

## ПИТАННЯ ПОБУДОВИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ ПРОЕКТОМ

*Розроблено систему автоматизованого управління проектом на основі алгоритмів нечіткої логіки і штучних нейронних мереж. Обґрунтовано критерій оптимальності команди управління проектом на основі штрафної функції релевантності правил.*

**Ключові слова:** управління проектом, нечітка логіка, нейронні мережі, оптимальність команди управління

*Разработана система автоматизированного управления проектом на основе алгоритмов нечеткой логики и искусственных нейронных сетей. Обоснован критерий оптимальности команды управления проектом на базе штрафной функции релевантности правил.*

**Ключевые слова:** управление проектом, нечеткая логика, нейронные сети, оптимальность команды управления

*Fuzzy logic and artificial neural networks were used to develop an automatic system for project management. Penalty function having the rule relevance as an argument has been employed for substantiation of a command optimality that are used to project management.*

**Key words:** project management, fuzzy logic, neural networks, command optimality

### Вступ

Процеси управління проектами і програмами розвиваються перш за все як складні інформаційні системи і тому методологія їх управління повинна базуватися на ґрунтовно розвинутих системах автоматичного управління. Проте механізм управління проектом суттєво відрізняється від функцій автоматичного управління виробничими процесами та технологіями. Так, наприклад в АСУТП всі основні процеси автоматичного управління описуються математичними функціями або системами математичних рівнянь, включаючи диференційні. Задачі управління динамікою поведінки об'єкта зводяться до дослідження похідних функцій, виведенню та дослідженню перехідних функцій, кореневих годографів, анізотропійних регуляторів та інших математичних функцій або відображень [1; 2]. Сигнали управління теж видаються зазвичай у вигляді безперервних або дискретних функцій. Натомість команди управління проектами мають вербальну форму, а сигнали зворотного зв'язку часто характеризуються нечіткими векторами, що утруднює використання готового розвинутого апарату зі сфери автоматичного управління. Тому в даній роботі

описано підхід до математичної формалізації параметрів проекту з урахуванням вказаних особливостей.

### Огляд стану проблеми

Закони та правила прийняття рішень під час реалізації проектів набагато складніше формалізувати, що підтверджується аналізом сучасного стану автоматизації процесів управління проектами [3-5]. Система управління проектами функціонує в умовах невизначеності, яка носить як параметричний, так і структурний характер. Очевидно, що в таких умовах алгоритмізація команд управління проектом повинна здійснюватися на основі застосування методів теорії ймовірності та математичної статистики. Зокрема ефективним інструментом проектування та аналізу систем управління проектом зарекомендувало себе стохастичне моделювання [6]. Разом з тим інструментарію математичної статистики недостатньо для того, щоб формалізувати на математичному рівні систему управління проектом. Справа в тому, що в реальності оперативне управління проектами часто пов'язано з маніпулюванням нечіткими поняттями.

Особливо яскраво це відображається у проектах будівництва, вуглевидобутку та подібних проектах, які оперують з великою кількістю об'єктів в умовах значної невизначеності. Так, стан покрівлі гірничих виробок характеризують як «стійкий», «нестійкий», «середньої стійкості», а її схильність до обвалення як такої, що «легко», «помірно», та «важко» обвалюються. Для оцінювання стану гірничих виробок використовують такі поняття, як «стійке» та «нестійке». Більше того, ці нечіткі (якісні) поняття закладені в галузеві нормативні документи, що затверджені на найвищому державному рівні і призначені для обов'язкового використання для проектування та експлуатації вугільних шахт. Темпи посування очисних або підготовчих вибоїв описують термінами «низькі», «середні», «високі». Такі ж поняття використовують для характеристики рівня проектних ризиків вуглевидобутку або його небезпеки. У зв'язку з цим для математичної формалізації правил вибору команд управління проектом у даній роботі запропоновано використовувати методи нечітких множин [2; 7]. Зазначені методи ідеально підходять для складання правил і законів оперативного управління проектом.

### Мета роботи

Метою роботи є обґрунтування методу математичної формалізації команд управління проектом на основі використання методів неоднозначної логіки і штучного інтелекту.

### Система управління проектом як об'єкт з нечіткими характеристиками

На рис. 1 показано приклад розподілу *функцій належності* для критерію стійкості безпосередньої покрівлі очисного вибою, який характеризує типovu або аварійну *ситуацію*, що виникає в ході реалізації проекту. Такі функції будуються на підставі експертних оцінок, а також застосування методу аналогів [3], який найбільш підходить для проектів вуглевидобутку [6] і дає самі точні результати. Для цього складається *список* типових ситуацій, які можуть виникати в процесі реалізації проекту. За необхідності такі списки формують окремо для передінвестиційної, інвестиційної та завершальної фази проекту. Вказані списки доповнюються *реєстром* проектних ризиків та *переліком* проектних обмежень. Такий перелік має особливо важливе значення в умовах підвищеної небезпеки реалізації проекту, наприклад у проектах підземного вуглевидобутку.

Згідно досвіду реалізації подібних проектів методом аналогів на основі необхідної і достатньої кількості фактичних прикладів успішного управління проектом формується *база* даних, що накопичує *правила*, які дозволили ефективно

управляти конкретною ситуацією. Наприклад, було отримано *сигнал* від спостерігача нижнього рівня системи оперативного управління (наприклад дільничного геолога) про те, що міцність безпосередньої покрівлі очисного вибою впала і знаходиться в діапазоні 10-20 МПа. Система оперативного управління проектом спочатку за допомогою функцій належності визначає *категорію* стійкості покрівлі згідно з переданою величиною міцності порід. За вказаним сигналом визначається категорія покрівлі як «нестійка» (рис. 1).

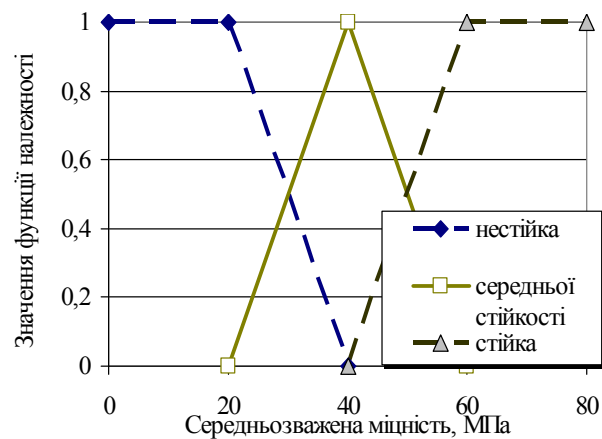


Рис. 1. Функції належності для критерію стійкості безпосередньої покрівлі очисного вибою

Структура системи мультиоб'єктного управління проектом показана на рис. 2.

Далі система оперативного управління використовує інформаційний ресурс або актив організаційного процесу у вигляді накопичених знань [3], в якому закладені перевірені закони і правила реагування на даний сигнал і визначає кілька *альтернатив* керуючого сигналу або *команди* з урахуванням проектних обмежень. Для демонстрації покажемо кілька можливих правил, з *множини* яких генеруються сигнали управління проектом для вирішення проблемної ситуації потрапляння очисного вибою у зону з нестійкою покрівлею.

1) «Якщо покрівля нестійка і швидкість посування лави мала і механізований комплекс зношений, тоді використовувати передове зміцнення покрівлі металополімерними анкерами завдовжки не менше 2 м»;

2) «Якщо покрівля нестійка і швидкість посування лави середня і механізований комплекс знаходиться в задовільному стані і газонасиченість вугільного пласта та вмісних порід середня або низька, тоді збільшити швидкість посування очисного вибою до високого рівня»;

3) ... ..

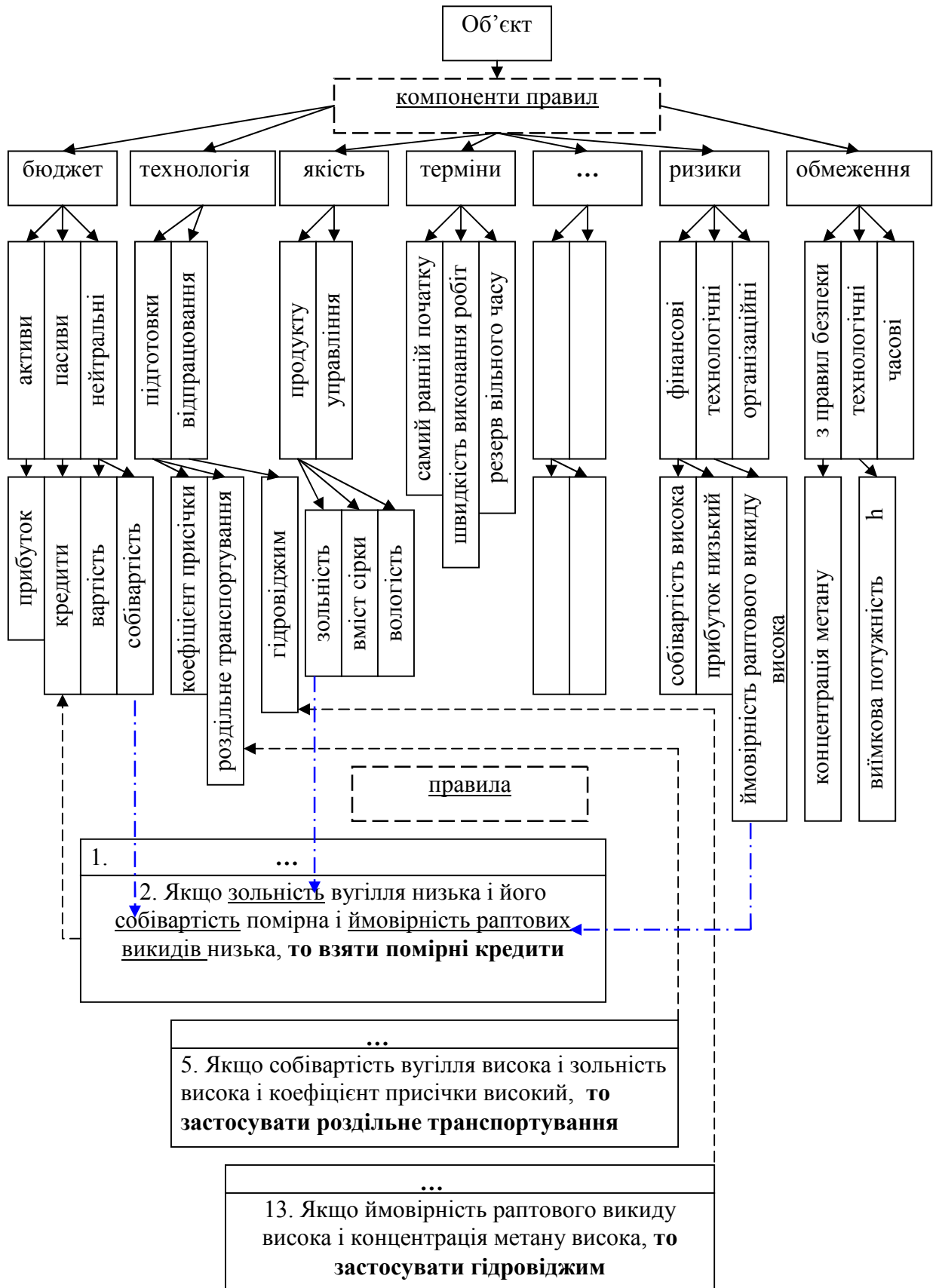


Рис. 2. Структура системи мультиоб'єктного управління проектом

У даному прикладі для прийняття рішення, близького до *оптимального*, система повинна мати ще набір функцій належності для визначення величини швидкості посування очисного вибою і ступеня зношеності механізованого комплексу. Чим більше таких правил буде використано, тим більше можливість для вибору такого сигналу управління, який є *найближчим до оптимального*. Зрозуміло, що при виборі альтернативних варіантів керуючої дії, необхідно враховувати проектні обмеження, які занесені в інформаційні бази даних.

Крім того, бази даних повинні за допомогою контролінгу якості управління проектом оперативно поповнюватися відомостями про *параметри компонент*, які входять до правила. У даному прикладі підмножина компонент правил складається з таких компонент, як «стан механізованого кріплення», «швидкість посування очисного вибою», «величина газонасиченості вугільного пласта». Наприклад, регулярно (щодоби) служба головного механіка повинна поповнювати поля бази даних по кожній лаві про кількість механізованих секцій, які вийшли з ладу або потребують ремонту та налагодження, стан конвеєрів, машин і механізмів. Служба вентиляції повинна стежити за оновленням інформації у своїх полях бази даних щодо стану вентиляційних дверей, кількості подачі повітря в окремі виробки, поновлювати газонасиченість вибоїв та інші важливі характеристики. Зазначені дані у свою чергу будуть використовуватися для обчислення нечітких значень компонент, які беруть участь через функції приналежності типу тих, що відображені на рис. 1, у виборі команд (сигналів) оперативного управління за допомогою множин нечітких правил типу (1).

### Обґрунтування критерію оптимальності

*Оптимізація* сигналу управління в даному випадку розуміється як вибір найбільш ефективного рішення за заздалегідь заданим векторним критерієм. Векторний критерій оптимальності (міра ефективності оперативного управління) повинен базуватися на ентропійному показнику надмірності її виробництва [7] і мати такий вигляд:

$$J(\theta) = w_{-1} \sum (r(t) - y(t))^2 + w_0 \rho(u(t-1))^2, \quad (2)$$

де  $\theta$  – вектор параметрів, що настроюються у проекті (наприклад, величина видобутку, зольність рядового вугілля, його собівартість);  $r(t)$  – вхідний сигнал, у якості якого використовують фактичне поточне значення регульованої величини (наприклад, вуглеводобутку);  $y(t)$  – вихід системи управління проектом (очікуване значення вихідної величини, або, як кажуть, уставка);  $\rho(u(t-1)) \geq 0$  – функція штрафу;

$u$  – сигнал управління проектом;  $w_{-1}$  і  $w_0$  – вагові фактори, що враховують поточний тренд виготовлення продукту проекту (наприклад вуглеводобутку) і поточне значення штрафної функції, що визначається згідно залежності:

$$I = 1 / (-\sum p_{i(t)} \log_2 p_{i(t)}), \quad (3)$$

де  $p_{(t)}$  – релевантність правила у базі даних; символ  $\log_2$  використовується для визначення двійкового логарифму.

Суму визначаємо за всіма попередніми дискретними кроками часу, що минув з початку реалізації проекту.

Особливістю технології управління проектом є те, що на відміну від класичної САУ, сигнали  $r(t)$  і  $y(t)$  надходять з великим запізненням (наприклад через добу, якщо мати на увазі вуглеводобуток, і навіть через місяць, що характерно для собівартості). Саме тому нами введено вагові фактори  $w_{-1}$  і  $w_0$ , причому  $w_0$  має бути у кілька разів більше за  $w_{-1}$ , оскільки комп'ютер підраховує штрафну функцію практично миттєво.

Вибір найбільш ефективного керуючого сигналу здійснюється за допомогою оптимального нейромережного регулятора (рис. 3), який знаходить рішення, близьке до оптимального в рамках допустимого часу і заданих проектних обмежень [1-3]. В якості такого у даній роботі запропоновано використати модифіковані нейронні мережі та топологічні карти Кохонена (self-organized maps – SOM) [8-10]. Мережа Кохонена складається з одного шару штучних нейронів, які поєднані з  $m$ -вимірним вхідним вектором. У нашому випадку кількість нейронів  $n$  у мережі дорівнює кількості правил. Модифікація нейронної мережі Кохонена перетворює її у класифікатор, у якого є “вчитель”.

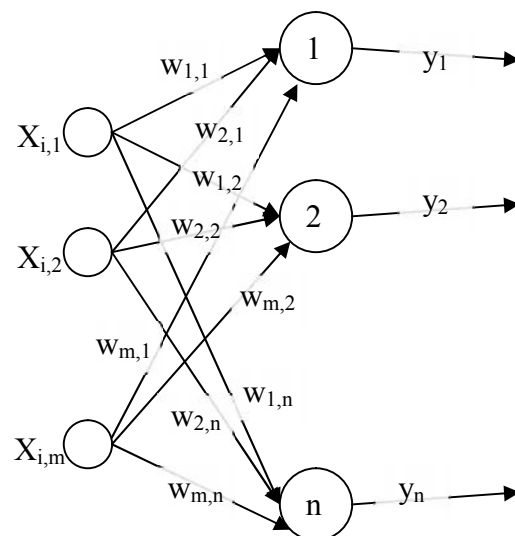


Рис. 3. Структура мережі Кохонена

За “вчителя” виступають відомі і добре перевірені на поточний момент правила, що застосовуються для управління проектом. Мережа обчислює *відстань* між вхідним вектором  $X_i$  і всіма правилами  $1, \dots, n$ , які є доступними на поточний момент. Вказана відстань між строковими типами визначається за допомогою алгоритму Вагнера-Фішера [11-12]. Як відомо, цей алгоритм гарантує знаходження оптимальної (тобто мінімально можливої) відстані. Це дає змогу підібрати найбільш придатні для поточного вхідного вектору правила, навіть не зважаючи на довільну словесну трактовку вхідного вектора.

Таким чином, вибір оптимального правила для реалізації управління проектом здійснюється на основі критерію (2). Оскільки правила можуть бути (і як правило є) неоднозначними, застосовується алгоритм нечітких множин, який дає змогу остаточно уточнити правило і прийняти скореговане рішення (команду управління проектом), яке є найбільш близьким до оптимального.

Програмна частина системи управління проектом базується на об’єктно-орієнтованому програмуванні. Система мультиоб’єктного управління проектом розглядається нами як *об’єкт* (див. рис. 2), основними складовими якого є *компоненти* правил і самі *правила*. Головні блоки компонентів правил представлені бюджетом, технологічними компонентами, компонентами якості управління проектом та іншими параметрами, які характеризують штатні типові ситуації управління проектом. Для врахування нештатних подій введено блоки проектних ризиків та обмежень.

Промислова перевірка розробленої системи автоматизованого мультиоб’єктного управління проектом у галузі вуглевидобутку засвідчила, що блок ризиків є точно таким за формою та змістом, як й інші блоки, що відповідають за штатні поточні ситуації в управлінні. Отже, для обробки ситуацій, що створюють проектні ризики та аварійні ситуації, нема потреби розробляти спеціальні комп’ютерні підпрограми. Деякі особливості пов’язані з врахуванням проектних обмежень, але вони досить просто реалізуються логічними операторами. Натомість практика вказала на необхідність суттєвого розширення множини «проектні обмеження». Так, ефективність автоматизованої системи управління проектом підвищується, якщо в якості обмежень використовувати усі параметри, що характеризують поточний стан проекту і його складових.

Наприклад, математична формалізація алгоритмів управління проектом значно спрощується, а точність управління підвищується, якщо в якості обмежень ввести такі параметри, як поточне положення виконавчих механізмів у

просторі, запаси матеріалів, фінансових резервів, характеристик оточуючого середовища. Так, інформація про ситуацію, коли «прохідницький комбайн знаходиться впритул до вибою» є суттєвою, оскільки вона не дозволяє здійснити заходи, що знижують небезпеку раптового викиду вугілля і газу у вибої гірничої виробки. Наявність 2,5 млн гривень на поточному рахунку підприємства не дозволить придбати бурильний станок, який коштує 2,7 млн гривень і так далі.

Важливо, що точність і ефективність автоматизованого управління проектом суттєво підвищується завдяки врахуванню таких обмежень, оскільки навіть найдосвідченіший член команди проекту не в змозі слідкувати за всіма поточними компонентами проекту і вчасно реагувати на зміну поточних ситуацій. Навіть за умових наявності ефективної бази даних і вільного доступу до неї ручне управління неефективне щодо точності, швидкості і ефективності порівняно з автоматизованим, оскільки програмні засоби слідкують за всіма змінами у базі даних практично миттєво і безпомилково, а пропуск важливої інформації практично неможливий.

Правила, за допомогою яких генеруються команди управління проектом не тільки формуються з компонентів об’єкта (штрих пунктирні стрілки), але й управляють цими компонентами (штрихові стрілки). Ці двосторонні зв’язки реалізуються за допомогою посилальних змінних (pointers) та зв’язаних списків.

Зауважимо, що розроблена система дає змогу генерувати нові правила, а також доповнювати списки компонентів об’єкта. Для цього нами введено поняття *субоптимального діапазону*  $D_{co}$ . Оскільки вхідний вектор не завжди буде абсолютно точно відповідати одному з наявних у базі даних правил, то часто відстань  $D$  між ними може бути не нульовою. Для обчислення  $D_{co}$  ми задавали пороги чутливості або точності  $D_m$  і прийнятності  $D_n > D_m$ . Модифікована нейронна мережа Кохонена видає перші 3-6 правил, що виявилися переможцями у порядку збільшення відстані  $D$ . Отже ті правила, що потрапили у діапазон від  $D_m$  до  $D_n$ , аналізуються аналітиком з команди проекту на предмет створення нового правила, яке б точніше реагувало на вхідний вектор, з яким порівнювали наявні правила. Іншими словами, якщо у разі пошуку знайдено правила, що знаходяться на значній відстані від вхідного вектора, але містять багато компонентів, з яких складається вхідний вектор, це свідчить про необхідність формулювання нового правила, яке б точніше реагувало на сигнал, що переданий даним вхідним вектором. Таким чином, відбувається генерування нових правил за допомогою автоматизованої системи управління проектом.

Суттєва особливість системи полягає в тому, що вона працює у режимі радника, тобто видає оперативні команди і детально інформує про вхідний вектор сигналу, а також обставини, в яких він виник і які є важливими для прийняття оперативного рішення (наприклад, поточні проектні обмеження). Кінцеве рішення з оперативного управління проектом приймає менеджер проекту або член команди на своєму рівні відповідальності. Практика засвідчила, що з часом, у міру того, як уточнюються компоненти бази даних і правила, люди все більше погоджуються з тими командами управління, які пропонує автоматизована система. Це свідчить про значну перспективу розробленої системи автоматизованого управління проектом.

Таким чином, реалізується поєднання двох позитивних сторін методів штучного інтелекту:

1) фуззі логіки, що володіє потужним і разом з тим простим апаратом перекладу якісних неоднозначних характеристик процесів, що протікають під час виконання проекту, в числову форму і навпаки;

2) нейронних мереж, які здатні до узагальнення та легко тренуються на фактичних даних (тобто на аналогах), відкидаючи випадкові точки, що не обумовлені закономірністю процесу. Однією з головних переваг регулятора, заснованого на штучній нейронній мережі, є його високий ступінь перешкодозахищеності від впливів випадкових факторів (збурень), які створюють невизначеність у процесі управління.

### Результати промислової перевірки розробленої системи

Система автоматичного управління проектом вуглеводобутку була апробована в якості радника в шахтоуправлінні Покровське. Пакет програм був інстальований на головному комп'ютері у відділі АСУ і використовувався протягом 25 діб для управління проектом вуглеводобутку у 4-й південній лаві блоку 10. На рис. 4 наведено графік вуглеводобутку, який демонструє різницю ефективності управління проектом в ручному (*a*) і автоматизованому режимі (*б*) з використанням вказаної моделі управління.

Управління проектом вуглеводобутку у 4-й південній лаві здійснювалося з автоматизованим радником протягом 25 діб, починаючи зі 157 доби з початку роботи очисного вибою. Порівняння ефективності управління виконувалося за критерієм середнього значення вуглеводобутку протягом експериментального і контрольного періодів. Середнє значення вуглеводобутку протягом контрольного періоду (*a*) становило  $2120 \pm 753$  т на добу, тоді як під час проведення експерименту воно збільшилося до рівня  $2453 \pm 986$  т/доб.

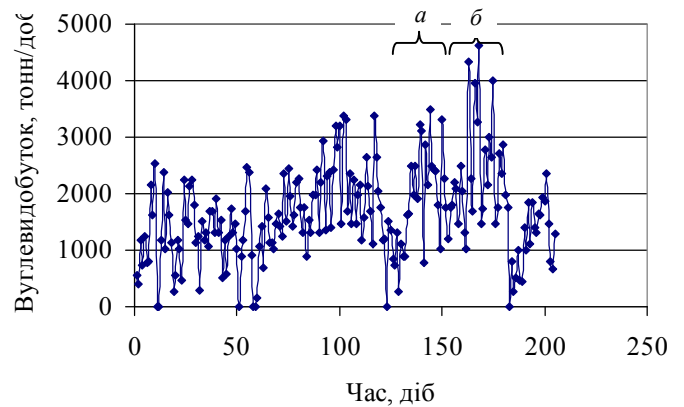


Рис. 4. Динаміка вуглеводобутку у 4-й південній лаві

Оскільки дослідженнями [6] встановлено, що розкид вуглеводобутку в очисних вибоях узгоджується з нормальним законом, було виконано порівняння статистичних вибірок за допомогою *t*-тесту. З'ясувалося, що з надійністю 86,1% можна стверджувати, що збільшення середнього вуглеводобутку є наслідком застосування електронного радника з управління проектом, що свідчить про його безумовну ефективність.

### Висновки

Розглянуте питання математичної формалізації команд управління проектом на основі використання методів неоднозначної логіки і штучного інтелекту дає змогу автоматизувати управління проектом, яке виконується переважно шляхом генерування вербальних команд. Вказаний метод застосовано для розроблення системи мультиоб'єктного управління проектом, яка представлена у вигляді об'єкта, що складається з компонент правил і самих правил, які компонується з цих компонент і одночасно управляють ними.

Для трансформації вхідних сигналів або інформації про поточні ситуації, що виникають у ході реалізації проекту, застосовується нечітка логіка.

Обґрунтовано новий критерій оптимальності, за яким вибирається правило для управління проектом, що є близьким до оптимального. Він пропорційний квадрату різниці вхідного і вихідного сигналів системи управління, а також штрафній функції, яка є обернено пропорційною сумі добутків величини релевантності правила на його двійковий логарифм.

Правило, що є близьким до оптимального, вибирається за допомогою модифікованої алгоритмом Вагнера-Фішера штучної нейронної мережі Кохонена і уточнюється алгоритмом нечіткої логіки. Вперше обґрунтовано алгоритм генерації нового правила для управління проектом на основі порівняння дистанції між вхідним вектором і правилом, яка граничить з прийнятною.

Ефективність розробленої автоматизованої системи управління проектом у якості радника підтверджена експериментально на прикладі управління проектом вуглевидобутку, який збільшився у 1,16 рази у порівнянні з контрольним періодом.

У подальшому планується виконати дослідження щодо уточнення параметрів розробленої системи і вдосконалення її ефективності на основі поповнення бази даних правил.

### Список літератури

1. Фельдбаум А.А. Основы теории оптимальных автоматических систем / Фельдбаум А.А. – М.: Физматгиз, 1963. – 552 с.
2. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 5-ти т.; 2-е изд., перераб. и доп. – Т.5: Синтез регуляторов систем автоматического управления / под ред. К.А. Пупкова и Н.Д. Егунова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 616 с.
3. Ярошенко Ф.А. Управление инновационными проектами и программами на основе системы знаний Р2М: Монография / Ярошенко Ф.А., Бушув С.Д., Танака Х. – К.: Саммит-Книга, 2011. – 268 с.
4. Бондарь А.В. Управление ценностью лизингового проекта / А.В. Бондарь // Вісник ОНМУ: Зб. наук. праць. – Одеса: ОНМУ, 2011. – № 33. – С. 144-160.
5. Тесленко П.А. Проект как управляемая организационно-техническая система / П.А. Тесленко // Вісник МГУ ХПП: Зб. наук. праць. – Харків: НТУ, 2010. – № 6 (57). – С. 198-202.
6. Захарова Л.Н. Исследование чувствительности программы развития горных работ и ее рисков в условиях угольной шахты / Л.Н. Захарова, В.В. Назимко // Радиоэлектронні і комп'ютерні системи (Інформаційні технології в управлінні підприємствами, програмами та проектами). – 2012. – № 1(53). – С.157-164.
7. Термодинамический подход к оценке эффективности социального проекта / В.В. Назимко, В.Л. Пілюшенко, Е.В. Пономаренко // Зб. наук. праць “Проектно-орієнтована діяльність соціально-економічних систем: сучасний погляд”. – Донецьк: ДонДУУ, 2013. – № 245. – С. 45-53.
8. Kohonen T., *Self-Organizing Maps (Third Extended Edition)* / T. Kohonen, New York: MT, 2001, 501 pp.
9. Valova I. SOMs for machine learning In: *Machine Learning*, / I. Valova, D. Beaton and D. MacLean. Ed. by Y. Zhang, InTech, 2010, pp. 20-44.
10. Назимко В.В. Разработка нейросетевой модели для управления рисками проекта. В.В. Назимко, Л.Н. Захарова / Зб. наук. праць “Проектно-орієнтована діяльність соціально-економічних систем: сучасний погляд”. – Донецьк: ДонДУУ, 2010. – Т. 11, № 158. – С. 73-82.
11. Wagner R. A. The string-to-string correction problem / R. A. Wagner, M. J. Fischer *J. ACM* 21 1 (1974). – P. 168 – 173.
12. Блейхут Р. Теория и практика кодов, контролируемых ошибки // *Theory and Practice of Error Control Codes* / Р.Блейхут. – М.: Мир, 1986. – 576 с.

Стаття надійшла до редколегії 06.06.2013

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.А. Святний, Донецький національний технічний університет, Донецьк.