

СИСТЕМА НЕЧІТКОГО АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ РЕЖИМОМ РОБОТИ ДВИГУНА ПРИВОДУ РІЗАННЯ ВИДОБУВНОГО КОМБАЙНУ

А. В. Бубліков

Національний технічний університет "Дніпровська політехніка"

Анотація. Наведений підхід щодо створення системи нечіткого автоматичного керування режимами роботи двигунів приводів складних електротехнічних систем на прикладі видобувного комбайна. Запропонований модифікований алгоритм нечіткого виводу на основі результатів ідентифікації режимів роботи двигуна приводу різання видобувного комбайна.

Ключові слова: система нечіткого автоматичного керування, видобувний комбайн.

Вступ

У гірничому виробництві використовується велика кількість обладнання та устаткування, яке в силу специфіки даної галузі створює значні механічні зусилля. До того, слід відзначити тенденцію щодо постійної інтенсифікації гірничих робіт з одночасним зростанням енергооснащеності устаткування. Як наслідок, гірничі підприємства є одними з найбільших споживачів електроенергії в Україні. Наприклад, прогнозне електроспоживання вугільної промисловості в цілому на 2020 рік становить 5,77 млрд. кВт·год [1]. При цьому одне гірниче підприємство може споживати від 200000 до 300000 тис. кВт·год.

Основною ознакою сучасного покоління гірничих машин та комплексів є велика кількість елементів електронно-інформаційної компоненти (вимірювальні, електронно-обчислювальні засоби, засоби швидкісної обробки, перетворення та передачі інформації тощо). Але значний об'єм інформації про зміну у часі різних фізичних величин, що є доступним у режимі реального часу, практично не використовується у процесах діагностики й керування. Відсутність належних алгоритмів обробки та аналізу інформації, а також алгоритмів прийняття рішень на основі цього аналізу є причиною того, що керування гірничими машинами та комплексами на гірничих підприємствах зводиться тільки до стабілізації фізичних величин на заданому рівні, який визначається оператором. Це призводить до того, що режими роботи гірничих машин є неефективними через людський фактор.

Таким чином, створення систем автоматичного керування складними енергоємними об'єктами та комплексами гірничого виробництва, що у повній мірі використовують потенціал високо розвиненої електронно-інформаційної компоненти сучасних гірничих машин, є одним з

найбільш перспективних шляхів підвищення ефективності роботи шахтних підприємств. Зменшення питомих енерговитрат одного підприємства за рахунок впровадження таких систем керування навіть на 5% дозволить зекономити тільки за рахунок економії електроенергії від 10000 до 15000 тис. кВт·год, не враховуючи економічний ефект від збільшення продуктивності роботи об'єктів та комплексів та поліпшення якості виготовленої кінцевої продукції.

Постановка проблеми

Наразі на регуляторах навантаження двигунів приводів різання, що встановлені на видобувних комбайнах, керування здійснюється за відхиленням фільтрованої від високочастотної (від 3 до 50 Гц) та середньо-частотної (від 1 до 3 Гц) складових активної потужності двигуна від свого стійкого значення [2]. При цьому відбувається стабілізація фільтрованої активної потужності двигуна відносно її стійкого значення з відпрацюванням збурення, яким є низькочастотні коливання моменту опору на виконавчому органі, що присутні у спектрі потужності без спотворень (з частотою до 0,01 Гц). З урахуванням значної інерційності видобувного комбайна, тільки низькочастотні коливання моменту опору на виконавчому органі регулятор навантаження здатний компенсувати за рахунок регулювання швидкості подачі комбайна. Щоб миттєва потужність двигуна не перевищувала свого критичного значення, для низькочастотних та середньо-частотних коливань потужності залишається запас за потужністю, що розраховується на основі приблизної інформації про гірничо-геологічні властивості пласта та якість автоматичного керування швидкістю подачі комбайна. Шляхом віднімання запасу за потужністю від її критичного значення отримується стійке значення потужності, що наразі є незмінною величиною для регуляторів навантаження.

© Бубліков А. В., 2019

Наслідком використання незмінного стійкого значення активної потужності двигуна приводу різання, що розраховано за приблизними гірничо-геологічними параметрами пласта, є неякісний алгоритм автоматичного керування навантаженням двигуна, що призводить до автоколивань швидкості подачі та періодичної роботи видобувного комбайна з недовантаженим або перевантаженим двигуном приводу різання [3].

Таким чином, необхідне вирішення проблеми підвищення якості автоматичного керування навантаженням двигунів приводів різання видобувних комбайнів в умовах неможливості точної ідентифікації режимів роботи двигуна через складну динаміку навантаження та відсутності знання про точний коефіцієнт підсилення за каналом керування “швидкість переміщення комбайна – потужність двигуна”.

Аналіз останніх досліджень та публікацій за проблемою

Одне з рішень проблеми підвищення якості автоматичного керування навантаженням двигунів приводів різання видобувних комбайнів описане у роботі [3]. В запропонованому в даній роботі способі автоматичного керування швидкістю подачі вугільних комбайнів за середньоквадратичним відхиленням струму статора відбувається коригування стійкої потужності двигуна, але при цьому не враховується змінність коефіцієнту підсилення за каналом керування “швидкість переміщення комбайна – потужність двигуна”.

В регуляторах навантаження двигуна приводу різання комбайна типу ІППР та УРАН описана проблема вирішується за рахунок введення змінного коефіцієнта підсилення у регулятор та розрахунку його таким чином, щоб загальний коефіцієнт підсилення за каналом керування «швидкість подачі – потужність двигуна приводу різання» залишався незмінним [4]. Але такий підхід потребує знання, на скільки змінився коефіцієнт підсилення об'єкта керування. Це можна було відстежити через зміну потужності за умови незмінної швидкості подачі, але за умови швидкості подачі, що постійно змінюється точне визначення зміни коефіцієнта підсилення об'єкта керування неможливе. Тому процедура налаштування сучасних регуляторів навантаження двигунів приводів різання видобувних комбайнів є досить складною та суб'єктивною – фактично емпіричним шляхом підбирається вдала комбінація параметрів регулятора під конкретні гірничо-геологічні властивості вугільного пласта.

Описаний недолік не вирішено й в роботі [5], де у запропонованому пристрої керування

електроприводом очисного комбайна коригування стійкої потужності двигуна здійснюється не тільки за середньоквадратичним відхиленням струму статора двигуна, а й за значеннями інших параметрів електроприводу, що характеризують режим його роботи (температура, віброприскорення тощо).

У роботі [6] за умови синтезу регулятора навантаження двигуна приводу різання змінність коефіцієнту підсилення за каналом керування “швидкість переміщення комбайна – потужність двигуна” врахована, але за умови дослідження якості роботи регулятора не враховано складну динаміку коефіцієнта підсилення, що тотожна динаміці потужності двигуна.

В усіх описаних способах керування режимами двигуна приводу різання коригування стійкої потужності двигуна приводу різання комбайна здійснюється фактично за прогнозуванням максимального відхилення струму статора від свого середнього значення. Тобто, через складну динаміку навантаження немає можливості точно визначати ступінь недовантаження або перевантаження двигуна. За таких умов доцільним буде використання нечіткого автоматичного керування режимами роботи привода різання очисного комбайна.

Системи нечіткого виводу в Україні успішно використовуються в різних сферах за умови вирішення досить різноманітних завдань. Так, наприклад, у роботі [7] розглядаються питання проектування нечітких баз знань у задачах ідентифікації. А у роботі [8] запропоновано комплексну методику синтезу та оптимізації нечітких регуляторів для систем автоматичного керування температурними режимами реакторів спеціалізованих піролізних комплексів.

У гірничій промисловості системи нечіткого виводу, як правило, використовуються для вирішення завдань планування, організації та керування виробництвом. Прикладом використання нечіткого керування на шахтних підприємствах є спосіб оцінювання рівня механізації на шахті [9]. Але для автоматичного керування нестационарними гірничими машинами на кшталт видобувного комбайну системи “верхнього” рівня, у тому числі системи нечіткого керування, наразі не використовуються. Це пов'язано з підвищеною складністю гірничих машин як об'єктів управління, а також складними умовами їх роботи. Тому створення теоретичної бази для впровадження систем нечіткого автоматичного керування нестационарними гірничими машинами є актуальним питанням.

Мета статті

Метою статті є підвищення якості автоматичного керування навантаженням двигунів приводів різання видобувних комбайнів на основі впровадження нечіткого автоматичного керування режимами роботи двигунів.

Викладення основного матеріалу

Система нечіткого автоматичного керування режимом роботи двигуна приводу різання видобувного комбайну пропонується як система керування “верхнього” рівня, що формує уставку для регулятора швидкості подачі видобувного комбайна (рис.1)

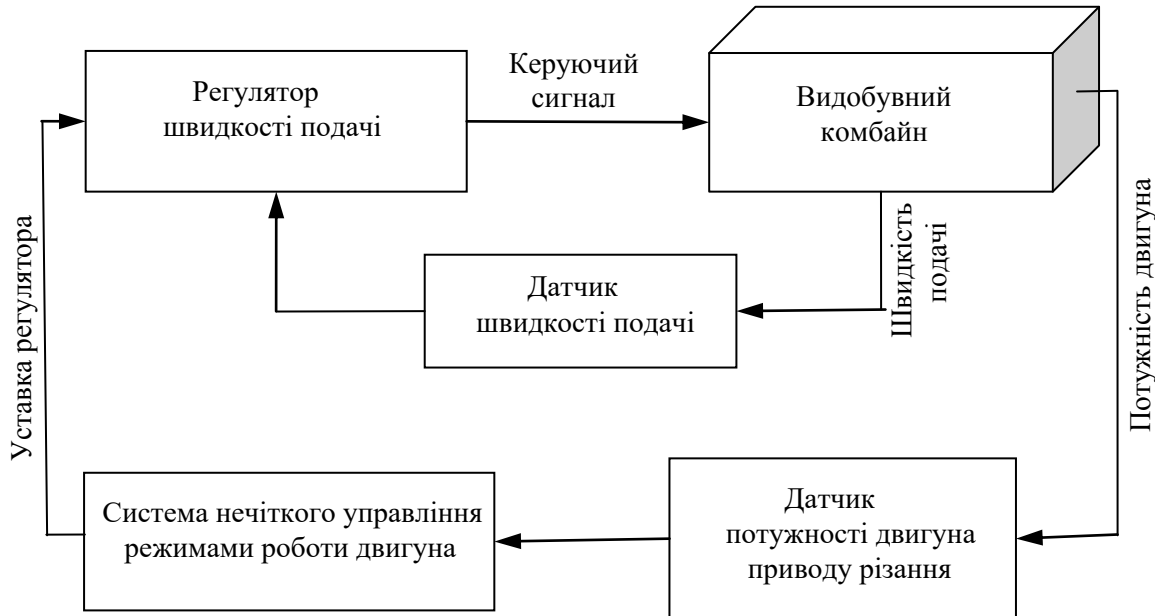


Рис.1. Структурна схема системи нечіткого автоматичного управління режимами роботи двигуна приводу різання видобувного комбайна.

Регулятор швидкості є класичним ПД-регулятором, особливості синтезу якого розглянуті в роботі [10].

Для створення системи нечіткого автоматичного керування режимом роботи двигуна приводу різання видобувного комбайну пропонується модифікований алгоритм нечіткого виводу. В його основі лежить алгоритм нечіткого виводу Мамдані [11], але при цьому в алгоритм введені доповнення, що дозволяють здійснювати нечітке автоматичне керування комбайном за умови динамічної зміни непередбачуваним чином станів комбайна як об'єкта керування, які важко ідентифікувати через складні умови роботи.

Першою відмінністю модифікованого алгоритму нечіткого виводу від класичного є прийняття за чіткі вхідні змінні не сигналів з давачів, а результатів їх статистичної обробки у вигляді чітких інформативних критеріїв, що є проєкціями на математичну площину індикативних подій, які дозволяють ідентифікувати режими роботи гірничої машини. Таким чином, перед фазифікацією обов'язковим підготовчим етапом модифі-

кованого алгоритму нечіткого виводу є попередня обробка сигналів з давачів з метою виділення певних обґрунтованих закономірностей в інформативних сигналах, що є унікальними відображеннями того чи іншого режиму роботи гірничої машини. Як результат, маємо декілька інформативних критеріїв режимів роботи гірничої машини у якості вхідних чітких змінних для системи нечіткого управління машиною.

Друга відмінна особливість модифікованого алгоритму нечіткого виводу стосується бази правил системи. Згідно з загальноприйнятим підходом щодо створення алгоритмів нечіткого виводу, база правил системи створюється на основі правил нечітких продукцій, що є незмінними. З урахуванням добре вивчених умов роботи гірничих машин та усіх особливостей щодо їх управління, а також враховуючи відносно простий алгоритм дій операторів за умови управління машинами, представлення алгоритму управління гірничою машиною у вигляді бази незмінних правил нечітких продукцій є цілком прийнятним.

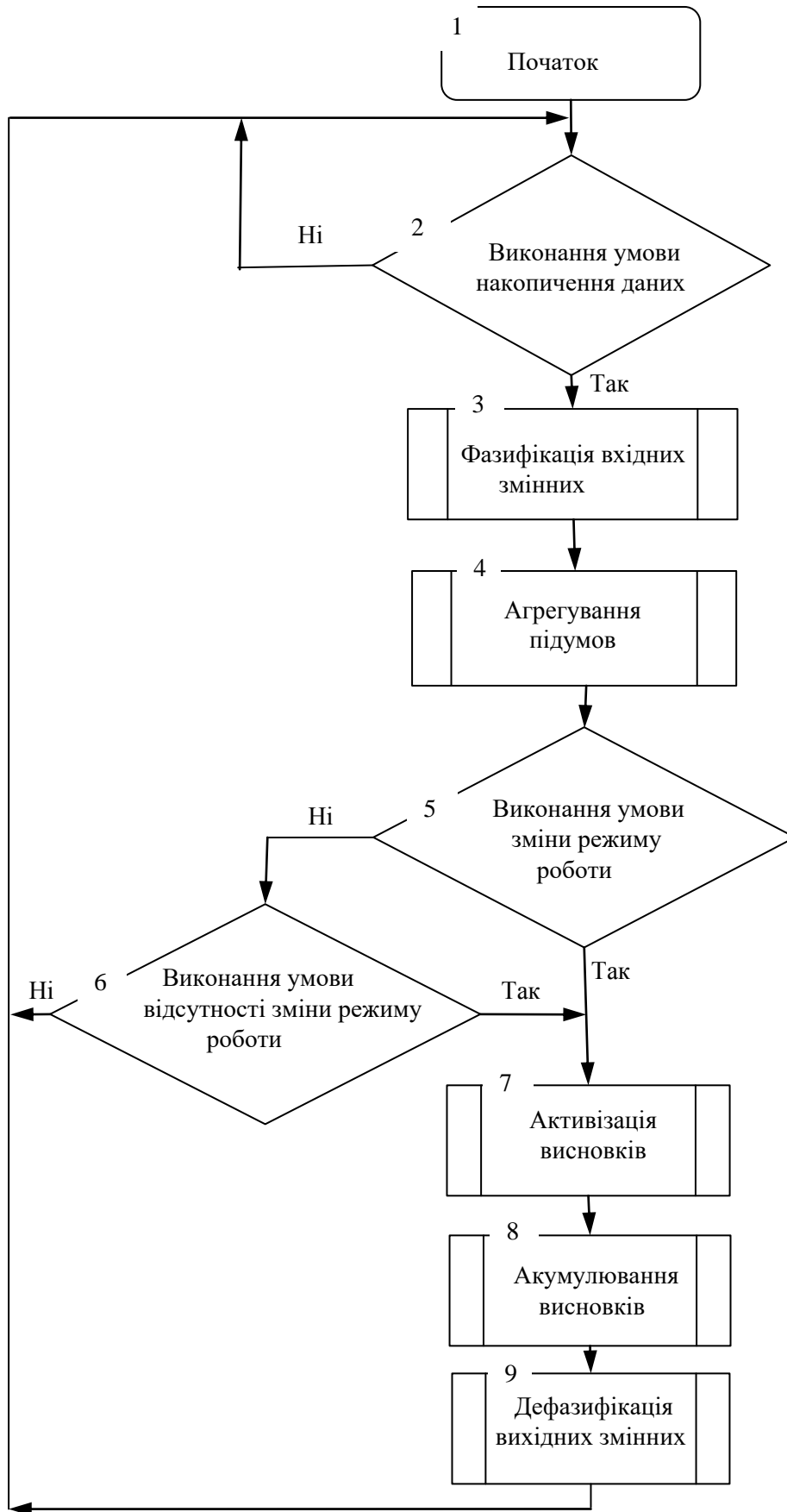


Рис. 2. Схема модифікованого алгоритму нечіткого виводу для системи нечіткого автоматичного керування режимом двигуна приводу різання видобувного комбайна.

Але, у рамках модифікованого алгоритму нечіткого виводу пропонується універсальний підхід щодо створення бази правил нечітких продукцій, коли об'єктом управління є гірнична машина. Згідно з ним, існує перелік характеристик режимів роботи гірничої машини, кожна з яких відповідає унікальній комбінації фізичних процесів як усередині конструктивних вузлів машини, так і за умови взаємодії конструктивних вузлів з зовнішньою середою. Таким чином, робота гірничої машини представляється як послідовна зміна у часі характеристик режимів роботи за певною траєкторією, причому кожна з характеристик спостерігається деякий час. Завданням управління у такому випадку є пошук та забезпечення траєкторії зміни характеристик режимів роботи гірничої машини, за умови якої маємо економічні, технічні та технологічні показники ефективності роботи машини, що близькі до оптимальних.

Пропонований модифікований алгоритм нечіткого виводу за умови нечіткого автоматичного керування режимом двигуна приводу різання комбайна на основі ідентифікації характеристик режимів двигуна передбачає ще одне доповнення у порівнянні з класичним підходом. З урахуванням того, що видобувний комбайн певний час має незмінну характеристику режиму роботи, переходи між режимами роботи відбуваються не неперервно, а тільки у моменти часу, коли виконується або умова зміни характеристик режимів роботи, або умова незмінності характеристики деякий час. З урахуванням цієї особливості, а також з урахуванням того, що для визначення інформативних критеріїв, в залежності від обраного алгоритму аналізу інформаційних сигналів з датчиків, потрібні вибірки певної довжини, модифікований алгоритм нечіткого виводу буде таким, як на рис.2.

Використаємо схему на рис.2 для створення алгоритму нечіткого автоматичного керування режимом двигуна приводу різання.

Для цього спочатку виділимо характеристики режимів роботи комбайна, що властиві процесу керування навантаженням двигуна приводу різання. З урахування задачі керування, запропонуємо такі характеристики режиму двигуна, як "Недовантаження двигуна" ($P1$), "Нормальне навантаження двигуна" ($P2$) та "Перевантаження двигуна" ($P3$).

Індикативною подією для існуючих регуляторів навантаження двигунів приводів різання комбайна, що дозволяє ідентифікувати перелічені вище характеристики режиму двигуна, є відхилення навантаження двигуна від припустимого рівня з урахуванням коливань моменту опору на

виконавчому органі, які неможливо компенсувати [2].

Візьмемо цю індикативну подію за основу для ідентифікації режимів двигуна приводу різання видобувного комбайна. Оскільки закономірність відхилення потужності двигуна приводу різання від свого стійкого значення, що характеризує індикативну подію, проявляється на низьких частотах до 0,01 Гц, у якості інформаційного сигналу приймемо результат ковзного усереднення активної потужності двигуна приводу різання комбайна:

$$P_{cp} = [P_{cp.1}, P_{cp.2}, \dots, P_{cp.n}], \text{ кВт},$$

де P_{cp} – вектор середніх значень активної потужності на різних часових інтервалах; $P_{cp.1}$, $P_{cp.2}$ та $P_{cp.n}$ – середні значення активної потужності, відповідно, на першому, другому та n -му кроці усереднення. При цьому формула для усереднення кожного елемента вектору P_{cp} :

$$P_{cp.n} = \begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^N P(i)}{N} & \text{якщо } t \geq T_{уср}; \\ P_{cp.n} & \text{якщо } t < T_{уср}, \end{cases}$$

де $P(i)$ – значення активної потужності двигуна приводу різання на i -му кроці заміру (крок заміру становить 0,01 с); N – кількість елементів вектору P_{cp} ; t – умовний час на n -му кроці усереднення:

$$t = \begin{cases} 0 & \text{якщо } t \geq T_{уср}; \\ t + 0.01 & \text{якщо } t < T_{уср}, \end{cases}$$

де $T_{уср}$ – час усереднення активної потужності двигуна приводу різання на n -му кроці усереднення, що визначається як максимальне значення між часом усереднення високочастотних випадкових коливань потужності (визначається за теоремою Котельникова) та часом усереднення практично синусоїдальних середньо-частотних коливань потужності (береться рівним періоду коливань для мінімальної частоти обертання виконавчого органу 50 об/хв):

$$T_{уср} = \max\left(\frac{50}{\omega_{ниж}}, T_{с-ч}\right) = \max\left(\frac{50}{18,8}, 0,6\right) = 2,65, \text{ с}, \quad (1)$$

де $\omega_{ниж}$ – нижня границя частотної ділянки, де присутні високочастотні коливання потужності, рад/с; $T_{с-ч}$ – період практично синусоїдальних середньо-частотних коливань активної потужності двигуна приводу різання, с. З формули (1) видно, що час усереднення $T_{уср}$ фактично визначає час, необхідний для усереднення високочастотних коливань потужності.

З урахуванням прийнятої за основу індикативної події, за якою проводиться ідентифікація режимів двигуна приводу різання комбайна, та запропонованого інформаційного сигналу формула для розрахунку чіткого інформативного критерію буде наступною:

$$INF_CR = \frac{P_{cp,n} - P_{cm}}{P_{cm}} \cdot 100, \% \quad (2)$$

де $P_{cp,n}$ – останній елемент вектору середніх значень активної потужності на різних часових інтервалах P_{cp} , кВт; P_{cm} – стійке значення активної потужності двигуна приводу різання видобувного комбайна, кВт.

За час усереднення активної потужності двигуна 2,65 с можна сформувати вибірку з миттєвих відхилень активної потужності від свого середнього значення ΔP достатньої довжини (265 елементів), щоб визначити деталізовану за кількістю частот (більше 12) гістограму розподілу значень відхилень активної потужності:

$$\Delta P = [P_1 - P_{cp,n}, P_2 - P_{cp,n}, \dots, P_m - P_{cp,n}], \text{ кВт},$$

де $P_{cp,n}$ – середнє значення активної потужності на n -му кроці усереднення; P_1, P_2 та P_m – миттєві значення активної потужності на n -му кроці усереднення ($m=265$).

Тож, пропонується визначати стійке значення активної потужності двигуна приводу різання за результатом статистичної оцінки характеру розподілу миттєвих відхилень активної потужності від свого середнього значення на останньому кроці усереднення:

$$P_{cm} = P_{кр} - \Delta P_{0,1}, \text{ кВт},$$

де $\Delta P_{0,1}$ – аргумент функції f_N , за умови якого значення функції f_N , що апроксимує нормовану гістограму розподілу значень відхилень потужності від свого середнього значення, стає менше за 0,1

Далі обґрунтуємо функції належності для термів вхідної величини системи нечіткого автоматичного керування режимами двигуна приводу різання видобувного комбайна за умови визначення чіткого інформативного критерію за формулою (2).

У нашому випадку пропонується використовувати три характеристики режиму роботи двигуна приводу різання (недовантаження, норма, перевантаження). Це пов'язане з тим, що керування швидкістю подачі комбайна, згідно з алгоритмом нечіткого виводу на рис.1, відбувається дискретно у часі з прогнозуванням величини зміни швидкості подачі, яке дозволяє усунути будь-яке відхилення фактичної середньої потужності від свого стійкого значення. У такому разі використання у назвах характеристик режиму двигуна приводу різання слів, що характеризують міру навантаження ("незначне" та "значне"), втрачає сенс. З урахуванням цього, та з оглядом на межі діапазонів зміни відхилення фактичної середньої потужності від свого стійкого значення, за якими проводилася класифікація режимів двигуна привода різання у регуляторах навантаження попереднього покоління [2], для фазифікації чіткого інформативного критерію запропоновані функції належності для термів вхідної величини системи нечіткого автоматичного керування режимами роботи двигуна приводу різання видобувного комбайна, що показані на рис.3.

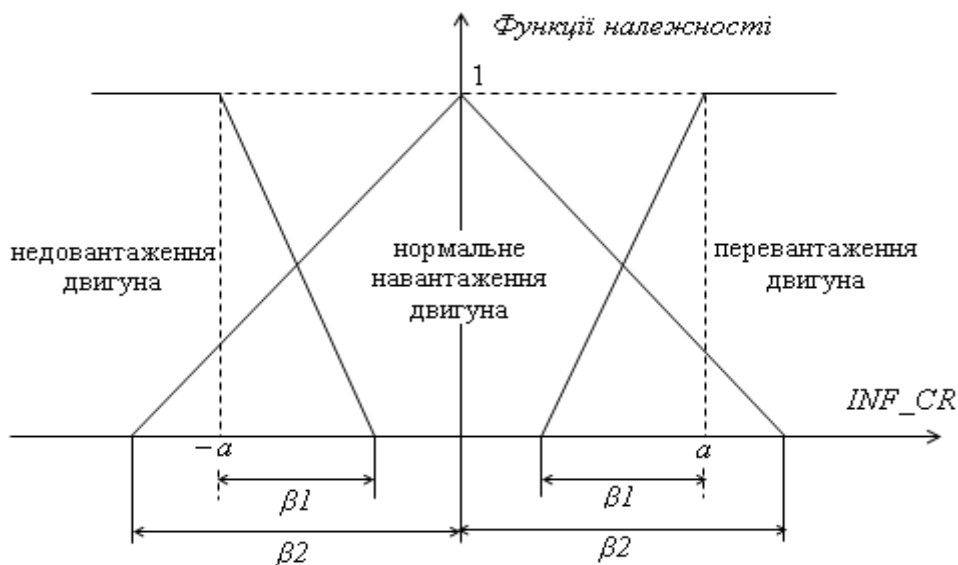


Рис. 3. Графіки функцій належності для термів вхідної величини системи нечіткого автоматичного керування режимами роботи двигуна приводу різання видобувного комбайна

На основі аналізу алгоритму роботи існуючих регуляторів навантаження двигунів приводів різання видобувних комбайнів [2-5], модальне значення функцій належності на рис.3 прийнято рівним $a = 10\%$, перший коефіцієнт нечіткості $\beta_1 = 5\%$, а другий коефіцієнт нечіткості $\beta_2 = 10\%$.

Далі обґрунтуємо алгоритм керування навантаженням двигуна приводу різання комбайна за умови створення бази правил нечітких продукцій для системи нечіткого автоматичного керування.

Модифікований алгоритм нечіткого виводу, що застосовується для створення системи нечіткого автоматичного керування режимами двигуна приводу різання комбайна, передбачає дискретну зміну у часі керуючого сигналу. Незмінність швидкості подачі комбайна певний час дозволяє відстежувати зміну у часі опірності вугілля різанню, та на основі цієї інформації коригувати кут нахилу робочої статичної характеристики видобувного комбайна. Це, у свою чергу, дає можливість при будь-якому відхиленні фактичної середньої потужності двигуна приводу різання від свого стійкого значення точно визначити величину зміни швидкості подачі, за умови якої це відхилення буде практично усунуте. Завдяки цьому, з урахуванням повільної зміни у часі опірності вугілля різанню, забезпечується незмінність швидкості подачі протягом наступного певного часового інтервалу, доки відбувається збір даних.

Запропонований підхід щодо керування навантаженням двигуна приводу різання через дискретну зміну у часі швидкості подачі комбайна з періодичним коригуванням куту нахилу статичної характеристики комбайна фактично визначає алгоритм керування за умови створення бази правил нечітких продукцій для системи нечіткого автоматичного керування. Цей алгоритм можна представити наступними пунктами:

- швидкість подачі збільшується, якщо за результатами двох посліпль проведених процедур ідентифікації режиму двигуна приводу різання в обох випадках зафіксоване явно виражене навантаження двигуна;

- швидкість подачі зменшується, якщо за результатами двох посліпль проведених процедур ідентифікації режиму двигуна приводу різання в обох випадках зафіксоване явно виражене перевантаження двигуна;

- в усіх інших випадках рішення щодо зміни швидкості подачі не приймається.

Як видно з опису запропонованого алгоритму керування навантаженням двигуна приводу різання, до нього введена умова зміни швидкості подачі комбайна, тільки якщо навантаження

або перевантаження двигуна фіксується два рази посліпль. Крім того, ці режими двигуна повинні бути явно вираженими, що пропонується відображати через введення додаткової умови перевищення ступенів істинності відповідних умов бази правил нечітких продукцій рівня 0,9. Обидві умови, що введені в алгоритм прийняття рішення, направлені на зменшення вірогідності неточної ідентифікації режиму двигуна приводу різання, та не погіршують якість стабілізації потужності двигуна, оскільки опірність вугілля різанню вздовж пласта змінюється значно повільніше у порівнянні з часом, необхідним для ідентифікації режиму двигуна.

На основі запропонованого алгоритму прийняття рішень щодо зміни швидкості подачі комбайна сформуємо перелік правил нечітких продукцій, що складуть основу бази правил системи нечіткого автоматичного керування режимом двигуна приводу різання. Для цього у контексті нечіткої логіки введемо наступні лінгвістичні нечіткі вислови стосовно підумов правил нечітких продукцій:

- наразі перебуваємо у режимі недовантаження двигуна ($P1$);

- наразі перебуваємо у режимі нормального навантаження двигуна ($P2$);

- наразі перебуваємо у режимі перевантаження двигуна ($P3$);

- до цього перебували у режимі недовантаження двигуна ($P4$);

- до цього перебували у режимі нормального навантаження двигуна ($P5$);

- до цього перебували у режимі перевантаження двигуна ($P6$).

Також у контексті нечіткої логіки введемо наступні лінгвістичні нечіткі вислови стосовно висновків правил нечітких продукцій:

- відбувається збільшення швидкості подачі видобувного комбайна ($Z1$);

- відбувається зменшення швидкості подачі видобувного комбайна ($Z2$).

Перелік правил нечітких продукцій для системи нечіткого автоматичного керування режимом двигуна приводу різання комбайна:

- ЯКЩО “наразі перебуваємо у режимі нормального навантаження двигуна” ТА “до цього перебували у режимі нормального навантаження двигуна” ТО “прийняття рішення системою відсутнє”;

- ЯКЩО “до цього перебували у режимі нормального навантаження двигуна” ТА “наразі перебуваємо у режимі недовантаження двигуна” ТО “прийняття рішення системою відсутнє”;

- ЯКЩО “до цього перебували у режимі нормального навантаження двигуна” ТА “наразі

перебуваємо у режимі перевантаження двигуна” ТО “прийняття рішення системою відсутнє”;

- ЯКЩО “наразі перебуваємо у режимі недовантаження двигуна” ТА “до цього перебували у режимі недовантаження двигуна” ТО “відбувається збільшення швидкості подачі видобувного комбайна”;

- ЯКЩО “наразі перебуваємо у режимі нормального навантаження двигуна” ТА “до цього перебували у режимі недовантаження двигуна” ТО “прийняття рішення системою відсутнє”;

- ЯКЩО “наразі перебуваємо у режимі перевантаження двигуна” ТА “до цього перебували у режимі недовантаження двигуна” ТО “прийняття рішення системою відсутнє”;

- ЯКЩО “до цього перебували у режимі перевантаження двигуна” ТА “наразі перебуваємо у режимі перевантаження двигуна” ТО “відбувається зменшення швидкості подачі видобувного комбайна”;

- ЯКЩО “наразі перебуваємо у режимі недовантаження двигуна” ТА “до цього перебували у режимі перевантаження двигуна” ТО “прийняття рішення системою відсутнє”;

- ЯКЩО “наразі перебуваємо у режимі нормального навантаження двигуна” ТА “до цього перебували у режимі перевантаження двигуна” ТО “прийняття рішення системою відсутнє”.

При створенні алгоритму нечіткого виводу для системи нечіткого автоматичного керування режимом двигуна приводу різання комбайна взятий за основу алгоритм, схема якого наведена на рис.2.

За цим алгоритмом спочатку треба обґрунтувати умову накопичення даних (блок 2 на рис.2). За умови створення системи нечіткого автоматичного керування режимом двигуна приводу різання комбайна умовою накопичення даних є проходження часу, що необхідний для усереднення активної потужності двигуна приводу

$$b'_4(k) = b'_1(k-1); b'_5(k) = b'_2(k-1); b'_6(k) = b'_3(k-1).$$

У блоці 4 на рис.2 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 двигуна приводу різання ком-

$$\begin{aligned} b''_1 &= \min(b'_5, b'_2); b''_2 = \min(b'_5, b'_1); b''_3 = \min(b'_5, b'_3); \\ b''_4 &= \min(b'_4, b'_1); b''_5 = \min(b'_4, b'_2); b''_6 = \min(b'_4, b'_3); \\ b''_7 &= \min(b'_6, b'_3); b''_8 = \min(b'_6, b'_1); b''_9 = \min(b'_6, b'_2). \end{aligned}$$

Далі, згідно з алгоритмом на рис.2 сформулюємо умови зміни та відсутності зміни режиму роботи для системи нечіткого автоматичного ке-

рування хоча б на одному часовому інтервалі (2,65 с). Але усереднення активної потужності двигуна приводу різання потрібно починати після закінчення перехідного процесу за умови зміни швидкості подачі комбайна. З урахуванням того, що перехід з одного рівня швидкості подачі до іншого відбувається у часі практично за лінійним законом з прискоренням 1 м·с/хв, за умови введення обмеження щодо максимальної величини зміни швидкості подачі 3 м/хв отримуємо час перехідного процесу 3 с. Тож, умовою накопичення даних є проходження часової затримки 5,65 с.

Фазифікація вхідної змінної системи нечіткого автоматичного керування режимом двигуна приводу різання комбайна (блок 3 на рис.2), якою є чіткий інформативний критерій, що визначається за формулою (2), проводиться на основі запропонованих вище функцій належності для термів вхідної величини (рис.3).

Вхідними даними для агрегування підумов бази правил нечітких продукцій, що запропоновані вище, (блок 4 схеми алгоритму на рис.2) є результати фазифікації чіткого інформативного критерію у вигляді функцій належності μ_{P1} , μ_{P2} та μ_{P3} за інформативним критерієм. За умови агрегування підумов бази правил системи нечіткого автоматичного керування режимом двигуна приводу різання комбайна з урахуванням єдиного інформативного критерію ступені істинності підумов b'_i будуть дорівнювати відповідним функціям належності μ_i за інформативним критерієм:

$$b'_1 = \mu_{P1}; b'_2 = \mu_{P2}; b'_3 = \mu_{P3}.$$

Ступень істинності підумов «до цього перебували у режимі ...» приймаємо рівним ступеню істинності підумов «наразі перебуваємо у режимі ...» на попередньому кроці нечіткого виводу:

байна. З урахуванням структури нечітких висловлювань в умовах бази правил, що наведені вище, у формулах для визначення ступенів істинності b' умов для кожного правила використаємо операцію *min*-кон'юнкції (нумерація ступенів істинності умов b'' співпадає з номером правила):

рування режимом двигуна приводу різання комбайна.

За допомогою умови зміни режиму роботи видобувного комбайна (блок 5 на рис.2) реалізується вище описана особливість запропонованого алгоритму керування навантаженням двигуна приводу різання, що полягає у прийнятті рішення системою, тільки якщо за результатами двох поспіль проведених процедур ідентифікації режиму двигуна в обох випадках зафіксоване явно виражене недовантаження або перевантаження двигуна. Фактично у даному випадку за допомогою умови зміни режиму роботи видобувного комбайна виконуються висновки усіх вище наведених правил нечітких продукцій для системи нечіткого автоматичного керування режимом двигуна приводу різання комбайна, крім четвертого та сьомого. Відповідно, формула для умови зміни режиму роботи комбайна (блок 5 на рис.2) буде такою:

$$(b_4'' \geq 0,9 \text{ АБО } b_7'' \geq 0,9) \text{ ТА } t \geq 10,$$

де t – умовний час, що відображає кількість секунд, що пройшло з моменту перевищення ступенів істинності умов b_4'' або b_7'' рівня 0,9. Якщо протягом часової затримки 10 с (час на проведення двох процедур ідентифікації режиму двигуна) ступені істинності умов b_4'' або b_7'' опускаються нижче рівня 0,9, умовний час t скидається в нуль.

Правила нечітких продукцій для системи нечіткого автоматичного керування режимом двигуна приводу різання комбайна сформульовані таким чином, що окремий терм, що асоціюється з відсутністю зміни режиму роботи, відсутній. Тому у цьому випадку умова відсутності зміни режиму роботи (блок 6 на рис.2) відсутня.

У рамках процедури активізації підвисновків (блок 7 на рис.2) визначаються ступені істинності c та функції належності μ_c для висновків четвертого та сьомого правил нечітких продукцій бази правил системи нечіткого автоматичного керування режимом двигуна приводу різання комбайна. Оскільки маємо тільки два правила з різними висновками, ступені істинності висновків просто приймаємо рівними ступеням істинності умов відповідних правил з прийняттям усіх вагових коефіцієнтів рівними одиниці:

$$\begin{aligned} c_1 &= b_4''; \\ c_2 &= b_7'', \end{aligned}$$

де c_1 – ступінь істинності висновку «відбувається збільшення швидкості подачі видобувного комбайна»; c_2 – ступінь істинності висновку «відбувається зменшення швидкості подачі видобувного комбайна».

Функції належності μ_c для висновків четвертого та сьомого правил нечітких продукцій бази правил системи нечіткого автоматичного керування режимом двигуна приводу різання комбайна визначаються за допомогою методу *min*-активізації:

$$\begin{aligned} \mu_{c_1}(y) &= \min[c_1, \mu_{y_1}(y)]; \\ \mu_{c_2}(y) &= \min[c_2, \mu_{y_2}(y)], \end{aligned}$$

де y – вихідна чітка змінна системи (у нашому випадку – величина зміни швидкості подачі комбайна ΔV_n); μ_{y_1} – функція належності терму «Збільшення швидкості подачі комбайна» вихідній лінгвістичній змінній системи «Зміна швидкості подачі комбайна»; μ_{y_2} – функція належності терму «Зменшення швидкості подачі комбайна» вихідній лінгвістичній змінній системи «Зміна швидкості подачі комбайна».

За умови дефазифікації вихідної лінгвістичної змінної системи нечіткого автоматичного керування режимом двигуна приводу різання комбайна, з урахуванням характеристик зміни швидкості подачі, що закладені у лінгвістичні формулювання висновків правил нечітких продукцій, обране симетричне розташування графіків функцій належності термів вихідній лінгвістичній змінній відносно осі ординат для випадків зменшення та збільшення швидкості подачі (рис.4).

Оскільки висновки четвертого та сьомого правил нечітких продукцій прив'язані до однієї чіткої вихідної змінної системи (швидкість подачі), за умови їх акумулювання, в залежності від ступенів істинності висновків, вони повинні мати явно виражену різну «вагу» відносно центру ваги, що співпадає з початком координат. З оглядом на це, обрана трикутна форма графіків функцій належності для термів вихідної лінгвістичної змінної системи з однаковими лівими й правими коефіцієнтами нечіткості β (рис.4).

Згідно з рис.4, далі проведемо обґрунтування модального значення функцій належності термів вихідної лінгвістичної змінної системи a , а також коефіцієнта нечіткості β .

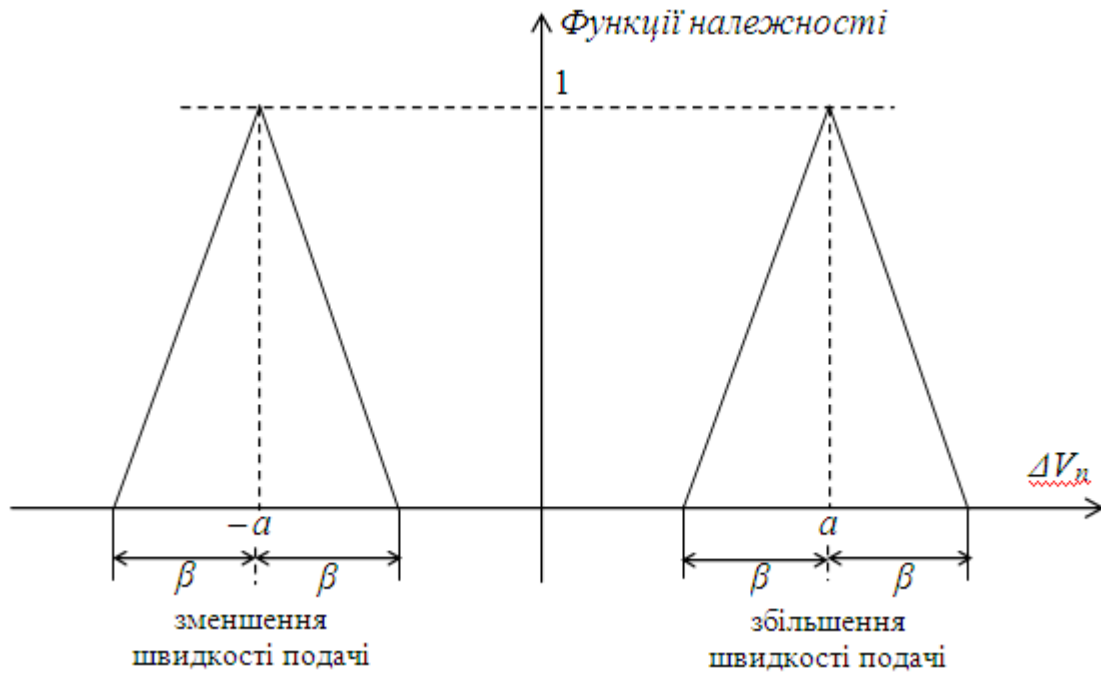


Рис. 4. Графіки функцій належності для термів вихідної величини системи нечіткого автоматичного керування режимами двигуна приводу різання видобувного комбайна

Запропонований підхід щодо дискретного керування у часі швидкістю подачі, на основі якого сформовані правила нечітких продукцій для системи нечіткого автоматичного керування режимом двигуна приводу різання комбайна, передбачає визначення на кожному кроці прийняття рішення системою величини зміни швидкості подачі за робочою статичною характеристикою комбайна з періодичним коригуванням куту її нахилу. Розглянемо цей підхід більш детально на

основі робочої статичної характеристики комбайна на рис.5.

Припустимо, напочатку ми деякий короткий час за умови незмінної швидкості подачі та опірності вугілля різанню A_1 знаходимося у точці 1 на статичній характеристиці комбайна (рис.5). При цьому кут нахилу α статичної характеристики практично не змінюється через повільну зміну у часі опірності вугілля різанню, але цього часу достатньо для визначення середньої активної потужності двигуна приводу різання $P_{cp.1}$.

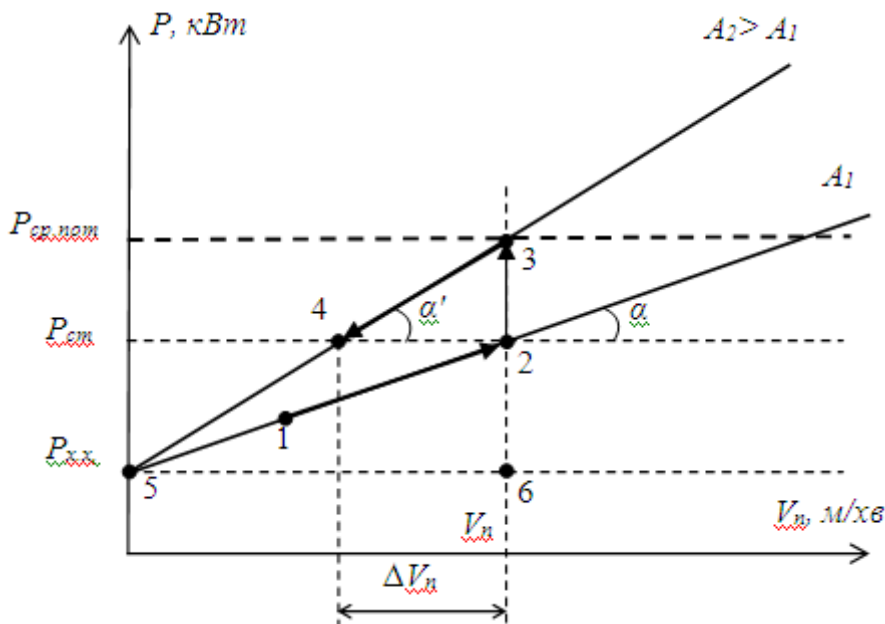


Рис. 5. Визначення модального значення функцій належності термів вихідній лінгвістичній змінній системи за робочою статичною характеристикою видобувного комбайна

Потім відбувається перехід до нової швидкості подачі комбайна з точки 1 на статичній характеристиці комбайна до точки 2 (рис.5). За результатом цього переходу після визначення середньої потужності $P_{cp,2}$ для нової швидкості подачі обчислюється поточний кут нахилу статичної робочої характеристики:

$$\tan(\alpha) = \frac{P_{cp,2} - P_{cp,1}}{\Delta V_{n,1}}, \quad (3)$$

де $\Delta V_{n,1}$ – перша зміна швидкості подачі, м/хв.

Після переходу до точки 2 на статичній характеристиці комбайна фактична середня потужність двигуна приводу різання комбайна стає практично рівною стійкому значенню потужності P_{cm} . Згідно з запропонованим алгоритмом, це є умовою незмінності швидкості подачі певний час, доки опірність вугілля різанню суттєво не збільшиться до значення A_2 , що призведе до появи відносного відхилення середньої потужності від свого стійкого значення більш ніж на 10% протягом 10 с (це є умовою початку процедури прийняття рішення системою). На цей момент ми вже знаходимося у точці 3 на статичній характеристиці комбайна (рис.5), та через зміну кута нахилу характеристики (α') не можемо використати формулу (3) для визначення величини зміни швидкості подачі ΔV_n на основі інформації про відхилення потужності ($P_{cp,nom} - P_{cm}$), щоб здійснити точний перехід з точки 3 до точки 4.

У зв'язку з цим пропонується на основі інформації про зміну активної середньої потужності двигуна приводу різання за умови переходу з точки 2 до точки 3 на статичній характеристиці комбайна провести коригування куту нахилу статичної характеристики $\tan(\alpha)$. Для цього на рис.5 розглянемо трикутники 5-6-2 та 5-6-3. Визначимо відношення тангенсів кутів α та α' цих трикутників через відношення їх катетів:

$$\frac{\tan(\alpha')}{\tan(\alpha)} = \frac{(P_{cp,nom} - P_{x,x}) \cdot V_n}{V_n \cdot (P_{cm} - P_{x,x})} = \frac{(P_{cp,nom} - P_{x,x})}{(P_{cm} - P_{x,x})}$$

де $P_{x,x}$ – потужність холостого ходу двигуна приводу різання комбайна, кВт; V_n – швидкість подачі комбайна за умови перебування у точках 2 та 3 на рис.4, м/хв.

Таким чином, тангенс нового кута нахилу робочої статичної характеристики комбайна визначається за формулою:

$$\tan(\alpha') = \frac{(P_{cp,nom} - P_{x,x})}{(P_{cm} - P_{x,x})} \cdot \tan(\alpha)$$

Щоб зменшити похибку визначення нового кута нахилу робочої статичної характеристики

комбайна через появу на часовому інтервалі усереднення потужності в момент прийняття рішення системою разових суттєвих збурень (перерізання мінерального включення тощо), пропонується кожний раз одразу після переходу на нову швидкість подачі починати формування вектору середніх значень потужності на різних часових інтервалах тривалістю 2,65 с:

$$(3) \quad P_{cp} = [P_{cp,1}, P_{cp,2}, \dots, P_{cp,m}],$$

де m – номер часового інтервалу усереднення, на якому виконується умова зміни режиму роботи комбайна (відбувається прийняття рішення системою про зміну швидкості подачі).

Далі пропонується в момент виконання умови зміни режиму роботи комбайна провести апроксимацію за елементами вектору середніх значень потужності P_{cp} ступеневим поліномом високого порядку методом найменших квадратів, в результаті якої отримуємо функцію $F_P(i)$, де i – поточний номер часового інтервалу усереднення потужності. Якщо зміну потужності між моментом останньої зміни швидкості подачі та моментом виконання умови зміни режиму роботи комбайна визначати за функцією, що апроксимує зміну у часі фактичної середньої потужності двигуна приводу різання, то разові випадкові відхилення середньої потужності, що не пов'язані з низькочастотною зміною у часі опірності вугілля різанню, у меншій мірі будуть впливати на точність визначення тангенсу нового кута нахилу робочої статичної характеристики комбайна.

Таким чином, скоригована формула для визначення тангенсу нового кута нахилу робочої статичної характеристики комбайна буде такою:

$$\tan(\alpha') = \frac{F_P(m) - P_{x,x}}{F_P(3) - P_{x,x}} \cdot \tan(\alpha),$$

де $F_P(3)$ та $F_P(m)$ – значення функції, що апроксимує зміну у часі фактичної середньої потужності двигуна приводу різання, відповідно, на третьому та m -му часових інтервалах усереднення потужності, кВт. На третьому часовому інтервалі усереднення потужності маємо середню потужність одразу після зміни швидкості подачі з урахуванням часової затримки для закінчення перехідного процесу. На m -му часовому інтервалі усереднення потужності маємо середню потужність на момент виконання умови зміни режиму роботи комбайна (відбувається прийняття рішення системою про зміну швидкості подачі).

За умови ідентифікації явно виражених недовантаження або перевантаження двигуна приводу різання, коли ступені істинності умов та висновків відповідних правил нечітких продук-

цій більше 0,9, величина зміни швидкості подачі комбайна після дефазифікації вихідної змінної системи повинна відповідати величині зміни швидкості подачі ΔV_n (рис.5), що визначена за статичною робочою характеристикою комбайна після уточнення її куту нахилу. У такому разі здійсниться перехід з точки 3 до точки 4 на рис.5, в результаті чого буде усунуто відхилення фактичної середньої потужності двигуна приводу різання від свого стійкого значення. З іншої сторони, коли ступені істинності висновків відповідних правил нечітких продукцій більше 0,9, центр площ трикутних графіків функцій належності для термів вихідної величини системи (рис.4) буде практично співпадати з їх модульними значеннями. Отже, можна зробити висновок, що модальне значення функцій належності для термів вихідної величини системи нечіткого автоматичного керування режимом двигуна приводу різання комбайна повинно дорівнювати величині зміни швидкості подачі, що визначена за статичною робочою характеристикою комбайна після уточнення її куту нахилу:

$$a = \Delta V_n = \frac{\Delta P}{\tan(\alpha')} = \frac{|P_{cp}(m) - P_{cm}|}{\tan(\alpha')}$$

де $P_{cp}(m)$ – фактична середня потужність двигуна приводу різання комбайна на момент

виконання умови зміни режиму роботи комбайна, кВт.

Коефіцієнт нечіткості β функцій належності для термів вихідної величини системи приймаємо рівним половині модального значення функцій:

$$\beta = 0,5 \cdot a.$$

Далі проводиться процедура акумулювання висновків четвертого та сьомого правил нечітких продукцій з урахуванням того, що обидва висновки є характеристиками однієї вихідної лінгвістичної змінної системи – «Зміна швидкості подачі комбайна» (блок 8 на рис.2). З урахуванням графіків функцій належності термів вихідній лінгвістичній змінній системи (рис.4), акумулювання висновків четвертого та сьомого правил нечітких продукцій здійснюємо, використовуючи метод *max-об'єднання*. У підсумку отримуємо функцію належності μ_y для лінгвістичної вихідної змінної системи «Зміна швидкості подачі комбайна»:

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

Процедура дефазифікації лінгвістичної вихідної змінної системи «Зміна швидкості подачі комбайна» виконується з використанням методу центру площ для дискретних множин (блок 9 на рис.2).

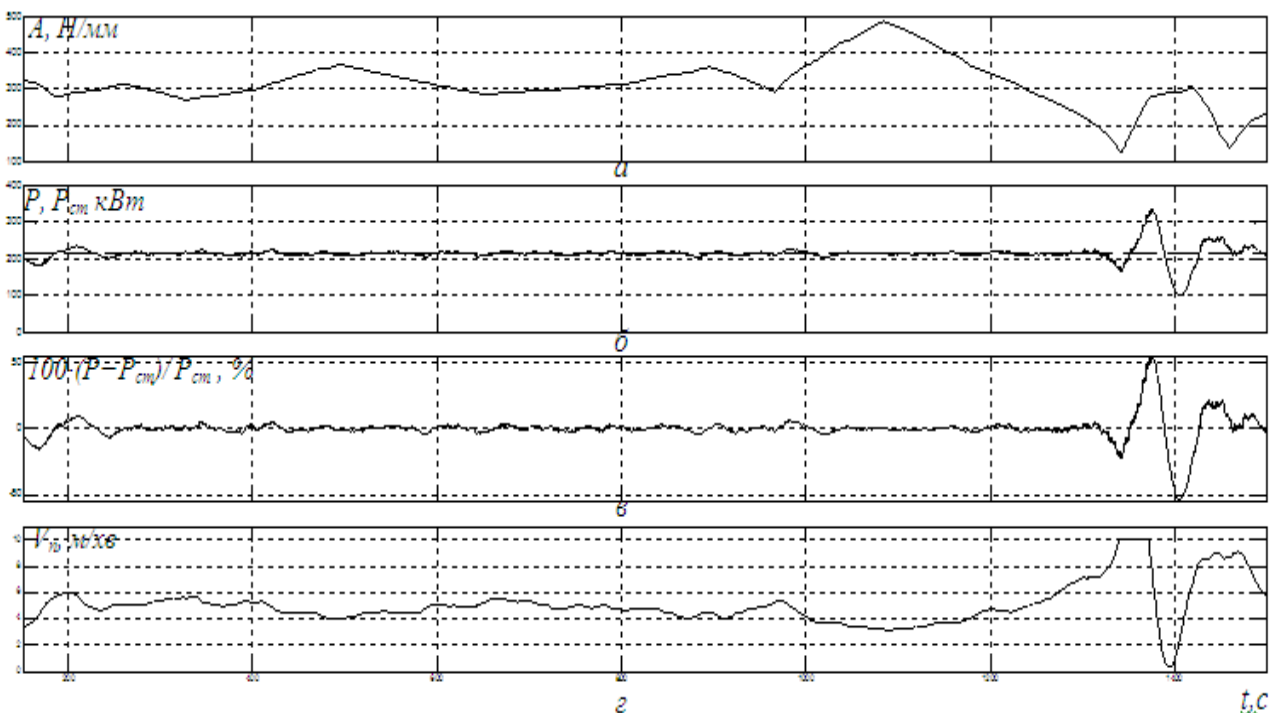


Рис. 6. Зміна у часі: a – опірності вугілля різанню; b – фактичної середньої потужності двигуна приводу різання видобувного комбайна (суцільна лінія) та її стійкого значення (пунктирна лінія); v – відносного відхилення середньої потужності двигуна приводу різання від свого стійкого значення; z – швидкості подачі комбайна за умови використання існуючого регулятора навантаження

У підсумку виконання алгоритму на рис.2 по відношенню до системи нечіткого автоматичного керування режимом двигуна приводу різання комбайна маємо величину зміни уставки ΔV_n для регулятора швидкості подачі як реакцію згідно бази правил нечітких продукцій системи на результат ідентифікації характеристик режиму двигуна з метою забезпечення роботи комбайна з максимальним використанням потужності двигунів приводів різання без їх перевантаження.

Розглянемо результат моделювання роботи сучасних регуляторів навантаження двигуна приводу різання видобувного комбайна, в яких автоматичне керування навантаженням двигуна здійснюється за відхиленням фактичної середньої потужності від свого стійкого значення без врахування зміни коефіцієнту підсилення у каналі керування [2-5]. При цьому моделювання проводилося за допомогою комплексної імітаційної моделі видобувного комбайна [12].

З рис.6 видно, що за умови несуттєвої зміни опірності вугілля різанню навколо свого середнього значення 300 Н/мм (рис.6,а) регулятор навантаження двигуна приводу різання забезпечує зміну відносного відхилення фактичної середньої потужності від свого стійкого значення у

діапазоні $\pm 15\%$ (рис.6,в), що за умови припустимих короткочасних відхилень на $\pm 25\%$ [5] вважається прийнятним. Але, коли відбувається різка зміна опірності вугілля різанню на значну величину (після 1100 с моделювання), через відсутність коригування коефіцієнту підсилення у каналі керування має місце занадто швидке збільшення швидкості подачі комбайна (рис.6,г), через що середня потужність двигуна сягає 330 кВт (рис.6,б), що відповідає відносному відхиленню більше 50% (рис.6,в). Таким чином, за певних умов, коли відбувається швидка зміна у часі опірності вугілля різанню вздовж лави на значну величину, регулятор навантаження двигуна приводу різання, що наразі застосовується на видобувних комбайнах, не забезпечує якісне керування. Через це на сучасних регуляторах навантаження двигунів приводів різання комбайнів застосовується так зване відсікання уставки струму статора двигуна, коли уставка скидається в нуль за умови значного перевищення фактичної потужності двигуна свого стійкого значення [4]. Це свого роду захист двигуна від перекидання, що призводить до повної зупинки комбайна та його простою певний час, тобто, до втрати продуктивності.

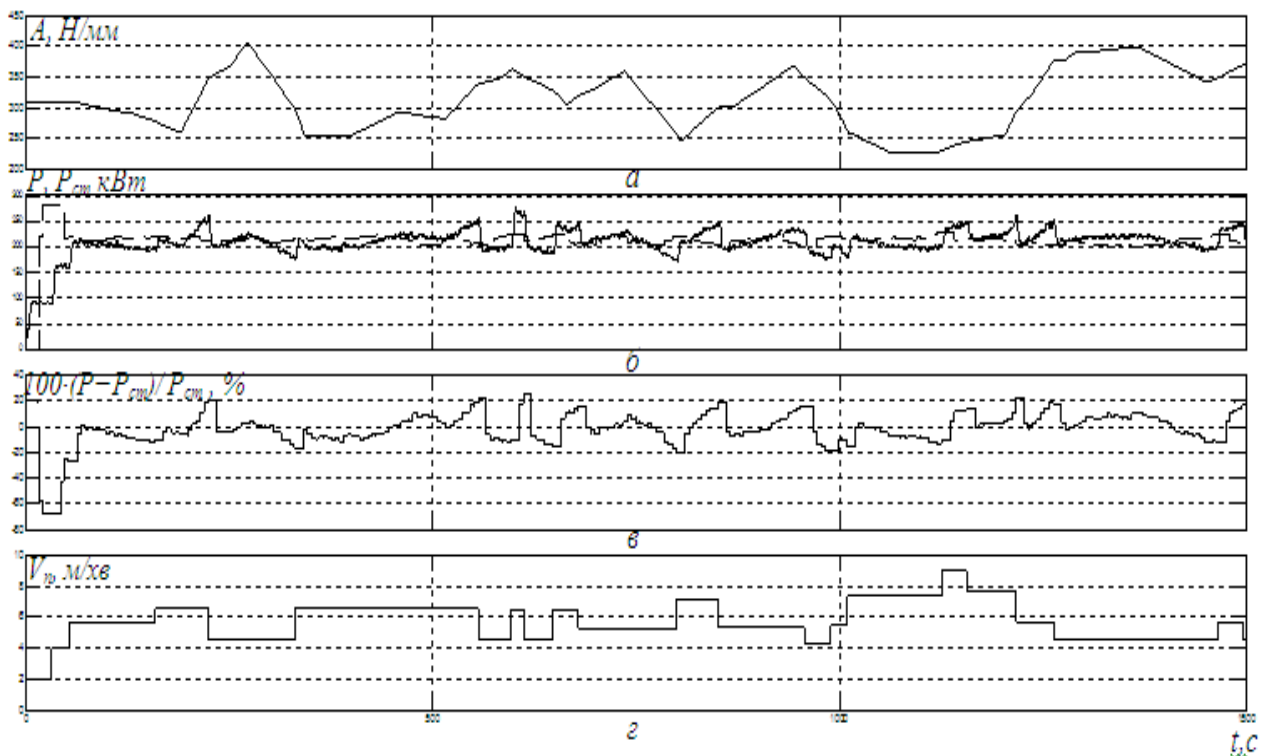


Рис. 7. Зміна у часі: *a* – опірності вугілля різанню; *б* – фактичної середньої потужності двигуна приводу різання видобувного комбайна (суцільна лінія) та її стійкого значення (пунктирна лінія); *в* – відносного відхилення середньої потужності двигуна приводу різання від свого стійкого значення; *г* – швидкості подачі комбайна за умови використання запропонованої системи нечіткого керування

Середньоквадратичне відхилення середньої фактичної потужності від свого стійкого значення, що є першим показником якості автоматичного керування, за результатами моделювання роботи сучасних регуляторів навантаження двигуна приводу різання видобувного комбайна склало 21,3%. Максимальне відносне відхилення середньої фактичної потужності від свого стійкого значення, що є другим показником якості автоматичного керування, склало 52,8%. Середнє значення відносного відхилення середньої фактичної потужності від свого стійкого значення, що є третім показником якості автоматичного керування, склало 1,8%.

Розглянемо результат моделювання роботи запропонованої системи нечіткого автоматичного керування режимами роботи двигуна приводу різання видобувного комбайна (рис.7).

З рис.7 видно, що прийняття рішення щодо зміни швидкості подачі комбайна система приймає у моменти часу (рис.7,г), коли відносне відхилення середньої потужності від свого стійкого значення знаходиться за межами діапазону $\pm 10\%$ більше 10 с. Це цілком відповідає запропонованому алгоритму прийняття рішення, що закладений в експертні правила нечітких продукцій бази знань системи. З рис.7,в ми бачимо, що затримка 10 с після виходу відносного відхилення середньої потужності від свого стійкого значення за межі діапазону $\pm 10\%$ не призводить до його суттєвого збільшення – цей параметр утримується в діапазоні $\pm 23,2\%$, що є прийнятним.

Також з аналізу рис.7 можна зробити висновок, що в абсолютній більшості випадків після зміни швидкості подачі (рис.7,г) відносне відхилення середньої потужності від свого стійкого значення приймає значення, близьке до нуля (рис.7,в). Це говорить про вдале коригування куту нахилу статичної робочої характеристики комбайна за запропонованим способом.

Середньоквадратичне відхилення середньої фактичної потужності від свого стійкого значення, що є першим показником якості автоматичного керування, за результатами моделювання роботи запропонованої системи нечіткого автоматичного керування режимами роботи двигуна приводу різання видобувного комбайна склало 10,3%. Максимальне відносне відхилення середньої фактичної потужності від свого стійкого значення, що є другим показником якості автоматичного керування, склало 23,2%. Середнє значення відносного відхилення середньої фактичної потужності від свого стійкого значення,

що є третім показником якості автоматичного керування, склало 0,07%.

Висновки

Запропонований підхід щодо створення системи нечіткого автоматичного керування режимом роботи двигуна приводу різання видобувного комбайна, згідно з яким здійснюється прогнозування зміни навантаження двигуна при зміні швидкості подачі комбайна на основі його статичної характеристики зі скоригованим кутом нахилу. Прогнозування можливе завдяки незмінності швидкості подачі комбайна протягом певного часу, що дозволяє за зміною ковзного середнього значення потужності з часом усереднення 2,65 с відстежувати зміну у часі опірності вугілля різанню, та на основі цієї інформації коригувати кут нахилу робочої статичної характеристики видобувного комбайна. Завдяки цьому на основі робочої статичної характеристики видобувного комбайна зі скоригованим кутом її нахилу є можливість при будь-якому відхиленні фактичної середньої потужності двигуна приводу різання від свого стійкого значення на момент прийняття рішення системою точно визначати величину зміни швидкості подачі, за умови якої це відхилення буде практично усунуте. Описаний алгоритм визначення величини зміни швидкості подачі дозволяє змінювати швидкість подачі дискретно у часі, та закладений в основу бази правил нечітких продукцій системи нечіткого автоматичного керування режимом двигуна приводу різання комбайна.

Результати моделювання процесу керування навантаженням двигуна приводу різання видобувного комбайна показали, що за умови використання запропонованої системи нечіткого автоматичного керування режимами роботи двигуна приводу різання у порівнянні з регуляторами навантаження, що наразі застосовуються на видобувних комбайнах, середньоквадратичне відхилення середньої фактичної потужності від свого стійкого значення зменшується з 21,3 до 10,3%, максимальне відхилення середньої фактичної потужності від свого стійкого значення зменшується з 52,8 до 23,2%, а середнє значення відхилення середньої фактичної потужності від свого стійкого значення також зменшується з 1,8 до 0,07%. Тобто, за умови використання запропонованої системи нечіткого автоматичного керування режимами роботи двигуна приводу різання у порівнянні з існуючими регуляторами наванта-

ження маємо суттєве поліпшення якості автоматичного керування навантаженням двигуна за трьома основними критеріями.

Список використаної літератури

1. Макаров, В. М., Перов, М. О., Потенціал енергозбереження при видобутку та переробці вугілля [Електронний ресурс]. *Проблеми загальної енергетики*, 4, 2012. – С. 46–53. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/PZE_2012_4_9

2. Бубликов, А. В., Козарь, М. В., Проценко, С. М. та ін. (2012) Автоматизація технологічних процесів підземних гірничих робіт [Електронний ресурс], 320 с. Режим доступу: <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/3415>

3. Способ автоматического управления скоростью подачи угольных комбайнов и устройство для его осуществления : пат. RU2066757C1 Росія; заявл. 28.04.1993 ; опубл. 20.09.1996. [Электронный ресурс] Режим доступу: <https://patents.google.com/patent/RU2066757C1/ru>

4. Иванов, А. А., Ткачев, В. В., и др. Автоматизация процессов подземных горных работ, [Текст]. 1987. – 328 с.

5. Устройство управления электроприводом очистного комбайна : пат. RU169576U1 Росія; заявл. 26.12.2016 ; опубл. 23.03.2017. [Электронный ресурс] Режим доступу: <https://patents.google.com/patent/RU169576U1/ru>

6. Бабокин, Г. И., Гнатюк, Т. А., Оценка робастности системы управления электроприводом комбайна для различных регуляторов нагрузки [Электронный ресурс]. *Известия ТулГУ. Технические науки*, 12, 2012. – С. 73–77. Режим доступу: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-robastnosti-sistemy-upravleniya-elektroprivodom-kombayna-dlya-razlichnyh-regulyatorov-nagruzki-1>

7. Штовба, С. Д., Штовба, О. В., Панкевич, О. Д., Критерії точності та компактності для оцінювання якості нечітких баз знань у задачах ідентифікації [Електронний ресурс]. *Наукові праці ВНТУ*, 4, 2012. – С. 1–8. Режим доступу: <http://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/4731>

8. Кондратенко, Ю. П., Кондратенко, Г. В., Козлов, О. В., Синтез та оптимізація нечітких регуляторів у системах керування піролізними реакторами [Електронний ресурс]. *Збірник наукових праць наук*, 4, 2017. – С. 25–36. Режим доступу: <http://jnn.nuos.edu.ua/article/view/119789/116516>

9. A. A. Hosseini, S & Ataei, Mohammad & M. Hosseini, S & Akhyani, M. Application of fuzzy logic for determining of coal mine mechanization.

[Electronic Resource]. *Journal of Coal Science and Engineering (China)*. – 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12404-012-0301-y>

10. Бубликов, А. В., Исследование переходных процессов в системе автоматического управления добычным комбайном в режиме стабилизации скорости подачи [Электронный ресурс]. *Збірник наукових праць НГУ*, 40, 2013. – С.91–97. Режим доступу: <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/147885>

11. Леоненков, А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzy TECH, [Текст]. 2005.–736 с.

12. Бубликов, А. В., Экспертна система нечіткого автоматичного керування видобувним комбайном як частина мехатронної системи [Електронний ресурс]. *Гірнична електромеханіка та автоматика*, 97, 2016. – С. 41–48. Режим доступу: http://gea.nmu.org.ua/index.php/en/archive?arh_article=400

References

1. Makarov, V. M., Perov, M. O., (2012). Energy saving potential in coal extraction and processing [Potensial enerhozberzhennya pry vydobutku ta pererobtsi vuhillya]. *Problemy zahal'noyi enerhetyky*, 4, С. 46–53. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/PZE_2012_4_9

2. Bublikov, A. V., Kozar', M. V., Protsenko, S. M. (2012) Automation of technological processes of sub-mine mining [Avtomatyzatsiya tekhnolohichnykh protsesiv pidzemnykh hirnychykh robot], 320 p. Available at: <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/3415>

3. The method of automatic control of the rate of supply of coal combines and device for its implementation [Sposob avtomaticheskogo upravleniya skorost'yu podachi ugol'nykh kombaynov i ustroystvo dlya yego osushchestvleniya] : pat. RU2066757C1 Russia; zajavl. 28.04.1993 ; opubl. 20.09.1996. Available at: <https://patents.google.com/patent/RU2066757C1/ru>

4. Ivanov, A. A., Tkachev, V. V., and other (1987) Automation of underground mining processes [Avtomatizatsiya protsessov podzemnykh gornyykh rabot], 328 с.

5. Control unit of the electric drive of the shearer [Ustroystvo upravleniya elektroprivodom ochnogo kombayna]: pat. RU169576U1 Russia; zajavl. 26.12.2016 ; opubl. 23.03.2017. Available at: <https://patents.google.com/patent/RU169576U1/ru>

6. Babokin, G. I., Gnatyuk, T. A., (2012). Evaluation of the robustness of the combine electric drive control system for various load regulators [Otsenka robastnosti sistemy upravleniya elektroprivodom kombayna dlya razlichnykh regulyatorov nagruzki]. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskiye nauki*, 12, C. 73-77. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-robastnosti-sistemy-upravleniya-elektroprivodom-kombayna-dlya-razlichnykh-regulyatorov-nagruzki-1>
7. Shtovba, S. D., Shtovba, O. V., Pankevich, A.D. (2012). Criteria of accuracy and compactness for assessing the quality of fuzzy knowledge bases in identification tasks [Kryteriyi tochnosti ta kompaktnosti dlya otsinyuvannya yakosti nechitkykh baz znan' u zadachakh identyfikatsiyi]. *Naukovi pratsi VNTU*, 4, C. 1–8. Available at: <http://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/4731>
8. Kondratenko, YU. P., Kondratenko, G V., Kozlov, A. V., (2017). Synthesis and optimization of fuzzy controllers in pyrolysis reactor control systems [Syntez ta optymizatsiya nechitkykh rehulyatoriv u systemakh keruvannya piroliznyimi reaktoramy]. *Zbirnyk naukovykh prats' nauk*, 4, C. 25–36. Available at: <http://jnn.nuos.edu.ua/article/view/119789/116516>
9. A. A. Hosseini, S & Ataei, Mohammad & M. Hosseini, S & Akhyani, M. (2012). Application of fuzzy logic for determining of coal mine mechanization. *Journal of Coal Science and Engineering (China)*. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12404-012-0301-y>
10. Bublikov, A. V., (2013). Study of transients in the system of automatic control of a mining combine in the mode of stabilization of the feed rate [Issledovaniye perekhodnykh protsessov v sisteme avtomaticheskogo upravleniya dobychnym kombaynom v rezhime stabilizatsii skorosti podachi]. *Zbirnik naukovykh prats' NGU*, 40, C. 91–97. Available at: <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/147885>
11. Leonenkov, A. V. (2005) Fuzzy simulation in MATLAB and fuzzy TECH [Nechetkoye modelirovaniye v srede MATLAB i fuzzy TECH], 736 p.
12. Bublykov, A. V., (2016). Expert system of fuzzy automatic control of the extraction combine as part of the mechatronic system [Ekspertna systema nechitkoho avtomatychnoho keruvannya vydobuvnym kom-baynom yak chastyna mekhatronnoyi systemy]. *Hirnycha elektromekhanika ta avtomatyka*, 97, C. 41–48. Available at: http://gea.nmu.org.ua/index.php/en/archive?arh_article=400

SYSTEM OF FUZZY AUTOMATIC CONTROL BY THE MODE OPERATION OF THE MOTOR OF THE CUTTING DRIVE OF THE SHEARER

A.V. Bublikov

National Technical University "Dnipro Polytechnic"

Abstract. Objective. Objective is to improve the quality of automatic control of the load of cutting drive motor of shearer at the expense of introduction of fuzzy inference algorithm into the automatic control of operation modes of motor of cutting drive.

Methods. A stage to determine nonfuzzy input variable of system as statistic indices has been added to universally accepted algorithm of a fuzzy output. The indices make it possible to identify operation mode of motor of cutting drive of shearer. Input nonfuzzy variable of the system is a result of statistic processing of information signal from the sensor to find unique regularities within the signal; the regularities should correspond to one or several operation modes of motor of cutting drive. Taking into consideration features of input nonfuzzy variables formation, the system performs non-fuzzy inference discretely in time; in this context, fuzzy output algorithm is added by the conditions for data accumulation, variations, and zero variations in the motor operation mode.

Findings. A technique to integrate a behavioural model of a motor of cutting drive of shearer, considered as a control object, into a fuzzy output algorithm has been proposed. Moreover, recommendations, concerning determination of both nonfuzzy and linguistic input variables of the system, formation of a basis of fuzzy products, and determination of conditions for data accumulation, variations, and zero variations of the operation modes of motor have been formulated.

Practical implications. The proposed technique is theoretical basis to solve topical scientific and application problem as well as to use nonfuzzy algorithms to control mining machines to improve their efficiency.

Key-words: shearer, fuzzy output algorithm, operation modes of the motor

СИСТЕМА НЕЧЕТКОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМОМ РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЯ ПРИВОДА РЕЗАНИЯ ОЧИСТНОГО КОМБАЙНА

А. В. Бубликов

Национальный технический университет «Днепровская политехника»

Аннотация. Цель. Целью является повышение качества автоматического управления нагрузкой двигателя привода резания очистного комбайна за счет использования алгоритма нечеткого вывода в алгоритме автоматического управления режимами работы двигателя.

Методы. К общепринятому алгоритму нечеткого вывода добавлен этап определения четкой входной переменной системы в виде статистических оценок, которые позволяют определить режим работы двигателя привода резания комбайна. Входная четкая переменная системы является результатом статистической обработки информационного сигнала от датчика с целью выявления уникальных закономерностей в сигнале; закономерности должны соответствовать одному или нескольким режимам работы двигателя привода резания. Принимая во внимание особенности формирования входных четких переменных, система выполняет нечеткий вывод дискретно во времени; в этом контексте в алгоритм нечеткого вывода добавлены условия накопления данных, изменения и отсутствия изменений режимов работы двигателя.

Выводы. Предложен способ интеграции поведенческой модели двигателя привода резания очистного комбайна, который рассматривается в качестве объекта управления, в алгоритм нечеткого вывода. Кроме того, даны рекомендации, касающиеся определения как четких, так и лингвистических входных переменных системы, формирования базы правил нечетких продукций и определения условий накопления данных, изменения и отсутствия изменений режимов работы двигателя.

Практическое применение. Предложенный способ нечеткого автоматического управления режимом двигателя привода резания очистного комбайна является теоретической основой для решения актуальной научной и прикладной проблемы использования нечетких алгоритмов управления горными машинами для повышения эффективности их работы.

Ключевые слова: очистной комбайн, алгоритм нечеткого вывода, режимы работы двигателя.

Отримано 14.02.2019



Бубликов Андрей Викторович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации и компьютерных систем Национального технического университета «Днепровская политехника». Просп. Яворницкого, 19, Днепр, Украина, E-mail: Bublikovandrey@i.ua, тел. +38-096-761-57-11

Andrey Bublikov, Ph.D, Docent, Associate professor of the Department of automation and computer systems, National Technical University “Dnipro Polytechnic”, Yavornytsky ave., 19, Dnipro, Ukraine, E-mail: Bublikovandrey@i.ua, тел. +38-096-761-57-11

ORCID ID: 0000-0003-3015-6754