

Н.О. СОКОЛОВА, В.В. ГНАТУШЕНКО, Л.В. БЕШТА
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

МОДЕЛЮВАННЯ СТРАТЕГІЇ КЕРУВАННЯ КОМПЛЕКСОМ ШАХТНОГО ВОДОВІДЛИВУ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОГО ПРОГНОЗУВАННЯ ПИТОМИХ ЕНЕРГОВИТРАТ

Українська промисловість, зокрема вугільні та гірничодобувні підприємства, у воєнний період активно спрямовується на енергозбереження. Загроза блекауту підштовхує уряд до зниження енергоспоживання під час пікових навантажень. Гірничодобувні підприємства є вагомими споживачами електроенергії, але під час застосування сучасних стратегій планування ресурсів такі ланки, як водовідлив, мають великий потенціал для енергозбереження.

Одним із рішень для зменшення електроспоживання шахт є регулювання роботи споживачів-регуляторів, що дає змогу балансувати навантаження на енергосистему. Проте передпікове управління комплексом водовідливу вимагає оптимального режиму та врахування тарифних зон. Раціональне управління насосними агрегатами та використання алгоритмів класифікації обладнання комплексу водовідливу можуть мінімізувати негативний вплив і передпікове ввімкнення.

Використання нечіткої логіки управління системами водовідливу може допомогти зменшити енергоспоживання та оптимізувати роботу насосних агрегатів. Розроблення системи прийняття рішення щодо оптимальної стратегії роботи на основі нечіткої логіки може забезпечити ефективне управління комплексом водовідливу, урахувавши навантаження на енергосистему та інші чинники невизначеності.

Дана робота присвячена моделюванню стратегії роботи системи шахтного водовідливу на основі нечіткої логіки з використанням експертних даних про групування насосних агрегатів для прогнозування енергетичних витрат із мінімізацією негативного взаємовпливу та можливостей автоматизованого передпікового включення насосних агрегатів. У роботі проведено аналіз методів та інформаційних технологій з енергоефективності шахтного водовідливу та підтримки прийняття рішень. У результаті аналізу шляхів зниження навантаження на енергосистему сформульовано задачу моделювання стратегії енергоефективного процесу шахтного водовідливу. Розроблено схему функціональної структури системи підтримки прийняття рішень. Розроблено нечіткий контролер, що формулює стратегію ввімкнення визначеної групи насосних агрегатів відносно зон навантаження на енергосистему у складі автоматизованої системи підтримки прийняття рішень оператором. База знань нечіткого контролера описує параметри роботи комплексу шахтного водовідливу, такі як тарифні зони, поточний об'єм води у водозбірнику, групи НА за подачею та ефективністю.

Ключові слова: нечітка логіка, енергосистема, енергозбереження, нечіткі множини та функції належності, водовідлив, передпікове управління.

N.O. SOKOLOVA, V.V. HNATUSHENKO, L.V. BESHTA
Dnipro University of Technology

SIMULATION OF A MINE DRAINAGE COMPLEX MANAGEMENT STRATEGY BASED ON FUZZY FORECASTING OF SPECIFIC ENERGY CONSUMPTIONS

Ukrainian industry, in particular coal and mining enterprises, is actively focused on energy conservation during the war. The threat of a blackout is pushing the government to reduce power consumption during peak loads. Mining enterprises are heavy consumers of electricity, but with the application of modern resource planning strategies, links such as drainage have great potential for energy savings.

One of the solutions to reduce the electricity consumption of mines is to regulate the operation of consumers-regulators, which allows balancing the load on the power system. However, pre-peak management of the drainage system requires an optimal regime and consideration of tariff zones. Rational management of pumping units and the use of algorithms for the classification of water drainage complex equipment can minimize the negative impact and pre-peak activation.

The use of fuzzy logic for the management of drainage systems can help reduce energy consumption and optimize the operation of pumping units. The development of a decision-making system on the optimal strategy of work based on fuzzy logic can ensure effective management of the drainage complex, taking into account the load on the power system and other uncertainty factors.

This work is devoted to modeling the operation strategy of the mine drainage system based on fuzzy logic using expert data on the grouping of pumping units to predict energy costs with the minimization of negative interaction and the

possibility of automated pre-peak switching of pumping units. The paper analyzes methods and information technologies for the energy efficiency of mine drainage and decision-making support. As a result of the analysis of ways to reduce the load on the power system, the problem of modeling the strategy of the energy-efficient mine drainage process was formulated. A diagram of the functional structure of the decision support system has been developed. A fuzzy controller has been developed that formulates a strategy for switching on a certain group of pumping units in relation to load zones on the power system as part of an automated decision support system for the operator. The knowledge base of the fuzzy controller describes the operation parameters of the mine drainage complex, such as tariff zones, the current volume of water in the reservoir, groups of NAs by supply and efficiency.

Key words: fuzzy logic, energy system, energy conservation, fuzzy sets and membership functions, water discharge, pre-peak control.

Постановка проблеми

Енергозбереження є ключовим трендом в українській промисловості в умовах воєнного стану. Енергозбереження особливо важливо для вугільних та гірничодобувних підприємств, які є вагомими споживачами електроенергії. Звідси також впливає проблема низької конкурентоспроможності української сировини через високий рівень питомих енергетичних витрат у вартості кінцевого продукту.

Під час потенційного блекауту в енергосистемі України уряд закликає до ощадливого використання ресурсів у періоди пікового навантаження, але призупинення деяких промислових процесів може призвести до катастрофічних наслідків. Зупинка процесу водовідливу вугільних підприємств унаслідок аварії або інших позаштатних ситуацій може призвести до затоплення шахти та екологічної катастрофи.

З огляду на той факт, що лише близько 30% усієї енергії витрачається безпосередньо на видобуток вугілля, а решта витрачається на «допоміжні» процеси, у тому числі водовідлив, саме їх моделювання являє собою значущу науково-практичну проблему, урахувавши потенціал для енергозбереження. Також є вимога енергосистеми на зниження навантаження в пікові часи відповідно до графіка навантаження енергосистеми [1].

Одним із рішень для зниження загального електроспоживання шахти є виділення споживачів-регуляторів – комплексів та ланок технологічного процесу. Регулювання графіка їхньої роботи дає змогу вирівнювати навантаження на енергосистему підприємства. При цьому основні проблеми стосуються передпікового управління насосними агрегатами (НА) для водовідливу шахти, з огляду на оптимальний режим навантаження енергосистеми з урахуванням тарифних зон. Потенціал для збереження енергії під час експлуатації системи водовідливу полягає у раціональному управлінні насосними агрегатами, що включає контроль за технічним станом насосів та застосування алгоритмів класифікації для мінімізації негативного взаємовпливу і передпікового ввімкнення [2]. Управління шахтними водовідливними системами вимагає математично обґрунтованих методів та відповідного інформаційно-аналітичного забезпечення для ефективного використання енергії відповідно до графіка навантаження енергосистеми в умовах невизначеності. Використання нечіткої логіки є ефективним та сучасним підходом для вирішення завдань ефективного управління в умовах невизначеності. Тому виникає завдання моделюванню стратегії роботи системи шахтного водовідливу задля підвищення енергоефективності комплексу водовідливу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Нечітка логіка часто застосовується під час вирішення різноманітних задач управління технологічними процесами з метою прийняття оптимальних рішень та автоматизації на основі багаторічного досвіду експертів.

У роботі індонезійських дослідників [3] розглядається застосування нечіткої логіки для обрахунків індексу кислотності шахтної води за геохімічними параметрами у зв'язку з негативним впливом гірничодобувної промисловості на стан річної води через її забруднення кислотною шахтною водою. Система нечіткої логіки на базі інформації спостережень прогнозує

уміст важких металів у річних водах та класифікує ступінь забруднення. Результати використовуються у прийнятті рішень із заходів мінімізації шкоди навколишньому середовищу.

У роботі [4] наведено досвід застосування нечіткої логіки в для вирішення завдань автоматичного управління технологічним процесом під час регулювання основного параметру процесу виробництва спирту – концентрації замісу. Нечітка система прийняття рішень доповнила модель технологічного процесу виробництва спирту, що відтворює динаміку процесу аналітичним методом за класичними методами математичного моделювання.

Під час моделювання стратегії прийняття рішень для процесу шахтного водовідливу пропонується застосовувати методи прийняття рішення в різних умовах визначеності інформації, що запропоновано в роботах [5–7].

Таким чином, на сучасному етапі існує низка автоматичних систем керування та експертних систем із нечіткими та нейромережевими структурами, які переважають традиційні аналоги під час роботи з нелінійними та нестационарними об'єктами (процесами). Серед переваг розробок із використанням нечіткої логіки та нейронних мереж можна визначити ефективну роботу в умовах невизначеності щодо характеру вхідних сигналів та надійне функціонування порівняно з традиційними системами вхідних змінних. У зв'язку з відсутністю систем прийняття рішень у даній галузі та необхідністю зниження вимог до кваліфікації експлуатаційного персоналу виникає необхідність моделювання й упровадження такої системи.

Мета дослідження

Сьогодні гірнича промисловість розвинута в багатьох країнах та є основою розвитку економіки. Організація водовідливу для них є одним із важливіших та енерговитратних технологічних процесів. Інтенсивний розвиток науково-технічного прогресу передбачає упровадження новітніх технологій із використанням сучасних засобів автоматизації та інтелектуальних інформаційних систем.

Установлення енергоефективного режиму шахтного водовідливу передбачає визначення добового притоку ґрунтових вод, розрахунок кількості насосних агрегатів для паралельної роботи на один колектор, урахування тарифних зон та вибору групи насосних агрегатів із близькими ККД, формування стратегії передпікового керування комплексом водовідливу. Оператор виконує такі дії за складними та неоднозначними методиками, що підвищує вимоги до кваліфікації та досвіду, а також збільшує вплив людського чинника на функціонування системи.

Мета дослідження полягає у прогнозуванні енергетичних та економічних показників на основі даних про групування насосних агрегатів із мінімізацією негативного взаємовпливу та можливостей автоматизованого передпікового включення насосних агрегатів. Використання систем із нечіткою логікою є доцільним для складних технологічних об'єктів, де класичні системи керування не можуть повністю врахувати всі особливості режимів їх функціонування. Процес шахтного водовідливу є саме таким складним об'єктом. Окрім того, багаторічний досвід кваліфікованих фахівців-експертів також важливий для поліпшення якості процесу.

Виклад основного матеріалу дослідження

Здійснення процесу водовідливу шахти, з огляду на показники енергоефективності, зниження нерівномірності навантаження на енергосистему та вимог до кваліфікації оператора, можливо за допомогою впровадження системи нечіткої логіки підтримки прийняття рішень. В умовах невизначеності та неоднозначності вхідних параметрів застосування нечіткої логіки є ефективним підходом до створення системи підтримки прийняття рішень. Розроблення систем із нечіткою логікою є актуальною задачею для складних технологічних об'єктів, де класичні системи регулювання не можуть повною мірою врахувати всі особливості режимів їх функціонування, а також наявний досвід кваліфікованих спеціалістів, що може суттєво поліпшити якість процесу.

Система підтримки прийняття рішень (СППР) передбачається до експлуатації під час роботи комплексу водовідливу шахти за оперативними гідравлічними, енергетичними даними та стану НА, експертними даними про групування НА та піки навантаження енергосистеми. З огляду на отримані та опрацьовані дані, надаються рекомендації оператору про задіяні групи НА для реалізації внепікового керування комплексом шахтного водовідливу з огляду на вимогу зменшення навантаження на енергосистему в години максимуму.

Схему функціональної структури нечіткої системи підтримки прийняття рішень процесу шахтного водовідливу представлено на рис. 1.

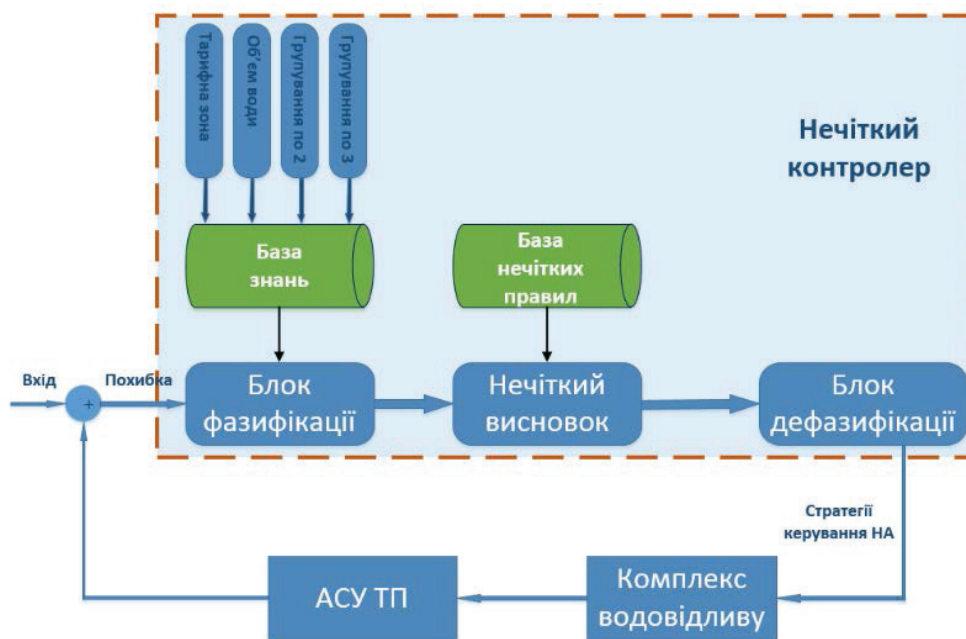


Рис. 1. Нечітка система підтримки прийняття рішень процесу шахтного водовідливу

БД операторів отримує дані про поточні значення вартості 1 кВт*год та інтервали часу тарифних зон від НКРЕ та передає дані про кількість готових до роботи НА в наступну БД. БД технологічних показників отримує дані про гідравлічні параметри, енергетичні параметри та стан обладнання від АСУ ТП комплексу водовідливу, передає показники роботи КВ до БД операторів і дані для опрацювання експертами підприємства та алгоритмами енергозбереження.

В основі нечіткої системи лежать правила отримання нечіткого логічного виводу.

Прийняття рішення щодо графіку роботи комплексу водовідливу, з огляду на оптимальний режим навантаження енергосистеми, визначається за допомогою алгоритмів класифікації, спрямованих на мінімізацію негативного взаємовпливу та передпікового управління, і базується на співвідношенні чотирьох лінгвістичних змінних. Для прогнозування енергетичної ефективності процесу водовідливу були визначені лінгвістичні вхідні змінні: *Zona* (тарифні зони згідно з регламентуючими документами НКРЕ), *Volume* (поточний об'єм води в водозбірнику), *Group2* (перелік пріоритетності ввімкнення насосів для випадку спільної роботи двох НА і відповідною подачею для напівику (11 годин) та піку (6 годин)), *Group3* (перелік пріоритетності ввімкнення насосів для випадку спільної роботи трьох НА для нічного часу (7 годин)).

Терм-множини лінгвістичних змінних та функції приналежності визначено на основі професійного досвіду експертів ДВАТ «Шахта імені М.І. Сташкова» та аналізу багаторічного збору даних (табл. 1).

Таблиця 1

Експертні дані

	Суммарное количество часов в год	Колоды №	Загрузка колодцев, %	Кол-во вкл. насосов	Номера вкл. насосов	Кол-во часов работы насоса за год	Агрегат 1-ой			Агрегат 2-ой			Агрегат 3-ий			Суммарный расход агрегатов, м3/час	Показания расхода по ИРКА, м3/час	Суммарная потребленная электроэнергия, кВт*час	Стоимость 1 кВт*час, без НДС	Итого, грн
							Удельные энергозатраты1, кВт*час/м3	Текущий расход О1, м3/час	Удельные энергозатраты2, кВт*час/м3	Текущий расход О2, м3/час	Удельные энергозатраты3, кВт*час/м3	Текущий расход О3, м3/час								
ПИК (6 часов)	2190	1	30	2	N#1-N#3	657	1,07	360	1,29	330	0	0	690	833	532 761	0,93	494 630,18			
		2	40		N#7-N#6	876	1,01	321	1,51	319	0	0	640	754	705 968					
		3	30		N#8-N#9	657	1,12	350	1,67	345	0	0	695	840	636 075					
ПОЛУПИК (11 часов)	4015	1	30	2	N#1-N#3	1204,5	1,07	360	1,29	330	0	0	690	833	976 729	0,56	550 631,00			
		2	40		N#7-N#6	1606	1,01	321	1,51	319	0	0	640	754	1 294 275					
		3	30		N#8-N#9	1204,5	1,12	350	1,67	345	0	0	695	840	1 166 137					
НОЧНОЕ ВРЕМЯ (7 часов)	2555	1	30	3	N#1-N#3-N#7	766,5	1,07	340	1,29	320	1,01	290	950	1117	819 772	0,19	158 584,85			
		2	40		N#1-N#6-N#7	1022	1,07	350	1,51	310	1,01	290	950	1 118	1 160 481					
		3	30		N#1-N#3-N#8	766,5	1,07	340	1,29	315	1,12	315	970	1147	860 741					
СУТОЧНЫЙ РАСХОД, м3/час	1	30										18380		21975						
	2	40										17530		20649						
	3	30										18605		22315						

	Суммарное количество часов в год	Колоды №	Загрузка колодцев, %	Кол-во вкл. насосов	Номера вкл. насосов	Кол-во часов работы насоса за год	Агрегат 1-ой			Агрегат 2-ой			Агрегат 3-ий			Суммарный расход агрегатов, м3/час	Показания расхода по ИРКА, м3/час	Суммарная потребленная электроэнергия, кВт*час	Стоимость 1 кВт*час, без НДС	Итого, грн
							Удельные энергозатраты1, кВт*час/м3	Текущий расход О1, м3/час	Удельные энергозатраты2, кВт*час/м3	Текущий расход О2, м3/час	Удельные энергозатраты3, кВт*час/м3	Текущий расход О3, м3/час								
ПИК (6 часов)	2190	1	30	2	N#1-N#3	657	1,07	360	1,29	330	0	0	690	833	532 761	0,93	877 570,25			
		2	40		N#4-N#5	876	1,63	351	1,64	309	0	0	660	786	945 108					
		3	30		N#8-N#9	657	1,12	350	1,67	345	0	0	695	840	636 075					
ПОЛУПИК (11 часов)	4015	1	30	2	N#1-N#3	1204,5	1,07	360	1,29	330	0	0	690	833	976 729	0,56	976 808,13			
		2	40		N#4-N#5	1606	1,63	351	1,64	309	0	0	660	786	1 732 697					
		3	30		N#8-N#9	1204,5	1,12	350	1,67	345	0	0	695	840	1 166 137					
НОЧНОЕ ВРЕМЯ (7 часов)	2555	1	30	3	N#1-N#3-N#9	766,5	1,07	340	1,29	315	1,67	320	975	1155	999 938	0,19	204 974,06			
		2	40		N#4-N#5-N#9	1022	1,63	325	1,64	290	1,67	325	940	1102	1 582 158					
		3	30		N#8-N#5-N#9	766,5	1,12	325	1,64	290	1,67	325	940	1102	1 059 571					
СУТОЧНЫЙ РАСХОД, м3/час	1	30										18555		22240						
	2	40										17800		21073						
	3	30										18395		21994						

На прикладі вхідної лінгвістичної змінної Volume (рис. 2) показано принцип формування функції приналежності. Універсум (діапазон зміни) – відрізок $[0..2400 \text{ м}^3]$. Множина термів {low (низький), below average (нижче середнього), average (середній), above average (вище середнього), high (високий)}.

Визначені дані на основі професійного досвіду експертів компанії та роботи алгоритмів енергозбереження передаються на вхід нечіткого контролера у вигляді терм-множин лінгвістичних змінних та функції приналежності для прогнозування енергетичної ефективності процесу водовідливу.

Результат, отриманий системою нечіткої логіки, моделює стратегію, яка до цього могла бути визначена лише експертом, що приймає рішення. У результаті роботи нечіткого контролера формується стратегія щодо кількості ввімкнених НА з відповідною продуктивністю з урахуванням тарифних зон навантаження енергосистеми.

На основі даних, які визначають стратегію (у їх складі питоми енерговитрати), виконується розрахунок очікуваних економічних показників комплексу водовідливу. Фактичні та прогнозовані дані СППР оформляються у вигляді звіту.

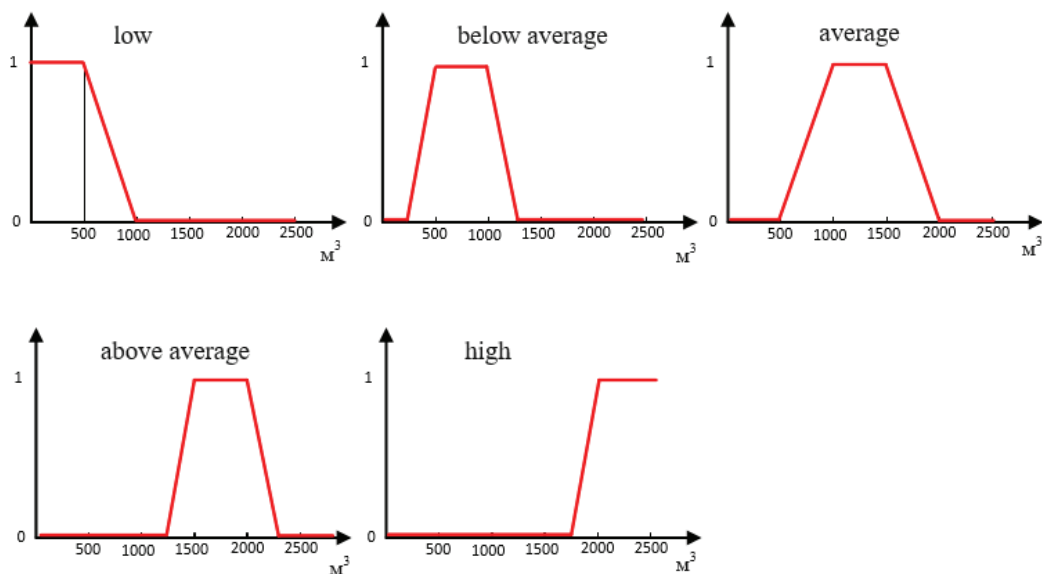


Рис. 2. Функції належності термів лінгвістичної змінної Volume

Результатом роботи нечіткого контролера є стратегія щодо кількості ввімкнених НА з відповідною продуктивністю і в які проміжки часу за тарифною зоною.

Розроблена на основі лінгвістичних змінних із термами та функціями належності база знань є основою нечіткої системи підтримки прийняття рішень комплексу шахтного водовідливу.

Сформована база нечітких правил, що містить нечіткі висловлювання у формі «Якщо – то», реалізована в Fuzzy Logic Toolbox програмного середовища Matlab, який надає широкі можливості для моделювання та аналізу поведінки системи та надає ефективність прийняттю рішень в умовах невизначеності (рис. 3). Застосовано тип системи нечіткого логічного висновку типу Мамдані. База нечітких правил моделює залежність $Y=f(X)$, де Y – вихідна стратегія, яка відображає об'єм сумарної спожитої електроенергії (кВт*год), а X – вектор вхідних параметрів процесу шахтного водовідливу: тарифна зона, об'єм води, групування НА по 2, групування НА по 3.

Дослідити вплив зміни значень вхідних змінних на результат Fuzzy Logic Toolbox можна, візуалізуючи дефазифікацію вихідних змінних після акумулювання всіх висновків правил нечіткого виведення.

Результати розробленого нечіткого контролера наведено на рис. 4.

Номера правил указані в лівій частині графічного інтерфейсу. У правій нижній частині графічного інтерфейсу програми перегляду правил розташований прямокутник, який зображує дефазифікацію вихідної змінної після акумулювання всіх висновків правил нечіткого виведення. Одержане в результаті дефазифікації значення вихідної змінної вказується у верхній частині стовпчика з ім'ям цієї змінної (стовпчик з ім'ям Strategy на рис. 4). Прямокутники, які відповідають вхідним змінним, перетинає вертикальна пряма червоного кольору, положення якої відповідає конкретному значенню вхідної змінної відповідного стовпчика. Задати конкретні значення вхідних змінних можна, переміщуючи вертикальні прямі в потрібному напрямку за допомогою миші. Після кожної зміни значення окремої вхідної змінної система MatLab виконує процедуру нечіткого виведення та відображає відповідні значення вихідних змінних.

Проаналізувати вплив значень кожної зі змінних на результат нечіткого виведення та отримані значення вихідних змінних, а також вивчати вплив різних чинників, надає можливість інструмент візуалізації Surface редактора FIS. Інструменти візуалізації дають змогу швидше оптимізувати параметри нечіткої системи для досягнення бажаних результатів (рис. 5).

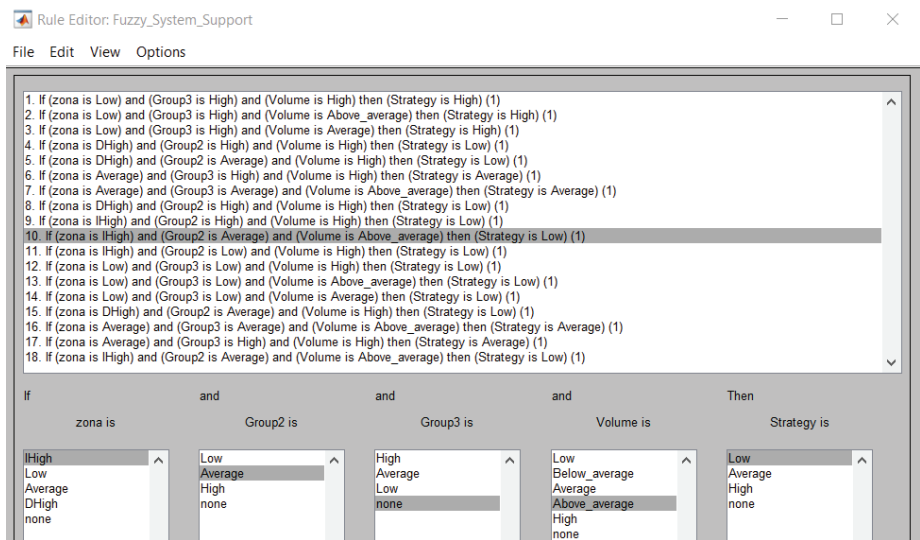


Рис. 3. База нечітких правил, що сформована у середовищі Matlab

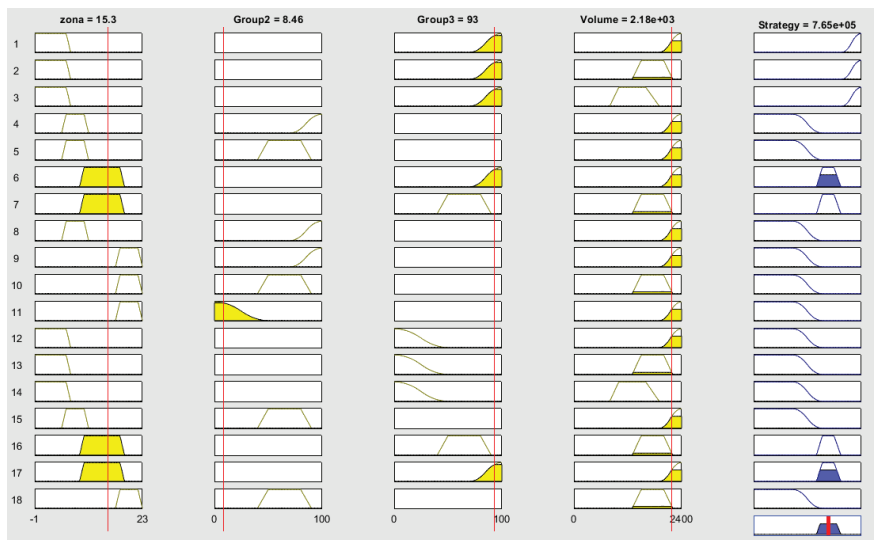


Рис. 4. Переглядач нечітких правил

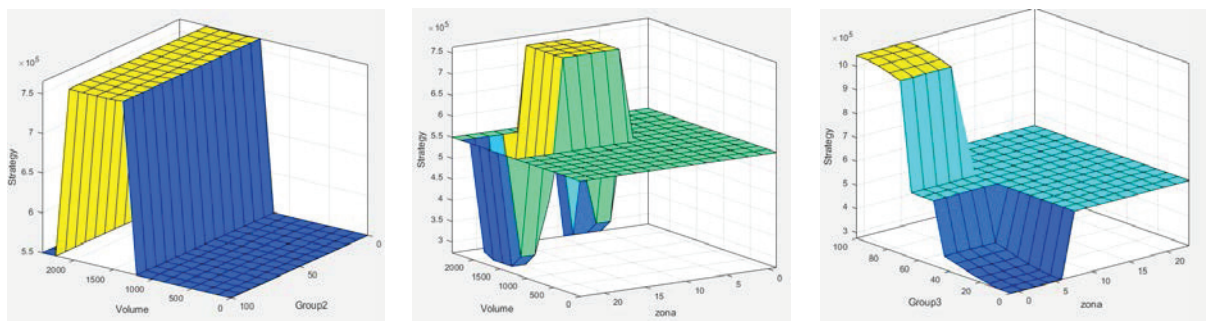


Рис. 5. Результати візуалізації впливу значень вхідних значень на формування стратегії керування комплексом водовідливу

Було проведено моделювання процесу вибору оптимальної стратегії системи шахтного водовідливу на таких тестах (табл. 2).

Таблиця 2

Тестові набори даних

№ п/п	Дія	Результат
1.	ЛЗ Zona терм Dhigh (8), ЛЗ Volume терм High (2000), ЛЗ Group2 терм High (90), ЛЗ Group3 Low(10)	HB Strategy терм Low (560 000)
2.	ЛЗ Zona терм Average(13) , ЛЗ Volume терм High (2200), ЛЗ Group2 терм Low(8) , ЛЗ Group3 High (92)	HB Strategy терм Average (770 000)
3.	ЛЗ Zona терм iHigh(21), ЛЗ Volume терм High (2190), ЛЗ Group2 терм High (95), ЛЗ Group3 Low(5)	HB Strategy терм Low (620 000)
4.	ЛЗ Zona терм Low(5), ЛЗ Volume терм Average (1800), ЛЗ Group2 терм Low(2), ЛЗ Group3 High (98)	HB Strategy терм High (990 000)
5.	ЛЗ Zona терм Low(0), ЛЗ Volume терм High (2300), ЛЗ Group2 терм Low(9), ЛЗ Group3 High (96)	HB Strategy терм Low (1100 000)
6.	ЛЗ Zona терм Average(14), ЛЗ Volume терм Low(900), ЛЗ Group2 терм Low(1), ЛЗ Group3 High (80)	HB Strategy терм Low (1000 000)
7.	ЛЗ Zona терм DHigh(7), ЛЗ Volume терм Low(800), ЛЗ Group2 терм Low(9), ЛЗ Group3 High (10)	HB Strategy терм Average (740 000)

Тестовий набір № 1 моделює стратегію режиму роботи комплексу водовідливу для зони денного піку навантаження енергосистеми.

Тестовий набір № 2 розглядає варіант вибору стратегії режиму роботи комплексу водовідливу для зони напівпіку навантаження енергосистеми.

Тестовий набір № 3 демонструє варіант вибору стратегії режиму роботи комплексу водовідливу для зони вечірнього піку навантаження енергосистеми.

Тестовий набір № 4 розглядає варіант вибору стратегії режиму роботи комплексу водовідливу для нічної зони навантаження енергосистеми за умови зниженого об'єму води у водозбірнику.

Тестовий набір № 5 моделює стратегію для зони нічного часу навантаження енергосистеми.

Тестовий набір № 6 – для зони напівпіку навантаження енергосистеми за умови низького об'єму води у водозбірнику.

Тестовий набір № 7 відповідає режиму роботи комплексу водовідливу для нічної зони навантаження енергосистеми за умови низького об'єму води у водозбірнику.

Проведені експериментальні дослідження підтвердили адекватність нечіткої системи прийняття рішень під час визначення параметрів системи комплексу водовідливу з урахуванням вимог зниження навантаження на енергосистему та довели відповідність отриманих результатів експертним даним. Результати експериментів показали достатність використання чотирьох лінгвістичних змінних із відповідними нечіткими множинами для моделювання стратегії керування комплексом шахтного водовідливу.

Висновки

У роботі запропоновано модель нечіткої системи, яка моделює стратегію ввімкнення визначеної групи НА відносно зон навантаження на енергосистему у складі автоматизованої системи підтримки прийняття рішень оператором, ефективно використовує базу знань, що описує параметри роботи комплексу шахтного водовідливу, такі як тарифні зони, поточний об'єм води у водозбірнику, групи НА за подачею та ефективністю. Модель нечіткої системи була перевірена шляхом виконання контрольних тестів. Тестування підтвердило коректну роботу й адекватність нечіткої системи процесу шахтного водовідливу для підтримки прийняття рішень оператором з енергоефективного керування комплексом шахтного водовідливу. Нечітка система допоможе автоматизувати роботу системи шахтного водовідливу, замінивши виконавців, які не всі є експертами під час прийняття рішень, та допомогти у формуванні оптимальної стратегії роботи НА з метою енергозбереження.

Список використаної літератури

1. Beshta A., Balakhontsev A., Khudoliy S., Khudy E., Khuda O. Energy saving in mine drainage via optimization of pumping operation modes. *Scientific Reports on Resource Issues*. 2012. Vol. 2. P. 66–75.
2. Цвіркун Л.І., Ткаченко С.М., Бешта Л.В. Алгоритми енергоефективного використання шахтних водовідливних установок із застосуванням методу передпікового вмикання. *Системні технології*. 2021. № 5. С. 88–97.
3. Agung T., Ernawati R. Fuzzy logic modeling of acid mine water using geochemical parameters. *Jurnal Scientia*. 2023. Vol. 12. No.03. P. 2978–2990.
4. Маркіна Л.М., Сацик В.О., Смолянкін О.О. Використання нечіткої логіки в системі автоматичного регулювання концентрації замісу при виробництві спирту. *Перспективні технології та прилади*. 2021. № 19. С. 78–84.
5. Желдак Т.А., Коряшкіна Л.С., Ус С.А. Нечіткі множини в системах управління та прийняття рішень : навчальний посібник. Дніпро : НТУ «ДП», 2020. 387 с.
6. Прокопенко Т.О., Березюк І.А., Зубенко В.О. Автоматизована система керування температурно-вологісним режимом теплиці на основі апарату нечіткої логіки. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія «Технічні науки. Інформатика, обчислювальна техніка та автоматизація»*. 2020. № 6. Т. 3. Ч. 1. С. 129–134.
7. Samudyata S.J., Sharanya S., Shrusti Heroor, Sneha Majumder, Sangeeta Modi. Fuzzy Logic Controller for Modern Power Systems. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2022. No.04. P. 158–162.

References

1. Beshta, A., Balakhontsev, A., Khudoliy, S., Khudy, E., & Khuda, O. (2012). Energy saving in mine drainage via optimization of pumping operation modes. *Scientific Reports on Resource Issues*. Vol. 2. P. 66–75 [in English].
2. Tsvirkun, L.I., Tkachenko, S.M., & Beshta, L.V. (2021). Alhorytmy enerhoefektyvnoho vykorystannia shakhtnykh vodovidlyvnykh ustanovok iz zastosuvanniam metodu peredpikovooho vmykannia [Algorithms for the energy-efficient use of mine drainage installations using the method of pre-peak switching on]. *Systemni tekhnolohii*. № 5. P. 88–97. doi: <https://doi.org/10.34185/1562-9945-5-136-2021-09> [in Ukrainian].
3. Agung, T., & Ernawati, R. (2023). Fuzzy logic modeling of acid mine water using geochemical parameters. *Jurnal Scientia*. Vol. 12. No. 03. P. 2978–2990. Retrieved from: <https://infor.seaninstitute.org/index.php/pendidikan/article/view/1657/1348> [in English].
4. Markina, L.M., Satsyk, V.O., & Smoliankin, O.O. (2021). Vykorystannia nechitkoi lohiky v systemi avtomatychnoho rehuliuвання kontsentratsii zamisu pry vyrobnytstvi spyrту. [The use of fuzzy logic in the system of automatic control of the batch concentration in the production of alcohol]. *Perspektyvni tekhnolohii ta prylady*. № 19. P. 78–84. doi: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2021-19-13> [in Ukrainian].
5. Zheldak, T.A., Koriashkina, L.S., & Us, S.A. (2020). *Nechitki mnozhyny v systemakh upravlinnia ta pryiniattia rishen* [Fuzzy sets in control and decision-making systems]. Dnipro: NTU «DP» [in Ukrainian].
6. Prokopenko, T.O. Bereziuk, I.A. & Zubenko, V.O. (2020). Avtomatyzovana systema keruvannia temperaturno-volohishnym rezhymom teploty na osnovi aparatu nechitkoi lohiky. [Automated greenhouse temperature and humidity control system based on fuzzy logic apparatus]. *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Serii: tekhnichni nauky. Informatyka, obchysluvalna tekhnika ta avtomatyzatsiia*. No. 6. Vol. 3. P.1 doi: <https://doi.org/10.32838/TNU-2663-5941/2020.6-1/22> [in Ukrainian].

7. Samudyata, S.J., Sharanya, S., Shrusti Heroor, Sneha Majumder, & Sangeeta Modi. (2022). Fuzzy Logic Controller for Modern Power Systems. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. No. 04. P. 158–162. Retrieved from <https://www.irjet.net/archives/V9/i5/IRJET-V9I5106.pdf> [in English].

Соколова Наталя Олегівна – к.т.н., доцент кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії Національного технічного університету «Дніпровська політехніка». E-mail: n.olegowna@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2493-3553.

Гнатушенко Володимир Володимирович – д.т.н., професор, завідувач кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії Національного технічного університету «Дніпровська політехніка». E-mail: vvgnat@ukr.net, ORCID: 0000-0003-3140-3788.

Бешта Лілія Валеріївна – асистент кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії Національного технічного університету «Дніпровська політехніка». E-mail: BeshtaL@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5041-0962.

Sokolova Natalya Olegivna – PhD in Engineering, Associate Professor at the Department of Information Technologies and Computer Engineering of the Dnipro University of Technology. E-mail: n.olegowna@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2493-3553.

Hnatushenko Volodymyr Volodymyrovych – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Information Technologies and Computer Engineering of the Dnipro University of Technology. E-mail: vvgnat@ukr.net, ORCID: 0000-0003-3140-3788.

Beshta Liliia Valeriivna – Assistant at the Department of Information Technologies and Computer Engineering of the Dnipro University of Technology. E-mail: BeshtaL@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5041-0962.