

А. В. БУБЛІКОВ¹, Н. С. ПРЯДКО², Ю. А. ПАПАЙКА³**СИСТЕМА НЕЧІТКОГО АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ РЕЖИМОМ
РУЙНУВАННЯ ВУГІЛЬНОГО МАСИВУ ВИКОНАВЧИМ ОРГАНОМ
ОЧИСНОГО КОМБАЙНА**^{1,3} Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»,

пр. Яворницького, 19, 49005, Дніпро, Україна; e-mail: bublikov.a.v@ntu.one, Papaika.Yu.A@ntu.one

² Інститут технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства
України, вул. Ляшко-Попеля, 15, 49005, Дніпро, Україна; e-mail: pr-2006@ukr.net

До теперішнього часу автоматичне керування швидкістю переміщення комбайна відбувається з метою підтримки фактичної швидкості на заданому оператором рівні або з метою підтримки фактичної потужності на стійкому рівні, що відбувається без перегрівання та перекидання. Але не досліджено питання про керування режимом руйнування вугільного пласта верхнім виконавчим органом очисного комбайна з урахуванням зміни кута охоплення органом масиву.

Мета роботи полягає в створенні методу синтезу системи нечіткого автоматичного керування режимом руйнування вугільного масиву виконавчим органом очисного комбайна на основі інформаційного критерію енергоефективності процесу різання вугілля різцями.

У даній роботі на основі інформаційного критерію енергоефективності процесу різання вугілля різцями створюється алгоритм нечіткого виводу для системи нечіткого автоматичного керування режимом руйнування вугільного масиву виконавчим органом очисного комбайна. При цьому за допомогою обґрунтованих правил нечітких продукцій визначаються параметри функцій належності термів вихідної лінгвістичної змінної системи та нечіткі операції згідно з рекомендаціями класичного алгоритму нечіткого виводу Мамдані.

Створений алгоритм нечіткого виводу досліджується на ефективність на основі відносного показника кількості сформованих системою нечіткого автоматичного керування ефективних керуючих впливів. За допомогою імітаційного моделювання здійснюється порівняльний аналіз ефективності керування швидкістю обертання органом за запропонованим алгоритмом нечіткого виводу та з використанням нерегульованого приводу різання комбайна.

При дослідженні закономірностей формування керуючого впливу щодо швидкості обертання верхнього виконавчого органа очисного комбайна з використанням створеного алгоритму нечіткого виводу отримано практичний висновок про формування ефективних керуючих впливів у переважній кількості випадків (близько 93 %).

Запропонований у роботі метод є теоретичною основою для розв'язання важливої науково-прикладної задачі автоматизації процесу керування швидкістю обертання верхнього виконавчого органа очисного комбайна з метою зменшення питомих енерговитрат на видобуток вугілля та кількості штибу.

Ключові слова: очисний комбайн, система нечіткого автоматичного керування, виконавчий орган, швидкість обертання.

Up to now, automatic control of the shearer speed has been performed to keep the actual speed at an operator-specified level or to keep the actual power at a stable level without overheating or overturning. However, the problem of control of coal seam cutting by the upper drum of a shearer in the case of a variable angle of drum – coal seam contact has yet to be studied.

The aim of this work is to develop a method for synthesizing a system of fuzzy automatic control of coal massif cutting by a shearer drum based on an information criterion for the power efficiency of coal cutting with cutters.

In this work, based on an information criterion for the power efficiency of coal cutting with cutters, a fuzzy inference algorithm is constructed for a system of automatic control of coal massif cutting by a shearer drum. In doing so, the parameters of the output linguistic variable term membership functions of the system and fuzzy operations are determined according to the recommendations of the classical Mamdani fuzzy inference algorithm using substantiated fuzzy production rules.

The fuzzy inference algorithm constructed in this work is tested for efficiency based on the fraction of effective control actions generated by the fuzzy automatic control system. Using simulation, the efficiency of drum rotation speed control with the use of the proposed fuzzy inference algorithm is compared with that with the use of an uncontrolled shearer cutting drive.

The study of the generation of control actions involving the upper shearer drum rotation speed showed that effective control actions were generated in the overwhelming majority of cases (about 93%).

The proposed method forms a theoretical basis for the solution of the important scientific and practical problem of upper shearer drum rotation speed control automation with the aim to reduce specific power consumption and the amount of chips.

Keywords: shearer, system of fuzzy automatic control, drum, rotation speed.

© А. В. Бубліков, Н. С. Прядко, Ю. А. Папайка, 2021

Вступ. На сьогодні єдиним способом автоматичного керування параметрами очисних комбайнів, який використовується на практиці, є мінімальний варіант автоматизації [1]. Згідно з ним, відбувається автоматичне керування швидкістю переміщення комбайна або з метою підтримки фактичної швидкості на заданому оператором рівні, або з метою підтримки фактичної потужності, що споживається найбільш завантаженим електродвигуном приводу різання на так званому стійкому рівні, при якому робота двигуна відбувається без перегрівання та перекидання. Але останнім часом очисні комбайни проєктуються як складні мехатронні системи з високорозвиненою інформаційною компонентою, що дозволяє, з однієї сторони, вимірювати багато параметрів, які характеризують роботу комбайна, та зберігати цю інформацію, а з іншої – здійснювати керування одразу декількома конструктивними підсистемами на основі результатів обробки накопиченої інформації [2]. Глибоке об'єднання інформаційної компоненти з іншими компонентами (електротехнічною, механічною, гідравлічною), як наслідок проєктування комбайнів на основі мехатронного підходу, дає можливість за рахунок цього підвищити їх якісні показники роботи, але це неможливо зробити без перегляду підходів щодо створення систем автоматизації процесів керування очисними комбайнами.

Постановка проблеми. Наразі використовуваний спосіб автоматизації очисних комбайнів є доцільним на шахтних підприємствах з середньою та значною потужністю пластів, при вийманні яких комбайновим способом не стоїть гостре питання щодо суттєво завищених питомих енерговитрат та кількості штибу у вугільній масі через незначну товщину стружки, що знімається різцями верхнього виконавчого органу комбайна. З оглядом на діаметр нижнього органу (0,7 – 0,9) м, та невелику потужність вугільного пласта кут охоплення масиву верхнім органом складає від 10 градусів до 50 градусів, через що середня товщина стружки за траєкторією руху різця є в декілька разів меншою у порівнянні з повним кутом охоплення масиву органом. Крім того, номінальне значення нерегульованої на сьогодні швидкості обертання органів комбайна також розраховане для роботи комбайнів на потужних вугільних пластах, де вони мають набагато більшу швидкість переміщення. Наслідком зазначених факторів є те, що середня товщина стружки за траєкторією переміщення різця для верхнього виконавчого органу менше 1 см, що призводить до збільшення питомих енерговитрат на руйнування масиву вугілля та кількості штибу в 3 – 4 рази. Це дає підстави для впровадження регульованого приводу різання для верхнього виконавчого органу очисного комбайна та, відповідно, для обґрунтування підходу щодо автоматизації процесу керування швидкістю обертання цього органу.

Огляд літератури. На сьогодні на очисних комбайнах сучасного покоління приводи різання є нерегульованими, але неодноразово була доведена економічна доцільність та технічна можливість впровадження регулювання швидкостей обертання виконавчих органів за допомогою перетворювачів частоти [3 – 5]. Однак, при цьому постає питання щодо спроможності операторів комбайнів на коротких часових інтервалах у режимі реального часу визначати оптимальне значення швидкості обертання органу, яке постійно змінюється через зміну гірничо-геологічних властивостей пласта. Так, у роботі [6] доведено, що на малих інтервалах часу оператори комбайнів фізично не в змозі належним чином проаналізувати інформацію від декількох датчиків,

що потребує статистичного аналізу, та прийняти оптимальне рішення в умовах динамічно мінливих непередбачуваним чином ситуацій.

Серед теоретично обґрунтованих рішень проблеми автоматизації процесу керування швидкістю обертання виконавчого органу очисного комбайна найбільш відомим є принцип підпорядкованого керування швидкостями різання та подачі [1]. В цьому рішенні приймається, що оптимальне відношення швидкостей різання та подачі за критерієм мінімальних питомих енерговитрат на руйнування вугільного масиву є незмінною величиною у процесі роботи комбайна та залежить лише від його конструктивних параметрів. Але для верхнього виконавчого органу комбайна через змінність середньої товщини стружки за траєкторією руху різця це оптимальне відношення швидкостей є змінною величиною.

Ще одне рішення щодо впровадження узгодженого керування швидкостями подачі та різання очисних комбайнів описано у роботі [5], але по відношенню до нижнього виконавчого органу, для якого існує проблема низької завантажувальної продуктивності. При цьому у цій роботі пропонується методика визначення оптимального відношення швидкостей різання та подачі комбайна за критеріями максимальної продуктивності та мінімальних питомих енерговитрат. Але на відміну від нижнього виконавчого органу, оптимальність швидкості обертання верхнього органу визначається не характером протікання процесу завантаження вугілля, а процесом руйнування різцями органу прошарку матеріалу біля покрівлі пласта.

Тож, аналіз відомих рішень зазначеної проблеми показав, що необхідний новий підхід щодо автоматизації процесу керування швидкістю обертання верхнього виконавчого органу очисного комбайна.

Метою роботи є створення методу синтезу системи нечіткого автоматичного керування режимом руйнування вугільного масиву виконавчим органом очисного комбайна на основі інформаційного критерію енергоефективності процесу різання вугілля різцями.

Матеріал досліджень. Очисні комбайни як об'єкти керування є добре вивченими та характеризуються відносно простою та незмінною базою правил, що пов'язує дії оператора з переліком ситуацій, які виникають у процесі керування. Складність керування видобувними комбайнами зумовлюється динамічним та непередбачуваним характером зміни у часі режимів роботи комбайна з одної сторони, та неможливістю однозначно ідентифікувати ці режими на основі аналізу сигналів з датчиків на короткому проміжку часу з іншої сторони. З урахуванням цього, для вирішення проблеми автоматизації процесу керування швидкістю обертання верхнього виконавчого органу доцільним є використання експертної системи з використанням нечіткої логіки для розпізнавання різних ситуацій згідно з підходом, що описаний у роботі [7]. При цьому за основу береться загальна структурна схема системи нечіткого автоматичного керування режимами роботи очисного комбайна, що також представлена й описана у роботі [7].

Зауважимо, що у якості інструмента досліджень використовується комплексна імітаційна модель очисного комбайна як мехатронного агрегату, яка створена на основі відомих та апробованих математичних моделей, що описують процеси у різних конструктивних вузлах комбайна, та в яку закладені результати обробки експериментальних даних, отриманих при випробуванні

очисного комбайна УКД300 в умовах пласта С₅ шахти «Павлоградська» Донецького басейну [1].

Крім того, за умови створення системи нечіткого автоматичного керування режимом руйнування вугільного масиву виконавчим органом (ВО) очисного комбайна використовуються правила нечітких продукцій, що виведені у роботі [7] на основі аналізу дій оператора при керуванні комбайном:

1. ЯКЩО “відбувається енергоефективне руйнування масиву виконавчим органом” (P1) ТА “до цього відбувалося енергоефективне руйнування масиву виконавчим органом” (P3) ТО “швидкість обертання ВО збільшується” (Z1).

2. ЯКЩО “відбувається неенергоефективне руйнування масиву виконавчим органом” (P2) ТА “до цього відбувалося енергоефективне руйнування масиву виконавчим органом” (P3) ТО “швидкість обертання ВО суттєво не змінюється” (Z2).

3. ЯКЩО “відбувається енергоефективне руйнування масиву виконавчим органом” (P1) ТА “до цього відбувалося неенергоефективне руйнування масиву виконавчим органом” (P4) ТО “швидкість обертання ВО суттєво не змінюється” (Z2).

4. ЯКЩО “відбувається неенергоефективне руйнування масиву виконавчим органом” (P2) ТА “до цього відбувалося неенергоефективне руйнування масиву виконавчим органом” (P4) ТО “швидкість обертання ВО зменшується” (Z3).

Якщо при створенні алгоритму нечіткого виводу для системи нечіткого автоматичного керування швидкістю обертання органу комбайна брати за основу схему алгоритму, що наведена на рис. 3 у роботі [7], то умовою накопичення даних є проходження часу, що дорівнює сумі двох часових затримок для формування вибірок зі значень інформаційного сигналу (потужність двигуна приводу різання) при різних швидкостях обертання органу, та часової затримки, необхідної для переходу до нового рівня швидкості обертання.

Обґрунтування вхідної лінгвістичної змінної для системи керування, встановлення для неї терм-множини та визначення інформаційного критерію енергоефективності процесу різання вугілля різцями як чіткої вхідної змінної системи виконані у роботі [8]. Також у цій роботі описана процедура фазифікації чіткої вхідної змінної системи нечіткого автоматичного керування швидкістю обертання органу (блок 3 на рис. 3 у роботі [7]), яка проводиться на основі встановлених у ході дослідження законів розподілу значень інформаційного критерію енергоефективності процесу різання вугілля різцями для різних гірничо-геологічних умов вугільних пластів та конструктивних параметрів очисних комбайнів.

Вхідними даними для агрегування наведених вище підумов бази правил нечітких продукцій (блок 4 схеми алгоритму на рис. 3 у роботі [7]) є результати фазифікації чіткого інформаційного критерію (ІК) у вигляді функцій належності (ФН) μ_{P1} та μ_{P2} за критерієм [8]. При цьому з урахуванням єдиного ІК ступені істинності підумов b'_i будуть дорівнювати відповідним ФН μ_i за критерієм:

$$b'_1 = \mu_{P1}; b'_2 = \mu_{P2}.$$

Ступень істинності підумов «до цього відбувалося (не)енергоефективне руйнування масиву ВО» приймаємо рівним ступеню істинності підумов «відбувається (не)енергоефективне руйнування масиву ВО» на попередньому кроці нечіткого виводу:

$$b'_3(k) = b'_1(k-1); \quad b'_4(k) = b'_2(k-1).$$

Після агрегування підумов також відбувається процедура агрегування умов бази правил нечітких продукцій, у ході якої визначаються ступені істинності b'' усіх умов бази правил системи нечіткого автоматичного керування режимом руйнування масиву вугілля ВО. З урахуванням структури нечітких висловлювань в умовах бази правил, що наведені вище, у формулах для визначення ступенів істинності b'' умов для кожного правила використовуємо операцію *min*-кон'юнкції (нумерація ступенів істинності умов b'' співпадає з номером правила):

$$b''_1 = \min(b'_1, b'_3); \quad b''_2 = \min(b'_2, b'_3); \quad b''_3 = \min(b'_1, b'_4); \quad b''_4 = \min(b'_2, b'_4).$$

Далі, за алгоритмом на рис. 3 у роботі [7] сформулюємо умови зміни та відсутності зміни режиму роботи для системи нечіткого автоматичного керування режимом руйнування масиву вугілля ВО.

Умовою зміни режиму роботи приймемо факт виконання однієї з підумов бази правил нечітких продукцій, що відповідають події зміни характеристик режиму роботи, зі ступенем істинності 0,5 і вище. Відповідно, формула для умови зміни режиму роботи для системи нечіткого автоматичного керування режимом руйнування масиву вугілля ВО буде такою:

$$b'_1 \geq 0,5 \quad \text{АБО} \quad b'_2 \geq 0,5 \quad \text{АБО} \quad b'_3 \geq 0,5 \quad \text{АБО} \quad b'_4 \geq 0,5.$$

Правила нечітких продукцій для системи нечіткого автоматичного керування режимом руйнування масиву вугілля ВО сформульовані таким чином, що окремий терм, що асоціюється з відсутністю зміни режиму роботи, відсутній. Також, з оглядом на єдиний ІК, не потрібно перевіряти умову заповнення допоміжних вибірок. Тому у цьому випадку умова відсутності зміни режиму роботи відсутня.

У рамках процедури активізації підвисновків (блок 7 на рис. 3 роботи [7]) визначаються ступені істинності c_i та ФН μ_{c_i} для кожного висновка правил нечітких продукцій бази правил системи нечіткого автоматичного керування режимом руйнування масиву вугілля ВО. При цьому за умови визначення ступенів істинності висновків відбувається об'єднання ідентичних висновків на основі операції нечіткої диз'юнкції з прийняттям усіх вагових коефіцієнтів рівними одиниці:

$$c_1 = b''_1; \quad c_{21} = \max(b''_2, b''_3); \quad c_3 = b''_4;$$

де c_1 – ступінь істинності висновку «швидкість обертання ВО збільшується»;
 c_2 – ступінь істинності висновку «швидкість обертання ВО не змінюється»;
 c_3 – ступінь істинності висновку «швидкість обертання ВО зменшується».

Функції належності μ_{c_i} для кожного i -го висновка правил нечітких продукцій бази правил системи нечіткого автоматичного керування режимом руйнування масиву вугілля ВО визначаються за допомогою методу *min*-активізації:

$$\mu_{c_1}(y) = \min[c_1, \mu_{y_1}(y)]; \quad \mu_{c_2}(y) = \min[c_2, \mu_{y_2}(y)]; \quad \mu_{c_3}(y) = \min[c_3, \mu_{y_3}(y)];$$

де y – вихідна чітка змінна системи (у нашому випадку – величина зміни швидкості обертання ВО $\Delta n_{об}$); μ_{y_1} – ФН терму «Збільшення швидкості обер-

тання ВО» вихідній лінгвістичній змінній системи «Зміна швидкості обертання ВО»; μ_{y2} – ФН терму «Відсутність суттєвої зміни швидкості обертання ВО» вихідній лінгвістичній змінній системи «Зміна швидкості обертання ВО»; μ_{y3} – ФН терму «Зменшення швидкості обертання ВО» вихідній лінгвістичній змінній системи «Зміна швидкості обертання ВО».

Таким чином, вихідна лінгвістична змінна системи нечіткого автоматичного керування режимом руйнування масиву вугілля ВО задається формулою:

$$y = \langle \text{Name_}y, T_y, [-\alpha - \beta, \alpha + \beta] \rangle,$$

де $\text{Name_}y$ – назва вихідної лінгвістичної змінної («Зміна швидкості обертання ВО»); T_y – базова терм-множина вихідної лінгвістичної змінної системи нечіткого автоматичного керування:

$$T_y = \{ \mu_{y1}, \mu_{y2}, \mu_{y3} \}.$$

За умови дефазифікації вихідної лінгвістичної змінної системи нечіткого автоматичного керування режимом руйнування масиву вугілля ВО, з урахуванням однозначної чіткої залежності питомих енерговитрат на різання вугілля від товщини стружки й, відповідно, від швидкості обертання ВО, а також з оглядом на характеристики зміни швидкості обертання ВО, що закладені у лінгвістичні формулювання висновків правил нечітких продукцій, будемо розглядати симетричне розташування графіків ФН термів вихідній лінгвістичній змінній відносно осі ординат для випадків зменшення та збільшення швидкості обертання ВО без перекриття графіками один одного (рис. 1).

Оскільки усі висновки правил нечітких продукцій прив'язані до однієї чіткої вихідної змінної (Δn_{ia} – приріст поточної швидкості обертання ВО, об/хв), за умови їх акумулювання розподіл ваги чи площ графіків відносно осі ординат на рис. 1 повинний чітко відображати відношення ступенів істинності різних висновків. З оглядом на це, оберемо трикутну форму графіків ФН для термів вихідної лінгвістичної змінної системи з відсутністю перекриття графіками один одного та однаковими лівими й правими коефіцієнтами нечіткості β (рис. 1).

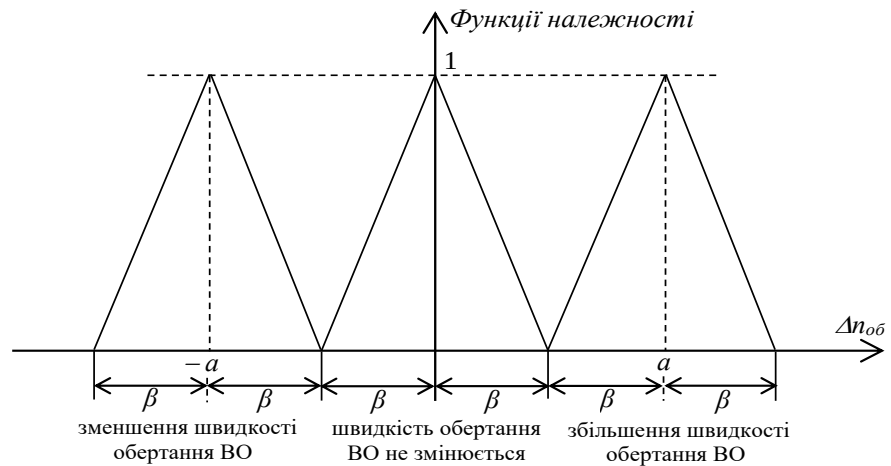


Рис. 1 – Графіки функцій належності для термів вихідної величини системи нечіткого автоматичного керування режимом руйнування масиву вугілля виконавчим органом видобувної машини

Згідно з рис. 1, далі проведемо обґрунтування модального значення ФН термів вихідній лінгвістичній змінній системи a , а також коефіцієнта нечіткості β .

З метою забезпечення роботи системи нечіткого автоматичного керування саме на межі між енергоефективним та неенергоефективним режимами руйнування масиву ВО, модальне значення ФН вихідній величині системи a (рис. 1) задається таким, що забезпечує незначний крок зміни товщини стружки, за умови якого поблизу межі не відбувається суттєвої зміни питомих енерговитрат (за результатами досліджень крок зміни товщини стружки $\Delta h_{cmp} = 0,07$ см [8]). Таким чином, модальне значення ФН вихідної лінгвістичної величини системи є змінною величиною, що залежить від поточних швидкості обертання ВО та швидкості переміщення очисного комбайна:

$$a = n_{об} - \frac{50 \cdot V_n \cdot n_{об}}{n_{об} \cdot \Delta h_{cmp} + V_n \cdot 50}, \text{ об/хв,}$$

де $n_{об}$ – поточна швидкість обертання ВО, об/хв; V_n – поточна швидкість подачі комбайна, м/хв; Δh_{cmp} – крок зміни товщини стружки.

Відповідно, коефіцієнт нечіткості β , згідно з рис. 1, обчислюється за формулою:

$$\beta = \alpha / 2, \hat{a}/\hat{a}.$$

Далі проводиться процедура акумулювання висновків правил нечітких продукцій з урахуванням того, що усі висновки є характеристиками однієї вихідної лінгвістичної змінної системи – зміни швидкості обертання ВО (блок 8 на рис. 3 роботи [7]). З урахуванням графіків ФН термів вихідної лінгвістичної змінної системи (рис. 1), акумулювання висновків правил нечітких продукцій здійснюємо, використовуючи метод *max*-об'єднання. У підсумку отримуємо ФН μ_y для лінгвістичної вихідної змінної системи «Зміна швидкості обертання ВО»:

$$\mu_y(\Delta n_{об}) = \max[\mu_{y1}(\Delta n_{об}), \mu_{y2}(\Delta n_{об}), \mu_{y3}(\Delta n_{об})].$$

Процедура дефазифікації лінгвістичної вихідної змінної системи «Зміна швидкості обертання ВО» виконується з використанням методу центру площ для дискретних множин (блок 9 на рис. 3 роботи [7]):

$$\sum_{i=1}^u \mu_y(\Delta n_{i\hat{a}}(i)) = \sum_{i=u}^L \mu_y(\Delta n_{i\hat{a}}(i)); \Delta n_{i\hat{a}} = \Delta n_{i\hat{a}}(u), \quad (1)$$

де $\Delta n_{об}(i)$ – вектор величин зміни швидкості обертання ВО від $(-a - \beta)$ до $(a + \beta)$ з кроком 0,1, об/хв; L – розмірність вектору $\Delta n_{об}(i)$; u – індекс вектору $\Delta n_{об}(i)$, при якому виконується умова рівності правої та лівої частин рівняння (1).

У підсумку маємо величину зміни уставки $\Delta n_{об}$ для регулятора швидкості обертання ВО як реакцію згідно бази правил нечітких продукцій системи на результат ідентифікації характеристик режиму руйнування масиву вугілля ВО з метою забезпечення роботи очисного комбайна з мінімальними питомих енерговитратами на різання вугілля різцями.

Наразі на приводах різання встановлені нерегульовані двигуни. Тож, обертання ВО відбувається з постійною номінальною швидкістю. З ураху-

ванням цього, з метою порівняльного аналізу ефективності роботи очисного комбайна (ОК) при керованій та некерованій швидкості різання верхнього ВО на основі комплексної імітаційної моделі ОК [1] проведені наступні обчислювальні експерименти при ідентичних умовах роботи:

- робота ОК за умови керування за допомогою запропонованої системи нечіткого автоматичного керування;
- робота ОК за умови керування, коли швидкість обертання верхнього ВО є незмінною та дорівнює номінальному значенню 78 об/хв.

Результати обчислювального експерименту на основі комплексної імітаційної моделі ОК за умови керування з використанням запропонованої системи нечіткого автоматичного керування показані на рис. 2.

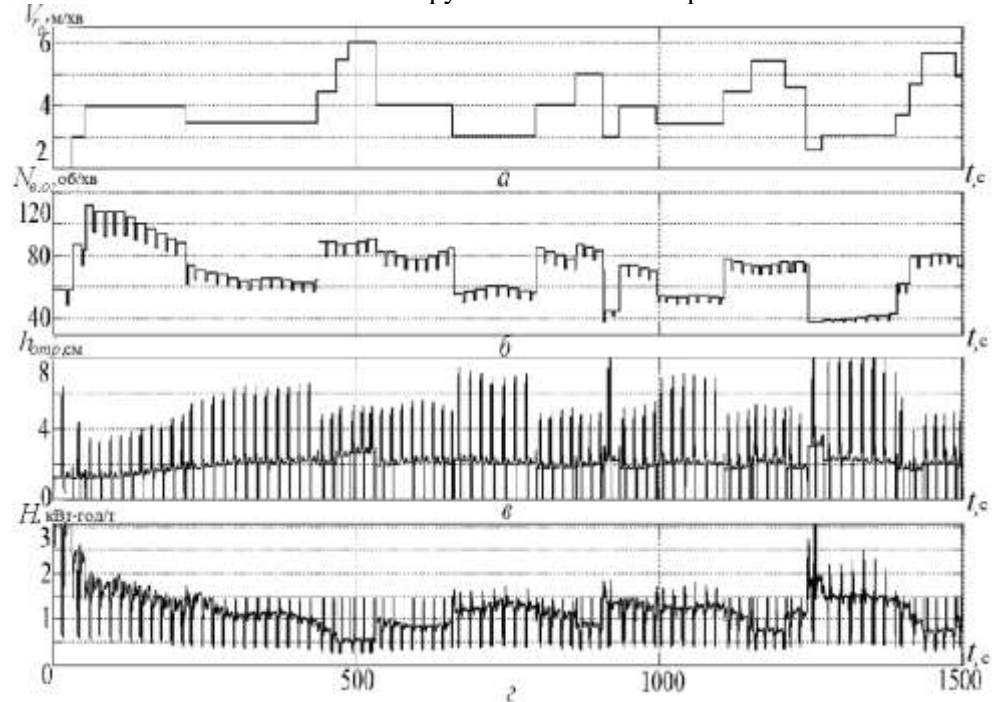


Рис. 2 – Зміна у часі: а – швидкості V_{r_0} подачі ОК; б – швидкості обертання $N_{в.о.}$ виконавчого органу; в – максимальної товщини $h_{отр}$ стружки вугілля, що знімається різцями органу; г – питомих енерговитрат H на видобуток вугілля

Верхнім ВО почергово керують дві системи – система нечіткого автоматичного керування органом за гіпсометрією пласта та система нечіткого автоматичного керування режимом руйнування масиву вугілля органом. Тож, на рис. 2, в простежується вплив на товщину стружки, що знімається різцями, обох систем – значні коливання товщини стружки від 0 до 8 см відбуваються за умов різкого переміщення ВО вверх та вниз з метою ідентифікації присікання породи біля покрівлі, а незначні коливання з амплітудою до 1 см відбуваються через періодичну зміну на незначну величину швидкості обертання ВО (рис. 2, б) з метою ідентифікації режиму руйнування масиву вугілля (енергоефективний чи ні).

Зміна швидкості обертання верхнього ВО на значну величину (рис. 2, б) має місце за умови зміни швидкості подачі (рис. 2, а) та відбувається з метою забезпечення незмінності товщини стружки. Це є наслідком компенсації

впливу регулятора навантаження ОК на режим руйнування масиву вугілля верхнім ВО.

У динаміці питомих енерговитрат на руйнування масиву верхнім ВО (рис. 2, г) також можна виділити коливання з меншою амплітудою, що відповідає періодичній зміні швидкості обертання ВО, та з більшою амплітудою, що відповідає різкому підняттю ВО при керуванні ним за гіпсометрією пласта. Середні питомі енерговитрати на руйнування масиву вугілля верхнім ВО за результатами обчислювального експерименту склали 1,09 кВт·год/т. При цьому зведений ступінь здрібнення вугілля склав 0,0755.

Результати обчислювального експерименту за умови використання регулятора навантаження ОК та системи керування ВО за гіпсометрією пласта, але з нерегульованою швидкістю обертання верхнього ВО, що дорівнює номінальному значенню 78 об/хв, представлені на рис. 3.

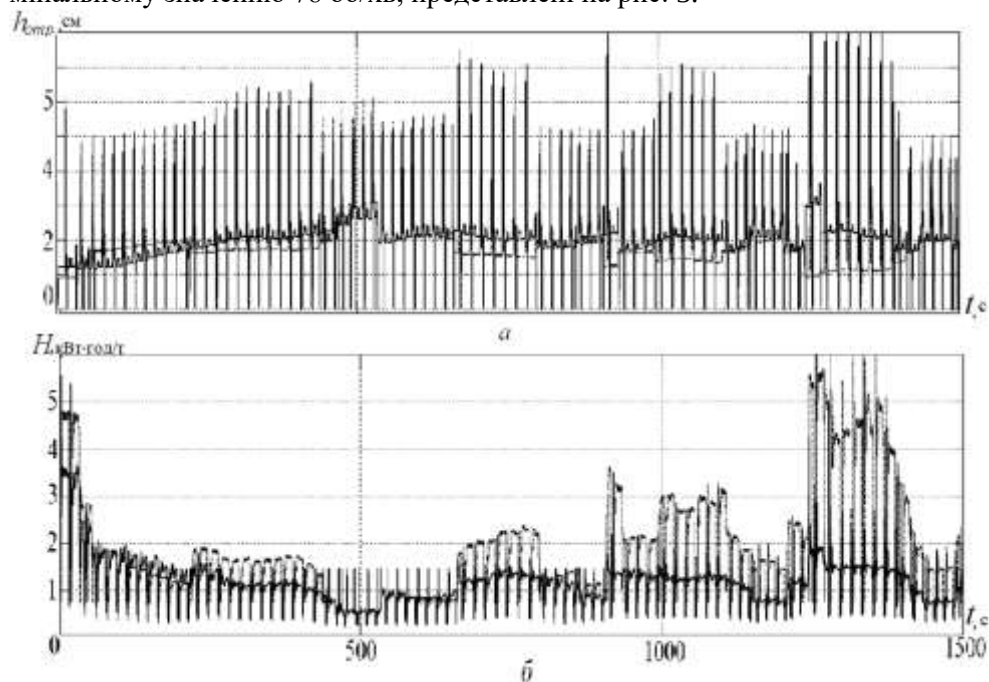


Рис. 3 – Зміна у часі: *a* – максимальної товщини стружки вугілля, що знімається різцями ВО; *б* – питомих енерговитрат на видобуток вугілля за умов номінальної та незмінної швидкості обертання органу (штрих-пунктирні лінії) та з використанням запропонованої системи керування (суцільні лінії)

З рис. 3, а видно, що на часових інтервалах, коли спостерігається незначна швидкість подачі ОК (2,5 – 3,0) м/хв (рис. 3, а), та коли маємо меншу величину потужності пласта (після 1000 с моделювання), за умови незмінної швидкості обертання верхнього ВО товщина стружки вугілля, що знімається різцями органу, зменшується до (1 – 1,5) см. Такий діапазон малих значень товщини стружки відповідає неенергоефективному режиму руйнування вугільного масиву верхнім ВО, через що на цих часових інтервалах для випадку незмінної швидкості обертання органу 78 об/хв спостерігаються суттєво вищі питомі енерговитрати на руйнування вугільного масиву у порівнянні з випадком керованої швидкості обертання з використанням запропонованої системи керування (рис. 3, б).

Таким чином, можна зробити висновок, що значний позитивний ефект щодо зменшення питомих енерговитрат на руйнування вугільного масиву за рахунок керування швидкістю обертання верхнього ВО буде мати місце за умов малих значень потужності вугільного пласта та швидкості подачі ОК.

Так, наприклад, за результатами обчислювального експерименту при роботі комбайна УКД300 в умовах пласта С₅ шахти «Павлоградська» Донецького басейну середні питомі енерговитрати на руйнування верхнім ВО вугільного масиву склали 1,72 кВт·год/т, що в 1,58 разів більше у порівнянні з випадком керованої швидкості обертання з використанням запропонованої системи керування. А визначений за результатами експерименту зведений ступінь здрібнення вугілля для випадку некерованої швидкості обертання верхнього ВО дорівнює 0,084, що на 11,3 % більше у порівнянні з випадком керованої швидкості обертання.

Далі проведемо дослідження якості формування керуючих впливів підсистемою нечіткого автоматичного керування режимом руйнування вугільного масиву верхнім ВО. Для цього протягом обчислювального експерименту сформована нормована гістограма розподілу значень чіткої керуючої величини A_i системи нечіткого автоматичного керування режимом руйнування ВО вугільного пласта (гістограма з прозорими стовпцями на рис. 4, а).

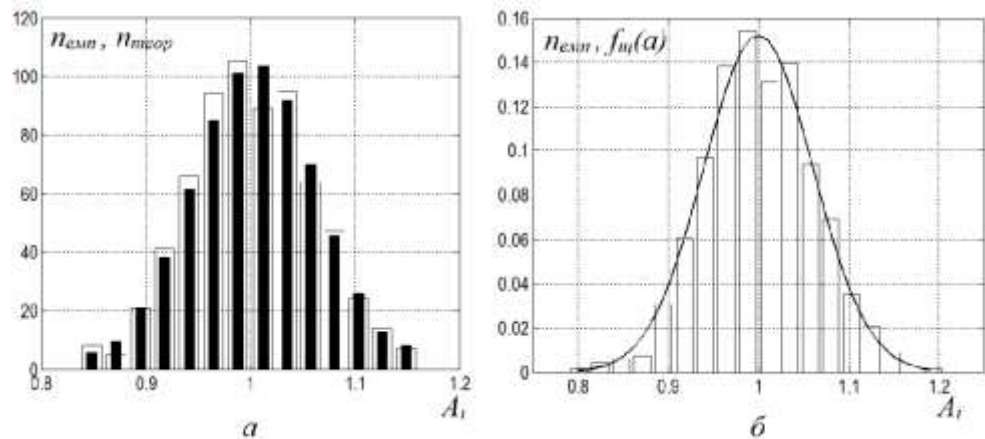


Рис. 4 – Нормована гістограма розподілу значень чіткої керованої величини (для випадку настання різних режимів руйнування масиву вугілля) з емпіричними n_{emp} (прозорі стовпці) та теоретичними $n_{теор}$ (стовпці з заливкою) частотами (a), та результат її апроксимації (b), $f_u(a)$ – функція щільності вірогідності

Ліва частина гістограми на рис. 4, а відносно одиниці за віссю абсцис характеризує розподіл значень чіткої керуючої величини системи нечіткого автоматичного керування режимом руйнування ВО вугільного пласта за умови збільшення швидкості обертання ВО, а права частина – зменшення. При цьому одиниця на рис. 4 за віссю абсцис умовно є істинним значенням чіткої керуючої величини (абсолютно вірне прийняття рішення системою керування щодо зміни швидкості обертання ВО).

Для визначення кількості випадків формування ефективних керуючих впливів системою нечіткого автоматичного керування режимом руйнування вугільного пласта верхнім ВО, за формулою (2) розрахуємо відповідний відносний показник. Для цього методом найменших квадратів проведена апроксимація експериментальної нормованої гістограми розподілу значень чіткої керуючої змінної системи керування (з прозорими стовпцями на рис. 4, б) за

допомогою функції щільності вірогідності, що відповідає нормальному закону розподілу.

$$R_{\delta^3\emptyset} = \frac{\int_{\alpha_{0,5\min}}^{\alpha_{0,5\max}} f_u(\alpha) d\alpha}{\int_{\alpha_{\min}}^{\alpha_{\max}} f_u(\alpha) d\alpha} \cdot 100, \% \quad (2)$$

де a – чітка вихідна змінна системи нечіткого автоматичного керування; $a_{\min}$ та $a_{\max}$ – мінімальне та максимальне значення чіткої вихідної змінної системи нечіткого автоматичного керування; $a_{0,5\min}$ та $a_{0,5\max}$ – усереднені мінімальне та максимальне значення чіткої вихідної змінної системи, при яких ще виконується умова перевищення ступенем істинності правильного висновку правил нечітких продукцій 0,5 та вище; $f_u(a)$ – функція щільності вірогідності, що визначається у ході апроксимації нормованої гістограми розподілу значень чіткої вихідної змінної системи нечіткого автоматичного керування.

Результат апроксимації показаний на рис. 4, б. При цьому отримані наступні параметри функції щільності вірогідності $f_u(a)$: математичне очікування $\bar{a}=1,0003$; середньоквадратичне відхилення $\sigma_a=0,0037$.

З урахуванням оцінювання ефективності формування керуючих впливів системою за відносним відхиленням чіткої вихідної змінної системи від свого істинного значення, для випадку періодичного настання різних режимів руйнування масиву вугілля верхнім ВО за результатами обчислювальних експериментів визначені ліва межа дискретного інтегрування у чисельнику формули (2) $a_{0,5\min} = 0,89$ та права $a_{0,5\max} = 1,11$. Тоді відносний показник кількості ефективних керуючих впливів системи нечіткого автоматичного керування режимом руйнування вугільного пласта ВО розрахується за формулою:

$$R_{\delta^3\emptyset} = \frac{\int_{0,89}^{1,11} \frac{1}{0,0037\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(a+1,003)^2}{2 \cdot 0,0037^2}} da}{\int_{0,75}^{1,25} \frac{1}{0,0037\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(a+1,003)^2}{2 \cdot 0,0037^2}} da} \cdot 100 = 93,1\%.$$

Таким чином, за результатами обчислювального експерименту на основі комплексної імітаційної моделі ОК можна зробити висновок про формування ефективних керуючих впливів (зі ступенем істинності правильного висновку правил нечітких продукцій більше 0,5) системою нечіткого автоматичного керування режимом руйнування вугільного пласта верхнім ВО у 93,1 % усіх випадків.

Висновки. В основу системи нечіткого автоматичного керування режимом руйнування органом очисного комбайна масиву вугілля закладений алгоритм нечіткого виводу Мамдані з урахуванням особливостей ідентифікації режимів роботи комбайна на основі відповідного інформаційного критерію.

За результатами обчислювального експерименту встановлено, що використання запропонованої системи нечіткого автоматичного керування за ра-

хунок ідентифікації режимів руйнування вугільного масиву верхнім виконавчим органом очисного комбайна, у порівнянні з нерегульованим приводом різання, дозволило зменшити питомі енерговитрати на видобуток вугілля на 58 %, а зведений ступінь здрібнення вугілля – на 11,3 %. При цьому відносний показник кількості керуючих впливів зі ступенем істинності правильного висновку правил нечітких продукцій більше 0,5 склав 93,1 %, що підтверджує ефективність запропонованого методу синтезу системи нечіткого автоматичного керування режимом руйнування органом очисного комбайна масиву вугілля.

1. Ткачев В. В., Бубликов А. В. Использование имитационного моделирования для исследования системы автоматического управления добычным комбайном. Днепропетровск: Национальный горный университет. 2015. 182 с.
2. Горбатов П. А., Косарев В. В., Стадник Н. И. Концептуальная характеристика сложных горных машин как мехатронных систем. Наукові праці ДонНТУ. 2006. Вип. 104. С. 53–61.
3. Zhang, Wei & Zhang, Dongsheng & Wang, Hongzhi & Cheng, Jixin. Comprehensive Technical Support for High-Quality Anthracite Production: A Case Study in the Xinqiao Coal Mine, Yongxia Mining Area, China. Minerals. 2015. № 5. С. 919–935. <https://doi.org/10.3390/min5040533>
4. Сысоев Н. И., Кожевников А. С. Алгоритм и техническая реализация мехатронного управления режимными параметрами очистного комбайна. Наук. пр. Донец. нац. техн. ун-ту. Сер. гірн.-електромех. 2010. № 18. С. 249–255.
5. Стадник Н. И., Еремін А. В., Таращ Е. В. Оптимизация работы очистного комбайна с частотно-регулируемым приводом резания. Геотехнічна механіка. 2015. № 122. С. 238–252.
6. Панихидников С. А., Новоселов С. В., Куликович А. В. Оценка подсистемы «человек-машина» (машинист горно-выемочных машин – очистной комбайн) в границах очистного забоя угольной шахты – один из методических элементов оценки системы промышленной безопасности угольной шахты. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 10. С. 227–233. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-10-0-227-233>
7. Bublikov A., Tkachov V. Automation of the control process of the mining machines based on fuzzy logic. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2019. № 3. Р. 112–118. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-3/19>
8. Бубликов А. В., Прядко Н. С., Тернова К. В., Соснін К. В. Ідентифікація режиму руйнування вугільного масиву виконавчим органом очисного комбайна. Системні технології. 2021. № 5 (136). С. 144–158.

Отримано 07.06.2021,
в остаточному варіанті 30.09.2021