яке місце вона займає у інтегрований системі судна?
9. Яким чином виконується захист інформаційної системи судна? Для чого він потрібен?
10. Наведіть структурна схему моніторингу параметрів судових енергетичних систем. Пояснить призначення елементів системи.
11. Які основні параметри судових енергетичних систем відображаються в інтегрований системі ходового мостика? Пояснить чому?
12. Приведіть принцип дії індуктивних датчиків обертання валу. Вкажіть їх переваги та недоліки.
13. Приведіть принцип дії датчиків обертання валу на основі тензорезисторів. Вкажіть їх переваги та недоліки.
14. Приведіть принцип дії індуктивних датчиків виміру обертального моменту на валу. Вкажіть їх переваги та недоліки.
15. Приведіть принцип дії оптоелектронних датчиків виміру обертального моменту на валу. Вкажіть їх переваги та недоліки.
16. Приведіть принцип дії датчиків виміру обертального моменту на валу на основі тензорезисторів. Вкажіть їх переваги та недоліки.
17. Опишіть систему моніторингу стану корпусу судна. На використанні яких датчиків вона побудована?
18. Опишіть систему моніторингу енергетичного обладнання судна fleetECO.
19. Опишіть систему моніторингу енергетичного обладнання судна Ship Monitoring

20. Приведіть основні вимоги до оснащення суден реєстраторами даних рейсу згідно нормативним документам ІМО.
21. Приведіть основні вимоги до реєстраторів даних рейсу згідно нормативним документам ІМО.
22. Приведіть основні вимоги до до записуючого пристрою реєстраторів даних рейсу згідно нормативним документам ІМО..
23. Чим відрізняється S-VDR від VDR? На яких типах суден вони встановлюються? Відповідь обґрунтуйте.
24. Які дані по моніторингу головного двигуна та в якому форматі записуються в VDR згідно нормативним документам ІМО.
25. Які дані по основним аварійним сигналам та в якому форматі записуються в VDR згідно нормативним документам ІМО.
26. Які дані та в якому форматі записуються в S-VDR згідно нормативним документам ІМО.
27. Наведіть структурну схему S-VDR та поясніть призначення його вузлів.
28. Наведіть структурну схему VDR та поясніть призначення його вузлів.
29. Які типи вихідних сигналів датчиків обробляються блоком DCU? Поясніть призначення цього блоку.
30. Наведіть структурну схему блоку DRU та поясніть призначення його вузлів.
31. Як оцінити об'єм зберігаємої інформації від мовних сигналів?
32. Як оцінити об'єм зберігаємої інформації від відео сигналів?
33. Опишіть основні вимоги та правила розташування блоку DCU на судні згідно нормативним документам ІМО.
34. Опишіть основні вимоги та правила розташування захисної капсули на судні згідно нормативним документам ІМО.
35. Приведіть різницю в вимогах до стаціонарної та спливаючої захисної капсули згідно нормативним документам ІМО.
36. Які маяки мають спливаюча та стаціонарна захисна капсула? Для чого вони необхідні? Наведіть вимоги до їх роботи згідно нормативним документам ІМО.

2. Основні поняття штучних нейронних мереж

Дослідження по штучним нейронним мережам (нейроні мережі чи нейрокомп'ютери) пов'язані з тим фактом, що засіб обробки інформації мозком людини значно відрізняється від засобів, які використовуються при роботі звичайними цифровими комп'ютерами. Мозок людини уявляє собою дуже складний, нелінійний, паралельний комп'ютер (систему обробки інформації). Він має властивості організовувати свої структурні компоненти, які звать нейтронами, таким чином, щоб вони мали змогу обробити інформацію для вирішення конкретної задачі за короткий проміжок часу. В першу чергу швидкодія обробки інформації мозком людини – це значна ступень проведення паралельної обробки елементарної інформації значною кількістю нейронів, які пов'язані між собою зв'язками та наявністю власної бази знань, то що ми називаємо досвідом. Досвід накопичується з протіканням часу. Поняття розвитку нейронів пов'язано з поняттям пластичності мозку людини – здатності настроювання рецепторних гілок нейтронів відповідно зі станом зовнішнього середовища.

В штучних нейронних мережах робота також проводиться з використанням штучних нейронів. В загальному випадку нейрона мережа – це комп'ютер, який модулює засіб обробки мозком людини конкретної задачі. Ця мережа реалізується за допомогою електронних компонентів чи модулюється програмою на звичайному цифровому комп'ютері. Для підвищення швидкодії нейроні мережі використовують множину взаємозв'язків між елементарними комірками розрахунків – нейронами, тобто *нейрона мережа*, це дуже великий розподілений паралельний процесор, який складається з елементарних одиниць обробки інформації, які накопичують експериментальні знання і використовують їх для наступної обробки інформації.

Нейрона мережа подібна мозку людини з двох точок зору:

- Знання поступають у нейрону мережу з зовнішнього середовища і використовуються в процесі навчання.
- Для накопичення знань використовують зв'язки між нейронами, які звать синаптичними зв'язками з різними ваговими коефіцієнтами.

Процедура, яка використовується в процесі навчання зветься *алгоритмом навчання*. В ході навчання синаптичні зв'язки розміщуються в необхідному порядку згідно їх ваговим коефіцієнтам для забезпечення необхідної структури нейронів в нейронній мережі.

Таким чином усі переваги нейронних мереж пов'язані з:

1. Паралельного процесу обробки інформації.
2. Властивості самонавчання, тобто утворювати узагальнення – властивість отримувати обґрунтований результат на основі даних, які були відсутні в процесі навчання.

Використання нейронних мереж забезпечує наступні корисні властивості управляючих систем:

1. Нелінійність. Нейроні мережі, які побудовані на з'єднанні нелінійних нейронів також є нелінійними, причому нелінійність буде розподілена з

різною ступеню по всій мережі. Нелінійність є важливою властивістю, оскільки більша частина вхідних сигналів є нелінійною.

2. Відображення вхідної інформації в вихідну. Ця властивість поширено використовується в процесі навчання, коли зміна вагових коефіцієнтів синаптичних зв'язків виникає з набору різних вхідних сигналів. Тобто кожний приклад навчання складається з вхідного сигналу та відповідного йому необхідного відклику. Далі з множини вхідних сигналів випадково задається який приклад вхідних сигналів, а нейрона мережа модифікує вагові коефіцієнти синаптичних зв'язків, таки чином, щоб розходження між необхідним вихідним сигналом і вихідним сигналом, який був сформований нейронною мережею, був мінімальними згідно вибраному статистичному критерію. Навчання проводиться доки зміни вагових коефіцієнтів синаптичних зв'язків не будуть значно змінюватися. Таким чином, нейрона мережа навчається на прикладах, формуючи таблицю відповідності вхід – вихід для конкретної задачі.
3. Адаптивність. Нейронні мережі мають змогу адаптувати значення своїх вагових коефіцієнтів синаптичних зв'язків до можливих змін в зовнішньому середовищі. Тобто нейроні мережі, які навчалися до дії в конкретному середовищі, можуть бути легко перенавчені до роботи в умовах незначних коливань параметрів середовища.
4. Контекстна інформація. Знання в структурі нейронної мережі уявляють собою стан її активації. Кожний нейрон має змогу бути підвладним впливу усіх інших нейронів, тобто мати контекстну інформацію від інших нейронів в мережі.
5. Відмовостійкість. Штучні нейронні мережі, які побудовані на штучних нейронах на основі електронних засобів є потенційно відмовостійкими, оскільки якщо пошкоджений один нейрон, то з урахування розподілення інформації рівномірно по всій мережі, таке пошкодження не викличе значного пошкодження нейронної мережі. Тільки значні пошкодження здатні суттєво впливати на роботу нейронної мережі. Тому зниження якості роботи нейронної мережі буде повільним.
6. Ефективність реалізації. Паралельна структура роботи однакових елементів (нейронів) нейронних мереж достатньо просто реалізується використанням надвеликих інтегральних мікросхем (НВІС) та програмованих логічних елементах інтегральних схем (ПЛІС).
7. Одноманітність аналізу та проектування. Нейронні мережі є універсальним механізмом обробки інформації. Це означає, що одно і теж проектне рішення нейронної мережі може використовуватися для рішення різноманітних задач. Ця властивість проявляється декількома шляхами:
 - нейрони є стандартними елементами будь якої нейронної мережі;
 - однаковість штучних нейронів дозволяє використовувати однакові алгоритми навчання та роботи в різних нейронних мережах;
 - складні мережі можна будувати як модульні конструкції локальних мереж на основі інтеграції готових модулів

Але існує ряд проблем, які обмежують поширеному розповсюдженню нейронних мереж:

1. Більшість використовуваних нейронних мереж є мережі зворотного розповсюдження. Цей алгоритм має свої недоліки, і перш за все не існує гарантії, що нейронна мережа може бути навченою за кінцевий час, особливо якщо навчання повторюється без покращення кінцевого результату.
2. Немає певності, що мережа буде навчена найкращим шляхом («пастка» локального мінімуму похибки).
3. Інші алгоритми навчання нейронних мереж мають також свої недоліки та обмеження.
4. Існує проблема нездатності штучних нейронних мереж пояснити, як отримано кінцеве рішення, що ускладнює перевірку вірності кінцевого рішення при зміні вхідних параметрів.
5. Розробники нейронних мереж часто перебільшують свої успіхи, що може привести до негативного відношення до нейрокомп'ютерів та нейронних мереж.
6. Поширене використання штучних нейронних мереж для рішення задач, які пов'язані з людським життям чи управлінням важливих об'єктів можливе тільки тоді, коли будуть вирішені питання надійності штучних нейронних мереж. В наступний час можна казати тільки про елементи штучного інтелекту.

2.1 Біологічний нейрон

Нервову систему людини можна розглядати як трьохступінчасту (рис.2.1). Центром такої системи є мозок, який складається з мережі нейронів. Він отримує інформацію за допомогою рецепторів, аналізує її, і видає її за допомогою ефекторів. Рецептори перетворюють сигнали від тіла з зовнішнього середовища в електричні імпульси і видає їх в нейронну мережу (мозок). Ефектори перетворюють електричні імпульси, які генеруються нейронною мережею (мозком) в вихідні сигнали. Стрілки, які направлені з ліворуч на праворуч показують напрямлення прийому сигналів інформації в систему. Стрілки, які направлені з праворуч на ліворуч показують напрямлення передачі сигналів інформації з нейронної системи – зворотна реакція..

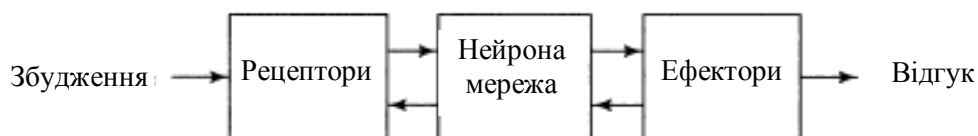


Рис.2.1 Блочна діаграма нервової системи людини

Швидкодія нейронів як правило на 5-6 порядків нижча швидкодії логічних елементів кремнієвих інтегральних мікросхем і складає звичайно декілька мілісекунд (10^{-3} с), тоді як в логічних елементах вона досягає декількох наносекунд (10^{-9} с). Але ця повільність біологічного нейрона компенсується їх значною кількістю і множиною зв'язків між ними. Нейронів в мозку людини налічується біля 10 більйонів ($10 \cdot 10^9$), а кількість взаємозв'язків між ними (синапсів) досягає 60 трильйонів ($60 \cdot 10^{12}$). При цьому енергетичні затрати мозку людини на виконання однієї операції складає 10^{-16} Дж, тоді як комп'ютер витрачає на це 10^{-6} Дж. В результаті цього мозок людини уявляє собою дуже ефективну структуру.

Існує багата кількість форм і розмірів біологічних нейронів, в залежності від їх розташування в мозку людини. На рис.2.2 наведений приклад пірамідальної клітки – найбільш розповсюдженної клітки в корі головного мозку

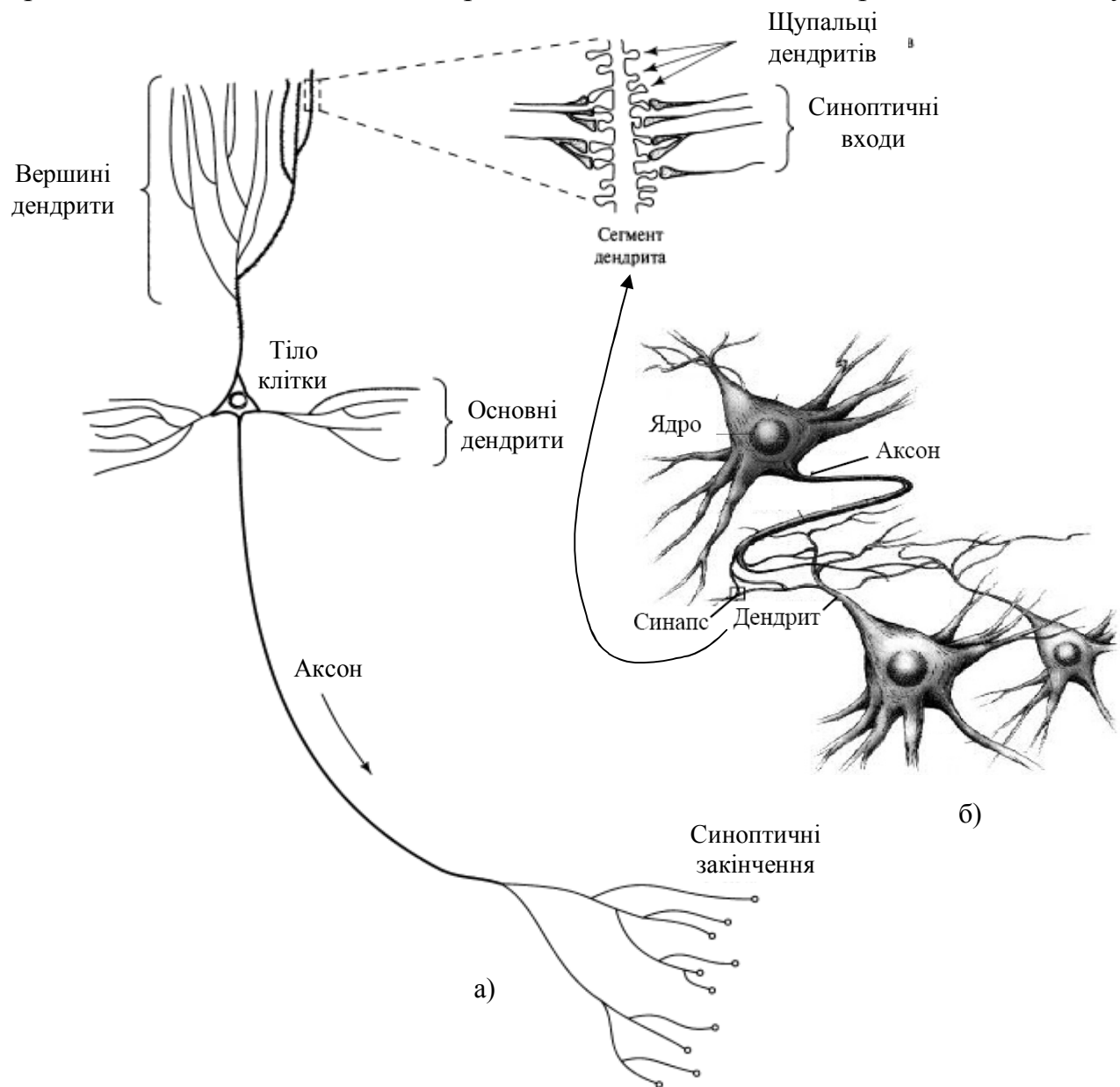


Рис.2.2 Біологічний нейрон пірамідального типу (а) та зв'язок окремих нейронів в корі головного мозку людини (б)

людини. Такий нейрон має ядро, відростки нервових волокон двох типів – дендрити (Dendrites) та один аксон (Axon).

Дендрити (свою назви отримали від форми, яка подібна дереву) мають нерівну поверхню з багатою кількістю розгалужених закінчень, і призначені для прийому сигналів (інформації) від зовнішнього середовища (Carries signals in).

Аксон – це єдиний шлях передавання нейроном вихідного сигналу (Carries signals away). Він має гладку поверхню, більш тонкі границі та значну довжину. Інформація передається по аксонах (рис. 2.2 б) у вигляді коротких електричних імпульсів, так званих потенціалів дії, амплітуда яких становить приблизно 100 мВ, а тривалість – 1 мс. Але не будь-який імпульс, що надійшов у нейрон по дендритах, передається на аксон. Лише за досягнення певного критичного (порогового) значення потенціалу, клітина генерує сигнал, що проходить по аксону до інших нейронів. Швидкість поширення нервового імпульсу по аксону досягає 100 м/с. Аксон контактує з дендритами інших нейронів за допомогою спеціальних утворень – синапсів.

Синапси (synapses) – це елементарні структурні і функціональні одиниці, які передають імпульси між нейронами звичайно в наслідок хімічних процесів і дифузії, тобто синапс перетворює пересинаптичний електричний сигнал в хімічний, а постсинаптичний хімічний сигнал в електричний. При описанні нейронної мережі синапси уявляють як просте з'єднання, яке може передавати збудження чи гальмування (але не одночасно) між нейтронами.

Структура, яка складається з сукупності великої кількості таких нейронів получила назву *біологічної нейронної мережі*.

Таким чином, всі процеси передачі сигналів від очей, вух, носу чи шкіри, процеси мислення і управління діями реалізовано в організмі людини як передача електричних імпульсів між нейтронами.

2.2. Штучний нейрон

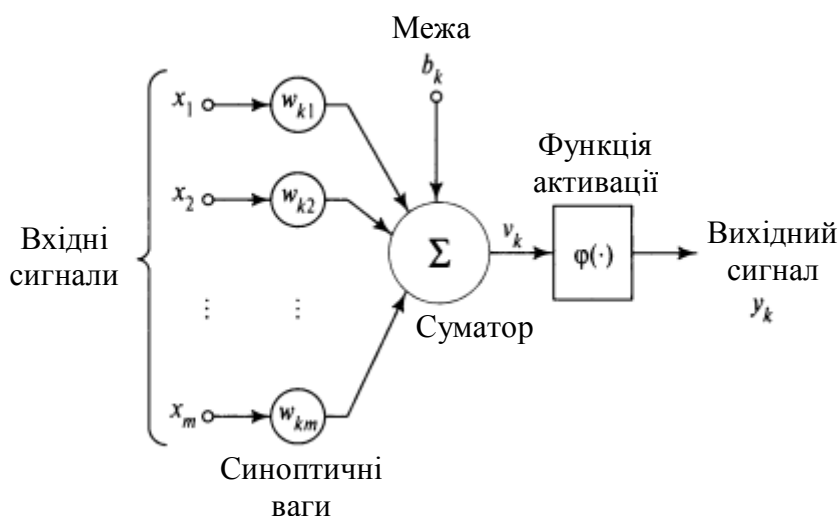


Рис.2.3 Нелінійна модель штучного нейтрону

Штучна нейронна мережа – це суттєво паралельно розподілений на штучні нейрони процесор, здатний зберігати і відтворювати досвідчене знання. Вона схожа з мозком людини у двох аспектах:

- мережа набуває знань у процесі навчання;
- для збереження знань мережа використовує сили між нейронних з'єднань (синаптичних ваг).

Штучний нейрон – це одиниця обробки інформації в нейронній мережі (рис.2.3). Нейрони уявляють собою відносно прості, однотипні елементи, які імітують роботу головного мозку. Кожний нейрон має групу синапсів (входів), які з'єднанні з виходами інших нейронів, а також аксон – вихід, з якого сигнали збудження або гальмування поступають на синапси інших нейронів.

В цій моделі можливо виділити три основних елемента:

1. Набор синапсів чи зв'язків. Кожний синапс характеризується величиною синаптичного зв'язку чи ваговим коефіцієнтом W_{kj} , який за фізичним сенсом еквівалентний електричній провідності. Перший індекс відноситься до даного нейрону, а другий – до вхідного закінчення синапса, з яким пов'язаний даний ваговий коефіцієнт. Для штучного нейтрона цей ваговий коефіцієнт може бути як позитивним, так і негативним.
2. Суматор, який підсумовує вхідні сигнали з відповідними ваговими коефіцієнтами. Цю операцію можливо описати лінійною комбінацією.
3. Функція активації (чи стискання), яка обмежує амплітуду вихідного сигналу нейтрона. Звичайно нормований діапазон амплітуд виходу нейтрону лежить в межах $[0,1]$ чи $[-1,1]$.
4. В модель нейтрона включений також межовий елемент, який позначений символом b_k . Це значення відображає збільшення чи зменшення вхідного сигналу, який подається на функцію активації.

Поточний стан нейрона визначається як зважена сума його входів:

$$u_k = \sum_{j=1}^m w_{kj} x_j \quad (2.1)$$

$$y_k = \varphi(u_k + b_k) \quad (2.2)$$

де $x_1, x_2, \dots, x_m$ – вхідні сигнали;

$w_{k1}, w_{k2}, \dots, w_{k1}, w_{km}$ – вагові синаптичні коефіцієнти нейрона k ;

u_k – лінійна комбінація вхідних сигналів;

b_k – поріг;

$\varphi(\dots)$ – функція активації;

y_k – вихідний сигнал нейтрону.

Використання межі b_k забезпечує ефект афінного перетворення виходу лінійного суматора u_k . Тоді пост синаптичний потенціал розраховується наступним шляхом:

$$v_k = u_k + b_k \quad (2.3)$$

В залежності від значення b_k можливий різний результат афінного перетворення (рис.2.4).

З урахуванням (2.3) вирази (2.1) та (2.2) можна переписати як:

$$v_k = \sum_{j=0}^m w_{kj} x_j \quad (2.4)$$

$$y_k = \varphi(v_k) \quad (2.5)$$

В виразі (2.4) додався ще один синапс. Його вхідний сигнал дорівнює:

$$x_0 = +1, \quad (2.6)$$

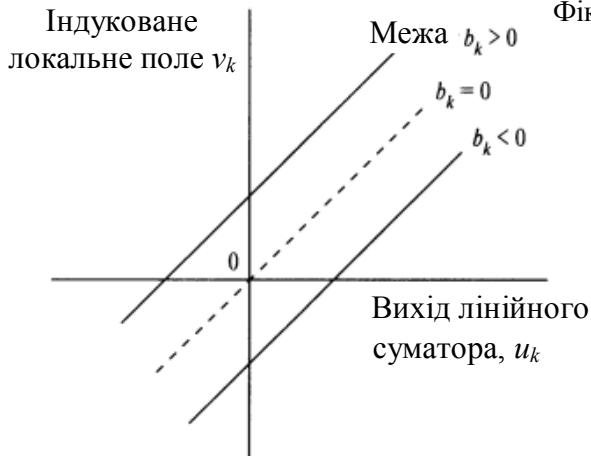


Рис.2.4 Афінне перетворення, яке викликано наявністю порогу b_k

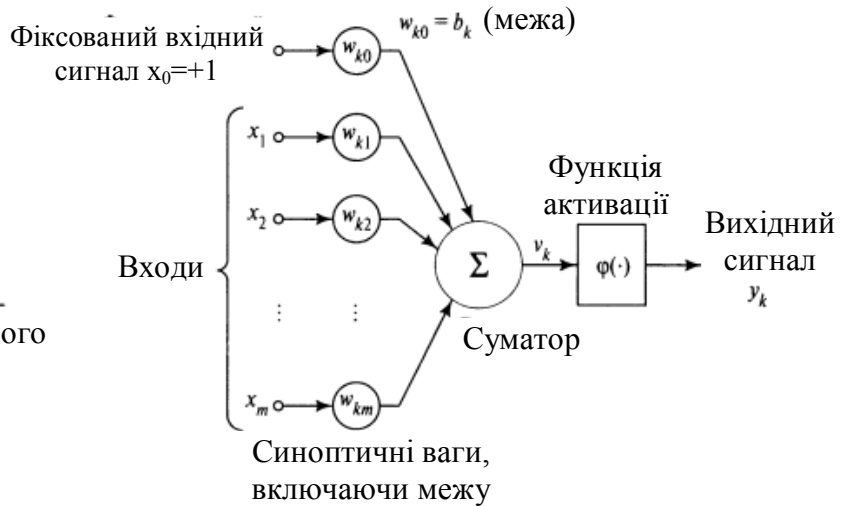


Рис.2.5 Варіант нелінійної моделі штучного нейрону

а його вага:

$$w_{k0} = b_k \quad (2.7)$$

Це дозволяє трансформувати модель нейтрона до виду наведеному на рис.2.5. У цій моделі додається ще один вхідний сигнал, фіксованого значення $+1$, але з синаптичною вагою b_k . Математично обидві моделі штучного нейрону, які наведені на рис.2.3 та рис.2.5 однакові.

2.3 Активаційна функція

Традиційно активаційні функції східчасті, тобто сигнал на виході нейрона з'являється тільки тоді, коли сумарний вхідний вплив перевищує певне порогове значення. Одна з умов реалізації якогось перетворення за допомогою штучних нейронних мереж – це *нелінійність* її активаційної функції.

Вихід нейрона є функція його стану $y = \varphi(v)$. Ця функція зветься *активаційною*, *стисливою* функцією або функцією *збудження*. Функції активації $\varphi(v)$ визначають вихідний сигнал нейрону в залежності від індукованого локального поля. Виділяють три основних типа активаційних функцій (рис.2.6):

1. **Функція одиничного скачку** чи **межова функція (threshold function)**. Цей тип функції показаний на рис.2.6 а і описується наступним чином:

$$\varphi(v) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } v \geq 0 \\ 0, & \text{якщо } v < 0 \end{cases} \quad (2.8)$$

Цю функцію звать також функцією Хевісайда. Відповідно вихідний сигнал нейрона описується виразом:

$$y_k = \begin{cases} 1, & \text{якщо } v_k \geq 0 \\ 0, & \text{якщо } v_k < 0 \end{cases} \quad (2.9)$$

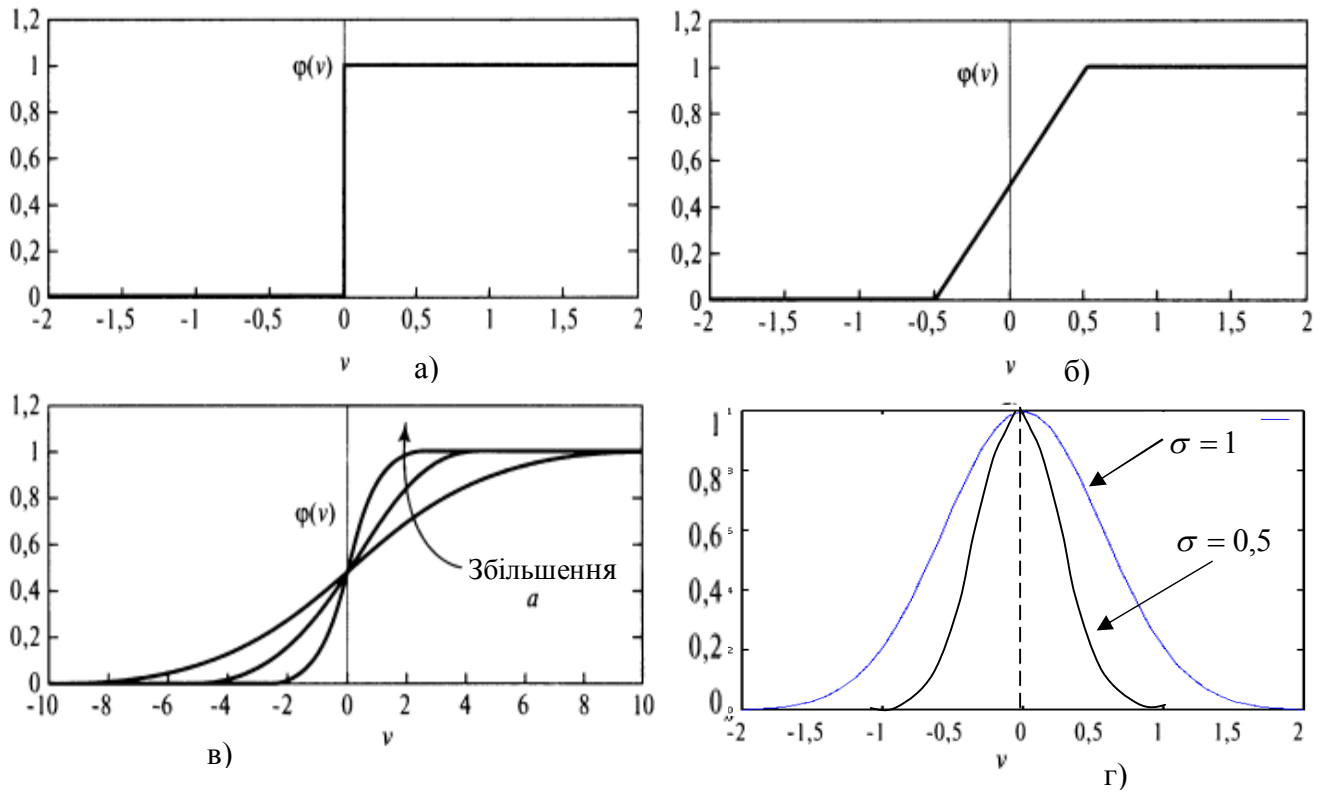


Рис.2.6 Варіанти активаційних функцій:
 а – функція одиночного скачку; б – кусково-лінійна функція;
 в – сигмоподібна логарифмічна функція для різних значень параметра a ;
 г – радіальна-базова функція гаусового типу

де v_k - індуковане локальне поле нейрона, тобто:

$$v_k = \sum_{j=1}^m w_{kj} x_j + b_k \quad (2.10)$$

В моделі Мак-Каллока-Питца вихідний сигнал нейрону приймає значення 1, якщо індуковане локальне поле нейрона не негативне, чи 0 - в протилежному випадку.

Якщо в нейронних мережах використовується функція одиночного скачку, то такі нейронні мережі звать *перцептронами*.

2. Кусково-лінійна функція (piecewise-linear function) наведена на рис.2.6 б і описується наступнім виразом:

$$\varphi(v) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } v \geq +\frac{1}{2} \\ |v|, & \text{якщо } +\frac{1}{2} > v > -\frac{1}{2} \\ 0, & \text{якщо } v < -\frac{1}{2} \end{cases} \quad (2.11)$$

де коефіцієнт підсилювання в лінійній області оператору дорівнює одиниці. Цю функцію можливо розглядати як апроксимацію нелінійного підсилювача. Можливі варіанти такої функції:

- якщо лінійна область не досягає порогу насичення, то он перетворюється в лінійний суматор(linear combiner);
- якщо коефіцієнт підсилювання в лінійній області безкінцеве великий, то кусково-лінійна функція перетворюється в межову функцію.

3. Сигмоподібна (sigmoid function), S-подібна чи логістична функція (logistic function) є найбільш поширеною функцію, яка використовується для побудови штучних нейронних мереж (рис.2.6 в). Сигмоподібна логарифмічна функція математично виражається як:

$$\varphi(v) = \frac{1}{1 + \exp(-av)} \quad (2.12)$$

Сигмоподібна тангенціальна функція математично виражається як:

$$\varphi(v) = \frac{2}{1 + \exp(-av)} - 1 \quad (2.13)$$

де a – параметр нахилу сигмоподібної функції.

Змінюючи цей параметр a можна будувати функції з функції різної крутизни. На рис. 2.6 в перший графік відповідає параметру $a/4$. Якщо цей параметр безкінцеве великий, то сигмоподібна функція перетворюється у межову, але якщо межова функція приймає тільки значення 0 та 1, то сигмоподібна функція приймає безкінцеву кількість значень в діапазоні від 0 до 1. При $a \rightarrow 0$ вона перетворюється в горизонтальну лінію. Слід відзначити, що сигмоподібна функція є диференційованою, тоді як межова – ні. Ця властивість відіграє значну роль в процесі навчання нейронних мереж.

Крім того сигмоподібна функція має властивість підсилювати малі сигнали краще ніж великі, що запобігає насиченню великих сигналів.

4. Радіально-базова функція активації. Ця функція приймає як аргумент відстань між вхідним вектором та деяким наперед заданим центром функції активації. Значення радіально-базової функції тим вище, чим менш відстань вхідного вектору до центру. Як радіально-базову функцію активації найчастіше використовують модифіковану функцію Гауса (рис.2.6 г):

$$\varphi(v) = \exp\left(-\frac{v^2}{\sigma^2}\right) \quad (2.12)$$

де σ – ширина вікна, яка визначає швидкість спадання функції при віддаленні від центра.

Нейрони, які використовують радіально-базові функції є радіально симетричними та поширено використовуються для рішення задач класифікації і є найбільш ефективними, якщо доступна значна кількість набору даних при навчанні.

Наведені активаційні функції найбільш вживані, але в жодному разі не перекривають усіх можливих.

2.4 Стохастична модель нейрона

Моделі нейрона, які наведені на рис.2.3 чи на рис.2.5 є детермінованими. Тобто перетворення вхідних сигналів у вихідний точно визначено для будь яких значень вхідного сигналу. Але іноді краще використовувати стохастичні моделі нейронів, в яких функція активації має імовірнісну інтерпретацію. В таких моделях нейрон може знаходитися в одному з двох станів; +1 чи -1. А рішення переключення стану нейрона приймається з урахуванням імовірності цієї події. Якщо позначити стан нейрону символом x , а імовірність активації нейрона функцією $P(v)$, то:

$$x = \begin{cases} +1, & \text{з імовірністю } P(v) \\ -1, & \text{з імовірністю } 1 - P(v) \end{cases} \quad (2.13)$$

де v - індуковане локальне поле нейрона,

а імовірність $P(v)$ описується сигноїдальною функцією наступного типу:

$$P(v) = \frac{1}{1 + \exp\left(-\frac{v}{T}\right)}, \quad (2.14)$$

де T – це аналог температури, який використовують для управління рівнем шуму, тобто ступенем невизначеності переключення.

Цей параметр управляє термальними флуктуаціями, які уявляють ефект синаптичного шуму. Якщо $T \rightarrow 0$, то стохастичний нейрон приймає детермінований вигляд нейрону згідно моделі Мак-Каллока-Питца.

2.5 Персептрон

У своїй найпростішій версії персептрон являє собою мережу нейронів з одним вхідним (S - нейрони), одним вихідним (R - нейрон) і одним прихованим (А-нейрони) шарами (рис. 2.7 а). S - нейрони це шар сенсорів чи рецепторів, кожний з яких може знаходитися у двох станах – спокою та збудження, причому тільки в стані збудження він передає сигнал асоціативним елементам (А-нейронам), які в свою чергу передають цей сигнал реагуючим елементам (R - нейрону). Формально А-нейрони прихованого шару та R – нейрон є суматорами з порогом. А-нейрон активізується, якщо сигнали від S – нейронів на його вході перевищують деяке межеве значення w_0 . Сигнали від збуджених А-елементів в свою чергу передаються в вихідний шар (R - елемент), причому сигнал від i -го А-елемента передається з коефіцієнтом w_i , який зветься ваговим коефіцієнтом зв'язку. Таким же чином R – елементи підсумовують значення вхідних сигналів від А-елементів, які помноженні на відповідні вагові коефіцієнти. R-елемент, тобто персептрон видає 1, якщо лінійна форма перевищує поріг w_0 . Математично функцію на виході персептрона можливо записати як:

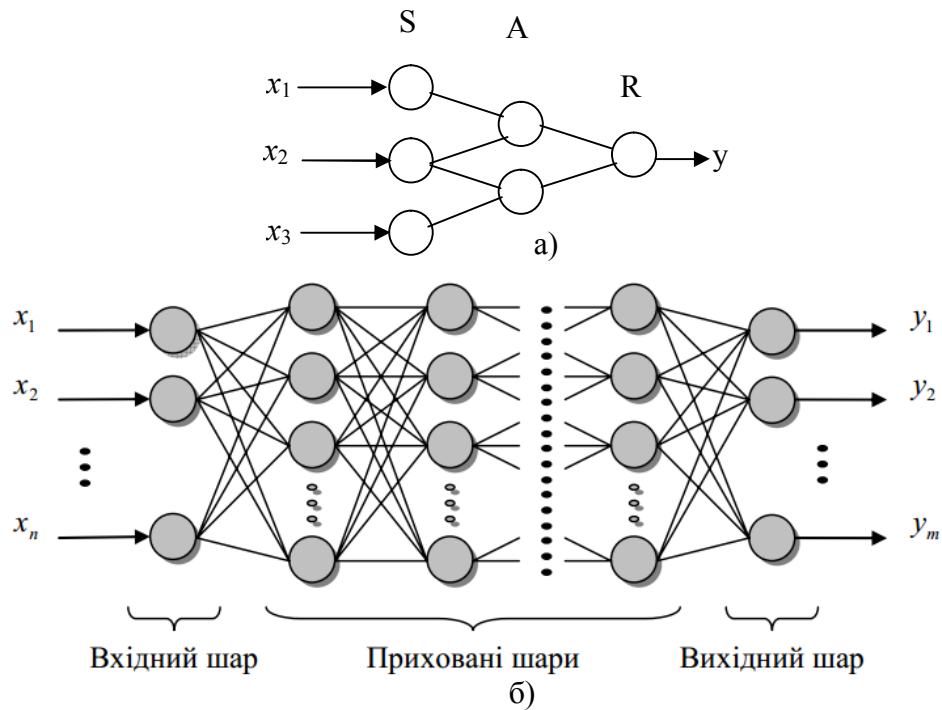


Рис.2.7 Модель простого (а) та багатошарового персептрона (б)

$$y = f(s) = f \sum_{i=1}^n (w_i x_i - w_0)$$

де x_i – i -тий вхідний сигнал

w_i – ваговий коефіцієнт – i -того синаптичного зв'язку;

s – вагова сума;

f – функція активації;

n – кількість входів;

Навчання персептрона складається у зміні вагових коефіцієнтів w_i синаптичних зв'язків А- R.

В більш складних моделях персептрона кількість прихованих шарів та елементів вихідного шару може бути декілька.

На рисунку 2.7,б приведена структура багатошарового персептрона, де кружками позначено нейрони, які мають входи і виходи. В загальному випадку вихід кожного нейрона шару ($i-1$) надходить на вхід кожного нейрона шару (i). Спільною ознакою для всіх багатошарових персептронів є пряма спрямованість передавання інформації від вхідного шару до вихідного через певну кількість прихованих шарів.

Модифіковані версії можуть мати прямі зв'язки між несуміжними шарами, зв'язки в межах одного шару, хаотичні зв'язки між шарами замість регулярних. Слід зазначити, що в інтелектуальних системах керування найбільшого поширення набули традиційні багатошарові персептрони.

2.6 Уявлення нейронних мереж за допомогою орієнтованих графів

Блочні діаграми моделі нейтронів, які наведені на рис.2.3, 2.5, 2.7, забезпечують функціональний опис різних елементів з яких складається модель штучного нейтрона. Зовнішній вигляд нейронних мереж можна значно спростити, якщо використовувати направлені графи проходження сигналів. Графи передачі сигналу в основному використовуються для опису лінійних мереж. Нелінійність в моделі нейрона обмежує область використання орієнтованих графів в нейронних мережах.

Граф передачі сигналу – це мережа направлених зв'язків, які з'єднують окремі вузли. З кожним вузлом j пов'язаний сигнал x_j . Звичайно направлений зв'язок починається в вузлі j і закінчується в другому вузлі k . З цим зв'язком пов'язана деяка передаточна функція, яка визначає залежність сигналу y_k вузла k від сигналу x_j вузла j .

Проходження сигналу по різним часткам графів підкоряється наступним основним правилам:

1. Направлення проходження сигналу вздовж кожного зв'язку визначається направленням стрілки. При цьому можливо виділити два типа зв'язків:
 - Синаптичні зв'язки (synaptic link). Їх поведінка визначається лінійним співвідношенням вхід-вихід, як показано на рис.2.8 а.
 - Активаційні зв'язки (activation link). Їх поведінка визначається нелінійним співвідношенням вхід-вихід, як показано на рис.2.8 б, де $\varphi(x)$ - нелінійна функція.
2. Сигнал вузла дорівнює алгебраїчній суми сигналів, які поступають на його вхід. На рис.2.8 в це правило показано для випадку синаптичної збіжності.
3. Сигнал даного вузлу передається по кожному первинному зв'язку без урахування передаточних функцій первинних зв'язків, як показано на рис.2.8 г для випадку синаптичної збіжності.

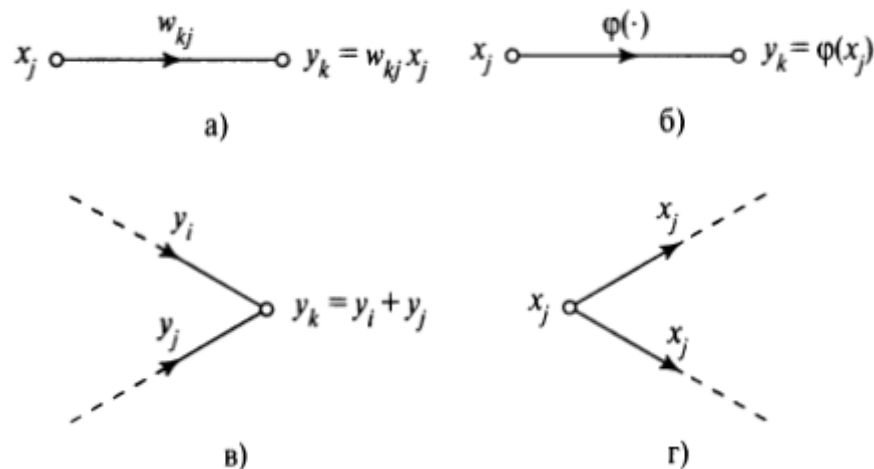


Рис.2.8 Основні правила побудови графів передачі сигналів

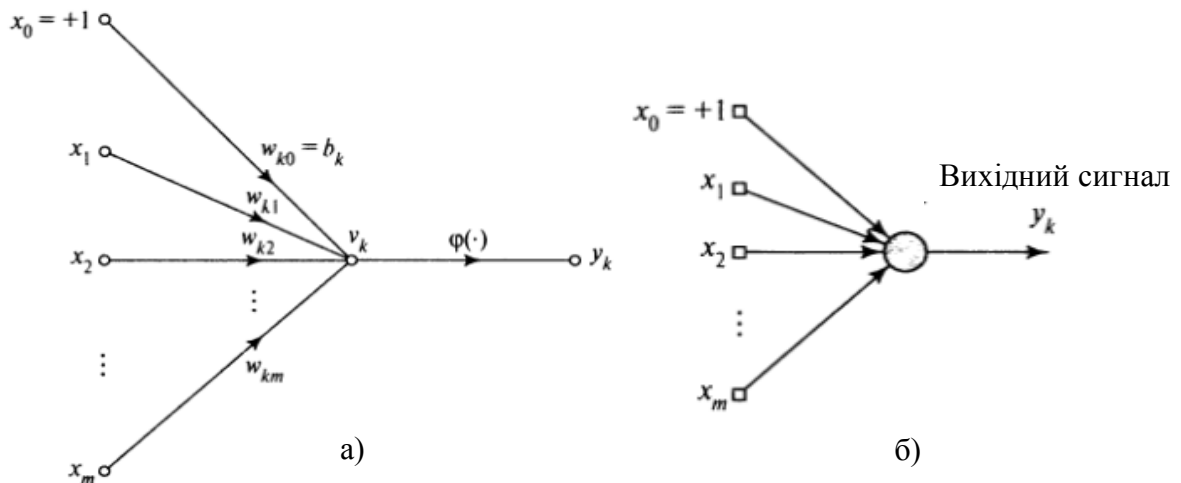


Рис.2.9 Повний (а) та частково повний (б) граф передачі сигналу одного нейрону, згідно моделі на рис.2.5.

На рис.2.9 а показаний приклад графу передавання сигналу для моделі нейрона, наведеної на рис.2.5, який значно просте діаграми на рис.2.5. З рис.2.9 можна сформулювати ще одне визначення нейронної мережі:

Нейрона мережа – це орієнтований граф, який складається з вузлів, з'єднаних синаптичними та активаційними зв'язками, що має наступні чотири властивості:

1. Кожний нейрон уявляє собою множину лінійних синаптичних зв'язків, має зовнішній поріг, і можливо нелінійний зв'язок активації. Поріг, який обумовлений вхідним синаптичним зв'язком приймається рівним +1.
2. Синаптичні зв'язки нейрона використовуються для завдання вагових коефіцієнтів відповідних вхідних сигналів.
3. Зважена сума вхідних сигналів визначає індуковане локальне поле, кожного конкретного нейрона.
4. Активаційні зв'язки модифікують індуковане локальне поле нейрону, утворюючи вихідний сигнал.

Стан нейрону можна визначити в термінах індукованого локального поля чи його вихідного сигналу. Приведений на рис.2.9 а граф є повним (complete), оскільки він описує проходження сигналів між нейронами, але і передачу сигналів в самому нейроні.

Якщо необхідно описувати проходження сигналу тільки між нейтронами, то використовують скорочену форм графа, в якому відсутні деталі передачі сигналів в нутрі нейрона (рис.2.9 б). Такий граф називають частково повним (partially complete) і він характеризується наступними властивостями:

1. Вхідні сигнали графу формуються вузлами джерела або вхідними елементами.
2. Кожний нейрон представлений одним вузлом, який зветься обчислюваним.
3. Лінії передачі сигналу, які з'єднують вузли-джерела та обчислюванні вузли, не мають ваги. Вони тільки показують напрямлення проходження сигналу в графі.

Частково повний граф описує структуру нейронної мережі. Простіший приклад такого графа, який складається тільки з одного нейрону з m входами та з фіксованим порогом, який дорівнює $+1$, приведено на рис.2.9 б. Тут обчислюваний вузол позначений заштрихованим кружком, а вузли джерела позначені квадратами.

Таким чином виділяють три графічних уявлення нейронних мереж:

1. Блочна діаграма, яка описує функції нейронної мережі.
2. Повний граф проходження сигналу, який описує повну передачу сигналу.
3. Частково повний граф (структурний), який описує тільки структуру нейронної мережі.

2.7 Зворотній зв'язок

Поняття зворотного зв'язку (feedback) характерно для динамічних систем чи управляючих систем, у яких вихідний сигнал якогось елемента оказує вплив на вхідний сигнал цього ж елемента. В наслідок цього деякі зовнішні сигнали змінюються під впливом внутрішніх сигналів системи. Зворотній зв'язок відіграє значну роль в рекурентних нейромережах..

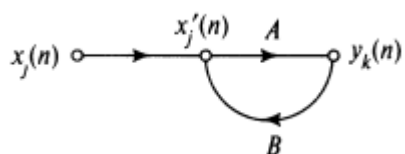


Рис.2.10 Граф передачі сигналу в системі з одним зворотним зв'язком

На рис.2.10 наведений граф проходження сигналу в системі з одним зворотнім зв'язком. В ній вхідний сигнал $x_j(n)$, внутрішній сигнал $x'_j(n)$ і вихідний сигнал $y_k(n)$ є функціями дискретної змінної n . Припускається що ця система лінійна, має прямий та зворотній зв'язки, який характеризуються операторами A і B , відповідно, тобто вихідний сигнал прямого каналу частково визначає значення каналу зворотного зв'язку. Тоді:

$$y_k(n) = A[x'_j(n)]. \quad (2.15)$$

$$x'_j(n) = x_j(n) + B[y_k(n)], \quad (2.16)$$

Виключаючи змінну $x'_j(n)$ в виразах (2.15), (2.16) маємо:

$$y_k(n) = \frac{A}{1 - AB} [x_j(n)], \quad (2.17)$$

Вираз $\frac{A}{1 - AB}$ звуть оператором замкнутого контуру системи, а вираз AB – оператором розімкненого контуру системи. В загальному випадку оператор AB не має властивості комутативності, тобто $B \cdot A \neq A \cdot B$.

Як приклад розглянемо систему, яка має один зворотній зв'язок (рис.2.11 а). Тут вважається, що A – це фіксована вага w , а B є оператором одиничного затримання z^{-1} , який затримує вихідний сигнал по відношенню до вхідного сигналу на один крок дискретизації.

Виходячи з цього оператор замкнутого контуру можливо уявити як:

$$\frac{A}{1 - AB} = \frac{w}{1 - wz^{-1}} = w(1 - wz^{-1})^{-1}, \quad (2.18)$$

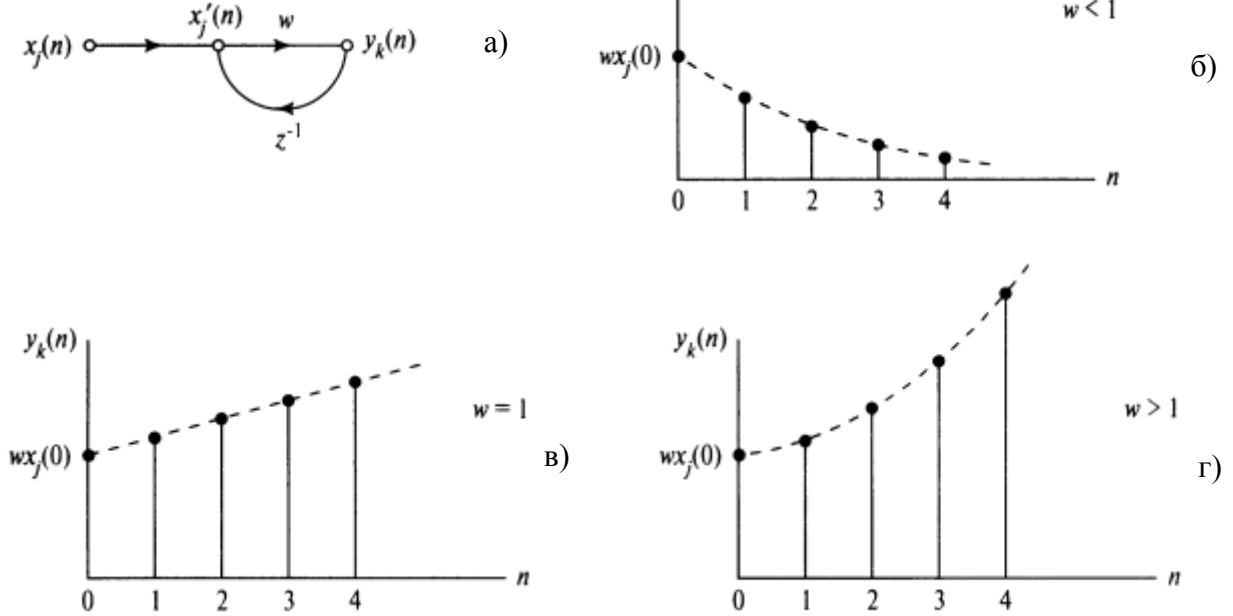


Рис.2.11 Граф передачі сигналу для фільтра з безкінцевою імпульсною характеристикою (а) та реакція системи для різних значень ваги w : б – стала система; в – лінійне розходження, г – експоненційне розходження

Використовуючи біноміальне уявлення виразу $(1 - wz^{-1})^{-1}$ отримуємо:

$$\frac{A}{1 - AB} = w \sum_{l=0}^{\infty} w^l z^{-l} \quad (2.19)$$

Підставляючи вираз (2.19) у (2.17) отримуємо:

$$y_k(n) = w \sum_{l=0}^{\infty} w^l z^{-l} [x_j(n)], \quad (2.20)$$

Тут квадратні скобки позначають оператор z^{-1} , тоді:

$$z^{-1} [x_j(n)] = x_j(n-l), \quad (2.21)$$

де $x_j(n-l)$ - це вхідний сигнал, який затриманий на l одиниць дискретизації.

Відповідно вихідний сигнал $y_k(n)$ можна уявити як безкінцеву вагову суму поточного та попереднього значень вхідного сигналу $x_j(n)$:

$$y_k(n) = \sum_{l=0}^{\infty} w^{l+1} x_j(n-l), \quad (2.22)$$

Динаміка реакції системи буде визначатися вагою w , як показано на рис.2.11 б-г. Тут можливо виділити два випадки:

1. $|w| < 1$. Вихідний сигнал експоненційно сходиться, тобто система стабільна. Для позитивного значення ваги ця реакція показана на рис.2.11 б.
2. $|w| \geq 1$. Вихідний сигнал розходиться. Якщо $|w| = 1$, розбіжність є лінійною (рис.2.11 в). Якщо $|w| > 1$, розбіжність є експоненційною (рис.2.11 г). В цьому випадку система не стала.

Сталість системи – це надважлива характеристика систем з зворотнім зв'язком. Випадок $|w| < 1$ відповідає системі з безкінцевою пам'яттю, тобто вихід системи залежить від стану системи в безкінцевому майбутньому.

2.8 Архітектура мереж

Структура нейронних мереж тісно пов'язана з алгоритмами їх навчання. В загальному випадку можливо виділити три основних фундаментальних класів нейронних мережевих архітектур.

2.8.1 Одношарові мережі прямого розповсюдження

В простішому випадку в такій мережі існує вхідний шар вузлів (input layer) джерела інформації, інформація від якого передається на вихідний шар нейронів (output layer) - обчислювальні вузли, а не навпаки. Така мережа зветься *мережею прямого розповсюдження* (feedforward) або *ациклічною мережею*.

На рис.2.12 наведена структура такої мережі для випадку чотирьох вузлів у кожному шарі. Така нейронна мережа зветься *одношаровою* (single-layer network), при цьому під одним шаром розуміють тільки шар обчислюваних вузлів, а вхідний шар не ураховується, оскільки він не виконує розрахунків.

2.8.2 Багатошарові мережі прямого розповсюдження

В багатошаровій нейронній мережі нейрони розташовуються по шарам, при цьому має місце один або більше скритих шарів, вузли яких зветься скритими нейронами (hidden layer). Функція цих шарів – організація зв'язків між зовнішніми вхідними сигналами та виходом нейронної мережі. Додаючи

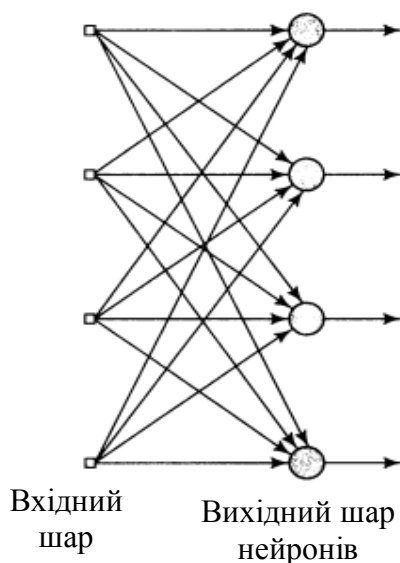


Рис.2.12 Одношарова мережа прямого розповсюдження

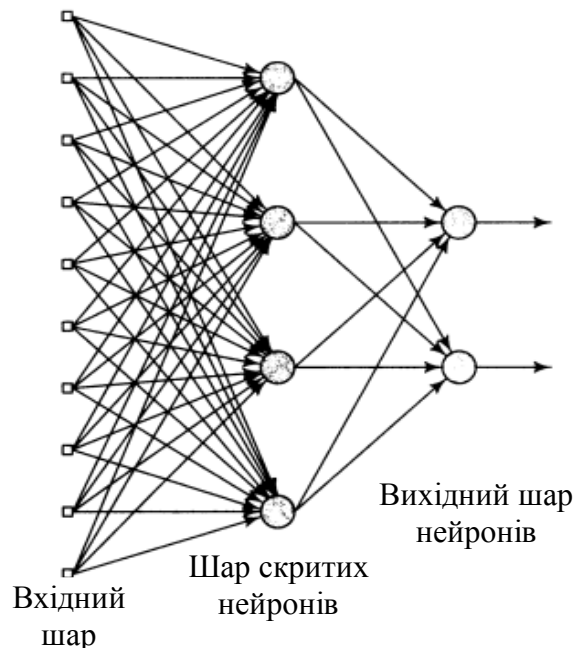


Рис.2.13 Повнозв'язкова мережа прямого розповсюдження з одним вхідним, одним скритим та одним вихідним шарами

один або більше скритих шарів підвищують порядок статистики. Така мережа дозволяє виділяти глобальні властивості даних за допомогою локальних з'єднань за рахунок наявності додаткових синаптичних зв'язків та підвищеного рівня взаємодії нейронів.

Вузли джерела вхідного шару мережі формують відповідні елементи шаблону активації (вхідний вектор) і складають вхідний сигнал, який поступає на нейрони (обчислювальні вузли) другого шару (першого скритого шару). Вихідні сигнали другого шару використовуються як вхідні сигнали третього шару і т.д. Звичайно нейрони кожного шару використовують як вхідні сигнали вихідні сигнали попереднього шару. Набір вихідних сигналів останнього шару мережі визначає загальний відклик мережі на задану вхідну інформацію.

Як приклад на рис.2.13 показана мережа 10-4-2, оскільки вона має 10 вхідних, 4 скритих та 2 вихідних нейрона. В загальному випадку мережа прямого розповсюдження з m входами, h_1 нейронами першого скритого шару, h_2 нейронами другого скритого шару, і q нейронами вихідного шару позначається як $m-h_1-h_2-q$.

Нейрона мережа, яка наведена на рис.2.13 це *повнозв'язкова* (fully connected), оскільки усі вузли кожного конкретного шару з'єднанні з усіма вузлами суміжних шарів. Якщо деякі з синаптичних зв'язків відсутні, то така мережа є *неповнозв'язковою* (partially connected).

Мережі прямого розповсюдження успішно виконують ряд задач: прогнозування, кластеризація та розпізнання.

В задачах прогнозування вирішується питання, як поведе себе система, якщо якийсь параметр (чи параметри) зміняться ту чи іншу сторону. Наприклад, якщо вихідним параметром нейронної мережі є термін технічного обслуговування, який нормується при номінальних параметрах двигуна, то є змога спрогнозувати на скільки скоротиться термін технічного обслуговування, якщо двигун буде більш норми працювати при значному механічному навантаженні.

В задачах кластеризації вирішується питання виділення з множини об'єктів такі які задовольняють визначеним вимогам. Наприклад, системи ідентифікації судна згідно визначеним ознакам: швидкість, наявність озброєння, форми корпусу, довжини та ін.

В задачах розпізнання вирішується питання точного визначення об'єкту. Наприклад якщо ми маємо семі сегментний індикатор, то згідно 7 вхідним сигналам, які подаються на індикатор можливо розпізнати символ (навіть якщо один з сегментів вийшов з ладу).

Прикладом багатошарової мережі є мережа Кохонена. Мережа Кохонена використовує конкурентне (змагальне) навчання. Мережа аналізує свої нейрони на предмет максимального співпадіння з вхідними даними. Найбільш сприйнятливі нейрони оновлюються таким чином, щоб більш наблизитися до необхідних вхідних даних та впливають на вагові коефіцієнти сусідніх нейронів, що залежить від відстані до них сприйнятливого нейрону.

2.8.3 Рекурентні мережі

Рекурентна мережа (recurrent network) відрізняється від мережі прямого розповсюдження наявністю хоч одного зворотного зв'язку. Наприклад, рекурентна мережа може складатися з одного шару нейронів, кожний з котрих направляє свій вихідний сигнал на входи всіх інших нейронів шару. Архітектура такої мережі наведена на рис.2.14. В приведеній структурі відсутні зворотні зв'язки нейронів між собою. На рис.2.15 показаний інший клас рекурентних мереж – зі скритими нейронами. В цьому випадку зворотні зв'язки виходять як зі скритих нейронів, так з вихідних нейронів.

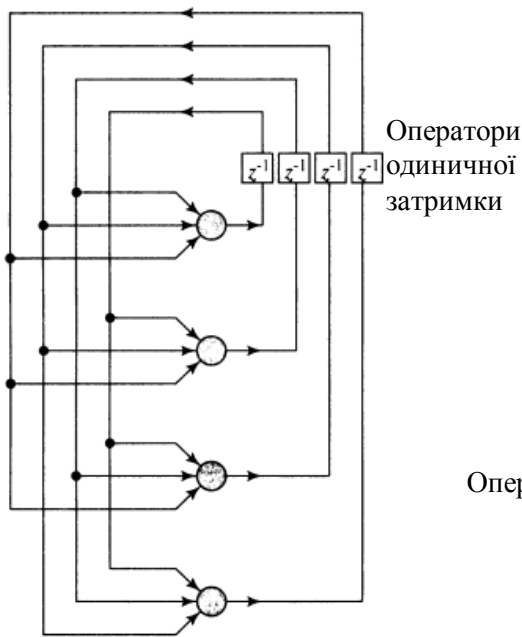


Рис.2.14 Рекурентна мережа без скритих нейронів та без зворотних зв'язків між нейронами

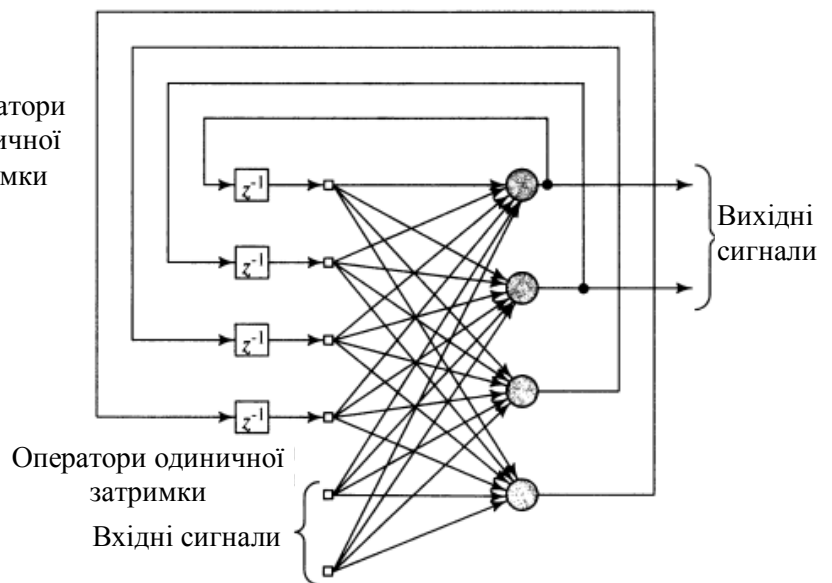


Рис.2.15 Рекурентна мережа зі скритими нейронами

Наявність зворотних зв'язків дає можливість впливати на здібність таких мереж на навчання і на їх продуктивність. Більш того наявність зворотного зв'язку потребує використання елементів одиничної затримки, які позначені як z^{-1} , що приводить к нелінійній динамічній поведінки.

В мережах прямого розповсюдження вся вхідна інформація передається тільки вперед, тому нейронна мережа кожний раз заново буде визначати свій вихід, тобто в таких мережах відсутня пам'ять. Наприклад, при визначенні задачі прогнозування терміну технічного обслуговування ця задача буде вирішуватися заново з новими можливими помилками.

На відзнаку від мереж прямого розповсюдження рекурентні мережі мають пам'ять в наслідок наявності властивості асоціювати поточний стан мережі з попереднім. Тому рекурентні мережі поширено використовують в задачах управління пристроями за якимсь законом, наприклад ПИД-регулювання.

В мережах прямого розповсюдження вся вхідна інформація передається тільки вперед, тому нейронна мережа кожний раз заново буде визначати свій вихід, тобто в таких мережах відсутня пам'ять. Наприклад, при визначенні задачі прогнозування терміну технічного обслуговування ця задача буде вирішуватися заново з новими можливими помилками.

На відзнаку від мереж прямого розповсюдження рекурентні мережі мають пам'ять в наслідок наявності властивості асоціювати поточний стан мережі з попереднім. Тому рекурентні мережі поширено використовують в задачах управління пристроями за якимсь законом, наприклад ПИД-регулювання.

Деякі види рекурентних мереж наведені на рис. 2.16

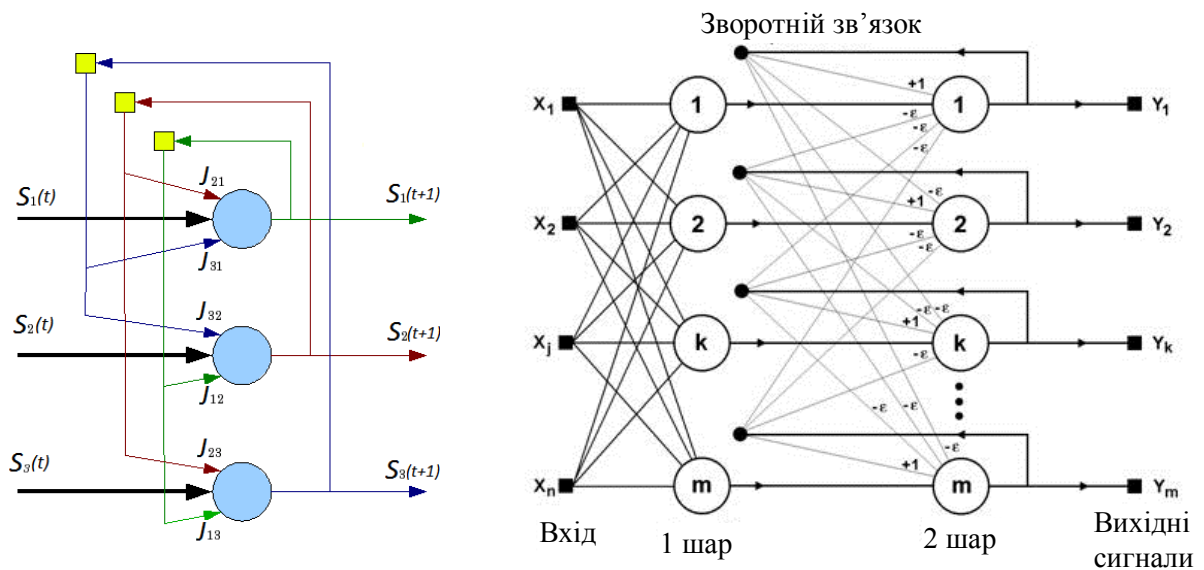


Рис.2.16 Моделі деяких рекурентних мереж:
а – мережа Хопфілда; б – мережа Хеммінга;

Мережа Хопфілда складається з N нейронів, причому вихід кожного нейрону пов'язаний зворотним зв'язком зі входом іншого нейрону. Така структура забезпечує значну надійність мережі. Експериментально доказано, що вихід з ладу 50 % нейронів дозволяє зберегти її роботу з ймовірністю до 100 %. Крім того така мережа має значну швидкість.

Задача асоціативної пам'яті, яка вирішується за допомогою даної мережі звичайно виглядає так: є набір вхідних даних, які рахуються як еталонні. Мережа повинна з довільного набору вхідних даних виділяти такий еталонний зразок, який найбільш доречний на поданий вхідний сигнал, або видати повідомлення про відсутність такого зразка.

Якщо в задачі асоціативної пам'яті нема необхідності того щоб нейронна мережа видавала еталонний зразок, а достатньо тільки номери зразка, то використовують мережу Хеммінга (рис.2.16, б). На відміну від мережі Хопфілда ця мережа характеризується меншими обчислюваними витратами.

2.8.4 Нейронні мережі на основі радіально-базових функцій.

Штучні нейронні мережі на основі радіально-симетричних (радіально-базисних) функцій (RBF) можуть використовуватися для вирішення широкого круга завдань, серед яких найбільш часті: апроксимація, класифікація і кластеризація даних.

Основна властивість радіально-симетричних функцій - це монотонна і симетрична відносно деякої вертикальної осі симетрії зміна (убування або зростання) їх відгуків. В якості прикладу такій функції може служити вираження функції Гауса $f(s) = e^{-\alpha(s-T)^2}$. Саме ця функція найчастіше використовується в даній архітектурі нейронних мереж, проте головним чином, в її багатовимірному випадку:

$$h(x) = e^{-\alpha \left\| x - \bar{c} \right\|^2} = \exp \left(-\alpha \cdot \left\| x - \bar{c} \right\|^2 \right) \quad (2.23)$$

де $\bar{c}$ вектор центрів (координат вертикальних осей симетрії) безлічі радіально-симетричних функцій;

$\left\| x - \bar{c} \right\|$ норма вектору відхилень вхідної змінної від центрів радіально-симетричних функцій;

Параметр α пов'язаний з радіусом розсіяння вхідних змінних r і може бути замінений у вираженні (2.23) на відповідне відношення:

$$\alpha = \frac{1}{2r^2} \quad (2.24)$$

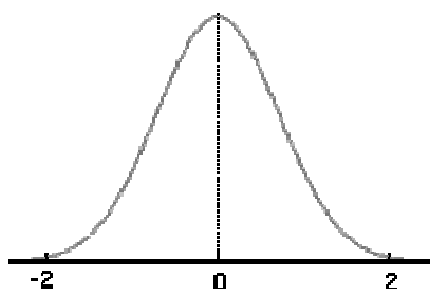


Рис.2.17 Функція Гауса для $c=0$ та $r=1$

Вигляд функції Гауса наведений на рис.2.17.

Норма різниці векторів розраховується як відстань Евкліда :

$$\left\| x - \bar{c} \right\| = \sqrt{(x - c_1)^2 + (x - c_2)^2 + \dots + (x - c_m)^2}$$

На рис.2.18 наведена типова структура штучної нейронної мережі на основі радіально-симетричних функцій.

Ця структура містить два шари нейронів. Виходи першого шару активуються безліччю радіально-симетричних функцій (2.23). Фактично вони обробляють вектор вхідних значень, визначаючи міру близькості кожного з них до центрів радіально-симетричних функцій. Виходи нейронів другого шару (тобто виходи усієї нейронної мережі) - це лінійні комбінації виходів першого шару. Склад і кількість входів і виходів визначаються класом вирішуваної задачі. При апроксимації даних входи - це аргументи апроксимуючої залежності, а виходи - значення, які повернені нею.. При кластеризації або класифікації даних входи - це характеристичні ознаки, по яких розрізняються об'єкти, а виходи вказують на того, як відповідає входам кластер або клас.

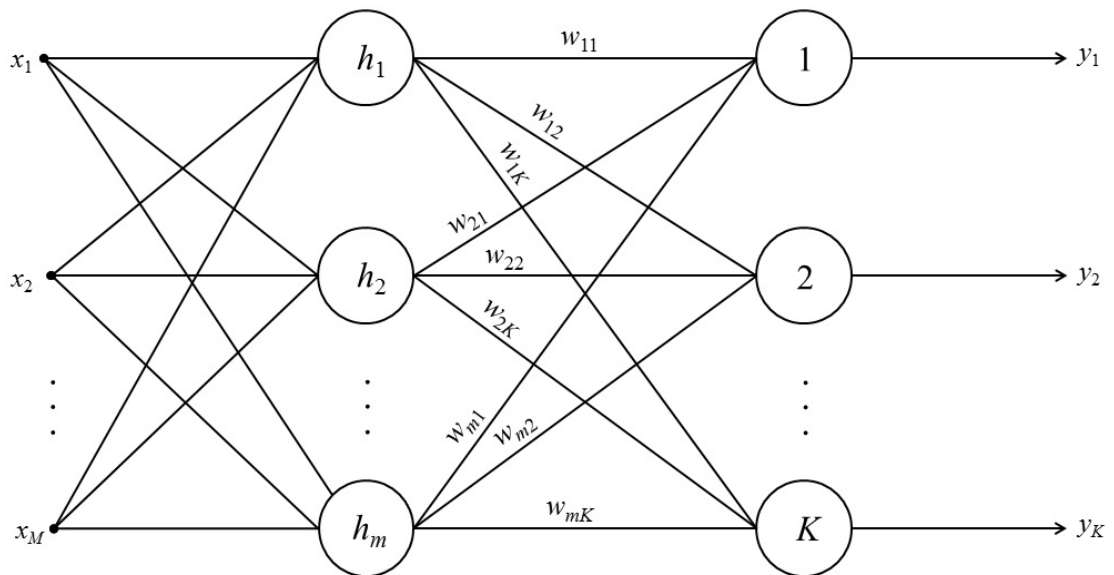


Рис.2.18 Структура нейронної мережі на основі базисно-радіальних функцій

Кількість прихованих елементів також залежить від вирішуваної задачі. Якщо це апроксимація даних, воно може бути будь-яким. У разі кластеризації або класифікації даних повинно відповідати кількості кластерів або еталонних образів класів.

Навчання такої мережі складається з двох етапів: настроювання (визначення центрів $\bar{c}$ та радіусі нейронів скритого шару r) та оптимізації синаптичних ваг зв'язків між нейтронами.

До переваг такої мережі відносять – наявність тільки одного скритого шару, простату оптимізації ваг вихідних нейронів, гарантоване знаходження глобального мінімуму та високу швидкість навчання. До недоліків відносять – процедуру спеціального настроювання параметрів $\bar{c}$ та r .

Основні типи архітектури нейронних мереж, які використовуються для штучного інтелекту наведені на рис. 2.19.

Наиболее распространенные

Нейронные сети

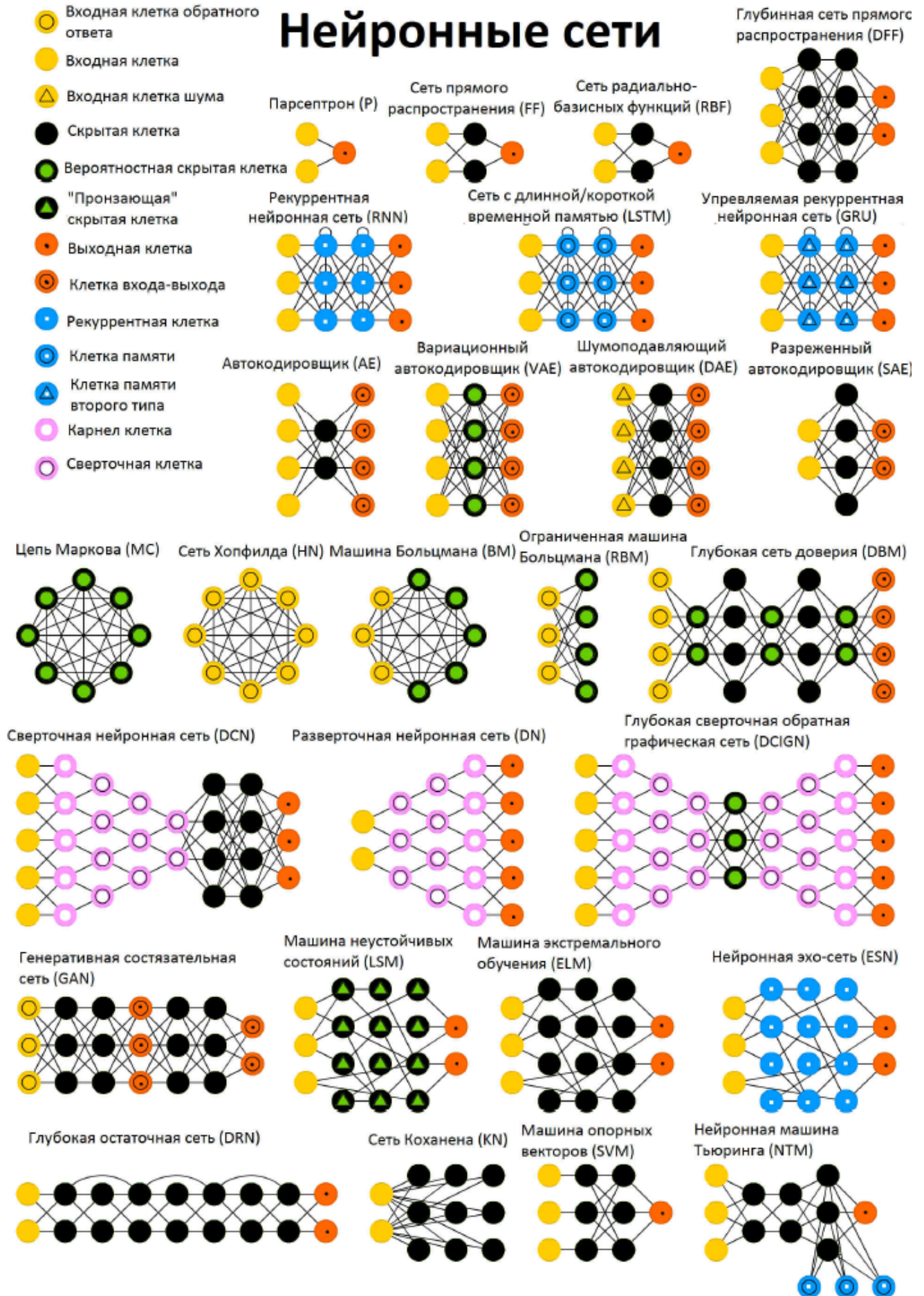


Рис.2.19. Основні види архітектор нейронних мереж, які використовуються

Контрольні питання до розділу 2

1. В чому різниця між класичною системою управління та на основі нейронних мереж.
2. Наведіть переваги та недоліки нейронних мереж.
3. Наведіть структуру та поясніть роботу біологічного нейрону дендритного типу.
4. Що таке дендрит? Аксон? Синапс? Рецептор? Поясніть їх роль в роботі головного мозку.
5. Поясніть структуру біологічної нейронної мережі.
6. Приведіть структуру та поясніть роботу штучного нейрону.
7. Поясніть призначення активаційної функції в роботі штучного нейрону.
8. Що таке межева активаційна функція? Наведіть її математичний опис та графічне зображення.
9. Що таке межева активаційна функція? Наведіть її математичний опис та графічне зображення.
10. Що таке кускова-лінійна активаційна функція? Наведіть її математичний опис та графічне зображення.
11. Що таке сигмоподібна активаційна функція? Наведіть її математичний опис та графічне зображення.
12. Що таке радіально-базова активаційна функція? Наведіть варіант її математичного опису та графічне зображення.
13. Поясніть схластичну модель нейрона. Як він працює?
14. Що таке персептрон? Наведіть його модель.
15. Поясніть уявлення нейрону за допомогою орієнтованих графів. Як оцінюється проходження сигналу в цій моделі?
16. Поясніть різницю між повним та частковим графами.
17. Що таке зворотній зв'язок в нейронній мережі? Для чого він використовується?
18. Наведіть структуру та поясніть проходження сигналів в одношаровій мережі прямого розповсюдження.
19. Наведіть структуру та поясніть проходження сигналів в багатошаровій мережі прямого розповсюдження.
20. Наведіть структуру та поясніть проходження сигналів в рекурентній мережі.
21. Що таке мережа Хопфілда?
22. Що таке мережа Кохонена?
23. Наведіть структуру та поясніть проходження сигналів в нейронній мережі на основі радіально-базових функцій. Для рішення яких задач використовується така мережа?

3. Процеси навчання

Найважливішою властивістю нейронних мереж є їх здатність навчатися на основі даних довкілля і в результаті навчання підвищувати свою продуктивність. Підвищення продуктивності відбувається з часом відповідно до певних правил. Навчання нейронної мережі відбувається за допомогою інтерактивного процесу коригування синоптичних ваг і порогів. У ідеальному випадку нейронна мережа отримує знання про довкілля на кожній ітерації процесу навчання.

З точки зору з нейронної мережі можна використовувати наступне визначення: *Навчання* - це процес, в якому вільні параметри нейронної мережі настраюються за допомогою моделювання середовища, в яке ця мережа вбудована.

Очевидно, що функціонування нейронної мережі, тобто. дії які вона здатна виконувати, залежить від величин синоптичних зв'язків. Тому, задавши структуру нейронної мережі, розробник повинен знайти оптимальні значення для усіх вагових коефіцієнтів w . Цей етап і називається навчанням нейронної мережі, і від того, наскільки якісно він буде виконаний, залежить здатність мережі вирішувати в час експлуатації поставлені перед нею проблеми. Найважливішими параметрами навчання являються: якість підбору вагових коефіцієнтів і час який необхідно витратити на навчання. Як правило, два ці параметри пов'язані між собою зворотною залежністю і їх доводиться вибирати на основі компромісу.

Тип навчання визначається способом підстроювання цих параметрів. Це визначення процесу навчання припускає наступну послідовність подій:

1. У нейронну мережу поступають стимули із зовнішнього середовища.
2. В результаті цього змінюються вільні параметри нейронної мережі (вагові коефіцієнти і пороги).
3. Після зміни внутрішньої структури нейронна мережа відповідає на збудження вже іншим чином.

Вищезгаданий список чітких правил вирішення проблеми навчання називається алгоритмом навчання. Нескладно здогадатися, що не існує універсального алгоритму навчання, відповідного для усієї архітектури нейронної мереж. Існує лише набір засобів, представлений безліччю алгоритмів навчання, кожен з яких має свої переваги. Алгоритми навчання відрізняються один від одного засобом налаштування синаптичних ваг нейронів.

Нині усі алгоритми навчання нейронних мереж можна розділити на три великі класи: навчання з вчителем, навчання з підкріпленням (метод критики) і без вчителя (рис.3.1).

Якщо навчання ШНМ відбувається із використанням еталонних даних, то такий підхід називають **«навчанням з вчителем»** (*supervised training*). Еталонні дані складаються з шаблонів. Кожен шаблон, в свою чергу, складається із вектора заданих входів мережі $\bar{X}^* = \{x_1^*, x_1^*, \dots, x_n^*\}$ і вектора відповідних їм бажаних виходів $\bar{D}^* = \{d_1^*, d_1^*, \dots, d_m^*\}$. Коли на вхід ненавченої

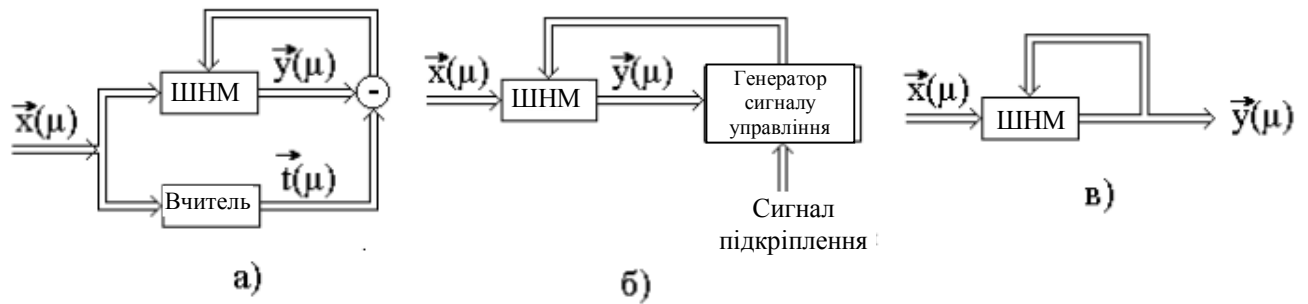


Рис.3.1 Види навчання штучної нейронної мережі (ШНМ)
а- з вчителем; б – з підкріпленням; в – без вчителя

мережі подається еталонний вектор $\vec{X}^*$, вихідний вектор $\vec{Y}^* = \{y_1^*, y_1^*, \dots, y_m^*\}$ буде відрізнятися від вектора бажаних вихідних значень $\vec{D}^*$. У цьому разі функцію похибки роботи штучної нейронної мережі можна задати у вигляді, що відповідає методу найменших квадратів:

$$E = \frac{1}{2} \sum (\bar{y}_p - \bar{D}_p)^2, \quad (3.1)$$

де індекс p означає номер шаблону із еталонних даних. Таким чином похибка обчислюється як сума похибок за всіма шаблонами еталонних даних. Слід зазначити, що розроблення адекватних еталонних даних для навчання – завдання трудомістке і не завжди здійсненне.

При **навчанні без вчителя** нейронній мережі пред'являються тільки вхідні сигнали, а виходи мережі формуються самостійно з урахуванням тільки вхідних і похідних від них сигналів. Навчання без вчителя є правдоподібною моделлю навчання в біологічній системі. Навчальна множина складається лише з вхідних векторів. Навчальний алгоритм підлагоджує ваги нейронної мережі так, щоб виходили узгоджені вихідні вектори, тобто. щоб пред'явлення досить близьких вхідних векторів давало однакові виходи. Таким чином процес навчання без вчителя виділяє статистичні властивості навчальної множини і групує схожі вектори в класи. Пред'явлення на вхід вектору з цього класу дасть певний вихідний вектор, але до навчання неможливо передбачити, яким буде вихід, який виникне під впливом цього класу вхідних векторів. Отже, виходи подібної мережі повинні трансформуватися в деяку зрозумілу форму, обумовлену процесом навчання. Це не є серйозною проблемою. Зазвичай не складно ідентифікувати зв'язок між входом і виходом для встановленої мережі.

Навчання методом критики фактично є проміжним між навчання з вчителем та навчанням без вчителя, коли об'єм доступної інформації о бажаних реакціях ШНМ обмежений, а відома тільки ступень відповідності дійсної реакції від бажаної. Вважається, що є можливість тільки оцінювати правильність роботи мережі та вказувати бажане напращення навчання. В цьому випадку управління вагами зв'язків здійснюється з зовнішнього сигналу, який звуть підкріпленням. Подібна ситуація часто зустрічається в системах, які пов'язані з оптимальним управлінням. Така мережа складається з так званих «егоїстичних» нейронів. Процедура навчання таких нейронів заохочує кожний

окремий нейрон до підвищення своєї ваги, а не підвищенню продуктивності усієї мережі, як це організовано в методі зворотного поширення похибки.

Розглянемо деякі основні моделі навчання

3.1 Навчання з вчителем

3.1.1 Метод зворотного поширення похибки (Error Back Propagation)

Метод зворотного поширення похибки (Error Back Propagation) вперше був сформульований Вербосом 1974 року. Але визнаний він був значно пізніше, 1986 року, коли його «перевідкрив» Румельхарт, Хінтон і Вільямс. За своєю суттю –це метод градієнтного спуску, котрий застосовують для настроювання вагових коефіцієнтів так, щоб мінімізувати функцію похибки (3.1). Цей метод відноситься до методу навчання з вчителем і потребує функції активації, яка повинна бути безперервно диференційовною (наприклад логістичною).

Мінімізація за методом градієнтного спуску означає підстроювання вагових коефіцієнтів

$$\Delta w_{ij}^{(n)} = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{ij}}, \quad (3.2)$$

де w_{ij} – ваговий коефіцієнт синоптичного зв'язку, що з'єднує i -й нейрон шару $n-1$ з j -м нейроном шару n ,

η – коефіцієнт швидкості навчання, $0 < \eta < 1$;

E – функція похибки.

Користуючись правилами диференціального числення, можна записати:

$$\frac{\partial E}{\partial w_{ij}} = \frac{\partial E}{\partial y_j} \cdot \frac{\partial y_j}{\partial u_j} \cdot \frac{\partial u_j}{\partial w_{ij}} \quad (3.3)$$

де y_j – вихід j -го нейрона,

u_j – зважена сума його вхідних сигналів, тобто аргумент його нелінійної активаційної функції:

$$u_j^{(n)} = \sum_{i=0}^M y_i^{(n-1)} w_{ij}^{(n)} + b_j^{(n)} \quad (3.4)$$

Оскільки множник $\frac{\partial y_j}{\partial u_j}$ є похідною цієї функції за її аргументом, то з цього

випливає, що похідна активаційної функції повинна бути визначеною на всій осі абсцис. У зв'язку з цим активаційні функції з розривами першого і другого родів не підходять для нейронних мереж, які навчаються методом зворотного поширення похибки.

Якщо активаційна функція сигмоподібна, наприклад, у випадку логістичної функції $\varphi(u) = \frac{1}{1 + \exp(-u)}$ маємо:

$$\frac{\partial y}{\partial u} = y(u) \cdot (1 - y(u)) \quad (3.5)$$

Третій множник $\frac{\partial u_j}{\partial w_{ij}}$ дорівнює виходу i -го нейрона з попереднього шару, $y_i^{(n-1)}$.

Щодо першого множника в (3.4), то його легко розкласти так:

$$\frac{\partial E}{\partial y_j} = \sum_k \frac{\partial E}{\partial y_k} \cdot \frac{\partial y_k}{\partial u_k} \cdot \frac{\partial u_k}{\partial y_j} = \sum_k \frac{\partial E}{\partial y_k} \cdot \frac{\partial y_k}{\partial u_k} \cdot w_{jk}^{(n+1)} \quad (3.6)$$

Тут додавання за k виконують серед нейронів шару $n+1$. Вводячи нову змінну

$$\delta_j^{(n)} = \frac{\partial E}{\partial y_j} \cdot \frac{\partial y_j}{\partial u_j}, \quad (3.7)$$

отримуємо рекурсивну формулу для розрахунків величин $\delta_j^{(n)}$ j шару (n) за величинами $\delta_k^{(n+1)}$ ($n+1$) k δ + наступного шару ($n+1$) отримуємо вираз, який зветься «дельта-правилом»:

$$\delta_j^{(n)} = \left[\sum_k \delta_k^{(n+1)} w_{jk}^{(n+1)} \right] \cdot \frac{\partial y_j}{\partial u_j} \quad (3.8)$$

Для останнього ж, вихідного шару маємо:

$$\delta_l^{(N)} = (d_l - y_l^{(N)}) \cdot \frac{\partial y_l}{\partial u_l} \quad (3.9)$$

де d_l - бажане значення виходу згідно еталонним даним.

Тепер ми можемо записати (3.2) в розгорнутому вигляді:

$$\Delta w_{ij}^{(n)} = \eta \delta_j^{(n)} y_i^{n-1} \quad (3.10)$$

Інколи для надання процесу корекції ваг деякої інерційності, що згладжує різкі стрибки під час переміщення поверхнею цільової функції, вираз (3.10) доповнюється значенням зміни ваги на попередній ітерації:

$$\Delta w_{ij}^{(n)}(t) = \eta (\mu \Delta w_{ij}^{(n)}(t-1) + (1-\mu) \delta_j^{(n)} y_i^{n-1}), \quad (3.11)$$

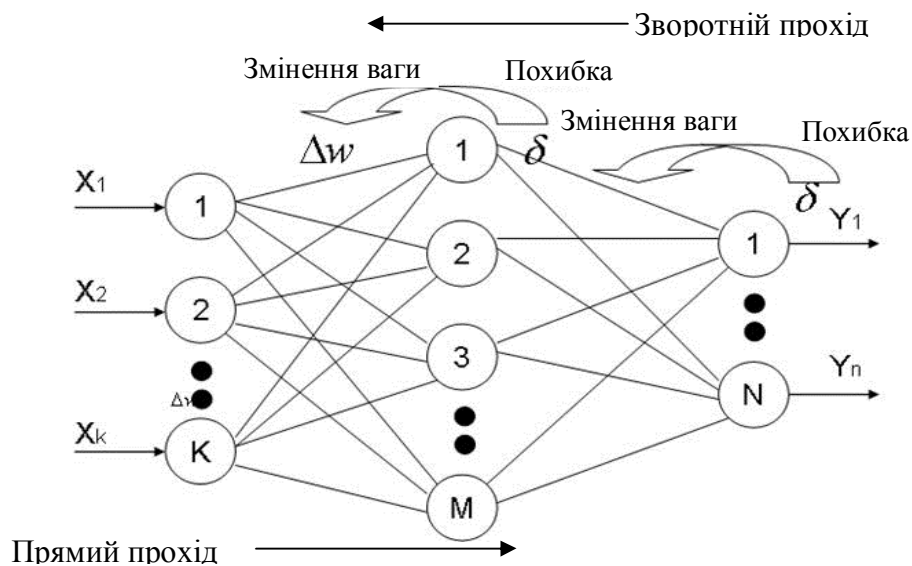


Рис.3.2 До пояснення навчання нейронної мережі прямого розповсюдження згідно алгоритму зворотного розповсюдження помилки

де μ – коефіцієнт інерційності, t – номер поточної ітерації.

Отже, повний алгоритм навчання штучної нейронної мережі за допомогою процедури зворотного розповсюдження похибки має такий вигляд (рис.3.2):

Крок 1. Ініціалізація ваги і зміщення, які задають випадково. Наприклад, в діапазоні від -1 до 1 .

Крок 2. Розрахунок виходу y_k мережі в прямому напрямку виходячи з лінійної комбінації вхідних сигналів u_k та типу функції активації $\varphi_k(u_k)$ згідно (2.1) та (2.2):

$$u_k = \sum_{j=1}^m w_{kj} x_j, \quad y_k = \varphi(u_k + b_k)$$

Крок 3. Розрахунок $\delta^{(N)}$ для вихідного шару за формулою (3.9) і похибки за вектором входу і відповідним йому вектором бажаного виходу для інших шарів згідно формули (3.8).

Крок 4. Розрахунок зміни ваг $\Delta w^{(N)}$ для вихідного шару за формулою (3.10) або (3.11).

Крок 5. Розрахунок за формулами (3.10) або (3.11) зміни ваг $\Delta w^{(n)}$ для всіх інших шарів.

Крок 6. Коригування всіх ваг у штучній нейронній мережі:

$$\Delta w_{ij}^{(n)}(t) = w_{ij}^{(n)}(t-1) + \Delta w_{ij}^{(n)}(t), \quad (3.12)$$

Крок 7. Перехід на крок 2, якщо похибка мережі суттєва, а якщо ні – то закінчення навчання.

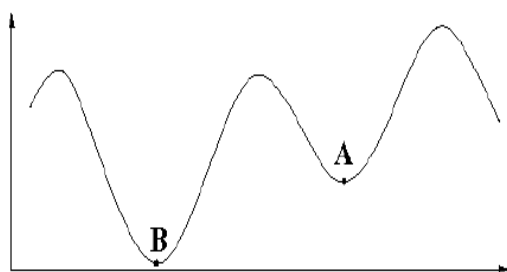


Рис.3.3 До проблеми локальних мінімумів

Розглянутий алгоритм є послідовним, оскільки припускає оновлення ваг для наступного набору вхідних даних (чергового вхідного вектору).

Розглянемо деякі практичні рекомендації по вибору ряду параметрів алгоритму зворотного розповсюдження похибки, що впливають на швидкість навчання, збіжність рішення,

узагальнювальні можливості багатшарового персептрона.

Початкові ваги зв'язків. Початкові ваги зв'язків є невеликими випадковими числами, що забезпечують для заданого вхідного вектору x_k таке значення $\varphi(net_k)$, при якому використовується лінійна ділянка сигмовидної функції активації. Зазвичай це досягається, якщо значення u_{kj} лежать в

діапазоні $\left[-\frac{3}{\sqrt{m}}, +\frac{3}{\sqrt{m}}\right]$, де m - число входів відповідного нейрона.

Неправильний вибір початкових вагів зв'язків може приводити до рішень, відповідних локальних мінімумів похибки персептрона, або до "попадання" в область "плато" (рис.3.3).

Припустимо, що початкові значення похибки дорівнюють, або дуже близькі до точки А. Тоді малі зміни вагових коефіцієнтів викличуть підвищення похибки поблизу точки А, та будуть відхиленні, тобто найменше значення похибки, яке локалізується в точці В, не буде ніколи знайдено. З іншої сторони, великі зміни вагових коефіцієнтів можуть викликати таку різку зміну похибки, що не буде знайдений ні локальний мінімум в точці А, ні кінцевий мінімум в точці В.

Крім того в процесі навчання може виникнути ситуація, коли великі позитивні або негативні значення вагових коефіцієнтів змістять робочу точку на сигмоїдальній функції багатьох нейронів в область насичення (див. рис.2.6 в). Малі величини похідної від активаційної функції відповідно до (3.8) і (3.9) приведуть до зупинки навчання нейронної мережі (ефект "плато").

Коефіцієнт навчання. Коефіцієнт навчання η чинить значний вплив на швидкість навчання багатошарового персептрона і збіжність рішення. Вибір η зазвичай здійснюють експериментально.

Відносно великі значення η забезпечують швидке навчання, але при цьому існує небезпека отримати невірне рішення. Малі значення η затягують процес навчання. Діапазон можливих значень η від 10^{-3} до 10. Окрім цього, конкретні значення η , вибрані на початку процесу навчання, можуть виявитися не зовсім відповідними у кінці навчання. Тому у ряді випадків η змінюють в ході навчання. Один із способів управління значенням η полягає в контролі помилки δ_k . Якщо корекція вагів зв'язків при виконаних за алгоритмом зворотного поширення похибки призводить до збільшення помилки, то необхідно η зменшити. І навпаки, якщо помилка монотонно зменшується, то необхідно збільшити η . Існує правило управління коефіцієнтом навчання:

$$\Delta\eta = \begin{cases} +a, & \text{якщо } \Delta\delta < 0, \\ -b\eta, & \text{якщо } \Delta\delta > 0, \\ 0, & \text{якщо } \Delta\delta = 0, \end{cases} \quad (3.13)$$

де a і b - позитивні константи.

Додавання моменту інерції. Оскільки алгоритм зворотного поширення похибки базується на використанні методу градієнта, то при великих значеннях параметра η по мірі наближення до мінімуму похибки, можливі осциляції. Для того щоб виключити осциляції, в правило оновлення вагів зв'язків (3.10) вводять момент інерції.

Припустимо, що зміна ваги Δw_{ij}^n на поточному кроці відповідала $\Delta w_{ij}^n(t)$. Для наступного моменту часу зміна ваги $\Delta w_{ij}^n(t+1)$ має бути пропорційне градієнту $-\eta \frac{\partial \delta}{\partial w_{ij}^k(t)}$. Додавання моменту інерції дозволяє на кожному кроці частково зберігати попередній напрям зміни ваг зв'язків згідно (3.11).

Перенавчання. У процесі навчання безліч прикладів, які містять в собі набір вхідних та бажаних даних розбивається на дві підмножини X_1 і X_2 . Для

навчання використовуються тільки елементи підмножини X_1 , яка дозволяє сформувати повчальну послідовність. Сукупність елементів з X_2 утворює перевірочну послідовність.

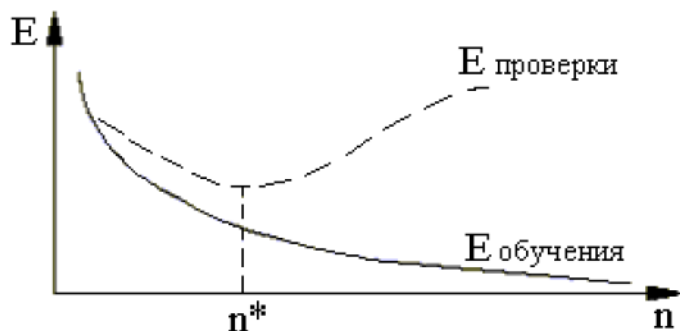


Рис.3.4 Залежність нейронної мережі від кількості циклів навчання

На рис.3.4 показаний якісний характер залежності помилки нейронної мережі на етапі навчання і на етапі перевірки від кількості циклів навчання. Спочатку обидві похибки зменшуються. Це означає, що мережа коректно навчається на структурі даних, які властиві простору вхідних сигналів. Проте якщо мережа є надмірно гнучкою (тобто має велику кількість ступенів

свободи, ніж необхідне), то похибка перевірки після деякого числа циклів навчання починає зростати. Це означає, що при навчанні мережа швидше враховує особливості властиві конкретних наборів даних X_1 , а не особливостей структурних даних, що представляють вхідні образи. Наприклад, дані з X_1 може бути зашумлені, і мережа в цьому випадку узагальнює властивості шуму. Тоді говорять, що мережа "перенавчалася". В зв'язку з цим виникає питання про правильність структури нейронної мережі.

Якщо похибка перевірки зростає, то необхідно скоротити число нейронів прихованих шарів ШНМ. В той же час, якщо обидві похибки зменшуються, але залишаються відносно великими до кінця процесу навчання, то необхідно збільшити число нейронів прихованих шарів.

3.1.2. Метод випадкового пошуку (random search)

Цей метод теж відноситься до методу навчання з вчителем. Під час навчання ШНМ методом випадкового пошуку відбувається динамічне підстроювання вагових коефіцієнтів синапсів, під час якого вибираються здебільшого найслабкіші зв'язки і змінюються на малу величину в той чи інший бік. Після цього обчислюють функцію похибки (3.1) і зберігають тільки ті зміни, які зумовили зменшення похибки на виході мережі порівняно з попереднім станом. Очевидно, що цей підхід, попри свою уявну простоту, потребує значної кількості ітерацій доки буде досягнуто прийнятних похибок на виході мережі.

3.1.3. Навчання нейронних мереж за допомогою генетичних алгоритмів

Цей метод теж відноситься до методу навчання з вчителем. Оскільки навчання ШНМ — це пошук такого стану параметрів мережі (синаптичних ваг і межових зміщень), який мінімізує функцію похибки, котру можна задати у вигляді (3.1). Одним із найбільш ефективних методів глобальної оптимізації є генетичні алгоритми. Під час використання генетичних алгоритмів для

навчання ШНМ параметрами оптимізації є синаптичні ваги і порогові зміщення. Функція пристосованості буде обернено пропорційною до функції похибки (3.1).

Генетичні алгоритми – це група алгоритмів, які засновані на моделюванні розвитку біологічної популяції. Назвемо популяцією набір векторів $P = \{p^j\} = \{p^1, p^2 \dots p^n\}$, де n – розмір популяції (розмір мережі), а елементи p^n – особи (нейрони). Кожний вектор p^n усі параметри (вагові коефіцієнти зв'язків), за допомогою яких можливо описати особу. Крім того є функція $E(p)$ за допомогою якої розраховується похибка. Навчання проводиться за критерієм зменшення цієї помилки $E(p)$. Елементи (нейрони) еволюціонують за наступними правилами:

- якщо $E(p^0)$ мале, то особа (нейрон) вважається вдалою, імовірність гибелі цієї особи знижується, а вона отримує пріоритет при розмноженні;
- якщо $E(p^0)$ значне, то особа (нейрон) вважається невдалою, імовірність гибелі цієї особи підвищується, а пріоритет при розмноженні зменшується;
- кожна особа має змогу до мутації, тобто її вектор p^n може зміститися на незначну відстань $p^0 = p^0 + \Delta p$, де Δp - незначний за модулем вектор мутації;
- кожна особа має змогу розмножуватися згідно умові 1, тоді вона розділяється (виникає новий нейрон), закон розмноження залежить від типу моделі.
- кожна особа має змогу гинути, згідно умові 2, тобто вона віддаляється з множини P (нейрон видаляється з мережі).

Таким чином генетичний алгоритм модифікує не тільки ваги зв'язків, а і кількість та рос положення нейронів в мережі. Але генетичні алгоритми зараз не засвоєні, тому нема чітких правил вибору числових критеріїв ймовірності розмноження чи гибелі.

При навчанні без вчителя використовують наступні основні методи.

3.2 Навчання без вчителя (unsupervised training)

Розглянуті вище алгоритми навчання ШНМ за допомогою процедур зворотного поширення похибки, випадкового пошуку або генетичних алгоритмів припускають наявність деякої зовнішньої ланки, що надає мережі крім вхідних образів також і цільові вихідні образи. Алгоритми, що використовують подібну концепцію, називають алгоритмами навчання з вчителем. Для їх успішного функціонування потрібні експерти, які створюють на попередньому етапі для кожного вхідного образу еталонний вихідний.

Головна перевага навчання без вчителя – це його «самостійність». Процес навчання без вчителя, як і навчання з вчителем, полягає у підстроюванні ваг синапсів. Деякі алгоритми, однак, змінюють і структуру мережі, тобто кількість нейронів і їх взаємозв'язки, але такі перетворення правильніше назвати більш

широким терміном «самоорганізація», та в межах цього матеріалу ми їх не розглядатимемо.

Очевидно, що підстроювати синапси можна тільки на основі інформації, доступної в нейроні, тобто його стану і вже наявних вагових коефіцієнтів. Виходячи із цієї думки і, що більш важливо, за аналогією з відомими принципами самоорганізації нервових клітин, побудовані алгоритми навчання Хебба.

Розглянемо деякі алгоритми навчання без вчителя.

3.2.1 Метод Хебба

Постулат навчання Хебба (Hebb's postulate of learning) є найстарішим і найвідомішим серед усіх правил навчання. Це твердження було зроблене в нейробіологічному контексті, але його можна перефразувати в наступне правило, що складається з двох частин.

1. Якщо два нейрони по обидві сторони синапсу (з'єднання) активізуються одночасно (тобто синхронно), то міцність цього з'єднання зростає.
2. Якщо два нейрони по обидві сторони синапсу активізуються асинхронно, то такий синапс ослабляється або взагалі відмирає.

Синапс, що функціонує таким чином, називається синапсом Хебба (Hebbian synapse). Якщо бути точнішим, то синапс Хебба використовує залежний від часу, вкрай локальний механізм взаємодії, що змінює ефективність синаптичного з'єднання залежно від кореляції між предсинаптичною і постсинаптичною активністю. З цього визначення можна вивести наступні чотири властивості (ключових механізму), що характеризують синапс Хебба.

1. **Залежність від часу** (time - dependent mechanism). Синапс Хебба залежить від точного часу виникнення предсинаптичного і постсинаптичного сигналів.
2. **Локальність** (local mechanism). За своєю природою синапс є вузлом передачі даних, в якому інформаційні сигнали (що представляють поточну активність предсинаптичних і постсинаптичних елементів) знаходяться в просторово-часовій (spatiotemporal) близькості. Ця локальна інформація використовується синапсом Хебба для виконання локальних синаптичних модифікацій, характерних для цього вхідного сигналу.
3. **Інтерактивність** (interactive mechanism). Зміни в синапсі Хебба визначаються сигналами на обох його кінцях. Це означає, що форма навчання Хебба залежить від міри взаємодії предсинаптичного і постсинаптичного сигналів (пророцтво не можна побудувати на основі тільки одного з цих сигналів). Помітимо, що така залежність або інтерактивність може носити детермінований або статистичний характер.
4. **Кореляція** (correlational mechanism). Одна з інтерпретацій постулату навчання Хебба полягає в тому, що умовою зміни ефективності синаптичного зв'язку є залежність між предсинаптичними і

постсинаптичним сигналами. Відповідно до цієї інтерпретації для модифікації синапсу необхідно забезпечити одночасність предсинаптичного і постсинаптичного сигналів.

Існує два алгоритми Хебба: сигнальний та диференційний.

Сигнальний метод навчання Хебба полягає в зміні ваг за таким правилом обчислень:

$$w_{ij}(t) = w_{ij}(t-1) + \alpha y_i^{(n-1)} y_j^n \quad (3.14)$$

де $y_i^{(n-1)}$ - вихідне значення i -го нейрону $(n-1)$ шару;

y_j^n - вихідне значення j -го нейрона шару n ;

$w_{ij}(t)$ та $w_{ij}(t-1)$ - ваговий коефіцієнт синапса, що з'єднує ці нейрони на ітераціях t і $(t-1)$ відповідно;

α - коефіцієнт швидкості навчання.

Тут і надалі, для загальності, літерою n позначають довільний шар мережі.

Під час навчання за цим методом підсилюються зв'язки між збудженими нейронами. Верхній графік на рис. 3.6 графічно ілюструє формулу (3.14). Він представляє залежність зміни $\Delta w_{ij}(t)$ від вихідного сигналу (постсинаптичний

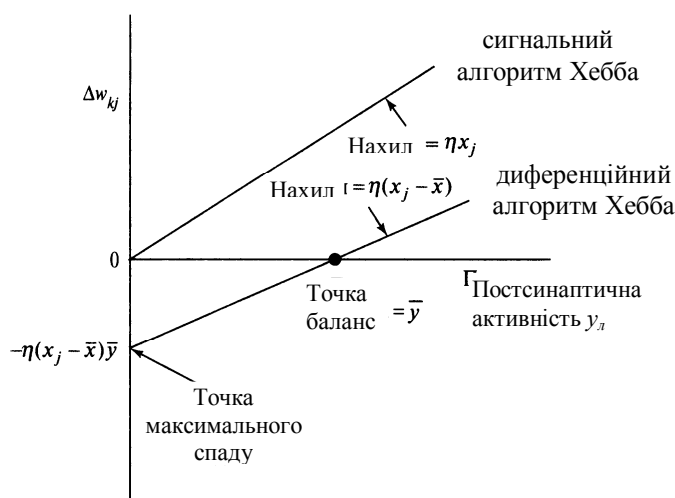


Рис.3.6 До пояснення різних алгоритмів Хебба

активності) y_j^n . На рисунку видно, що регулярний додаток вхідного сигналу (предсинаптичної активності) $y_i^{(n-1)}$ веде до збільшення y_j^n і експоненціальному зростанню активності, що призводить до насичення синаптичного зв'язку. У цій точці синапс вже не містить ніякої інформації, і вибірковість зв'язків втрачається.

Є також і диференціальний метод навчання Хебба:

$$w_{ij}(t) = w_{ij}(t-1) + \alpha [y_i^{(n-1)}(t) - y_i^{(n-1)}(t-1)] [y_j^n(t) - y_j^n(t-1)] \quad (3.15)$$

де $y_i^{(n-1)}(t)$ та $y_i^{(n-1)}(t)$ - вихідне значення i -го нейрону $(n-1)$ шару та те саме для нейрона j шару n ;

Як видно з формули (3.15), найбільше навчаються синапси, що з'єднують ті нейрони, виходи яких динамічно збільшаються.

На рис. 3.6 показана відмінність диференційного методу Хебба від сигнального методу Хебба. У обох випадках залежність величини $\Delta w_{ij}(t)$ від y_j^n є лінійною, проте перетин з віссю y_k для сигнального методу Хебба відбувається на початку координат, а для диференційного методу в точці $y_k = \bar{y}$.

При уважному дослідженні вираження (3.15) можна зробити наступні висновки.

1. Синаптична вага зв'язку посилюється при високому рівні предсинаптичного і постсинаптичного сигналів, тобто у тому випадку, коли одночасно задовольняються наступні умови:

$$\left[y_i^{(n-1)}(t) > y_i^{(n-1)}(t-1) \right] \text{ та } \left[y_j^{(n)}(t) > y_i^{(n)}(t-1) \right]$$

2. Синаптична вага послаблюється в наступних ситуаціях.:

- Предсинаптична активність тобто $\left[y_i^{(n-1)}(t) > y_i^{(n-1)}(t-1) \right]$ не викликає істотної постсинаптичної активності $\left[y_j^{(n)}(t) < y_i^{(n)}(t-1) \right]$.
- Постсинаптична активність $\left[y_j^{(n)}(t) > y_i^{(n)}(t-1) \right]$ виникає за відсутності істотної предсинаптичної активності $\left[y_i^{(n-1)}(t) < y_i^{(n-1)}(t-1) \right]$.

Таку поведінку можна розглядати як форму тимчасової конкуренції між вхідними моделями.

Повний алгоритм навчання за методом Хебба буде виглядати так:

Крок 1. Привласнення малих випадкових значень на стадії ініціалізації всім ваговим коефіцієнтам.

Крок 2. Подача вхідних образів на входи мережі і поширення сигналів збудження по всіх шарах відповідно до принципів класичних прямопоточних (feedforward) мереж, тобто для кожного нейрона розраховується зважена сума його входів, до якої потім застосовується активаційна (передатна) функція нейрона, в результаті чого отримується його вихідне значення.

Крок 3. Зміна вагових коефіцієнтів на основі отриманих вихідних значень нейронів за формулою (3.14) або (3.15).

Крок 4. Повторення, починаючи з кроку 2, доки вихідні значення мережі не встановляться із заданою точністю.

Завершення навчання за методом Хебба, відмінне від використовуваного для мережі зворотного поширення, і зумовлене тим, що підстроюванні значення синапсів фактично не обмежені. На другому кроці циклу навчання (ітерації) поперемінно подаються всі образи із вхідного набору.

Слід зазначити, що відгук на кожен з класів вхідних образів не відомий заздалегідь і являтиме собою довільне сполучення станів нейронів вихідного шару, зумовлене випадковим розподілом ваг на стадії ініціалізації. Разом з тим, мережа здатна узагальнювати схожі образи, визначаючи їх приналежність до одного класу.

3.2.2. Конкурентне навчання

Як випливає з самої назви, в конкурентному навчанні (competitive learning) вихідні нейрони нейронної мережі конкурують між собою за право бути активізованими. На відміну від метода Хебба, в якому множина вихідних нейронів може збуджуватися одночасно, при конкурентному навчанні вихідні нейрони конкурують між собою за право бути збудженими. Тобто з усієї множини вихідних нейронів використовується тільки один нейрон з самим великим виходом.

Конкурентне навчання дозволяє класифікувати вхідні данні: подібні зразки об'єднуються мережею в один клас і визначаються одним зразковим елементом. При цьому кожний нейрон відповідає тільки за один клас, тому загальна кількість класів, з якими здібна працювати мережа дорівнює кількості вихідних нейронів. При навчанні модифікуються тільки ваги нейрона - переможці.

Завдяки цій властивості конкурентне навчання дуже зручно використовувати для вивчення статистичних властивостей, використовуваних в завданнях класифікації вхідних образів.

Правило конкурентного навчання засноване на використанні трьох основних елементів

- Безліч однакових нейронів з випадково розподіленими синаптичними вагами, які призводять до різної реакції нейронів на один і той же вхідний сигнал.
- Граничне значення (limit) "сили" кожного нейрона.
- Механізм, що дозволяє нейронам конкурувати за право відгуку на цю підмножину вхідних сигналів і який визначає єдиний активний вихідний нейрон (чи по одному нейрону на групу). Нейрон, що переміг в цьому

змаганні, називають нейроном-переможцем, а принцип конкурентного навчання формулюють у вигляді гасла "переможець забирає усе" (winner - takes - all).

Таким чином, кожен окремий нейрон мережі відповідає групі близьких образів. При цьому нейрони стають детекторами ознак (feature detector) різних класів вхідних образів.

Проста нейронна мережа з конкурентним навчанням містить єдиний шар вихідних нейронів, кожен з яких сполучений з вхідними вузлами. У такій мережі можуть існувати зворотні зв'язки між нейронами (рис.3.7). У подібній архітектурі зворотний зв'язок забезпечує латеральне гальмування (lateral inhibition), коли кожен

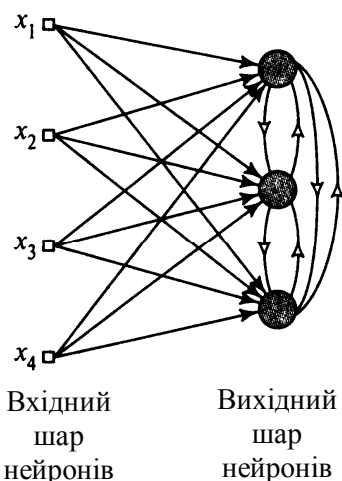


Рис.3.7 Структурний граф простої мережі конкурентного навчання з прямими (які збуджуються) зв'язками від вхідних вузлів до вихідних нейронів зі зворотними зв'язками між ними

нейрон прагне "загальмувати" пов'язані з ним нейрони. Прямі синаптичні зв'язки в мережі, які показані на рис.2.22, являються збуджуючими (excitatory).

Для того, щоб нейрон переміг в конкурентній боротьбі, його індуковане локальне поле ϕ_k для заданого вхідного образу x_i має бути максимальним серед усіх нейронів мережі. Тоді вихідний сигнал y_k нейрона-переможця приймається рівним одиниці. Вихідні сигнали інших нейронів при цьому встановлюються в значення нуль. Таким чином, можна записати:

$$y_k = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \phi_k > \phi_j \text{ для всіх } j \neq k \\ 0, & \text{для інших випадків} \end{cases} \quad (3.16)$$

де індуковане локальне поле ϕ_k представляє сумарне збудження нейрона k від усіх вхідних сигналів і сигналів зворотного зв'язку.

Нехай w_{kj} - синаптична вага зв'язку вхідного вузла j з нейроном k . Припустимо, що синаптичні ваги усіх нейронів фіксовані (тобто позитивні), при цьому $\sum_j w_{kj} = 1$ для всіх k . Тоді навчання цього нейрона полягає в зміщенні синаптичних

ваг від неактивних до активних вхідних вузлів. Якщо нейрон не формує відгуку на конкретний вхідний образ, то він і не навчається. Якщо деякий нейрон виграв у конкурентній боротьбі, то ваги зв'язків цього нейрона рівномірно розподіляються між його активними вхідними вузлами, а зв'язки з неактивними вхідними вузлами послабляються. Згідно з правилом конкурентного навчання (competitive learning rule) зміна Δw_{kj} синаптичної ваги визначається наступним виразом:

$$\Delta w_{kj} = \begin{cases} \eta(x_j - w_{kj}), & \text{якщо нейрон } k \text{ перемагає у змаганні} \\ 0, & \text{якщо нейрон } k \text{ програває у змаганні} \end{cases} \quad (3.17)$$

де η - параметр швидкості навчання.

Це правило відображає зміщення вектору синаптичної ваги w_{kj} нейрона k , що переміг, у бік вхідного образу x .

Для ілюстрації суті конкурентного навчання можна використовувати геометричну аналогію (рис.3.8). Передбачається, що усі вхідні образи (вектори) x мають деяку постійну норму Евкліда. Тобто їх можна зображувати у вигляді точок на N - мірній одиничній сфері, де N - кількість вхідних вузлів. N також є розмірністю вектору синаптичної ваги w_k . Передбачається, що усі нейрони мережі мають ту ж довжину (норму) Евкліда, тобто

$$\sum_j w_{kj}^2 = 1 \text{ для всіх } k \quad (3.18)$$

Якщо синаптичні ваги правильно масштабовані, вони формують набір векторів, які проектується на ту ж N -мірну одиничну сферу. На рис. 3.8, а можна виділити три природні групи (кластери) точок, що представляють вхідні образи. На цьому малюнку також показаний вірогідний початковий стан мережі ((відмічено хрестиками) до початку навчання.

На рис. 3.8,б показаний кінцевий стан мережі, в результаті конкурентного навчання, в якому синаптичні ваги кожного вхідного нейрона зміщені до центрів тяжіння відповідних кластерів. На цьому прикладі

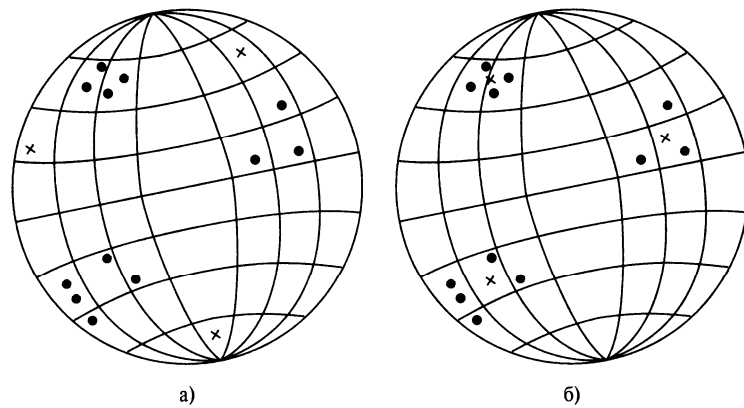


Рис.3.8 Геометрична інтерпретація процесу конкурентного навчання.
Точки – вхідні вектори, хрестики – вектори синаптичних вагів трьох вихідних нейронів початковому (а) та кінцевому (б) стані

продемонстрована здатність нейронної мережі вирішувати завдання кластеризації в процесі конкурентного навчання. Проте для "стійкого" рішення цієї задачі вхідні образи повинні формувати досить розрізнені групи векторів. Інакше мережа може стати нестійкою, оскільки у відповідь на заданий вхідний образ формуватимуться відгуки від різних вихідних нейронів.

3.3 Перспективи використання нейронних мереж в інтегрованих системах судна

Для поліпшення якості діагностики упродовж багатьох років розробляються системи моніторингу стану робочих параметрів інтегрованих систем судна. У більшості існуючих систем принцип дії полягає в знятті параметрів з датчиків і відображенні результатів екіпажу і судновласників. Аналіз суден, що мають клас реєстра, показав, що тільки невелика доля з них оснащена системами моніторингу, функція яких зводиться головним чином до контролю за витратою палива.

Не дивлячись на те, що функціональні можливості подібних систем набагато ширші, судновласники вважають за краще використовувати тільки цей напрям роботи системи. Головна причина полягає у вартості установки і експлуатації. Екіпаж такі системи також не радують: додаткова система для обслуговування, не інформативність великої кількості параметрів, що знімаються, додатковий контроль за діями екіпажа. Проблема полягає в тому, що у складі систем моніторингу відсутній аналіз параметрів, що знімаються, але який такий потрібний.

Для усунення цього недоліку необхідне впроваджувати в систему моніторингу глибокий аналіз параметрів, який не лише порівнюватиме з еталонними значеннями, але і складатиме прогноз на залишковий ресурс механізмів, пропонувати рекомендації по зміні режиму роботи двигуна і проведення позапланового технічного обслуговування. Нині застосовуються різні методи аналізу параметрів, у тому числі швидке перетворення Фур'є; регресійний аналіз, статистика вищого порядку.

Найбільш перспективним напрямом аналізу даних є метод, заснований на нейромережевих технологіях. Впровадження нейромережевих технологій в існуючі системи моніторингу дасть можливість системі не лише фіксувати показники датчиків і порівнювати їх з еталонними значеннями, але і робити аналіз отримуваних параметрів системи в комплексі, прогножуючи можливість настання збоїв в роботі як окремих елементів, так і системи в цілому.

Результатом такого аналізу системи моніторингу, заснованої на нейромережевих технологіях, повинні стати рекомендації по вживанню тих або інших заходів як судновласників, так і екіпажу. Це може бути рекомендація по зміні режиму роботи двигуна, для поліпшення експлуатаційних характеристик, або рекомендації по проведенню позапланового технічного обслуговування або ремонту, вибору оптимального курсу та ін. Діагностика, яка заснована на нейромережевих технологіях, сприятиме запобіганню виникненню аварійних ситуацій і збільшенню показника готовності судна, що, у свою чергу, збільшить економічні показники експлуатації судна.

В процесі моніторингу стану судна використовують декілька типів нейронних мереж, які здатні здійснювати аналіз параметрів різних систем судна.. Аналіз можна розбити на декілька етапів (рис.3.9). Перший етап - це фільтрація сигналів від перешкод і шумів, виділення реального сигналу. Другий етап полягає в безпосередньому аналізі параметрів, що знімаються, порівнянні їх з еталоном, визначенні поточного стану і пророцтві залишкового ресурсу елементів системи. Третій етап - класифікація стану систем : аварійне, неаварійне, доаварійне і рішення по формуванню рекомендацій.

Важливим завданням в процесі побудови нейромережевої діагностики параметрів є фільтрація сигналів, що поступають на нейронну мережу, що

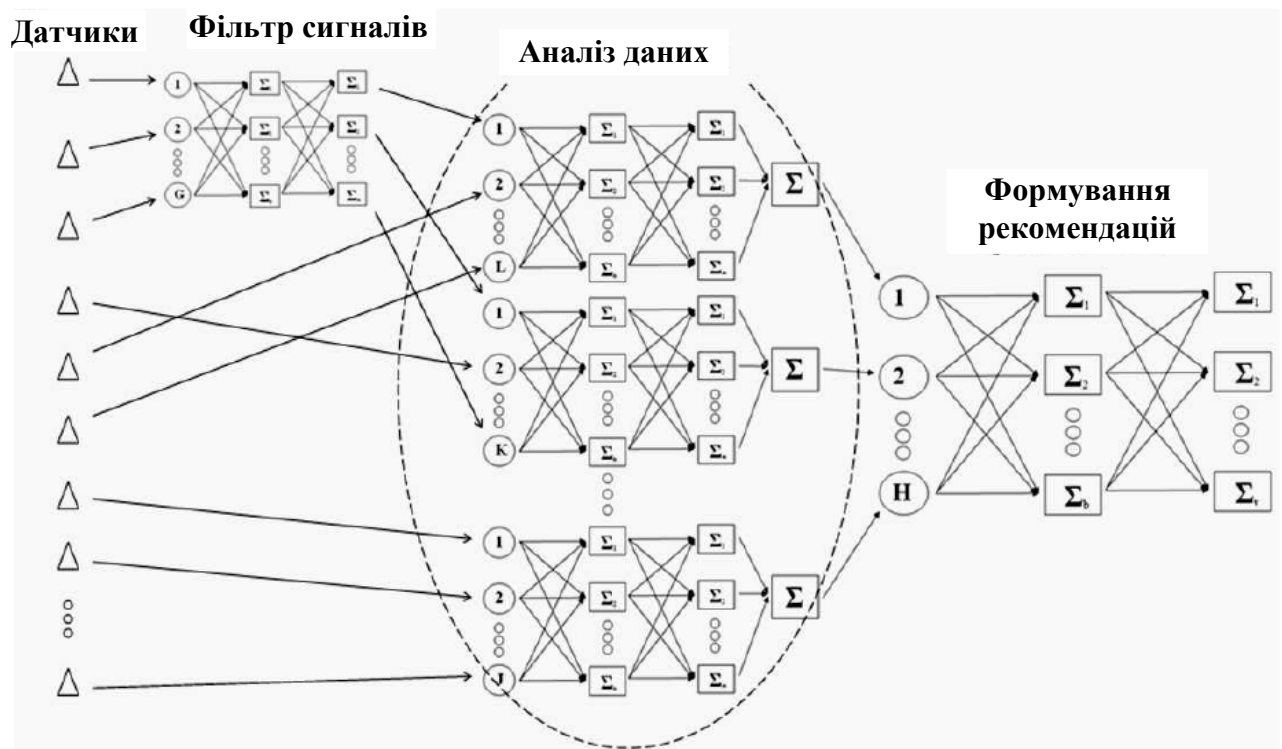


Рис.3.9 Схема поетапного аналізу параметрів суднового аналізу

відповідає за аналіз даних. До спотворених сигналів, що знімаються з датчиків (акустичних і вібраційних, температурних та ін.), можна віднести в першу чергу аналогові сигнали, які найбільш схильні до впливу "шуму". Для виявлення корисного сигналу пропонується застосувати нейронні мережі з розпізнаванням образів, типу: багатошаровий мережі прямого розповсюдження (FF), радіально-базові мережі (RBF). В якості вхідних даних на етапі безпосереднього аналізу пропонується використовувати безпосередньо параметри двигунів і допоміжних систем. Аналіз сигналів, що поступають, можливе здійснювати нейронними мережами типу: багатошаровий мережі прямого розповсюдження (FF), радіально-базові мережі (RBF). мережу Кохонена (KN). На етапі формування пропозиції використовуються нейронні мережі із змішаною парадигмою навчання і з "учителем", такі як багатошаровий мережі прямого розповсюдження (FF), радіально-базові мережі (RBF). На цьому етапі нейронна мережа здійснюватиме аналіз не самих параметрів системи, а вихідних даних нейронної мережі другого етапу.

Ґрунтуючись на властивостях нейронних мереж, можна уявити собі абсолютно інший спосіб моделювання і осмислення протікаючих процесів, підвищивши якість процесу діагностики судна, що зрештою дозволить істотно понизити кількість аварійних ситуацій, що виникають на судах.

Нейронні мережі знаходять також різноманітне ви користування при рішенні навігаційних задач. В одних випадках коефіцієнти нейронної мережі залежать від фізичних характеристик конкретного судна, його рульового комплексу, залишаючись постійними при любых значеннях вхідних сигналів, а в других – вільні параметри мережі підстроюються відповідно с даною динамікою судна, характером зміни його траєкторії, які не залежать у явному вигляді від характеристик його корпусу, типу двигуна та рульового пристрою.

Окрім того нейронна мережа може працювати в ролі регулюючої системи, яке може стабілізувати курс судна. При цьому коефіцієнти мережі мають змогу підстроюватися к в режимі реального часу на основі значення похибки регулювання, так і визначатися апріорі на основі еталонних ситуацій, які формуються в процесі управління судном за допомогою того або іншого регулятора. В системах управління знайшли поширене використання нейронні мережі, які побудовані на нечіткій логіці.

Контрольні питання до розділу 3

1. Що таке процес навчання нейронної мережі за допомогою вчителя? Які основні методи навчання з вчителем?
2. Що таке процес навчання нейронної мережі без вчителя?
3. Що таке процес навчання з підкріпленням? Чим він відрізняється від метода навчання з вчителем?
4. Опишіть алгоритм навчання нейронної мережі згідно методу зворотного поширення похибки.
5. Які труднощі виникають при використанні алгоритму зворотного поширення похибки? Яким чином можливо їх уникнути?
6. Що таке процес навчання нейронної мережі по алгоритму випадкового пошуку?
7. Що таке процес навчання нейронної мережі по генетичному алгоритму?
8. Опишіть метод Хебба при навчанні нейронної мережі без вчителя.
9. Опишіть різницю навчання між сигнальним та диференціальним методом Хебба.
10. Опишіть метод конкурентного навчання нейронної мережі без вчителя.
11. Яким чином використовують нейронні мережі в інтегрованих системах судна. Які перспективи є у такому використанні нейронних мереж?

4. Нейронні мережі нечіткої логіки в системах управління

Штучні нейронні мережі в системах керування застосовують у вигляді нейроконтролерів (нейрорегуляторів) та нейроемуляторів, що імітують динамічну поведінку об'єкту керування в цілому, або описуючих його окремі характеристики, які не піддаються математичному моделюванню.

Нейронні мережі почали застосовуватись у системах управління завдяки таким властивостям:

- нейронні мережі можуть реалізовувати довільні гладкі функції будь-якої складності;
- для реалізації нейромережних систем управління потрібна мінімальна інформація про об'єкт управління;
- під час реалізації штучних нейронних мереж у вигляді спеціалізованих інтегральних мікросхем можливе паралельне оброблення інформації, що значно збільшує швидкість роботи і підвищує надійність системи.

Найбільш часто для цього використовують нейронні мережі на основі нечіткої логіки.

Нечітка нейронна мережа – це багатошарова нейронна мережа, в якій шари виконують функції елементів системи нечіткого висновку. Нейрони такої мережі характеризуються набором параметрів, настроювання яких виконують під час навчання, як у звичайних штучних нейронних мережах.

Основна перевага систем з нечіткою логікою – це здатність використовувати умови і методи розв'язування задач, описані мовою, близькою до природної. Однак класичні системи з нечіткою логікою, нездатні навчатися автоматично, мають недоліки. Набір нечітких правил, вид і параметри функцій належності, що описують вхідні і вихідні змінні системи, а також вид алгоритму нечіткого висновку, вибираються суб'єктивно експертом-людиною, і вони не завжди відповідають дійсності. Для усунення вказаного недоліку був запропонований апарат нечітких нейронних мереж (fuzzy neural networks). Ці системи відомі також як *адаптивні нейро-нечіткі системи висновку* (Adaptive NeuroFuzzy Inference System, ANFIS).

4.1 Нечітка логіка та нечіткі множини

Нечітка логіка – це надмножина традиційної (булевої) логіки, яка була розширена для того, щоб оперувати над *частково* істинними значеннями, розміщеними між поняттями «*повна істина*» і «*повна неправда*». Висновки в нечіткій логіці швидше наближені, ніж точні. Важливість нечіткої логіки впливає з того, що більшість висновків, які робить людина, особливо ґрунтуючись на здоровому глузді, – неточні за своєю природою.

Найбільш суттєві такі характеристики нечіткої логіки:

- точний висновок є граничним випадком наближеного;
- все визначено лише в тій чи іншій мірі;
- будь-яку логічну систему можна розглядати у «нечіткому» сенсі, іншими словами, нечітка логіка є надмножиною традиційної логіки;

- знання інтерпретують як множину *не жорстких* або, що те ж саме, *нечітких* обмежень набору змінних;
- висновок розглядають як процес поширення нежорстких обмежень.

Перед тим, як зайнятися детальним вивченням нечіткої логіки і нечітких множин, згадаємо, що являє собою класична «двозначна» теорія множин. **Множина** – це набір об'єктів із спільними властивостями у певному контексті. Наведемо декілька прикладів класичних множин:

- множина натуральних чисел, менших за 5: $A = \{1, 2, 3, 4\}$;
- коло одиничного радіуса у комплексній площині:
 $A = \{z \mid z \in \mathbb{C}, |z| \leq 1\}$ - множина A складається з чисел z , які належать множені $\mathbb{C}$ причому їх модуль менш або дорівнює 1;
- пряма на площині: $A = \{(x, y) \mid ax + by + c = 0, (x, y, a, b, c \in \mathbb{R})\}$ - множина A складається з чисел x, y , для яких виконується рівняння $ax + by + c = 0$, причому числа x, y, a, b, c є дійсними числами.

Множина може бути задана (визначена) такими способами:

- переліком її елементів з яких вона складається: $A = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$;
- завданням властивостей множини: $A = \{x \in R \mid x < P\}$ - множина складається з чисел x , які є дійсними та їх значення менш числа P ;
- функцією належності $\mu_A(x)$, яка за умови $x \rightarrow [0, 1]$ має такий вигляд:

$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & x \in A \\ 0, & x \notin A \end{cases}$ - якщо функція $\mu_A(x) = 1$, то число x належить множині A , якщо функція $\mu_A(x) = 0$, то число x не належить множині A ,

Наприклад: множина дійсних чисел в діапазоні від 5 до 10: $A = \{x \in \mathbb{R} \mid 5 \leq x \leq 10\}$, а її графік $\mu_A = \begin{cases} 1, & x \in R \\ 0, & x \notin R \end{cases}$ має вигляд, наведений на рис.4.1.

У цьому прикладі числа, для яких функція належності набуває значення 1, ми

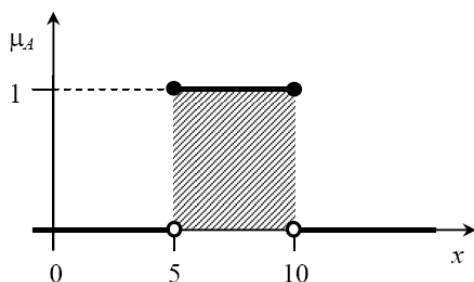


Рис.4.1 Множина дійсних чисел в діапазоні від 5 до 10

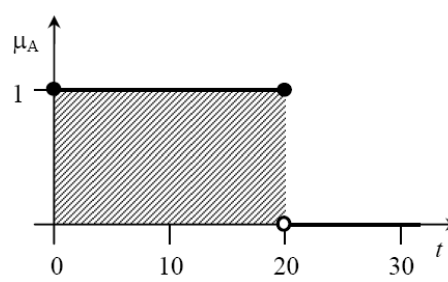


Рис.4.2 Функція належності множини «молоді люди»

інтерпретуємо як елементи, що *належать* множині, а числа, для яких значення функції дорівнює 0, як такі, що *не належать* множині. Такої концепції завдання та інтерпретації множин зазвичай достатньо для більшості застосувань. Проте, не важко знайти ситуації, в яких такому підходові вже не вистачає «гнучкості». Наприклад, розглянемо множину «молодих людей». Задавши верхню вікову межу поняття «молодий» у 20 років (нижня, природно,

0), маємо таку функцію належності $A = \{x \in R \mid 0 \leq x \leq 20\}$, $\mu_A = \begin{cases} 1, x \in R \\ 0, x \notin R \end{cases}$ (рис. 4.2).

У цьому випадку, дотримуючись традиційної логіки, якщо вік індивідуума без одного дня 20 років, то він молодий, а наступного дня – вже ні. Бачимо, що в наведеному прикладі традиційна логіка не здатна адекватно відобразити реальної ситуації. В нечіткій логіці ця проблема може бути вирішена.

Використання елементів нечітких множин може послабити *жорсткість* верхнього обмеження на належність множині. Задамо функції належності таким чином:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} \text{не молодий, } x > 25 \\ \text{частково молодий, } x \in [15, 25] \\ \text{молодий, } 15 > x > 0 \end{cases} \quad (4.1)$$

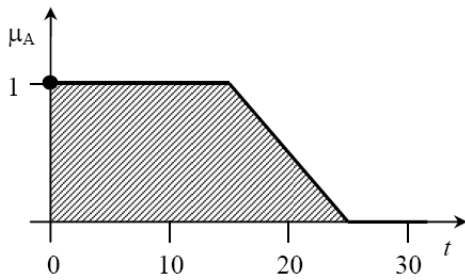


Рис.4.3 . «Нечітка» функція належності

Графік такої функції наведено на рис. 4.3.

У цьому випадку можна сказати, що коли вік людини 15 років, то ступінь належності до множини «молодий» дорівнює 1, якщо 20 років, то ступінь належності 0,5, а якщо вік більший за 25, то 0. Таким чином, нечіткій множині можна дати таке визначення:

Нечіткою множиною A в деякому (непорожньому) просторі X , що позначається як $A \subseteq X$, називається множина пар $A = \{(x, \mu_A(x)); x \in X\}$, де $\mu_A : X \rightarrow [0,1]$ – **функція належності** нечіткої множини A .

Ця функція приписує кожному елементу $x \in X$ міру його належності до нечіткої множини A . При цьому можна виділити три випадки:

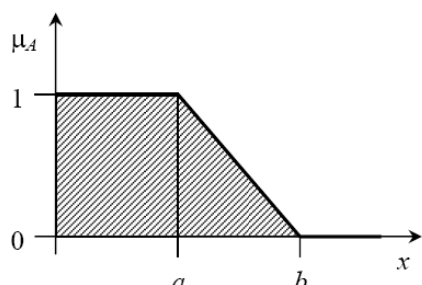
- 1) $\mu_A(x) = 1$ - означає повну належність елемента x до нечіткої множини A , тобто $x \in A$;
- 2) $\mu_A(x) = 0$ - означає, що елемент x не належить до нечіткої множини A , тобто $x \notin A$;
- 3) $0 < \mu_A(x) < 1$ - означає часткову належність елемента x до нечіткої множини A .

4.2. Види функцій належності та їх побудова

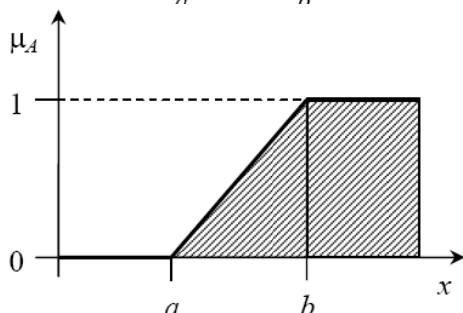
Для визначення вигляду функції належності розроблено різні експертні методи. У деяких випадках використовують типові форми функцій належності. Тоді методом експертних оцінок визначають тип функцій належності і їх параметри. Наведемо деякі типові функції належності.

Кусково-лінійні (трапецієподібні і трикутні):

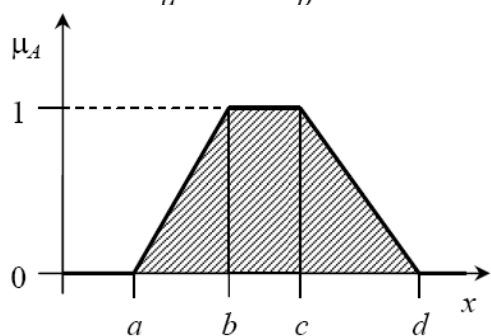
Бачимо, що трикутна функція належності (4.5) є частинним випадком узагальненої трапецієподібної (4.4).



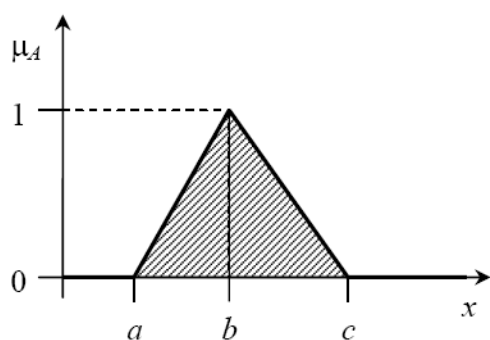
$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & x < a \\ \frac{b-x}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 0, & x > b \end{cases} \quad (4.2)$$



$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & x > b \end{cases} \quad (4.3)$$

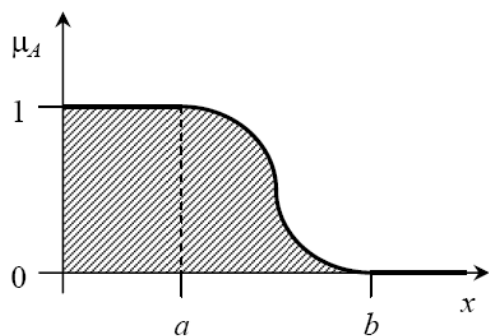


$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b < x < c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & x > d \end{cases} \quad (4.4)$$

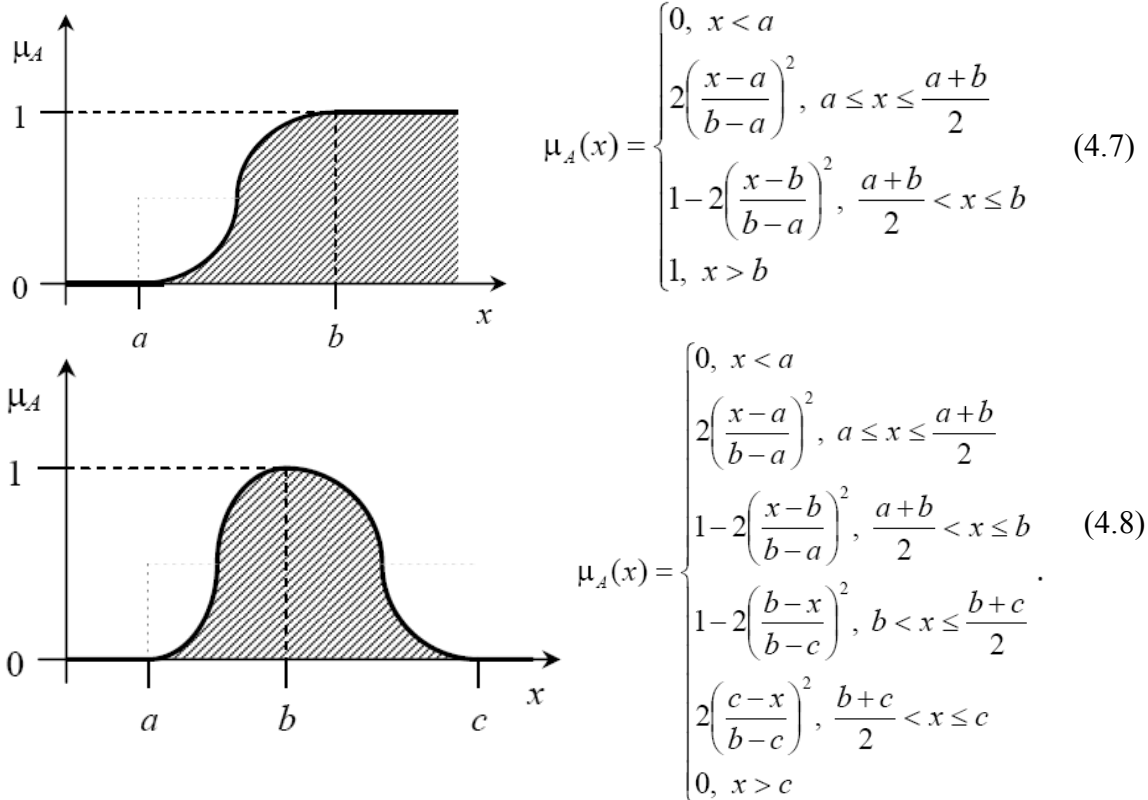


$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b < x \leq c \\ 0, & x > c \end{cases} \quad (4.5)$$

S-подібні та дзвоноподібні:



$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & x < a \\ 1 - 2\left(\frac{a-x}{a-b}\right)^2, & a \leq x \leq \frac{a+b}{2} \\ 2\left(\frac{b-x}{a-b}\right)^2, & \frac{a+b}{2} < x \leq b \\ 0, & x > b \end{cases} \quad (4.6)$$



Слід зазначити, що дзвоноподібна функція належності (4.8) не обов'язково повинна бути симетричною.

Розглянемо приклад побудови нечітких функцій належності, виходячи з інформації, поданої у лінгвістичній формі. Візьмемо, наприклад, таке словосполучення, як *температура повітря*. З погляду суб'єктивного сприйняття температури людиною, вона може відповідати трьом рівням (множинам): *холодно*, *тепло* і *гаряче*. Процес переходу до нечітких множин схематично подано на рис. 4.4.

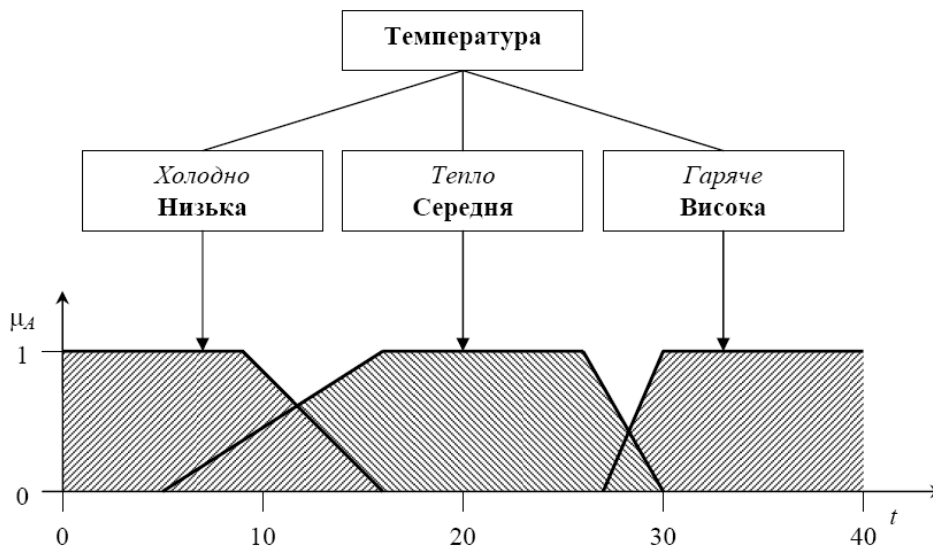


Рис.4.4 . Перехід до нечітких функцій належності

Слід зазначити, що слова «холодно», «тепло» і «гаряче», які відповідають нечітким функціям належності, повинні вибиратися так, щоб мати очевидний

сенс і покривати весь діапазон можливих значень для базової змінної (в нашому випадку температури).

4.3. Операції над нечіткими множинами

Аналогічно із звичайною теорією множин, в теорії нечітких множин вводяться логічні операції над множинами: *перетин*, *об'єднання* та *доповнення* (заперечення).

Нехай A і B – нечіткі множини на універсальній множині E (рис. 4.5).

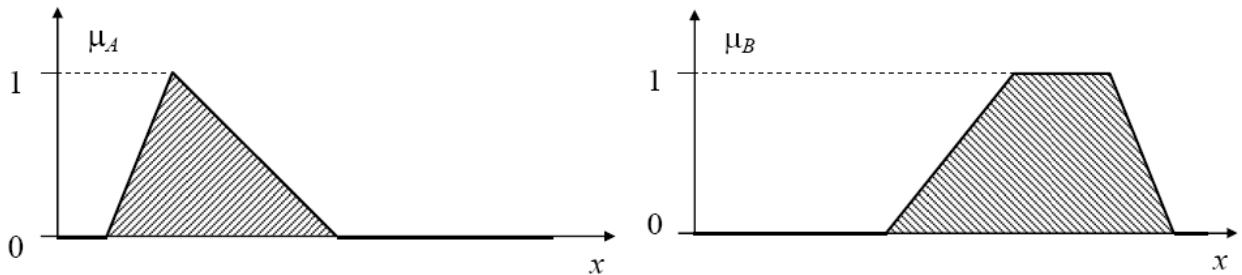


Рис.4.5 Функції належності початкових множин A і B

Тоді можемо визначити такі операції над нечіткими множинами A і B .

Рівність

A і B рівні, якщо $\forall x \in E, \mu_A(x) = \mu_B(x)$.

Перетин (операція І, AND)

Перетином нечітких множин A і B називають нечітку множину $A \cap B$, яка має для такої функції належності:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (4.9)$$

Графічна інтерпретація цієї операції подана на рис. 4.6. (жирна суцільна лінія відповідає функції належності множини висновку).

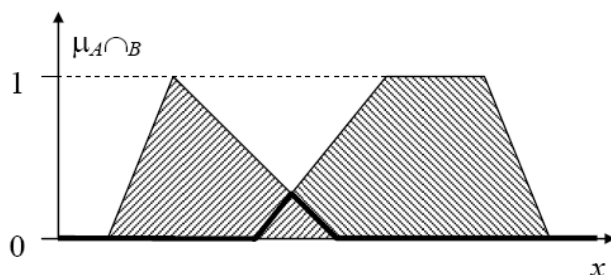


Рис.6.6 П е р е т и н д в о х

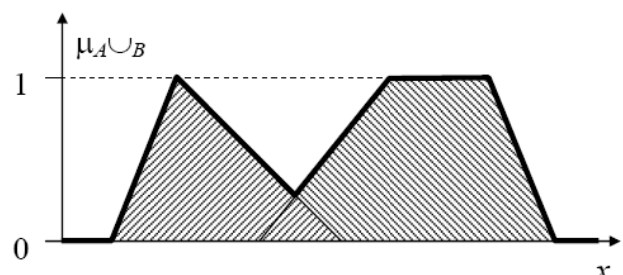


Рис.4.7 О б ' є д н а н н я

Об'єднання (операція АБО, OR)

Об'єднанням нечітких множин A і B називають нечітку множину $A \cup B$, яка має для $\forall x \in E$ таку функцію належності:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (4.10)$$

Графічна інтерпретація операції об'єднання подана на рис. 4.7.

Доповнення (операція НІ, NOT)

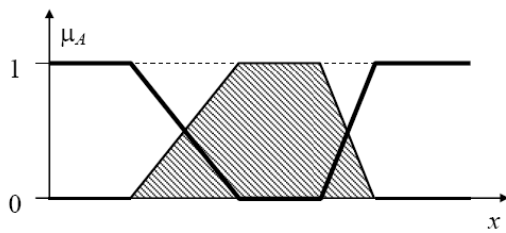


Рис.4.8 Доповнення множини

Доповненням нечіткої множини A називають нечітку множину $\bar{A}$ яка має для $\forall x \in E$ таку функцію належності:

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x).$$

Графічну інтерпретацію операції доповнення подано на рис. 4.8.

Застосування операцій доповнення, об'єднання і перетину дає змогу взяти до уваги різноманітні змістові відтінки відповідних їм зв'язків «НІ», «АБО», «І». Зазначимо також, що застосування операцій $\min$ і $\max$ у виразах (4.9) і (4.10) дозволяє для нечітких множин зберегти більшість властивостей традиційних множин, зокрема комутативність, асоціативність, ідемпотентність, дистрибутивність.

Комутативність (закон переміщення) – це властивість множин, яка складається в тому, що результат операції над множинами не залежить від порядку слідування операндів (аргументів операції), тобто «від зміни місцями множників доданок не змінюється». Наприклад, для класичній логіки операція кон'юнкції (операція І) є комутативною: $(A \& B) \leftrightarrow (B \& A)$ – A і B тоді і тільки тоді, коли B і A .

Асоціативність – властивість бінарної операції при якому результат послідовного використання операції не залежить від розташування скобок.. Наприклад, для класичній логіки операція диз'юнкції (операція АБО) є асоціативною: $(A \vee B) \vee C \leftrightarrow A \vee (B \vee C)$.

Ідемпотентність – властивість операції при повторному використанні давати теж самий результат. Наприклад, для класичній логіки операція диз'юнкції (операція АБО) є ідемпотентною: $A \vee A = A$ (при $A=0$ $0 \vee 0 = 0$, при $A=1$ $1 \vee 1 = 1$).

Дистрибутивність – властивість узгодження двох бінарних операцій, які визначені в одній і тій же множині. Наприклад, для класичній логіки дистрибутивність кон'юнкції відносно диз'юнкції виглядає так: $(A \& B) \vee (A \& C) = A \& (B \vee C)$.

4.4 Методи нечіткого висновку

У традиційній двійковій логіці висновки щодо істинності одних суджень виводять ґрунтуючись на істинності інших суджень. Розглянемо два основних правила висновку, які застосовують у двійковій логіці.

Правило 1. Modus Ponens (модус поненс) дозволяє від ствердження умовного висловлювання та ствердження його основи перейти до ствердження наслідку висловлювання:

Умова	A	(правило)
Імплікація	$A \rightarrow B$	(факт)
Висновок	B	

Нехай судження A – «це судно», а судження B – «воно плаває». Відповідно до правила *modus ponens*, якщо A правильне, то і B правильне. Іншими словами, з істинності передумови та імплікації випливає істинність висновку. Інший приклад: «метали» - провідники струму, мідь – метал, тоді мідь проводить струм.

Правило 2. **Modus Tollens** (модус толленс) міркування від протилежного:

$$\begin{array}{lll} \text{Умова} & \bar{B} & \text{(правило)} \\ \text{Імплікація} & A \rightarrow B & \text{(факт)} \\ \hline \text{Висновок} & \bar{A} & \end{array}$$

У цьому випадку з істинності передумови та імплікації випливає істинність висновку. Наприклад, якщо «воно не судно», то «це не плаває». В даному випадку ми прийшли до невірної висновку це може бути човен.

В нечіткій логіці необхідне припустити, що наявні у правилах *modus ponens* і *modus tollens* судження характеризуються деякими нечіткими множинами. Далі буде записувати залежності типу «якщо A , то B » використовуючи службові слова мов програмування: **if A then B** . Тоді:

Modus Ponens

$$\begin{array}{lll} \text{Умова} & x \text{ is } A' & \text{(правило)} \\ \text{Імплікація} & \text{if } x \text{ is } A \text{ then } y \text{ is } B & \text{(факт)} \\ \hline \text{Висновок} & y \text{ is } B' & \end{array}$$

Modus Tollens

$$\begin{array}{lll} \text{Умова} & x \text{ is not } B' & \text{(правило)} \\ \text{Імплікація} & \text{if } x \text{ is } A \text{ then } y \text{ is } B & \text{(факт)} \\ \hline \text{Висновок} & x \text{ is not } A' & \end{array}$$

Поняття нечіткого виводу займає центральне місце в нечіткій логіці і в теорії нечіткого управління. Говорячи про нечітку логіку в системах управління, можна дати наступне визначення системи нечіткого виводу.

Система нечіткого виводу - це процес отримання нечітких



Рис.4.9 Діаграма процесу нечіткого виводу в нечітких системах управління

ув'язнень про необхідне управління об'єктом на основі нечітких умов або передумов, що є інформацією про поточний стан об'єкту.

Цей процес сполучає в собі усі основні концепції теорії нечітких великих кількостей : функції приналежності, лінгвістичні змінні, методи нечіткої імплікації і тому подібне. Розробка і застосування систем нечіткого виводу включає ряд етапів, реалізація яких виконується на основі розглянутих раніше положень нечіткої логіки (рис.4.9).

База правил систем нечіткого виводу призначена для формального уявлення емпіричних знань експертів в тій або іншій предметній області у формі нечітких продукційних правил. Таким чином, база нечітких продукційних правил системи нечіткого виводу - це система нечітких продукційних правил, що відбиває знання експертів про методи управління об'єктом в різних ситуаціях, характері його функціонування в різних умовах і тому подібне, тобто що містить формалізовані людські знання.

Приклад. Є наливна ємність (бак) з безперервним керованим припливом рідини і безперервною некерованою витратою рідини. База правил системи нечіткого виводу, що відповідає знанням експерта про те, який необхідно вибрати приплив рідини щоб рівень рідини в баку залишався середнім, виглядатиме таким чином:

ПРАВИЛО 1	ЯКЩО "рівень рідини малий"	I "витрата рідини велика"	ТО "приплив рідини великий"
ПРАВИЛО 2:	ЯКЩО "рівень рідини малий"	I "витрата рідини середня"	ТО "приплив рідини великий"
ПРАВИЛО 3:	ЯКЩО "рівень рідини малий"	I "витрата рідини мала"	ТО "приплив рідини середній"
ПРАВИЛО 4:	ЯКЩО "рівень рідини середній"	I "витрата рідини великої"	ТО "приплив рідини великий"
ПРАВИЛО 5:	ЯКЩО "рівень рідини середній"	I "витрата рідини середня"	ТО "приплив рідини середній"
ПРАВИЛО 6:	ЯКЩО "рівень рідини середній"	I "витрата рідини мала"	ТО "приплив рідини середній"
ПРАВИЛО 7:	ЯКЩО "рівень рідини великий"	I "витрата рідини великої"	ТО "приплив рідини середній"
ПРАВИЛО 8:	ЯКЩО "рівень рідини великий"	I "витрата рідини середня"	ТО "приплив рідини малий"
ПРАВИЛО 9:	ЯКЩО "рівень рідини великий"	I "витрата рідини мала"	ТО "приплив рідини малий"

Використовуючи позначення ZP – "малий", PM – "середній", PB – "великий", цю базу нечітких продукційних правил можна уявити у вигляді таблиці, у вузлах якої знаходяться відповідні вимоги про необхідний приплив рідини :

Витрата	Рівень		
	ZP - малий	PM - середній	PB - великий
ZP - малі	PM (;№3)	ZP (;№6)	ZP (;№9)
PM - середні	PM (;№2)	PM (;№5)	ZP (;№8)
PB - великі	PB (;№1)	PB (;№4)	PM (;№7)

Фаззифікація (fuzzification - введення нечіткості) - це установка відповідності між чисельним значенням вхідної змінної системи нечіткого виводу і значенням функції належності відповідного нею терма лінгвістичної змінної. На етапі фаззифікації значенням усіх вхідним змінним системи нечіткого виводу, отриманим зовнішнім по відношенню до системи нечіткого виводу способом, наприклад, за допомогою датчиків, ставляться у відповідність конкретні значення функцій належності відповідних лінгвістичних термів, які використовуються в умовах (антецедентах) ядер нечітких продукційних правил, що становлять базу нечітких продукційних правил системи нечіткого виводу. Фаззифікація вважається виконаною, якщо знайдені міри істинності $\mu_A(x)$ усіх елементарних логічних висловлювань виду x is A , що входять в антецеденти нечітких продукційних правил

Приклад. Формалізація опису рівня рідини в баку і витрати рідини проведена за допомогою лінгвістичних змінних, в кортежі яких міститься по три нечітких змінних, що відповідають поняттям малого, середнього і великого значення відповідних фізичних величин від датчика рівня. Поняття «малий рівень» нехай описується функцією (4.2) зі значенням $a=2, b=4$. Поняття «середній рівень» нехай описується функцією (5.4) зі значенням $a=2, b=4, c=6, d=8$. Поняття «великий рівень» нехай описується функцією (4.3) зі значенням $a=6, b=8$ (рис.4.10 а). Тоді поточному рівню рідини в баку 2,5 м згідно датчику відповідають наступні значення функції належності:

"рівень рідини малий" згідно (4.2): $\mu_A(x=2,5) = \frac{b-x}{b-a} = \frac{4-2,5}{4-2} = 0,75$

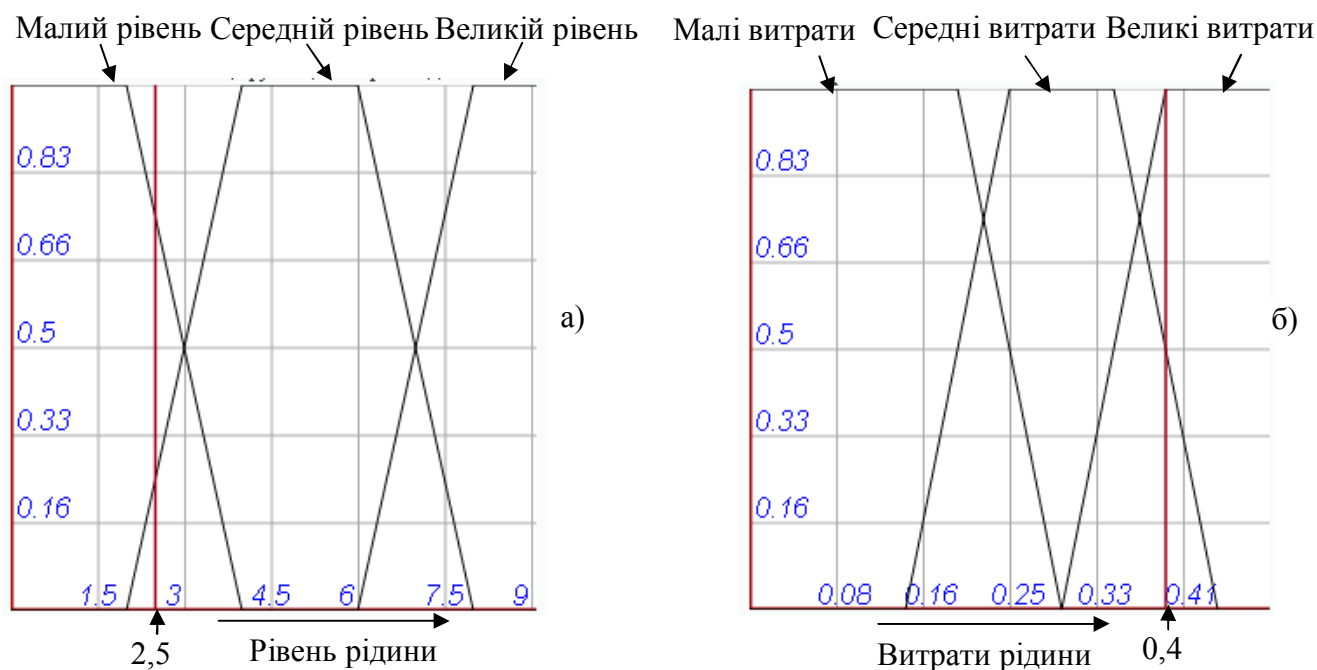


Рис.4.10 Введення нечіткості (фазифізація) вхідних даних від датчиків:
а – терм «рівень рідини»; б – терм «поточні втрати рідини»

"рівень рідини середній" згідно (4.4): $\mu_A(x=2,5) = \frac{x-a}{b-a} = \frac{2,5-2}{4-2} = 0,25$

"рівень рідини великий" згідно (4.3): $\mu_A(x=2,5) = 0,00$

Аналогічно для вхідного терма лінгвістичної змінної «витрата» при витратах згідно датчику $0,4 \text{ м}^3/\text{с}$ маємо (рис.4.10 б):

"витрата рідини мала" згідно (4.2) при $a = 0,2, b = 0,3$: $\mu_A(x = 0,4) = 0$

"витрата рідини середня" згідно (4.4) при

$$a = 0,15, b = 0,25, c = 0,35, d = 0,45: \mu_A(x = 0,4) = \frac{d-x}{d-c} = \frac{0,45-0,4}{0,45-0,35} = 0,50$$

"витрата рідини велика" згідно (4.3) при

$$a = 0,3, b = 0,4: \mu_A(x = 0,4) = \frac{x-a}{b-a} = \frac{0,4-0,3}{0,4-0,3} = 1,00$$

Агрегація (aggregation) - це процедура визначення міри істинності умов по кожному з правил системи нечіткого виводу. При цьому використовується отримане на етапі фаззифікації значення функцій належності термів лінгвістичних змінних, що становлять вищезгадані умови (антецеденти) ядер нечітких продукційних правил.

Якщо умова нечіткого продукційного правила є простим нечітким висловлюванням, то міра його істинності відповідає значенню функції приналежності відповідного терма лінгвістичної змінної.

Якщо умова представляє складене висловлювання, то міра істинності складного висловлювання визначається на основі відомих значень істинності складових його елементарних висловлювань за допомогою введених раніше нечітких логічних операцій в одному з обумовлених заздалегідь базисів.

Наприклад, з урахуванням отриманих в результаті фаззифікації значень істинності елементарних висловлювань, міра істинності умов для кожного складеного правила системи нечіткого виводу по управлінню рівнем рідини в баку, відповідно до визначення згідно, наприклад, правила імплікації Заде: $\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(y) = \min[\mu_A(x), \mu_B(y)]$, буде наступною.

ПРАВИЛО <1>: антецедент – "рівень рідини малий" І "витрата рідини великі"; міра істинності антецедента $\min\{0.75; 1.00\} = 0.75$.

ПРАВИЛО <2>: антецедент – "рівень рідини малий" І "витрата рідини середня"; міра істинності антецедента $\min\{0.75; 0.50\} = 0.50$.

ПРАВИЛО <3>: антецедент – "рівень рідини малий" І "витрата рідини мала", міра істинності антецедента $\min\{0.75; 0.00\} = 0.00$.

ПРАВИЛО <4>: антецедент – "рівень рідини середній" І "витрата рідини великої", міра істинності антецедента $\min\{0.25; 1.00\} = 0.25$.

ПРАВИЛО <5>: антецедент – "рівень рідини середній" І "витрата рідини середня", міра істинності антецедента $\min\{0.25; 0.50\} = 0.25$.

ПРАВИЛО <6>: антецедент – "рівень рідини середній" І "витрата рідини мала", міра істинності антецедента $\min\{0.25; 0.00\} = 0.00$.

ПРАВИЛО <7>: антецедент – "рівень рідини великої" І "витрата рідини великої", міра істинності антецедента $\min\{0.00; 1.00\} = 0.00$.

ПРАВИЛО <8>: антецедент – "рівень рідини великої" І "витрата рідини середня", міра істинності антецедента $\min\{0.00;0.50\}=0.00$.

ПРАВИЛО <9>: антецедент – "рівень рідини великої" І "витрата рідини мала", міра істинності антецедента $\min\{0.00;0.00\}=0.00$.

Витрата	Рівень		
	0.75	0.25	0
0	0	0	0
0,50	0.50	0.25	0
1	0.75	0.25	0

Правила імплікації можуть бути і іншими. Основні з них:

1. Правило типу «мінімум» (правило Мамдані)

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(y) = \min[\mu_A(x), \mu_B(y)]$$

2. Правило типу «добуток» (правило Ларсена)

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(y)$$

3. Правило Лукашевича

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = 1 \wedge [1 - \mu_A(x) + \mu_B(y)] = \min[1, 1 - \mu_A(x) + \mu_B(y)]$$

4. Правило типу «максимум-мінімум» (правило Заде)

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = [\mu_A(x) \wedge \mu_B(y)] \vee [1 - \mu_A(x)] = \max\{\min[\mu_A(x), \mu_B(y)], 1 - \mu_A(x)\}$$

5. Бінарне правило (правило Кліна–Дейна)

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = [1 - \mu_A(x)] \vee \mu_B(y) = \max[1 - \mu_A(x), \mu_B(y)]$$

Активізація в системах нечіткого виводу - це процедура або процес знаходження міри істинності кожного з елементарних логічних висловлювань (підув'язнень), що становлять консеквенти ядер усіх нечітких продукційних правил. Оскільки ув'язнення робляться відносно вихідних лінгвістичних змінних, то мірам істинності елементарних підув'язнень при активізації ставляться у відповідність елементарні функції належності.

Якщо ув'язнення (консеквент) нечіткого продукційного правила є простим нечітким висловлюванням, то міра його істинності дорівнює твору алгебри вагового коефіцієнта і міри істинності антецедента цього нечіткого продукційного правила.

Якщо ув'язнення представляє складене висловлювання, то міра істинності кожного з елементарних висловлювань дорівнює твору алгебри вагового коефіцієнта і міри істинності антецедента цього нечіткого продукційного правила.

Якщо вагові коефіцієнти продукційних правил не вказані явно на етапі формування бази правил, то їх значення за умовчанням дорівнюють одиниці.

Функції належності μ (у) кожного з елементарних підув'язнень консеквентів усіх продукційних правил знаходяться за допомогою одного з методів нечіткої композиції:

min -активізація – $\mu(y) = \min\{c; \mu(x)\}$;

prod -активізація – $\mu(y) = c \cdot \mu(x)$;

average -активізація – $\mu(y) = 0.5(c + \mu(x))$;

де $\mu(x)$ і s - відповідно до функції приналежності термів лінгвістичних змінних і міри істинності нечітких висловлювань, що утворюють відповідні наслідки (консеквенти) ядер нечітких продукційних правил.

Приклад. Якщо формалізація опису подачі рідини в бак проведена за допомогою лінгвістичної змінної, в кортежі якої міститься три нечітких змінних, що відповідають поняттям малого, середнього і великого значення подачі рідини, функції приналежності яких представлені на рис.4.10, то для

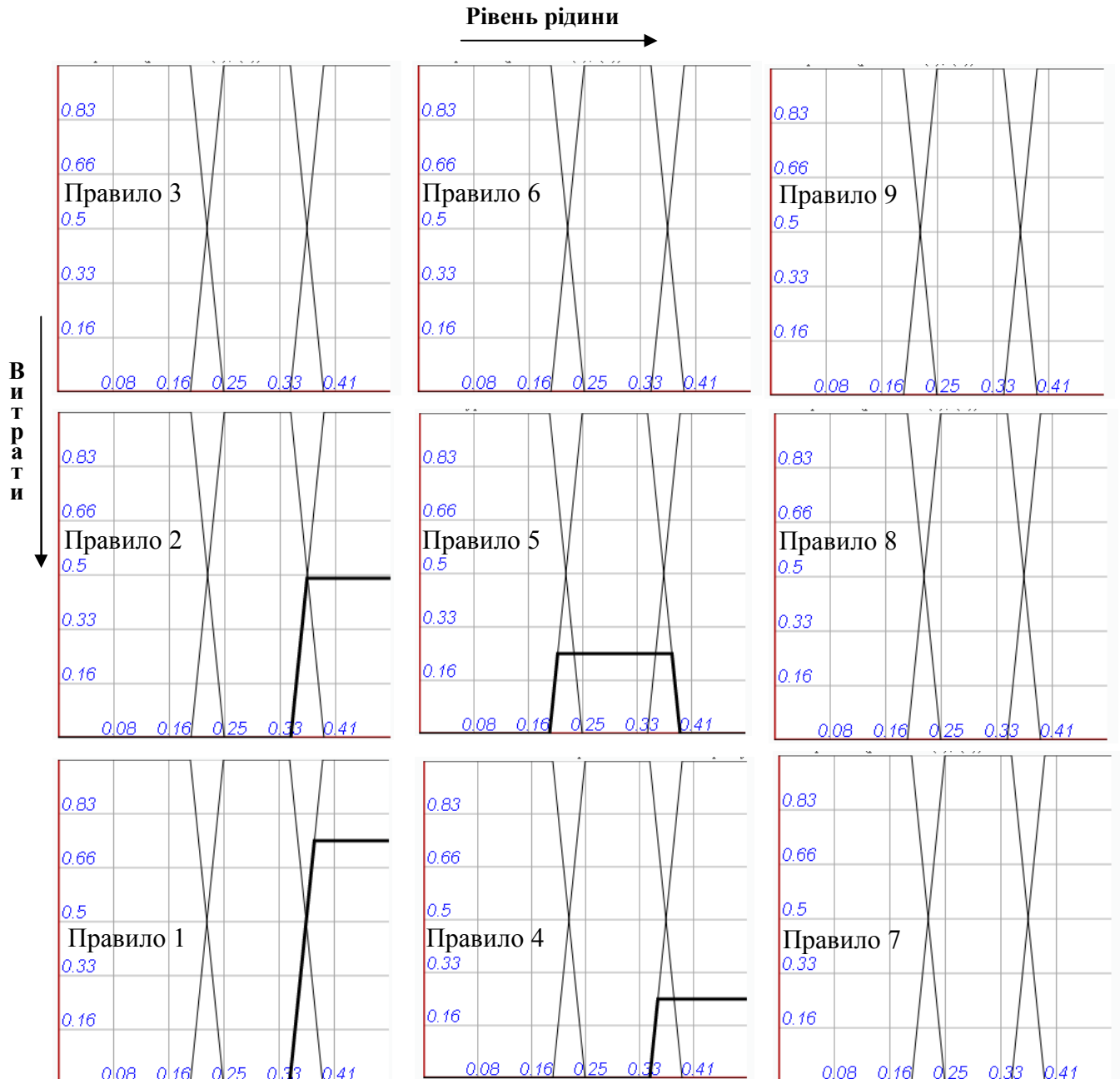


Рис.4.11 Вигляд функцій належності нечіткого виходу управління подавання рідини в бак після процесу активації

продукційних правил системи нечіткого виводу по управлінню рівнем рідини в баку за допомогою зміни подачі рідини, функції належності $\mu(y)$ усіх підув'язень при мін активізації виглядатимуть таким чином (рис.4.11).

Акумуляція (чи акумулювання) в системах нечіткого виводу - це процес знаходження функції належності для кожної з вихідних лінгвістичних змінних. Мета акумуляції полягає в об'єднанні усіх мір істинності підув'язнень для отримання функції належності кожної з вихідних змінних. Результат акумуляції для кожної вихідної лінгвістичної змінної визначається як об'єднання нечіткої безлічі усіх підув'язнень нечіткої бази правил відносно відповідної лінгвістичної змінної. Об'єднання функцій приналежності усіх підув'язнень проводиться як правило класично $\forall x \in X, \mu_A \cup \mu_B(x) = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}$ – операція **max – об'єднання**. Також можуть використовуватися операції:

алгебраїчне об'єднання: $\forall x \in X \mu_{A+B}x = \mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x) \cdot \mu_B(x)$

граничного об'єднання: $\forall x \in X \mu_{ABx} = \min(\mu_A(x) \cdot \mu_V(x), 1)$

драстичного об'єднання:

$\forall x \in X \mu_{A \nabla B}x = (\mu_B(x), \text{якщо } \mu_A(x) = 0; \mu_A(x), \text{якщо } \mu_B(x) = 0, 1 \text{ інакше})$

Приклад. Для продукційних правил системи нечіткого виводу по управлінню рівнем рідини в баку за допомогою зміни подачі рідини, функція належності лінгвістичної змінної "подача рідини", отримана в результаті акумуляції усіх підув'язнень при max – об'єднанні виглядатиме таким чином (рис.4.12).

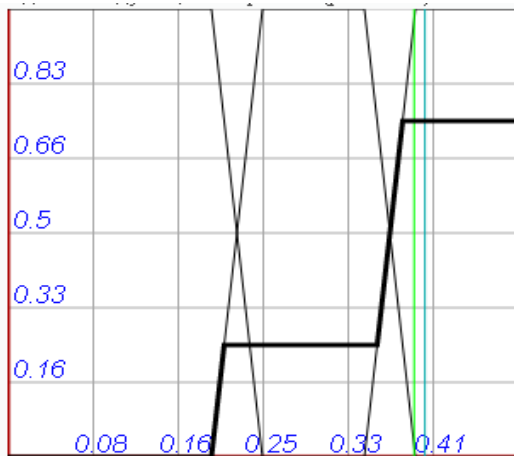


Рис.4.12 Функція належності лінгвістичної змінної «подача» рідини» після активації

Дефаззифікація (defuzzification) в системах нечіткого виводу - це процес переходу від функції належності вихідної лінгвістичної змінної до її чіткого (числового) значення. Мета дефаззифікації полягає в тому, щоб, використовуючи результати акумуляції усіх вихідних лінгвістичних змінних, набуті кількісних значень для кожної вихідної змінної, яке використовується зовнішніми по відношенню до системи нечіткого виводу пристроями (виконавчими механізмами

інтелектуальної САУ).

Перехід від отриманої в результаті акумуляції функції належності $\mu(x)$ вихідної лінгвістичної змінної до чисельного значення у вихідній змінної робиться одним з наступних методів :

- **метод центру тяжіння або центроїдний метод** (Centre of Gravity) полягає в розрахунку центроїда площі

$$y_0 = y_c = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} y \mu_{\Sigma}(y) dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \mu_{\Sigma}(y) dy} \quad (4.11)$$

Цей метод найбільш поширений. Результат такої дефаззифікації позначений на рис. 4.12 зеленою лінією.

- **метод центру площі** (Centre of Area) полягає в розрахунку абсциси y , що ділить площу, обмежену кривій функції належності $\mu(x)$, так званої бісектриси площі $\int x \min y \mu(x) dx = \int y x \max \mu(x) dx$; (на рис.4.12 результат дефазифікації позначений синьою лінією).
- **метод лівого модального значення** $y = x \min$;
- **метод правого модального значення** $y = x \max$

Приклад. Для продукційних правил системи нечіткого виводу по управлінню рівнем рідини в баку за допомогою зміни подачі рідини дефазифікація функції належності лінгвістичної змінної "подача рідини" (рис.4.12) призводить до наступних результатів:

метод центру тяжіння $y = 0.39875 \text{ м}^3/\text{с}$;

метод центру площі $y = 0.40938 \text{ м}^3/\text{с}$

метод лівого модального значення $y = 0.21 \text{ м}^3/\text{с}$;

метод правого модального значення $y = 0.50 \text{ м}^3/\text{с}$

Розглянуті етапи нечіткого виводу можуть бути реалізовані неоднозначним чином: агрегація може проводитися не лише в базисі нечіткої логіки Заде, активізація може проводитися різними методами нечіткої композиції, на етапі акумуляції об'єднання можна провести відмінним від $\max$ – об'єднанням способом, дефазифікація також може проводитися різними методами. Таким чином, вибір конкретних чинів реалізації окремих етапів нечіткого виводу визначає той або інший алгоритм нечіткого виводу. Нині залишається відкритим питання критеріїв і методів вибору алгоритму нечіткого виводу залежно від конкретного технічного завдання. На даний момент в системах нечіткого виводу найчастіше застосовуються наступні алгоритми.

4.4.1 Нечіткий логічний висновок за методом Мамдані

Механізм нечіткого логічного висновку (*inference*) ґрунтується на знаннях, сформованих спеціалістами цієї предметної галузі у вигляді сукупності нечітких породжувальних правил (правил логічного висновку):

$$\text{if } x_1 \text{ is } A_1 \text{ and } x_2 \text{ is } A_2 \text{ and...} x_n \text{ is } A_n \text{ then } y \text{ is } B$$

Частину правила перед ключовим словом **then** («то») називають умовою або передумовою (*antecedent*), а завершальну частину « $y \in B$ » – наслідком або висновком (*consequent*). Це етап формування бази даних.

Проілюструємо механізм нечіткого логічного висновку на прикладі обчислень значень функції $y = f(x_1, x_2)$. Припустимо, що маємо базу знань, яка складається з двох правил:

$$R1: \text{if } x_1 \text{ is } A_{11} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{22} \text{ then } y \text{ is } B_1,$$

$$R2: \text{if } x_1 \text{ is } A_{12} \text{ or } x_2 \text{ is } A_{22} \text{ then } y \text{ is } B_2,$$

де A_{ij} і B_i – це нечіткі множини, визначені для відповідних нечітких змінних, котрі мають функції належностей $\mu_{A_{ij}}(x)$ і $\mu_{B_{ij}}(y)$. Тепер за наданими значеннями $x_1 = x_{10}$ і $x_2 = x_{20}$ знайдемо конкретне y_0 . Слід зазначити, що цей

приклад легко узагальнити для довільної кількості вхідних (x) і вихідних (y) змінних.

Для логічного висновку приходимо за чотири кроки:

Крок 1. Введення нечіткості (fuzzification). Для чітко заданих вихідних значень розраховують ступені належності до окремих множин. Це етап фаззифікації.

Для розглядуваного прикладу визначають числові значення $\mu_{A_{1j}}(x_{10})$ і

$$\mu_{A_{2j}}(x_{20}).$$

Крок 2. Нечітка імплікація. Знаходять функції належності передумов кожного окремого правила за конкретних вхідних сигналів. Це етап агрегації.

$$\alpha_j = \mu_{A_{1j}}(x_{10}) \cap \mu_{A_{2j}}(x_{20}) \text{ — для оператора **and**.}$$

$$\alpha_j = \mu_{A_{1j}}(x_{10}) \cup \mu_{A_{2j}}(x_{20}) \text{ — для оператора **or**.}$$

Потім знаходять функції висновків належності кожного правила. Це етап активації.

$$\mu_j(y) = \alpha_j \cap \mu_{Bj}(y)$$

Крок 3. Нечітка композиція. Знаходять функцію висновків належності всієї сукупності правил при вхідних сигналах x_{10} і x_{20} . Це етап акумуляції.

$$\mu_{\Sigma}(y) = \mu_1(y) \cup \mu_2(y)$$

Крок 4. Зведення до чіткості (defuzzification). Використовують, коли потрібно перетворити вихідну функцію належності у конкретне значення y_0 . Це етап дефаззифікації. Крім розглянутих є багато різних методів зведення до чіткості, але найбільш поширений *центроїдний* метод.

Якщо в наведеному прикладі розділу 5.4 логічна операція перетину реалізується як функція «мінімум», а об'єднання — як «максимум» (рис. 4.9) та етап дефаззифікації виконується центроїдним методом за площею чи за центром тяжіння (рис. 4.12), то це алгоритм **Мамдані** (або Мамдані–Заде).

4.4.2 Нечіткий логічний висновок за методом Сугено

Формування бази правил системи нечіткого виводу здійснюється у вигляді впорядкованого узгодженого списку нечітких продукційних правил у вигляді "IF A AND B THEN $w = \varepsilon_A \cdot a + \varepsilon_B \cdot b$ ", де антецеденти ядер правил нечіткої продукції побудовані з двох простих нечітких висловлювань A, B за допомогою логічного зв'язку "I", а a і b - чіткі значення вхідних змінних, що відповідають висловлюванням A і B відповідно, $\varepsilon_A, \varepsilon_B$ - вагові коефіцієнти, що визначають коефіцієнти пропорційності між чіткими значеннями вхідних змінних і вихідної змінної системи нечіткого виводу, w - чітке значення вихідний змінної, визначене в ув'язненні нечіткого правила, як дійсне число.

Фаззифікація вхідних змінних, що визначають висловлювання і, здійснюється аналогічно алгоритму Мамдані.

Агрегація підумов правил нечіткої продукції здійснюється аналогічно алгоритму Мамдані за допомогою класичної нечіткої логічної операції "I" двох елементарних висловлювань A, B: $T(A \cap B) = \min\{T(A); T(B)\}$.

Активізація підумов правил нечіткої продукції проводиться в два етапи. На першому етапі, мірі істинності s висновків (консеквентів) нечітких продукційних правил, що ставлять у відповідність вихідний змінної дійсні числа, знаходяться аналогічно алгоритму Мамдани, як алгебраїчний добуток вагового коефіцієнта і міри істинності антецедента цього нечіткого продукційного правила. На другому етапі, на відміну від алгоритму Мамдани, для кожного з продукційних правил замість побудови функцій приналежності підув'язнень в явному виді знаходиться чітке значення вихідний змінної $w = \varepsilon_A \cdot a + \varepsilon_B \cdot b$. . Таким чином, кожному i -у продукційному правилу ставиться у відповідно точка $(c_i w_i)$, де c_i - міра істинності продукційного правила, w_i - чітке значення вихідної змінної, визначеної в консеквенте продукційного правила.

Акумуляція висновків правил нечіткої продукції не проводиться, оскільки на етапі активізації вже отримана дискретна безліч чітких значень для кожного з вихідних лінгвістичних змінних.

Дефазифікація проводиться методом центра тяжіння: Для кожної лінгвістичної змінної здійснюється перехід від дискретної безлічі чітких значень $\{w_1 \dots w_n\}$ до єдиного чіткого значення згідно з дискретним аналогом методу центру тяжіння:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n c_i w_i}{\sum_{i=1}^n c_i} \quad (4.12)$$

де n - кількість правил нечіткої продукції, в підув'язненнях якої фігурує ця лінгвістична змінна, c_i - міра істинності висновку продукційного правила, w_i - чітке значення цієї лінгвістичної змінної, встановлене в консеквенте продукційного правила.

Наприклад, алгоритм Сугено реалізується, якщо в описаному вище випадку управління рівнем рідини в баку на етапі формування бази правил системи нечіткого виведення правила задаються виходячи з того, що при підтримці постійного рівня рідини чисельні значення подачі w_1 витрати b рідини мають бути рівні між собою $\varepsilon_2 = 1$, а швидкість наповнюваності баку визначається відповідною зміною коефіцієнта пропорційності ε_1 між подачею w_i та рівнем рідини a . В цьому випадку база правил системи нечіткого виводу, що відповідає знанням експерта про те, яку необхідно вибрати подачу рідини $w = \varepsilon_1 \cdot a + \varepsilon_2 \cdot b$ щоб рівень рідини в баку залишався середнім, виглядатиме таким чином:

ПРАВИЛО <1>: ЯКЩО "рівень рідини малий" І "витрата рідини велика" ТО $w = 0,3a + b$;

ПРАВИЛО <2>: ЯКЩО "рівень рідини малий" І "витрата рідини середня" ТО $w = 0,2a + b$;

ПРАВИЛО <3>: ЯКЩО "рівень рідини малий" І "витрата рідини мала" ТО $w = 0,1a + b$;

ПРАВИЛО <4>: ЯКЩО "рівень рідини середній" І "витрата рідини велика" ТО $w=0,3a+b$;

ПРАВИЛО <5>: ЯКЩО "рівень рідини середній" І "витрата рідини середня" ТО $w=0,2a+b$;

ПРАВИЛО <6>: ЯКЩО "рівень рідини середній" І "витрата рідини мала" ТО $w=0,1a+b$;

ПРАВИЛО <7>: ЕСЛИ "рівень рідини великий" І "витрата рідини велика" ТО $w=0,4a+b$;

ПРАВИЛО <8>: ЯКЩО "рівень рідини великий" І "витрата рідини середня" ТО $w=0,2a+b$;

ПРАВИЛО <9>: ЯКЩО "рівень рідини великий" І "витрата рідини мала" ТО $w=0,1a+b$.

При вже розглянутих раніше поточному рівні і витраті рідини $a=2.5$ м і $b=0.4$ м³/с відповідно, в результаті фаззифікації, агрегації і активізації з урахуванням явного визначення чітких значень вихідний змінної в консеквентах продукційних правил отримуємо пари значень ($c_i w_i$)
rule1 - (0,75 ; 1,15), rule2 - (0,5 ; 0,9), rule3 - (0 ; 0,65), rule4 - (0,25 ; 1,15), rule5 - (0,25 ; 0,9), rule6 - (0 ; 0,65), rule7 - (0 ; 0), rule7 - (0 ; 1,14), rule8 - (0 ; 0,9), rule9 - (0 ; 0,65).

На етапі дефаззифікації для лінгвістичної змінної "подача рідини" здійснюється перехід від дискретної безлічі чітких значень $\{w_1 \dots w_n\}$ до єдиного чіткого значення згідно (5.12) з дискретним аналогом методу центру тяжіння: $y=1.0475$ м³/с

Реалізація алгоритму Сугено складається із трьох кроків:

Крок 1. Введення нечіткості. Цілком аналогічне алгоритмові Мамдані.

Крок 2. Нечітка імплікація. Знаходяться функції належності передумов кожного окремого правила за конкретних вхідних сигналів x_{i0} :

$$\alpha_r, \quad r=1,2,\dots,m$$

де m – кількість породжувальних правил. У класичному алгоритмі Сугено логічна операція перетину реалізується як $\min$.

Крок 3. Зведення до чіткості. Визначається чітке значення вихідної змінної:

$$y_0 = \frac{\sum_{r=1}^m \alpha_r f_r \left(\bar{x}_0 \right)}{\sum_{r=1}^m \alpha_r}$$

Як функцію f_r часто використовують поліноми нульового порядку:

$$f_r \left(\bar{x} \right) = w_r,$$

або першого порядку:

$$f_r \left(\bar{x} \right) = w_r + \sum_{j=1}^n p_{rj} x_j$$

де w_r та p_{rj} – деякі постійні.

Їх називають алгоритмами Сугено нульового або першого порядку відповідно.

4.5. Нечіткі нейронні мережі

Під час розв'язування більшості прикладних задач регулювання, інформацію, потрібну для побудови і реалізації системи управління, можна поділити на дві частини:

- числову (кількісну), що отримується з вимірювальних датчиків;
- лінгвістичну (якісну), що надходить від експерта.

Значна частина нечітких систем регулювання використовує другий вид знань, що частіше за все подають у формі бази нечітких правил. У випадку, коли виникає потреба спроектувати нечітку систему, але наявні лише числові дані, ми стикаємося з серйозними проблемами. Один із способів їх розв'язання – це застосування так званих нейро-нечітких (neuro-fuzzy) систем. Вони мають багато переваг, але їх база правил повільно наповнюється знаннями в процесі ітеративного навчання.

Основна перевага систем з нечіткою логікою – це здатність використовувати умови і методи розв'язування задач, описані мовою, близькою до природної. Однак класичні системи з нечіткою логікою, нездатні навчатися автоматично, мають недоліки. Набір нечітких правил, вид і параметри функцій належності, що описують вхідні і вихідні змінні системи, а також вид алгоритму нечіткого висновку, вибираються суб'єктивно експертом-людиною, і вони не завжди відповідають дійсності.

Для усунення вказаного недоліку був запропонований апарат нечітких нейронних мереж (fuzzy neural networks). Ці системи відомі також як адаптивні нейро-нечіткі системи висновку (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System, ANFIS).

Нечітка нейронна мережа – це багат шарова нейронна мережа, в якій шари виконують функції елементів системи нечіткого висновку. Нейрони такої мережі характеризуються набором параметрів, налаштування яких виконують під час навчання, як у звичайних штучних нейронних мережах.

На рис. 4.13 зображена нечітка штучна нейронна мережа на базі алгоритму Сугено нульового порядку, за якого значення вихідної змінної обчислюють за формулою

$$y = \frac{\sum_{r=1}^m \alpha_r w_r}{\sum_{r=1}^m \alpha_r},$$

де α_r – значення функцій належності передумов кожного окремого правила r за конкретних значень вхідних сигналів.

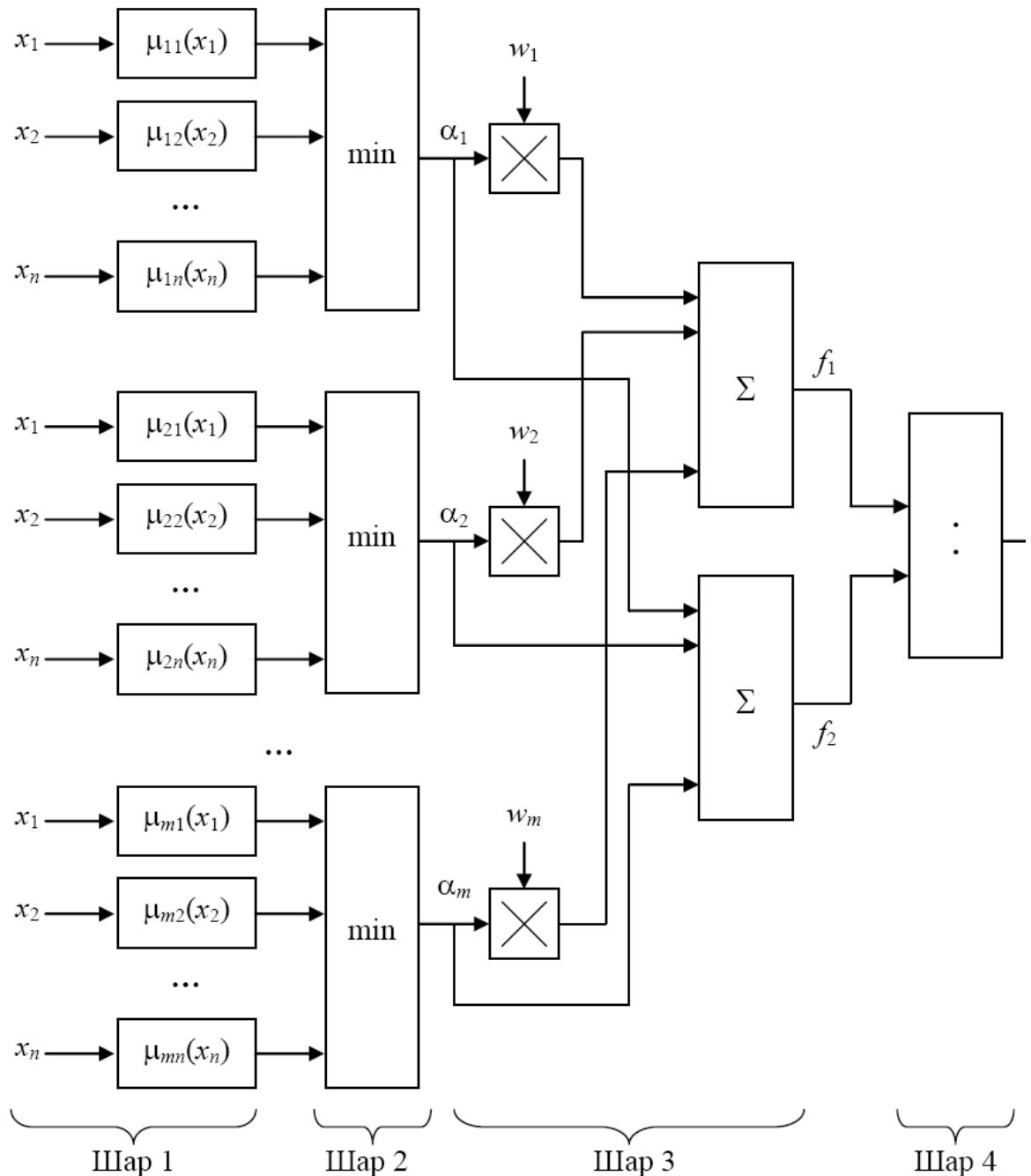


Рис.4.13 Нечітка нейронна мережа на основі алгоритму Сугено

Шар 1 здійснює зведення до нечіткості. Нелінійні функції $\mu_{ri}(x_i)$, де r – номер продукційного правила, а i – номер компоненти вхідного вектора, відповідають функціям належності передумов правил. Настроювані параметри цього шару – параметри використовуваних функцій належності.

Шар 2 обчислює функції висновків належності передумов нечітких правил. У цьому випадку шар не має настроюваних параметрів.

Шар 3 (складається з двох нейронів) і виконує додавання і зважене додавання вихідних сигналів шару 2. Параметрами цього шару є вагові коефіцієнти w_r .

Шар 4 реалізує операцію ділення $y = \frac{f_1}{f_2}$. Він не містить настроюваних параметрів.

Якщо в такій мережі використовувати функції належності гауссового типу, а для обчислення вислідних функцій належності передумов правил (шар 2) – операцію множення замість операції «мінімум», то отримаємо досить поширену нечітку мережу Ванга–Менделя.

Для мережі Ванга–Менделя можна аналітично подати градієнт функції похибки від параметрів мережі, що дає змогу використовувати для її навчання метод зворотного поширення похибки, котрий застосовують у багат шарових персептронах.

4.5.1 Використання нечітких нейронних мереж для систем управління

Нечіткі нейронні мережі в системах управління застосовують у вигляді нейроконтролерів (нейрорегуляторів) та нейроемуляторів, що імітують динамічну поведінку об'єкту курування в цілому, або описуючих його окремі характеристики, які не піддаються математичному моделюванню.

Нейронні мережі почали застосовуватись у системах управління завдяки таким властивостям:

- нейронні мережі можуть реалізовувати довільні гладкі функції будь-якої складності;
- для реалізації нейромережних систем управління потрібна мінімальна інформація про об'єкт управління;
- під час реалізації штучної нейронної мережі у вигляді спеціалізованих інтегральних мікросхем можливе паралельне оброблення інформації, що значно збільшує швидкість роботи і підвищує надійність системи.

4.5.1.1 Послідовна схема нейромережевого управління

Найпростіша схема послідовного управління за допомогою штучної нейронної мережі зображена на рис. 4.14. Розрізняють два варіанти навчання такої мережі: інверсне і предикатне.

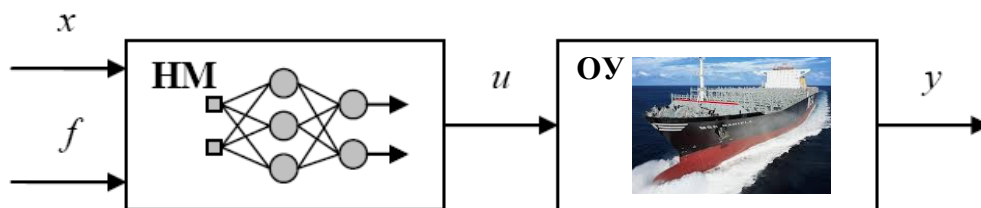


Рис.4.14 Послідовна схема нейромережевого управління:

x – вхідний задавальний сигнал системи; f – сигнали, що несуть інформацію про контрольовані збурення; u – управління, що діє на об'єкт управління;
 y – вихідний сигнал системи

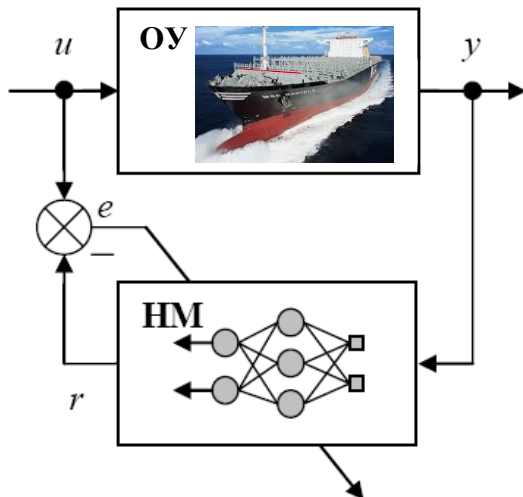


Рис.4.15 Схема попереднього інверсного навчання:

рис. 4.14.

Концепція **предикатного управління** побудована на управлінні з передбаченням. Рис. 4.16 ілюструє процедуру спеціалізованого навчання штучної нейронної мережі для послідовної схеми управління. У цьому разі штучна нейронна мережа навчається так, щоб отримати найкраще виконання

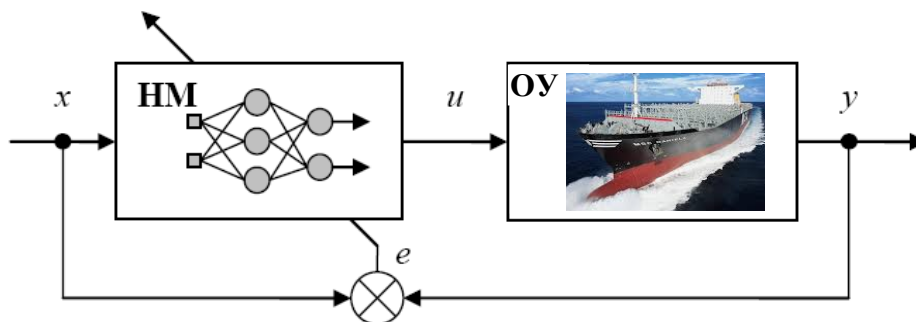


Рис.4.16 Схема спеціалізованого предикатного навчання:

рівності $y = x$. Слід зазначити, що у цьому разі для навчання нейронної мережі не можна застосовувати класичного методу зворотного поширення похибки, оскільки між виходом системи і нейронною мережею стоїть об'єкт управління, параметри якого в загальному випадку невідомі, і доводиться застосовувати або числову апроксимацію закону регулювання системи, або інші модернізації методу зворотного поширення, що не потребують інформації про закон регулювання системи. Також для цього випадку може застосовуватися навчання за допомогою генетичних алгоритмів. Крім цього, система, яка зображена на рис. 4.16, не може навчатися в оперативному режимі.

При **інверсному управлінні** в ідеальному випадку контролер у системі реалізує зворотну (інверсну) динаміку об'єкту управління. На рис. 4.15 зображено схему попереднього узагальненого інверсного навчання нейронної мережі. За такого підходу на вхід штучної нейронної мережі подають реальний вихід системи, а мережа навчається за похибкою розузгодження її виходу з реальним входом. Після завершення процесу навчання штучна нейронна мережа реалізує зворотну динаміку об'єкту керування. Потім вона використовується у схемі, яка показана на

5.5.1.2 Паралельна схема нейромережевого управління

На рис. 4.17 наведена схема паралельного вмикання штучної нейронної мережі як контролера для послідовної схеми управління. Навчання штучної нейронної мережі полягає в тому, щоб скоригувати сигнал звичайного

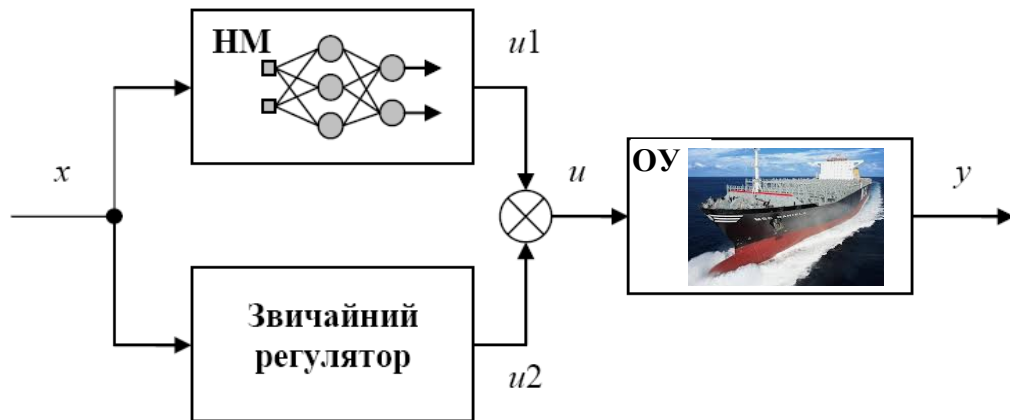


Рис.4.17 Паралельна схема вмикання нейроконтролера:

контролера u_2 , якщо він не забезпечує належної якості управління. Один із способів реалізації такого підходу зображено на рис. 4.18. Такий підхід називають «навчанням із похибкою зворотного зв'язку». У цій схемі штучна нейронна мережа після завершення навчання приймає на себе управління об'єктом, усуваючи дію контролера зворотного зв'язку. Зазначимо, що зразковим регулятором у цьому випадку може виступати також і людина-

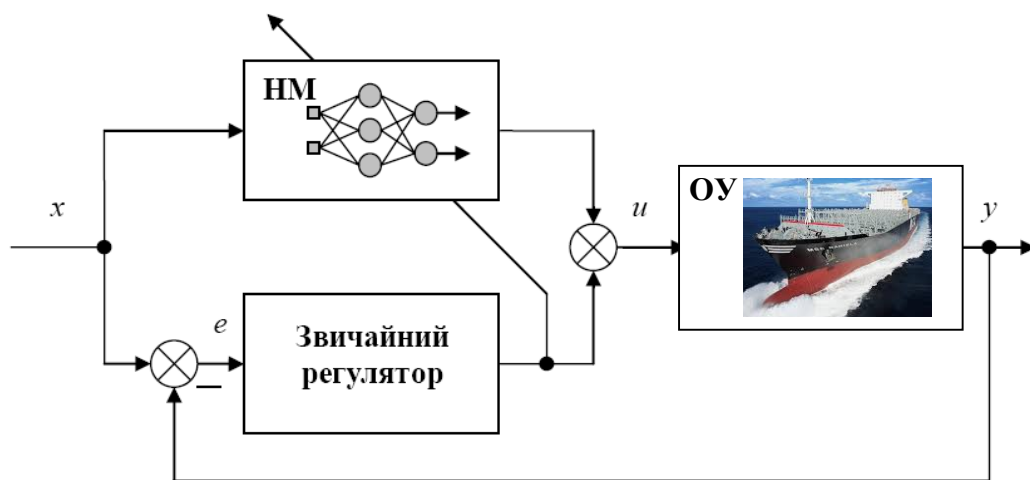


Рис.4.18 Схема навчання із похибкою зворотного зв'язку

оператор.

Попри численні переваги, системи управління на основі штучних нейронних мереж мають і багато недоліків:

– під час оптимізації ваг синаптичних зв'язків штучної нейронної мережі алгоритм навчання може зупинитись у локальному мінімумі, що зумовлює застосування алгоритмів глобальної оптимізації, які працюють досить повільно;

- немає строгої теорії щодо вибору типу і архітектури штучної нейронної мережі, що спонукає до застосування алгоритмів самоорганізації, які також працюють повільно;
- всю інформацію штучна нейронна мережа отримує в процесі навчання і ніяку апріорну інформацію ввести в штучну нейронну мережу неможливо.

Контрольні питання до розділу 4

1. Що таке нечітка логіка та нечіткі множини?
2. Опишіть кусково-лінійні функції належності в нечіткій логіці.
3. Опишіть S-подібні функції належності в нечіткій логіці.
4. Опишіть дзвоноподібну функцію належності в нечіткій логіці.
5. Опишіть операцію перетину в нечіткій логіці. Яка операція в класичній логіці відповідає їй?
6. Опишіть операцію об'єднання в нечіткій логіці. Яка операція в класичній логіці відповідає їй?
7. Опишіть операцію доповнення в нечіткій логіці. Яка операція в класичній логіці відповідає їй?
8. Які властивості мають основні операції в нечіткій логіці? Опишіть ці властивості.
9. Які правила висновку існують в класичній логіці? Поясніть ці правила. Чим ці правила будуть відрізнятися від правил висновку в нечіткій логіці?
10. Опишіть основні етапи системи висновку нечіткої логіки.
11. Що таке база правил? Навіщо вона потрібна в системі висновку нечіткої логіки?
12. Яку роль відіграє фаззифікація в системі висновку нечіткої логіки? Навіщо вона потрібна ?
13. Яку роль відіграє агрегація в системі висновку нечіткої логіки? Навіщо вона потрібна?
14. Яку роль відіграє активація в системі висновку нечіткої логіки? Навіщо вона потрібна?
15. Яку роль відіграє аккумуляція в системі висновку нечіткої логіки? Навіщо вона потрібна?
16. Яку роль відіграє дефаззифікація в системі висновку нечіткої логіки? Навіщо вона потрібна? Наведіть основні методи дефаззифікації.
17. Поясніть алгоритм нечіткого виводу за методом Мамдані.
18. Поясніть алгоритм нечіткого виводу за методом Сугено.
19. Що таке нечіткі нейронні мережі? Наведіть приклад, та поясніть призначення її складових.
20. Які переваги та недоліки мають нейронні мережі на основі нечіткої логіки в системах управління?
21. Послідовна схема управління на з використанням нечіткої нейронної мережі.
37. Паралельна схема управління на з використанням нечіткої нейронної мережі.

Список використаних джерел

1. Методи та системи штучного інтелекту: навч. посіб. / Уклад.: А.С.Савченко, О.О.Синельніков. – К.: НАУ, 2017. – 190 с.
2. Субботін С.О. Нейронні мережі: теорія та практика: навч. посібн. / С.О. Субботін.- Житомир: Вид. О.О.Євенок, 2020. – 184 с.
3. Вовк О.Б., Шаховська Н.Б., Камінський Р.М. Системи штучного інтелекту. – Львів: Львівська політехніка, 2018. – 392 с.
4. Булгакова О.С., Зосімов В.В., Поздєєв В.О. Методи та системи штучного інтелекту: теорія та практика. – Херсон: Олді-плюс, 2020. – 356 с.
5. Апостолук В. О. Інтелектуальні системи керування: конспект лекцій /В. О. Апостолук, О. С. Апостолук. – К.: НТУУ «КПІ», 2008. – 88 с.
6. Завадський В.А. Електронні засоби і системи охорони судна: навч. посібн. /В.А.Завадський, С.М.Дранчук.- Одеса: ОНМА, 2012. – 164 с.
7. Система моніторингу енергетичного обладнання судна : <http://www.fleeteco.com/about.php>
8. Система дистанційного контролю параметрів роботи суднового дизельного енергетичного обладнання з WEB-доступом “ShipMonitoring”: <http://www.shipmonitoring.org>
9. Завальнюк О.П. Автоматичний моніторинг технічного стану корпусу судна в процесі його експлуатації /Восточно-Европейский журнал передовых технологий: ISSN 1729-3774, № 5/7 (77) 2015, с.36-39.
10. Харченко Р.Ю. Гібридні інтелектуальні мережі для суднових систем мікроклімату. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.22.20 – Експлуатація та ремонт засобів транспорту. – Національний університет «Одеська морська академія», Одеса, 2018.- 261 с.
11. Phelps B., Morris, B. Review of Hull Structural Monitoring Systems for Navy Ships/ Technical rept. № ADA588962: Australia, 2013. – 152 p.