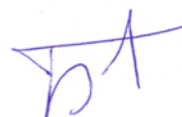


**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

**БУБЛІКОВ Андрій Вікторович**



УДК 681.5.013:622.232.72:004.942

**АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ КЕРУВАННЯ ВИДОБУВНИМИ  
МАШИНАМИ НА ОСНОВІ АЛГОРИТМІВ НЕЧІТКОГО ВИВОДУ**

**Спеціальність: 05.13.07 – «Автоматизація процесів керування»**

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Дніпро – 2020

**Дисертацією є рукопис.**

Роботу виконано на кафедрі автоматизації та приладобудування Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» (м. Дніпро) Міністерства освіти і науки України.

**Науковий консультант:** доктор технічних наук, професор **Ткачов Віктор Васильович**, завідувач кафедри автоматизації та приладобудування Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» (м. Дніпро) Міністерства освіти і науки України.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор **Поркуян Ольга Вікторівна**, ректор Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля (м. Сєверодонецьк) Міністерства освіти і науки України.

доктор технічних наук, професор **Купін Андрій Іванович**, завідувач кафедри комп'ютерних систем та мереж Криворізького національного університету Міністерства освіти і науки України.

доктор технічних наук, професор **Осадчий Сергій Іванович**, завідувач кафедри автоматизації виробничих процесів Центральноукраїнського національного технічного університету (м. Кропивницький) Міністерства освіти і науки України

Захист відбудеться ”8” жовтня 2020 р. об 11<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.080.07 при Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка» (м. Дніпро) Міністерства освіти і науки України за адресою: 49005, м. Дніпро, пр. Д. Яворницького, 19, корпус 1, ауд. 102, тел. (056) 746-22-00.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України за адресою: 49005, м. Дніпро, пр. Д. Яворницького, 19, корпус 1.

Автореферат розіслано ”4” вересня 2020 р.

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради Д 08.080.07,  
к.т.н., доц.



І.М. Удовик

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Однією з умов вирішення питання енергобезпеки України є ефективна розробка власних запасів вугілля. Однак, для цього потрібно зменшити собівартість видобутку вугілля, яка сьогодні є завищеною через використання морально застарілих принципів розробки систем автоматизації гірничого обладнання. Успіхи розвитку технологій видобутку вугілля та інформаційних технологій дають підстави для запровадження нових підходів до створення систем керування гірничими машинами.

Відмінною ознакою гірничих машин сучасного покоління є велика кількість елементів електронно-інформаційної компоненти (вимірювальні, електронно-обчислювальні засоби, засоби швидкісної обробки, перетворення та передачі інформації тощо). Однак, значний об'єм інформації про зміну у часі різних параметрів механізмів, що є доступним у режимі реального часу, лише частково використовується в процесах діагностики та керування гірничими машинами, яке зводиться тільки до стабілізації параметрів на заданому оператором рівні. На малих інтервалах часу операторам машин складно проаналізувати великий об'єм інформації, виявити приховані закономірності в інформаційних сигналах та прийняти раціональне рішення в умовах динамічної зміни режимів машин. Таким чином, через відсутність належних методів та алгоритмів обробки і аналізу інформації, а також прийняття рішень на основі цього аналізу, керування гірничими об'єктами та комплексами є неефективним.

Враховуючи стратегічне значення для енергетичної безпеки та обороноздатності України підприємств гірничо-видобувної галузі, виконання комплексних досліджень процесів керування гірничими машинами, зважаючи на нестационарність їх характеристик та умов роботи, а також вимоги переходу до інтелектуального керування технологічними процесами на шахтних підприємствах є актуальним.

Основи для автоматизації складних багатокомпонентних технологічних об'єктів та комплексів закладено в роботах вітчизняних та зарубіжних вчених: Лаптева А.Г., Стадніка М.І., Купіна А.І., Косарева І.В., Кондрахіна В.П., Поркуян О.В., Шабаєва О.Є., Горбатова П. А., Осадчого С.І., Fei Ding, He Ming-xing, Qigao Fan, Xin Zhou, J. Xu, Lei Si, Wei Zhang, Rongxin Xu та інших. Однак, в існуючих та запропонованих підходах до управління гірничими машинами вирішується завдання автоматизації процесу керування лише одною робочою операцією в рамках певної конструктивної підсистеми без урахування того, що ефективність роботи сучасних гірничих машин, які створені як мехатронні агрегати з поєднанням на основі синергетичного підходу конструктивних підсистем різної фізичної природи, визначають процеси, що одночасно протікають в усіх підсистемах.

У зв'язку з цим особливу актуальність набуває науково-дослідна проблема розробки наукових основ автоматизації процесів керування

видобувними машинами як мехатронними агрегатами з використанням методів сучасної теорії керування, що передуює переходу до інтелектуального керування технологічними процесами на шахтах. Тож, тема досліджень, спрямованих на створення цих основ, також є актуальною.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, темами.** Дисертаційна робота виконана відповідно до енергетичної стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність конкурентоспроможність», затвердженої розпорядженням кабінету міністрів України від 18 серпня 2017 року № 605-р. До дисертаційної роботи увійшли результати досліджень, які виконані згідно з тематичними планами науково-дослідних робіт НТУ «Дніпровська політехніка» за темами: «Енергозберігаюче керування електромеханічними технологічними комплексами і системами гірничометалургійної промисловості» (№ держ. реєстрації 0115U002296, 2015-2017 р.); «Інтелектуальні технології керування процесами гірничого виробництва в задачах енергозбереження та енергоефективності» (№ держ. реєстрації 0113U000402, 2013-2015 р.), у яких автор брав участь як відповідальний виконавець.

**Мета й завдання дослідження.** Метою досліджень є підвищення продуктивності видобувних машин (комбайнів), зменшення питомих енерговитрат на видобуток вугілля, його зольності та кількості штибу за рахунок отримання нових закономірностей, що є унікальними для певних фізичних процесів в конструктивних підсистемах машини, та створення на їх основі алгоритмів нечіткого виводу для одночасного та узгодженого автоматичного керування окремими режимами роботи видобувних машин.

Для досягнення визначеної мети необхідно вирішити наступні завдання дослідження:

– виконати аналіз гірничих машин як мехатронних об'єктів автоматизації, а також відомих методів створення систем керування такими машинами;

– розробити комплексну імітаційну модель видобувної машини як мехатронного агрегату з введенням окремої компоненти, на основі якої вирішується проблема автоматизації процесів керування видобувною машиною;

– визначити фізичні процеси, що є унікальними для різних характеристик режиму завантаження вугілля виконавчим органом видобувної машини та режиму руйнування матеріалу виконавчим органом біля покрівлі вугільного пласта, їх відображення у вигляді унікальних закономірностей зміни струмів статора та активних потужностей двигунів приводів різання, а також статистичні критерії для виявлення цих закономірностей;

– здійснити аналіз роботи видобувної машини за умови керування оператором з визначенням основних режимів роботи машини та їх характеристик;

– розробити керуючу компоненту видобувної машини на основі сукупності незалежно працюючих підсистем нечіткого автоматичного керування її режимами роботи, що забезпечують пошук та підтримку ефективних режимів роботи;

– розв’язати задачу забезпечення узгодженої сумісної роботи підсистем нечіткого автоматичного керування окремими режимами роботи видобувної машини за умови присутності їх перехресного впливу на інші режими роботи;

– провести дослідження роботи видобувної машини за умови використання запропонованих підсистем нечіткого автоматичного керування її режимами роботи та підтвердити адекватність розробленої комплексної імітаційної моделі видобувної машини щодо імітації формування керуючих впливів підсистемами.

**Об’єктом дослідження** є процеси автоматичного керування видобувними машинами як мехатронними агрегатами при підземному видобутку вугілля.

**Предметом дослідження** є математичні моделі, принципи та методи керування видобувними машинами, що спроектовані як мехатронні агрегати та системи.

**Основна ідея** роботи полягає в одночасному та узгодженому керуванні декількома конструктивними підсистемами видобувних машин, що спроектовані як мехатронні агрегати, на основі ідентифікації фізичних процесів у підсистемах та з урахуванням впливів між ними, й досягненні за рахунок цього раціональних режимів роботи видобувних машин, які неможливо досягти за умови локального та незалежного керування окремими підсистемами.

**Наукова проблема** полягає у створенні наукових основ автоматизації процесів керування видобувними машинами шляхом одночасного, узгодженого та нечіткого керування декількома конструктивними підсистемами машини через синхронізацію дискретної зміни у часі станів підсистем керування та компенсацію їх впливів на режими роботи, якими вони не керують, за допомогою встановлених залежностей між їх вихідними чіткими змінними.

**Методи дослідження.** Для розв’язання поставлених завдань у роботі використані наступні методи: методи системного аналізу та мехатронний підхід для створення узагальненої математичної моделі видобувної машини як мехатронного агрегату; методи теорії автоматичного керування – для створення інформаційно-електронної компоненти моделі; методи теорії різання вугільного масиву, теорії завантаження вугілля виконавчими органами видобувної машини, теорії випадкових процесів – для створення моделі геотехнічної системи «гірничий масив – забійний конвеєр»; методи теорії вейвлет-перетворення – для аналізу інформаційного сигналу з метою визначення закономірностей, що є унікальними для певних характеристик режимів роботи видобувної машини; методи теорії нечітких множин та нечіткої логіки – для створення керуючої компоненти видобувної машини як мехатронного агрегату;

методи статистичного та кореляційного аналізу – для перевірки узагальненої математичної моделі видобувної машини на адекватність щодо імітування формування керуючих впливів підсистемами нечіткого автоматичного керування режимами роботи видобувної машини та дослідження ефективності формування керуючих впливів.

### **Основні наукові положення, що захищаються в дисертації**

1. Нормоване середньоквадратичне відхилення функції, що апроксимує гістограми розподілу значень амплітуди коливань струму статора двигуна приводу різання видобувної машини на частоті його власних коливань, замірених на різних часових інтервалах в залежності від знаку похідної струму за часом на подвійній частоті обертання виконавчого органу, прагне до одиниці за умови відсутності заштибовки органу, та прагне до нуля за умови настання ранньої стадії заштибовки.

2. Нормоване відношення максимальних значень функцій, що апроксимують низькочастотну зміну у часі струму статора двигуна приводу різання видобувної машини, прямо пропорційно залежить від різності опірності матеріалу різанню на двох послідовних переміщеннях виконавчого органу вверх, що дозволяє ідентифікувати присікання органом породи.

3. Величина зміни швидкості обертання верхнього виконавчого органу видобувної машини, за умови якої компенсується вплив швидкості подачі та висоти підйому виконавчого органу на режим руйнування різцями вугільного масиву, має пряму і нелінійну залежність від величин зміни швидкості подачі та висоти підйому виконавчого органу, що дозволяє здійснювати одночасне керування режимами руйнування різцями вугільного масиву, руйнування матеріалу біля покрівлі вугільного пласта та навантаження двигуна приводу різання.

4. Період зміни швидкості подачі видобувної машини за умови дискретного керування у часі навантаженням двигуна приводу різання є випадковою величиною з нормальним законом розподілу, при якому більше 90% значень періоду перевищує час ідентифікації інших режимів роботи машини, що дозволяє розділити у часі ідентифікацію різних режимів роботи машини.

### **Наукова новизна отриманих результатів.**

#### ***Вперше розроблено:***

– принцип створення систем керування складними багатовимірними та нелінійними об'єктами з перехресними зв'язками між величинами, що спроектовані як мехатронні агрегати, на основі обґрунтування окремих режимів роботи об'єкта, що визначають ефективність його роботи, та впровадження нечіткого та незалежного керування цими режимами з подальшим усуненням взаємного впливу процесів у різних компонентах об'єкта через зв'язки між керуючими впливами, та за допомогою синхронізації формування керуючих впливів у часі;

– комплексну математичну модель видобувної машини як мехатронного агрегату на основі поєднання математичних моделей фізичних процесів, що протікають у різних конструктивних компонентах машини, моделей локальних систем автоматичного керування цими компонентами, а також моделей фізичних процесів, які відбуваються за умови взаємодії машини з зовнішнім середовищем;

– методи ідентифікації заштибовки виконавчого органу видобувної машини та присікання ним породи біля покрівлі вугільного пласта на основі вейвлет-перетворення і аналізу струмів статора двигунів приводу різання, які дозволяють системам керування розпізнавати режими транспортування та завантаження вугілля і породи органом, а також режими руйнування матеріалу органом біля покрівлі пласта;

– методи синтезу систем керування виконавчим органом видобувної машини за гіпсометрією вугільного пласта, режимом транспортування та завантаження вугілля органом, а також режимом руйнування органом масиву вугілля на основі використання алгоритму нечіткого виводу Мамдані, що дозволяють системам керування за різних умов роботи машини постійно підтримувати максимальну завантажувальну продуктивність виконавчого органу без його заштибовки, з високою точністю відстежувати межу порода-вугілля, та підтримувати енергоефективний режим руйнування масиву;

– метод синхронізації роботи експертних систем нечіткого автоматичного керування режимами роботи видобувної машини на основі алгоритму компенсації впливів систем нечіткого автоматичного керування на режими роботи машини, якими вони не керують.

#### **Набули подальшого розвитку:**

– метод синтезу систем автоматичного керування багатомірними нестационарними об'єктами на основі алгоритмів нечіткого виводу, для яких неможливо отримати інформацію про керовані процеси через вимірювані параметри;

– метод кількісної оцінки адекватності моделі системи нечіткого автоматичного керування технологічним процесом на основі перевірки статистичних гіпотез щодо однаковості законів розподілу величини відхилення значень вихідної чіткої змінної системи від свого істинного значення.

#### **Удосконалено:**

– метод керування режимом навантаження двигунів приводів різання видобувної машини, який відрізняється від практично застосованого впровадженням дискретного та нечіткого керування швидкістю подачі з коригуванням стійкої потужності двигунів за результатами статистичної обробки високо-частотної складової струмів статора, та компенсацією відхилення середньої потужності від свого стійкого значення на основі робочої статичної характеристики видобувної машини зі скоригованим кутом нахилу у функції опірності вугілля різанню.

**Наукове значення роботи** полягає у створенні теоретичної бази для впровадження алгоритмів нечіткого виводу за умови автоматизації процесів керування видобувними машинами, що відображується в обґрунтуванні баз правил нечітких продукцій для експертних підсистем керування окремими конструктивними компонентами машин на основі представлення роботи машини у вигляді дискретної зміни у часі її режимів роботи, в отриманні нових закономірностей зміни струмів статорів та активних потужностей двигунів приводів різання, що дозволяють ідентифікувати режими роботи машини, а також у встановленні залежностей між вихідними змінними експертних підсистем та правил синхронізації у часі зміни їх станів, які дозволяють забезпечити їх сумісну та узгоджену роботу в умовах взаємного впливу.

**Обґрунтованість і достовірність** наукових положень, висновків і рекомендацій підтверджуються коректністю постановки та вирішення задач з використанням достовірних вихідних даних, що отримані за результатами експериментальних випробувань видобувних машин, використанням сучасного, апробованого математичного апарату, збігом результатів теоретичних та експериментальних досліджень та доведенням адекватності розробленої комплексної математичної моделі видобувної машини з підтвердженням відповідних статистичних гіпотез з рівнем значимості 0,05.

**Практична цінність роботи** полягає у:

- вдосконалені алгоритму визначення прямого та зворотного переходу від нормального завантаження вугілля виконавчим органом видобувної машини до його незначної заштибовки на основі статистичного аналізу струму статора двигуна приводу різання, який від існуючого відрізняється аналізом струму одночасно на декількох інтервалах частотного спектру, що дозволяє усунути помилкове визначення незначної заштибовки через руйнування мінеральних включень;

- розробці алгоритмів визначення зміни характеристик режиму завантаження вугілля виконавчим органом видобувної машини на основі статистичного аналізу струму статора двигуна приводу різання, що дозволило за рахунок запобігання заштибовки органу зменшити питомі енерговитрати у 2,1 рази, а кількість штибу – у 1,5 рази;

- розробці алгоритму визначення прямого та зворотного переходу від руйнування виконавчим органом видобувної машини вугілля біля покрівлі вугільного пласта до руйнування породи на основі статистичного аналізу струму статора двигуна приводу різання, що за рахунок запобігання присікання органом породи дозволило зменшити зольність вугілля на 12-16%;

- вдосконалені алгоритму керування режимом навантаження двигунів приводів різання видобувної машини, який відрізняється від практично застосованого впровадженням дискретного та нечіткого керування швидкістю



подачі з коригуванням стійкої потужності двигунів, що за рахунок більш повного використання потужності двигуна дозволило підвищити продуктивність машини на 8-10%;

– розробці алгоритму нечіткого керування режимом транспортування та завантаження вугілля і породи виконавчим органом видобувної машини, що дозволяє за різних умов роботи машини постійно підтримувати максимальну завантажувальну продуктивність виконавчого органу без його заштибовки;

– розробці алгоритму нечіткого керування верхнім виконавчим органом видобувної машини за гіпсометрією вугільного пласта, що дозволяє за різних умов роботи машини з високою точністю відстежувати межу порода-вугілля;

– розробці алгоритму нечіткого керування режимом руйнування масиву вугілля різцями виконавчого органу видобувної машини, що дозволяє за різних умов роботи машини постійно підтримувати енергоефективний режим руйнування масиву за рахунок запобігання щілинного виду різання вугілля різцями;

– розробці алгоритму координованого керування підсистемами нечіткого автоматичного керування режимами роботи видобувної машини, який дозволив за рахунок узгодженого й незалежного керування одразу декількома режимами роботи машини досягнути раціональних значень одночасно за усіма критеріями ефективності роботи машини – продуктивністю, питомими енерговитратами, зольністю вугілля та кількістю штибу у вугільній масі.

**Реалізація результатів роботи.** Запропоновані за результатами роботи методи ідентифікації режимів роботи видобувних машин та алгоритми нечіткого й узгодженого керування ними прийняті для впровадження на підприємстві Акціонерне товариство «Харківський машинобудівний завод «Світло шахтаря»», підприємстві ПрАТ «Макіївський завод «Лазер» (м. Павлоград, Україна) при створенні засобів керування та діагностування гірничих машин, у Міжгалузевій господарчій корпорації «ОБЛІК», а також використані на експериментальній базі Інституту технічної механіки НАН України і Державного космічного агентства України при удосконаленні технологічного обладнання та розробці автоматичної системи керування процесом обробки мінеральної сировини.

**Особистий внесок здобувача.** Результати дисертації, що виносяться на захист, одержані автором особисто. У наукових публікаціях, створених у співавторстві, здобувачу належить: закономірності зміни у часі струму статора двигуна приводу різання видобувної машини, що дозволяють ідентифікувати характеристики режимів завантаження вугілля органом, та інформативні критерії цих характеристик [1, 15, 24, 25, 36]; спосіб синхронізації у часі роботи систем автоматичного керування, кожна з яких керує окремим технологічним процесом за умови наявності перехресних впливів систем на інші технологічні процеси [2, 13, 16, 23, 27, 33]; дослідження впливу на інформативні критерії

характеристик режимів завантаження вугілля органом машини гірничо-геологічних параметрів вугільного пласта, а також рішення щодо врахування даного впливу при використанні критеріїв в різних умовах роботи [4]; зв'язки між механічною компонентою видобувної машини та моделлю геотехнічної системи «гірничий масив – забійний конвеєр» за умови створення комплексної моделі комбайна як мехатронного агрегата [10]; математична модель рушія мобільної платформи, яка як складова частина увійшла до механічної компоненти створеної моделі видобувної машини [11]; закономірність зміни у часі струму статора двигуна приводу різання, що дозволяє системі автоматичного керування ідентифікувати процес присікання породи органом, та інформативний критерій для визначення цього процесу [12]; алгоритм нечіткого виводу для автоматизації процесів керування режимами роботи видобувної машини [19]; алгоритм розрахунку величини зміни швидкості подачі машини, що дозволяє усунути відхилення потужності двигуна приводу різання від свого стійкого значення за будь-яких умов роботи комбайна [26]; обґрунтування режимів роботи видобувної машини з метою автоматизації процесів керування ним [28].

#### **Апробація результатів роботи**

Основні положення та наукові результати роботи розглядалися на: міжнародних наукових і науково-практичних конференціях: «3th Protodyakonov Colloquium» (Дніпро, 2010), «Проблеми використання інформаційних технологій в освіті, науці та промисловості» (Дніпро, 2013, 2014, 2017, 2018), «Математичне та імітаційне моделювання систем» (Чернігів, 2013, 2017), «Автоматика-2013 : XX Міжнародна конференція з автоматичного керування» (Миколаїв, 2013) «Контроль і керування в складних системах» (Вінниця, 2016).

**Публікації.** Основні наукові положення і результати дисертації опубліковані у 36 наукових працях, з них: дві монографії, 20 статей – у фахових виданнях, що входять до переліку МОН України (у т. ч. 2 статті – в журналах, що індексуються у наукометричній базі Scopus), 4 статті – у зарубіжних виданнях (з них 3 статті – в журналах, що індексуються у наукометричній базі Scopus), 9 статей – в матеріалах наукових конференцій та 1 патент.

**Структура й обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, 7 додатків на 178 сторінках, списку використаних джерел, що містить 215 найменувань на 27 сторінках. Текстова частина містить 295 сторінок машинописного тексту, 64 рисунків і 4 таблиць. Загальний обсяг дисертації становить 500 сторінок.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність обраної теми; розкрито зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами; поставлено мету і сформульовано завдання, об'єкт та предмет дослідження; викладено ідею роботи та наукову проблему; визначено методи дослідження; зазначено наукові положення та наукову новизну отриманих результатів; наведено практичне та наукове значення результатів роботи; задекларовано особистий внесок автора; висвітлено апробацію результатів роботи, публікації за темою.

У **першому розділі** проведений аналіз гірничих підприємств як об'єктів автоматизації, за результатами якого зроблений висновок, що ефективному й повноцінному впровадженню на шахтних підприємствах АСУ ТП заважає проблема відсутності автоматизації процесів керування гірничими машинами, що спроектовані як мехатронні агрегати, та для яких властивий динамічний і випадковий характер зміни їх режимів роботи. Прикладом таких машин є видобувні машини для підземного видобутку вугілля.

Виконаний аналіз конструктивних особливостей видобувних машин як мехатронних агрегатів показав, що наразі у складі видобувних машин сучасного покоління відбувається поєднання за допомогою синергетичного підходу декількох конструктивних компонентів з різною фізичною природою та принципами функціонування. При цьому сучасні видобувні машини мають високорозвинену інформаційно-електронну компоненту, яка забезпечує збирання та зберігання інформації про зміну у часі багатьох параметрів машини, але ця інформація не використовується для керування машиною.

Зроблений аналіз процесів керування гірничими машинами у виробках дозволив встановити, що практично в усіх випадках машинами керують оператори, які на малих інтервалах часу фізично не в змозі належним чином проаналізувати інформацію щодо зміни у часі режимних параметрів машини, та прийняти раціональне рішення в умовах значного збільшення потоку інформації, а також динамічно мінливих непередбачуваним чином ситуацій. Виконаний аналіз ефективності видобутку вугілля у забоях на шахтних підприємствах підтвердив суттєвий негативний вплив людського фактору на основні якісні критерії ефективності роботи гірничих машин у виробках.

Аналіз запропонованих наразі рішень щодо автоматизації процесів керування гірничими машинами у виробках показав, що в усіх випадках ця проблема вирішується шляхом автоматизації процесу керування лише одною робочою операцією у рамках певної конструктивної підсистеми, тоді як ефективність роботи машини, що спроектована як мехатронний агрегат, визначають процеси, які одночасно протікають в усіх підсистемах.

Засновниками наукового напрямку використання мехатронного підходу за умови створення, дослідження та проектування технологічних машин в Україні є Лаптев А.Г., Стаднік М.І., Купін А.І., Косарев І.В., Кондрахін В.П., Поркуян О.В., Шабаєв О.Є., Горбатов П.А., Осадчий С.І. У працях цих науковців

доведено, що за умови створення технологічної машини як мехатронного агрегату вона набуває абсолютно нових, більш якісних властивостей, за рахунок чого суттєво підвищується ефективність роботи машини. Разом з тим, виконаний аналіз праць показав, що у даному напрямі вирішувалися проблеми або механізації, або автоматизації окремих конструктивних підсистем. Отже, зроблений висновок про необхідність нового підходу щодо автоматизації процесів керування технологічними машинами як мехатронними агрегатами, який передбачає одночасне й узгоджене керування усіма підсистемами машини.

У **другому розділі** з метою дослідження процесів керування режимами роботи видобувної машини на основі відомих моделей, з урахуванням синергетичного поєднання складових гірничої машини, що мають різну фізичну природу, створена комплексна імітаційна модель видобувної машини, в якій виділено шість компонент: інформаційно-електронна, електротехнічна, перша механічна (сукупність моделей, що описують обертальні рухи мас у редукторах приводів машини), гідравлічна, друга механічна (сукупність моделей, що описують поступальні та обертальні рухи конструктивних вузлів машини у тримірному просторі), а також модель геотехнічної системи «гірничий масив – забійний конвеєр» (моделі, що описують взаємодію виконавчих органів й корпусу машини з масивом вугілля й конвеєром).

До перелічених компонент видобувної машини, що розглядається як мехатронний агрегат, додана ще одна – керуюча, завданням якої є забезпечення принципово нових ефективних режимів роботи машини, які неможливо досягти без одночасного та координованого керування усіма її компонентами.

На основі аналізу інформації щодо експлуатації та випробувань видобувних машин різних типів на вугільних шахтах виділені основні режими роботи машин, які визначалися рішеннями операторів (рис.1).

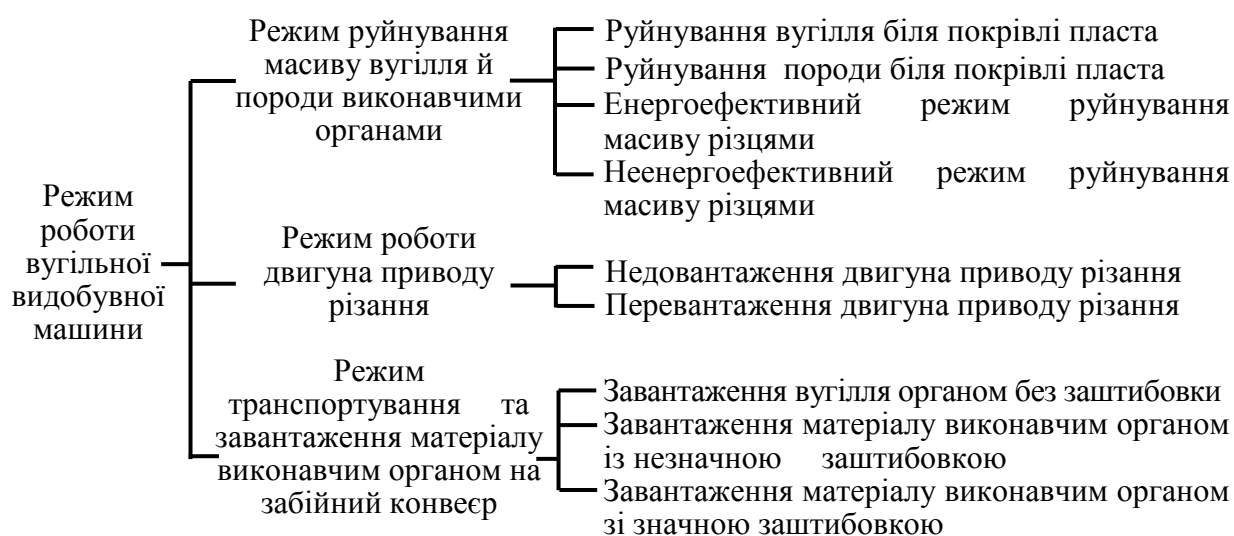


Рис. 1. Схема режимів роботи видобувної машини та їх характеристик

Кожний режим роботи машини є комплексним поняттям, яке розкладається на сукупність характеристик, що його уточнюють. За умови створення керуючої компоненти видобувної машини на основі алгоритмів нечіткого виводу характеристики режимів роботи машини приймаються за імена вхідних лінгвістичних змінних підсистем нечіткого керування окремими режимами роботи машини.

Встановлена унікальна індикативна подія, що дозволяє ідентифікувати настання ранньої стадії заштибовки виконавчого органу видобувної машини, якою є поява силового завантаження вугілля (області без сірої заливки на рис.2) лише на певних кутових інтервалах обертання органу з їх поступовим збільшенням у часі.

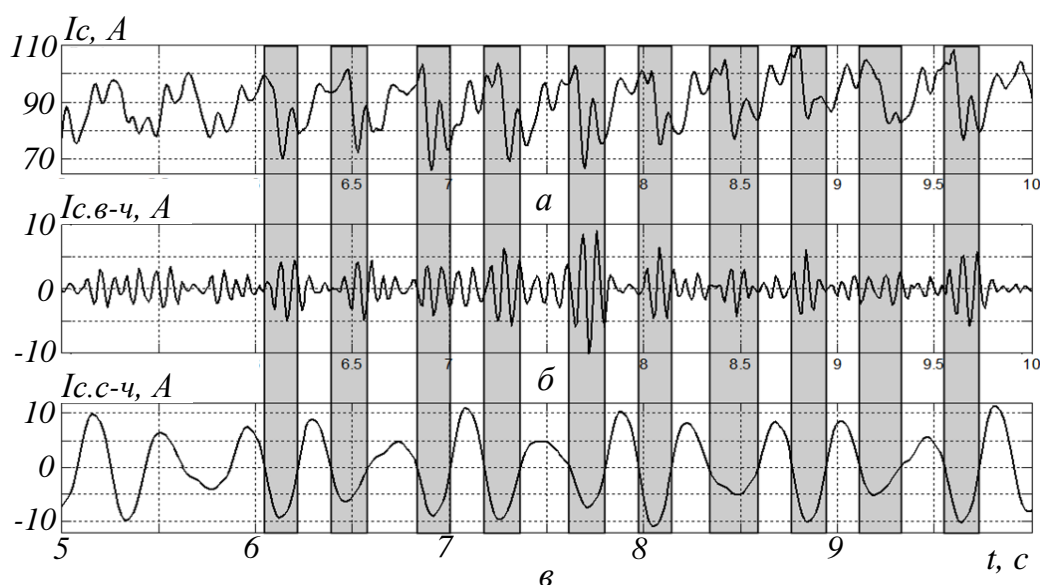


Рис. 2. Зміна у часі: а – струму статора електродвигуна приводу різання; б – високочастотної складової струму; в – середньо-частотної складової струму

Ця індикативна подія знаходить відображення у закономірності зменшення амплітуди коливання частотної складової інформаційного сигналу у вузькому діапазоні частот навколо частоти власних коливань двигуна на певних кутових інтервалах. Ці кутові інтервали визначає знак частотної складової сигналу у вузькому діапазоні частот навколо двократної частоти обертання органу.

Встановлена унікальна індикативна подія для ідентифікації протікання заштибовки органу, якою є суттєве збільшення у частотному спектрі інформаційного сигналу за умови появи силового завантаження вугілля ваги частотної складової, що відповідає двократній частоті обертання органу (рис.3). Через це відбувається зміщення фази цієї частотної складової сигналу.

Також встановлена унікальна індикативна подія для ідентифікації настання значної заштибовки, якою є поява в інформаційному сигналі низькочастотного тренду в сторону збільшення значень (рис.4).

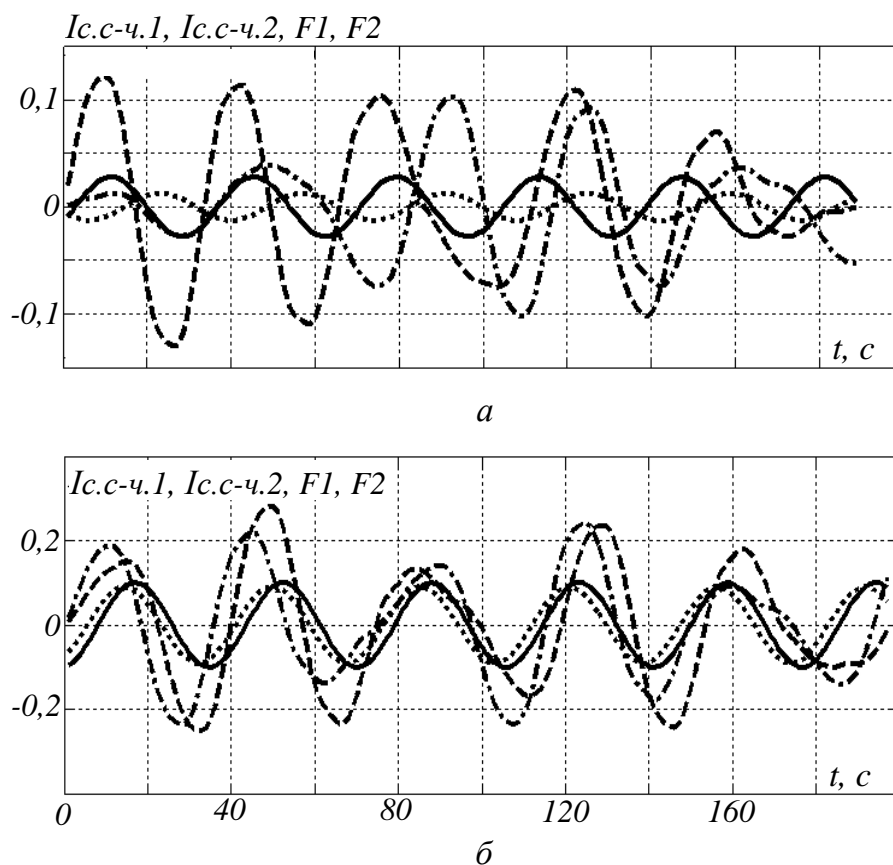


Рис. 3. Зміна у часі середньо-частотної складової струму статора на першому (пунктирна лінія) та другому (штрих-пунктирна лінія) послідовних часових інтервалах, та графіки функцій, що апроксимують цю складову, на першому (суцільна лінія) та другому (крапкова лінія) часових інтервалах для: а – нормального завантаження вугілля; б – заштибовки виконавчого органу

Ця подія відповідає унікальній закономірності зміщення діапазону зміни значень низькочастотної складової інформаційного сигналу, заміряних на сусідніх часових інтервалах, за умови настання заштибовки виконавчого органу пізньої стадії. Встановлено, що цій складовій відповідає шостий масштабний коефіцієнт за умови швидкого дискретного вейвлет-перетворення сигналу.

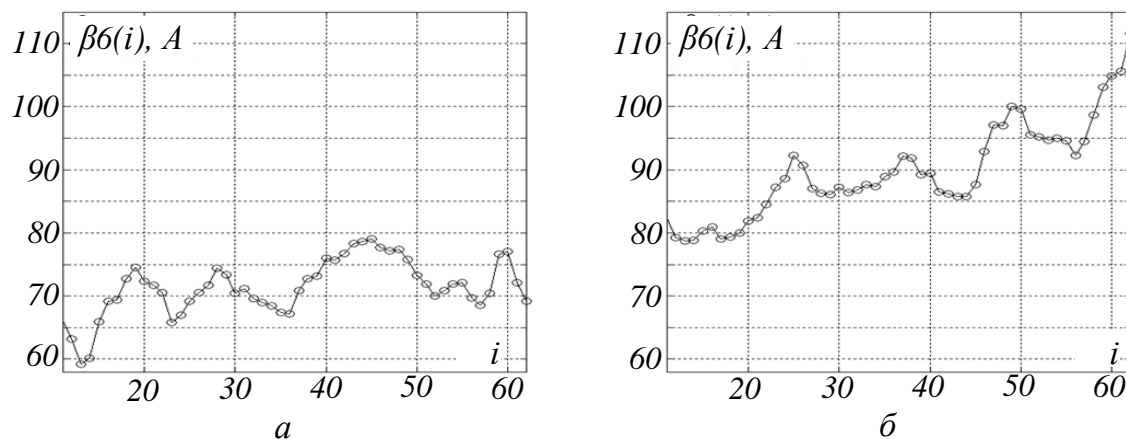


Рис. 4. Зміна у відносному часі масштабного коефіцієнту шостого рівня у режимах: а – нормального завантаження матеріалу; б – значної заштибовки

Для ідентифікації характеристик режиму руйнування прошарку матеріалу біля покрівлі пласта індикативна подія створюється штучно шляхом двоетапного східчастого переміщення виконавчого органу вверх (області з сірою заливкою на рис.5). Встановлено, що при переміщенні виконавчого органу вверх з кутом нахилу вектору швидкості відносно напрямку переміщення машини 1,3 рад. та більше, закономірності зміни інформаційного сигналу визначає процес руйнування саме матеріалу біля покрівлі, а не процес руйнування вугільного пласта.

Унікальна закономірність зміни інформаційного сигналу, яка є відображенням зазначеної індикативної події, у вигляді разового відхилення його низькочастотної складової, що є суттєво різним на другому етапі переміщення органу за умови руйнування породи (рис.5,б), більше всього проявляється у діапазоні частот від 3 до 6 Гц, який відповідає восьмому масштабному коефіцієнту за умови вейвлет-перетворення сигналу.

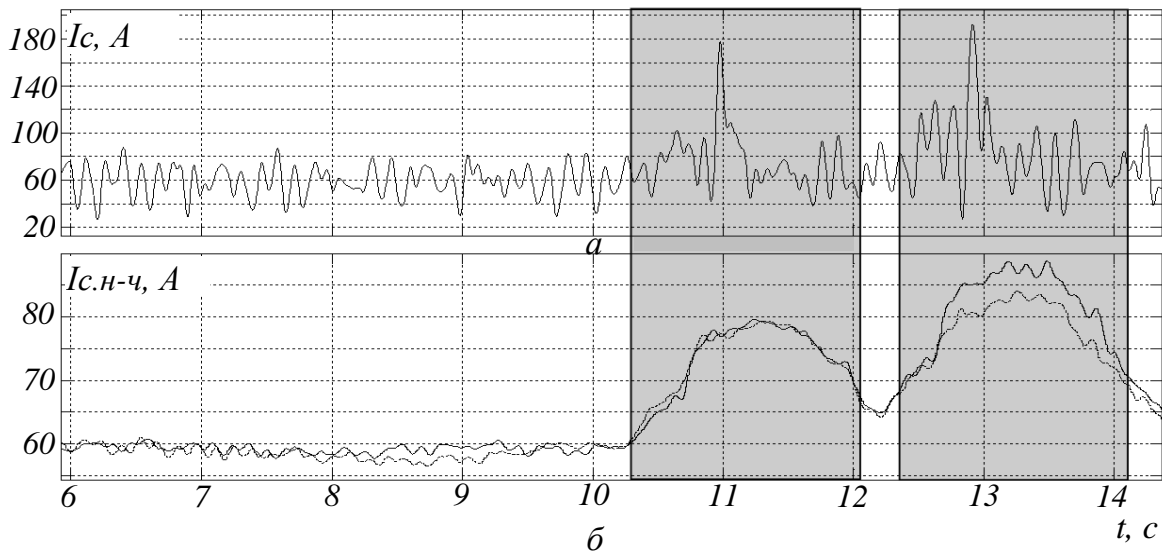


Рис. 5. Зміна у часі: *а* – струму статора двигуна приводу різання; *б* – низькочастотної складової струму статора двигуна приводу різання за умови присутності (суцільна лінія) та відсутності (пунктирна лінія) присікання породи

Для ідентифікації характеристик режимів двигуна приводу різання та руйнування різцями виконавчого органу вугільного масиву використовуються відомі індикативні події зміни характеристик – вихід середньої фактичної потужності двигуна за межі  $\pm 10-25\%$  від свого стійкого значення, та зміна процесу різання вугілля різцями, внаслідок чого відбувається суттєва зміна характеру залежності середніх питомих енерговитрат на руйнування органом масиву від товщини стружки.

У **третьому розділі** дисертаційної роботи для керування окремими режимами роботи видобувної машини створений алгоритм нечіткого виводу з наступними модифікаціями:

- за чіткі вхідні змінні прийняті не сигнали з датчиків, а результати їх статистичної обробки у вигляді чітких інформативних критеріїв, що є проєкціями на математичну площину індикативних подій, які дозволяють ідентифікувати режими роботи видобувної машини;

- база правил нечітких продукцій формується на основі представлення роботи гірничої машини як дискретної зміни у часі характеристик режимів роботи за певною траєкторією, причому кожна з характеристик спостерігається деякий час;

- введена умова накопичення даних для формування вибірок інформаційних сигналів достатньої довжини для визначення інформативних критеріїв, які є унікальним для певної характеристики режимів роботи машини;

- введені умови зміни та відсутності зміни режимів роботи машини, які зумовлені тим, що пошук закономірностей в інформаційних сигналах відбувається на різних часових масштабах, тому для визначення інформативних критеріїв потрібний різний час.

При створенні алгоритму нечіткого виводу для керування режимом завантаження вугілля виконавчим органом виділені наступні його характеристики: нормальне завантаження вугілля, незначна заштибовка органу, значна заштибовка органу.

З урахуванням встановленої унікальної індикативної події, що дозволяє ідентифікувати настання ранньої стадії заштибовки органу видобувної машини, визначений перший інформативний критерій зміни характеристик режиму завантаження вугілля органом «нормальне завантаження ↔ незначна заштибовка» та «незначна заштибовка ↔ значна заштибовка» –  $NRMSE$ :

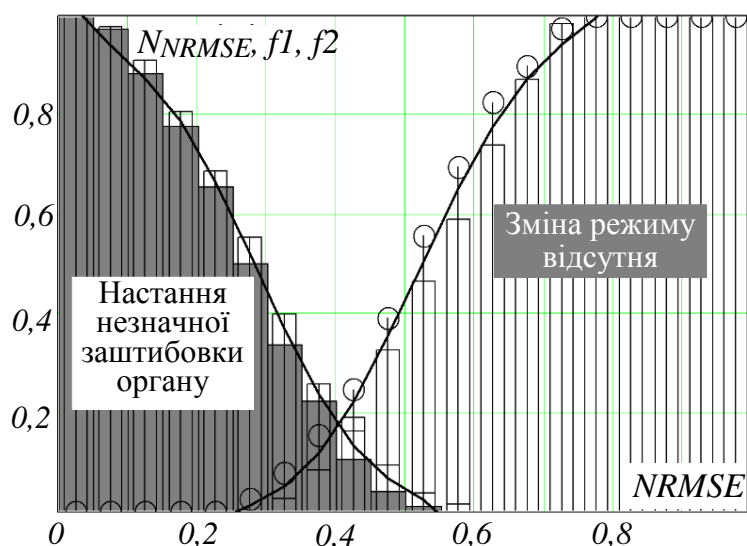


Рис. 6. Гістограми розподілу значень першого інформативного критерію зміни характеристик режиму завантаження вугілля

$$NRMSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N [f1_i - f2_i]^2}{\sum_{i=1}^N [f1_i - \text{mean}(f2)]^2},$$

де  $f1$  та  $f2$  – вибірки, що складаються зі значень функцій, які апроксимують гістограми, відповідно, першої та другої допоміжних вибірок, що сформовані на часових інтервалах з різним знаком частотної складової сигналу навколо двократної частоти обертання органу;  $N$  – довжина вибірок  $f1$  та  $f2$ ;  $\text{mean}(f2)$  – середнє значення за вибіркою  $f2$ .



Для різних гірничо-геологічних умов вугільних пластів та конструктивних параметрів видобувної машини досліджений характер розподілу значень першого критерію для різних ситуацій (рис.6).

Результати дослідження на рис.6 підтверджують ефективність запропонованого критерію, оскільки за умови настання незначної заштибовки та відсутності зміни режиму має місце розподіл значень критерію за різними інтервалами діапазону зміни значень. З метою більш точної ідентифікації характеристик функції належності для відповідних термів вхідної лінгвістичної змінної підсистеми нечіткого керування режимом завантаження вугілля отримані шляхом апроксимації гістограм неперервними функціями (на рис.6 графіки функцій показані суцільними лініями).

З урахуванням встановленої унікальної індикативної події, що дозволяє ідентифікувати протікання заштибовки виконавчого органу видобувної машини, визначений другий чіткий інформативний критерій характеристик режиму завантаження вугілля органом «нормальне завантаження вугілля», «незначна заштибовка виконавчого органу» та «значна заштибовка виконавчого органу» –  $\Delta\theta$ :

$$\Delta\theta(i) = \frac{\sum_{j=0}^2 \frac{|\theta_1(i-j) - \theta_2(i-j)|}{3,14}}{3},$$

де  $i$  – поточний такт роботи підсистеми нечіткого керування;  $\Delta\theta(i)$  – значення другого чіткого інформативного критерію на поточному такті роботи підсистеми нечіткого керування;  $\theta_1(i-j)$  та  $\theta_2(i-j)$  – початкові фази функцій, які апроксимують середньо-частотну складову струму статора двигуна приводу різання, відповідно, на першому та другому сусідніх часових інтервалах, що були  $j$  тактів тому, рад.

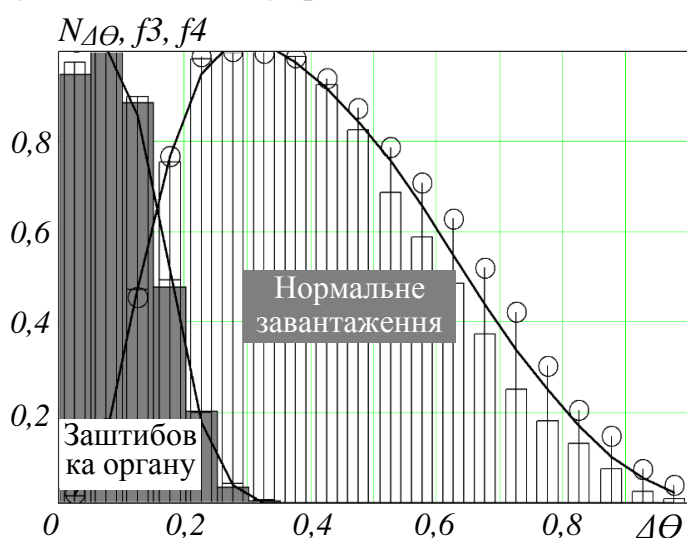


Рис. 7. Гістограми розподілу значень другого інформативного критерію зміни характеристик режиму завантаження

Для різних гірничо-геологічних умов вугільних пластів та конструктивних параметрів видобувної машини досліджений характер розподілу значень другого критерію для різних ситуацій (рис.7). Результати дослідження, що наведені на рис.7, підтверджують ефективність запропонованого критерію, оскільки за умови настання заштибовки органу ранньої чи пізньої стадії та нормального завантаження має місце розподіл значень критерію за різними

інтервалами діапазону зміни значень.

Функції належності  $f3$  та  $f4$  для відповідних термів вхідної лінгвістичної змінної підсистеми нечіткого керування режимом завантаження вугілля для другого критерію отримані шляхом апроксимації гістограм неперервними функціями (їх графіки на рис.7 показані суцільними лініями). З урахуванням встановленої унікальної індикативної події, що дозволяє ідентифікувати настання заштибовки виконавчого органу видобувної машини, визначений третій інформативний критерій зміни усіх характеристик режиму завантаження вугілля виконавчим органом –  $INF\_CR3$ :

$$INF\_CR3 = \begin{cases} 1 & \text{якщо } (X2_{max} < X1_{max} \text{ та } X2_{min} > X1_{min}) \\ & \text{або } (X1_{max} < X2_{max} \text{ та } X1_{min} > X2_{min}); \\ 0 & \text{якщо } X2_{min} \geq X1_{max} \text{ або } X1_{min} \geq X2_{max}; \\ \max\left(\frac{X1_{max} - X2_{min}}{X2_{max} - X2_{min}}, \frac{X1_{max} - X2_{min}}{X1_{max} - X1_{min}}\right), & \text{інакше} \end{cases}$$

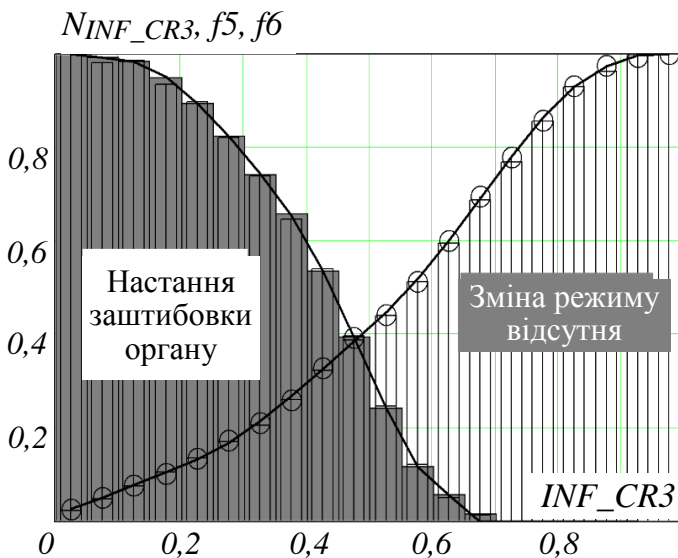


Рис. 8. Гістограми розподілу значень третього інформативного критерію зміни характеристик режиму завантаження вугілля органом

третього інформативного критерію. Результати дослідження (рис.8) підтверджують ефективність даного критерію, оскільки для відсутності зміни режиму завантаження вугілля та настання заштибовки органу має місце розподіл значень критерію за різними інтервалами діапазону зміни значень. Функції належності для відповідних термів вхідної лінгвістичної змінної підсистеми для даного критерію отримані шляхом апроксимації гістограм неперервними функціями, графіки яких наведені на рис.8 суцільними лініями.

База правил нечітких продукцій для підсистеми нечіткого керування режимами завантаження вугілля виконавчим органом створена на основі аналізу дій оператора машини, який інтенсивно збільшує швидкість подачі машини до тих пір, доки не виникне заштибовка органу, з подальшою

де  $X1_{min}$  та  $X1_{max}$  – відповідно, нижня та верхня межі діапазону зміни значень шостого масштабного коефіцієнту для першого часового інтервалу;  $X2_{min}$  та  $X2_{max}$  – відповідно, нижня та верхня межі діапазону зміни значень шостого масштабного коефіцієнту для другого часового інтервалу.

Для різних гірничо-геологічних умов вугільних пластів та конструктивних параметрів видобувних машин досліджений характер розподілу значень

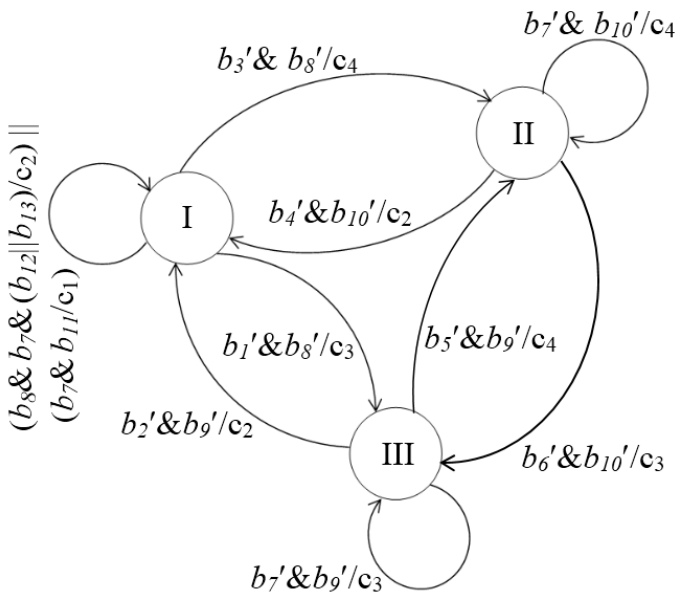


Рис. 9. База правил нечітких продукцій підсистеми керування режимом навантаження вугілля органом

умовами правил нечітких продукцій, які мають складну структуру та складаються з підумов, пов'язаних між собою нечіткими логічними операціями. Дії за умови переходів на графі є підвисновками правил нечітких продукцій.

Підумови переходів на рис.9:  $b_1'$  – перехід від режиму нормального навантаження до незначної заштибовки;  $b_2'$  – перехід від режиму незначної заштибовки до нормального навантаження;  $b_3'$  – перехід від режиму нормального навантаження до значної заштибовки;  $b_4'$  – перехід від режиму значної заштибовки до нормального навантаження;  $b_5'$  – перехід від режиму незначної заштибовки до значної заштибовки;  $b_6'$  – перехід від режиму значної заштибовки до незначної заштибовки;  $b_7'$  – зміна режиму роботи видобувної машини відсутня;  $b_8'$  – наразі перебуваємо у режимі нормального навантаження;  $b_9'$  та  $b_{10}'$  – наразі перебуваємо у режимі, відповідно, незначної та значної заштибовки;  $b_{11}'$  – до цього перебували у режимі нормального навантаження;  $b_{12}'$  та  $b_{13}'$  – до цього перебували у режимі, відповідно, незначної та значної заштибовки.

Дії за умови переходів на рис.9:  $c_1$  та  $c_2$  – відповідно, значне та незначне зменшення швидкості різання машини;  $c_3$  та  $c_4$  – відповідно, незначне та значне збільшення швидкості різання машини.

Незначна величина зміни керуючого сигналу для даної підсистеми визначається на основі встановленого граничного значення величини зміни товщини стружки  $\Delta h_{max.zp}$ , за умови перевищення якого зменшується вірогідність ідентифікації незначної заштибовки:

$$a_1 = n_{об} - \frac{50 \cdot V_n \cdot n_{об}}{n_{об} \cdot \Delta h_{max.zp} + V_n \cdot 50},$$

несуттєвою зміною керуючої величини навколо її критичного значення для балансування на грані заштибовки органу. Базу правил нечітких продукцій зручно представляти графічно у вигляді графу переходів (рис.9), якщо характеристики режимів роботи прийняти за вершини графу (I – нормальне навантаження, II та III – значна та незначна заштибовки виконавчого органу). Дуги графу описують переходи від одної

характеристики режиму роботи гірничої машини до іншої. Умови переходу на графі є одночасно

де  $n_{об}$  – поточна швидкість обертання виконавчого органу, об/хв;  $V_n$  – поточна швидкість подачі видобувної машини, м/хв.

Значна величина зміни керуючого сигналу визначається на основі встановленого граничного значення величини зміни товщини стружки  $\Delta h_{сп}$ , за умови перевищення якого потужність різання починає суттєво впливати на закономірності інформаційного сигналу, за якими проводиться ідентифікація характеристик режиму завантаження вугілля органом, що призводить до зменшення вірогідності правильної ідентифікації характеристик:

$$a_2 = n_{об} - \frac{50 \cdot V_n \cdot n_{об}}{n_{об} \cdot \Delta h_{сп} + V_n \cdot 50}.$$

Таким чином, величина зміни керуючого сигналу, що викликає необхідну зміну характеристик режиму завантаження вугілля органом, є відомою величиною, що залежить від поточних швидкостей різання та подачі машини.

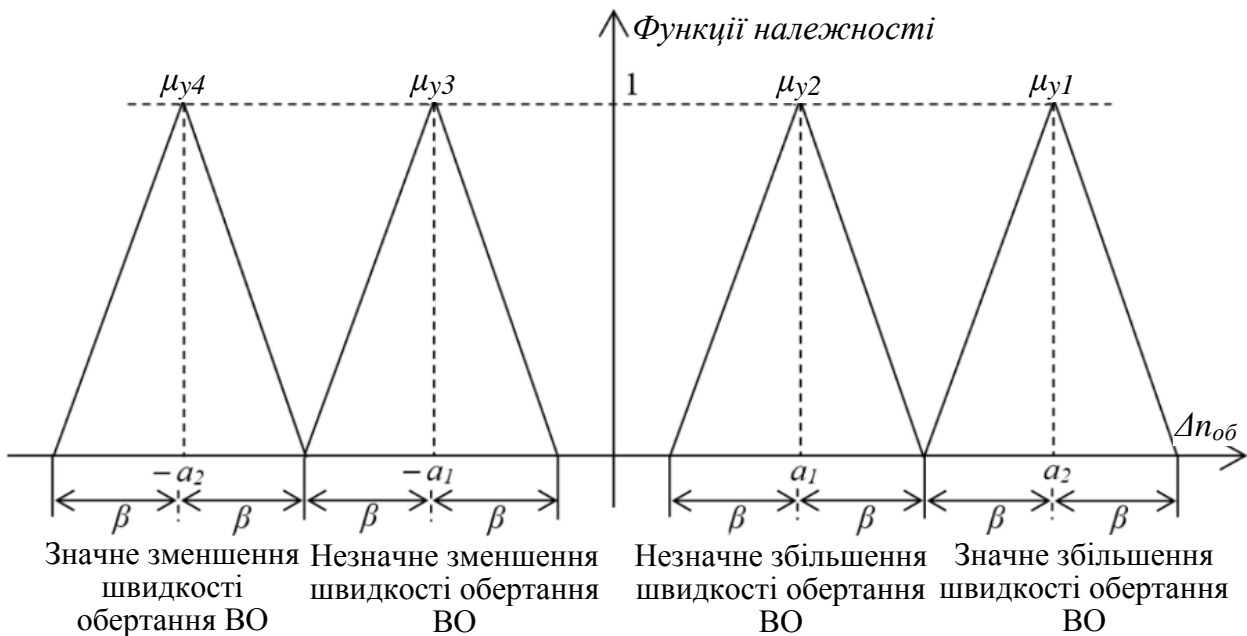


Рис. 10. Графіки функцій належності для термів вихідної величини підсистеми нечіткого автоматичного керування режимом завантаження вугілля й породи виконавчим органом

Тому функції належності для термів вихідної лінгвістичної величини даної підсистеми взяті без перекриття з симетричним розташуванням відносно осі ординат (рис.10).

У **четвертому розділі** виконано дослідження процесів керування режимами роботи видобувної машини, на основі яких створені алгоритми нечіткого виводу для експертних підсистем нечіткого керування окремими режимами роботи машини та алгоритм координованого керування ними.

За результатами досліджень процесу керування режимом двигуна приводу різання існуючими регуляторами навантаження на видобувних

машинах виділені такі характеристики режиму двигуна, як “Недовантаження двигуна” (II), “Нормальне навантаження двигуна” (I) та “Перевантаження двигуна” (III). Індикативною подією для існуючих регуляторів навантаження є відхилення навантаження двигуна від припустимого рівня з урахуванням коливань моменту опору на виконавчому органі, які неможливо компенсувати, що розпізнається за відхиленням фільтрованої від високочастотної та середньочастотної складових активної потужності двигуна  $P_{cp}$  від свого стійкого значення  $P_{cm}$ . З урахуванням цього запропонований інформативний критерій характеристик режимів навантаження двигуна приводу різання –  $INF\_CR4$ :

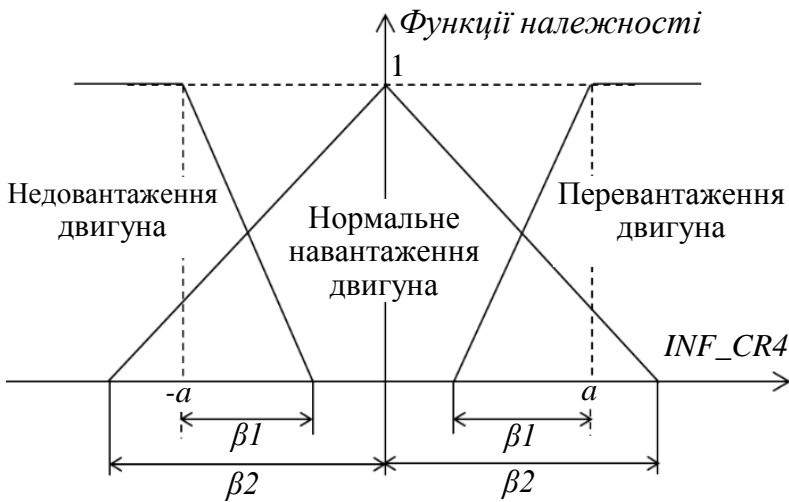


Рис. 11. Графіки функцій належності для термів вхідної величини підсистеми нечіткого керування режимом навантаження двигуна приводу різання

$$INF\_CR4 = \frac{P_{cp.n} - P_{cm}}{P_{cm}} \cdot 100, \%$$

При цьому середнє значення потужності визначається на основі функції, що апроксимує зміну у часі значень середньої потужності на поточному кроці формування керуючого впливу, а стійке значення потужності постійно коригується з урахуванням зміни міцності вугілля вздовж вугільного

пласта за результатом статистичної оцінки характеру розподілу миттєвих відхилень активної потужності від свого середнього значення.

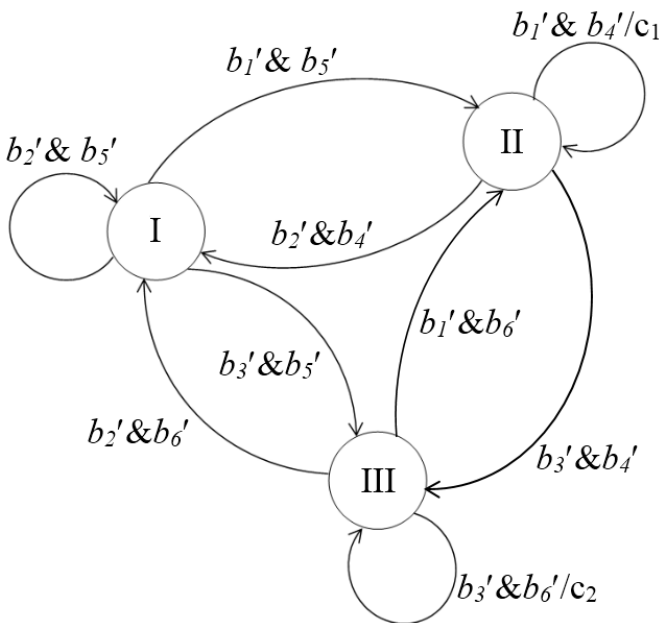


Рис. 12. База правил нечітких продукцій підсистеми керування режимом двигуна приводу різання

Функції належності для термів вхідної величини та їх параметри (рис.11) визначені таким чином, щоб відхилення фактичної середньої потужності від свого стійкого значення були близькі до допустимих значень, але не перевищували їх. Це дало можливість досягти якомога більшого періоду дискретної зміни у часі швидкості подачі машини, що є умовою забезпечення одночасного та узгодженого керування декількома її режимами роботи.

Особливістю запропонованої бази правил для підсистеми

нечіткого керування режимом двигуна приводу різання (рис.12) є те, що підсистема формує керуючий вплив щодо зміни швидкості подачі машини за умови ідентифікації недовантаження або перевантаження двигуна два рази поспіль. Це дає можливість ще більше збільшити період дискретної зміни швидкості подачі без перевищення допустимих значень відхилень потужності від свого стійкого значення, оскільки міцність вугілля змінюється вздовж пласта з періодом, у декілька разів більшим за крок формування керуючого впливу.

Підумови переходів на рис.12:  $b'_1$  та  $b'_3$  – відповідно, недовантаження та перевантаження двигуна;  $b'_2$  – нормальне навантаження двигуна;  $b'_4$  та  $b'_6$  – до цього було, відповідно, недовантаження та перевантаження двигуна;  $b'_5$  – до цього було нормальне навантаження двигуна; Дії за умови переходів на рис.12:  $c_1$  – збільшення швидкості подачі;  $c_2$  – зменшення швидкості подачі.

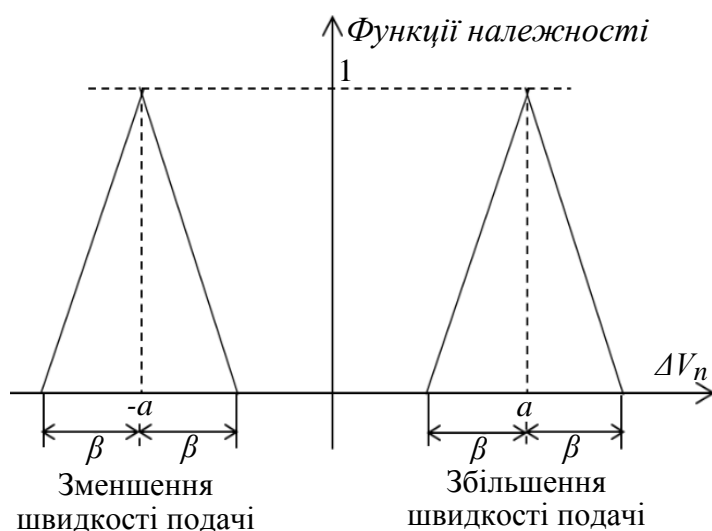


Рис. 13. Графіки функцій належності для термів вихідної величини системи нечіткого автоматичного керування режимом

умови зміни режиму роботи, кВт;  $\tan(\alpha')$  – тангенс нового кута нахилу робочої статичної характеристики видобувної машини.

Тому для процедури дефазифікації прийнята трикутна форма графіків функцій належності для термів вихідної лінгвістичної змінної підсистеми з симетричним розташуванням відносно початку координат та однаковими лівими та правими коефіцієнтами нечіткості  $\beta$  (рис.13).

За результатами досліджень процесу керування режимом руйнування прошарку матеріалу біля покрівлі пласта виділені такі характеристики режиму, як “Руйнування вугілля” (I) та “Руйнування породи” (II). З урахуванням встановленої індикативної події, що дозволяє ідентифікувати настання присікання породи виконавчим органом, визначений інформативний критерій зміни характеристик режиму руйнування матеріалу біля покрівлі пласта –  $INF\_CR5$ :

За умови ідентифікації певної зміни режиму навантаження двигуна приводу різання, є можливість визначити чітку величину зміни швидкості подачі, при якій забезпечується (модальне значення  $a$  функцій належності на рис.13) необхідна зміна характеристики режиму:

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

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

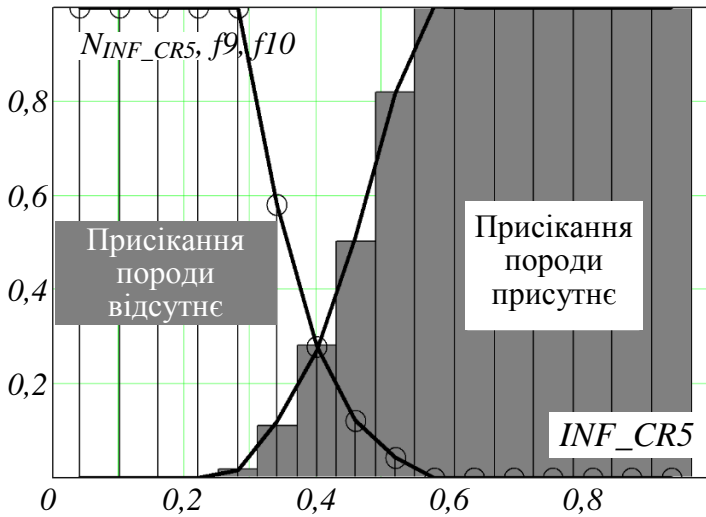


Рис. 14. Гістограми розподілу значень інформативного критерію присікання органом породи біля покрівлі пласта

присікання органом породи біля покрівлі пласта. Результати дослідження (рис. 14) підтверджують ефективність даного критерію, оскільки для відсутності присікання породи органом та його настання має місце розподіл значень критерію за різними інтервалами діапазону зміни значень. Функції належності  $f_9$  та  $f_{10}$  для відповідних термів вхідної лінгвістичної змінної підсистеми отримані через апроксимацію гістограм неперервними функціями, графіки яких наведені на рис. 14 суцільними лініями.

Особливістю запропонованої бази правил для підсистеми нечіткого керування режимом руйнування матеріалу біля покрівлі пласта є те, що підсистема формує керуючий вплив щодо зміни висоти підйому органу за умови ідентифікації присутності або відсутності присікання породи органом два рази поспіль (рис. 15).

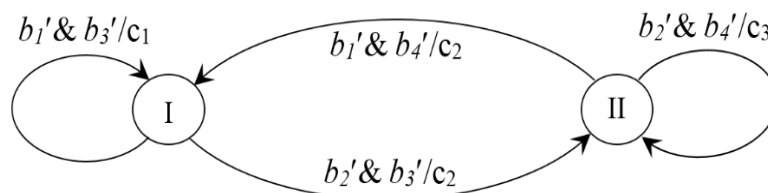


Рис. 15. База правил нечітких продукцій підсистеми керування режимом руйнування виконавчим органом прошарку матеріалу біля покрівлі пласта

Це дає можливість збільшити вірогідність правильної ідентифікації присікання органом породи без погіршення якості відпрацьовування зміни гіпсометрії пласта, оскільки час суттєвої зміни гіпсометрії у декілька разів перевищує крок формування керуючого впливу.

Підумови переходів на рис. 15:  $b_1'$  – присікання породи органом немає;  $b_2'$  – присікання породи органом є;  $b_3'$  та  $b_4'$  – до цього, відповідно, не було та було

$$INF\_CR5 = \frac{|\max(F1(i)) - \max(F2(i))|}{\max(F1(i))}$$

де  $F1(i)$  та  $F2(i)$  – неперервні функції, які є результатами апроксимації, відповідно, першої та другої вибірок інформаційного сигналу на різних етапах підйому органу;  $i$  – змінна для нумерації елементів вибірок.

Для різних гірничо-геологічних умов вугільних пластів та конструктивних параметрів видобувних машин досліджений характер розподілу значень інформативного критерію

присікання органом породи. Дії за умови переходів на рис.15:  $c_1$  – підняти орган;  $c_2$  – положення органу не змінюється;  $c_3$  – опустити орган.

Ідентифікація підсистемою присутності або відсутності присікання органом породи за допомогою запропонованого критерію відбувається тільки за умови перетинання межі порода-вугілля. З метою збільшення вірогідності правильної ідентифікації присікання органом породи величина зміни керуючого впливу прийнята такою, щоб виконавчий орган, навіть за умови постійного підйому або опускання, перебував біля межі 5-7 кроків формування керуючого впливу (рис.16):

$$a=h/7; \beta=a/2,$$

де  $h$  – величина зміни висоти підйому органу для створення індикативної події;  $a$  – модальне значення функцій належності;  $\beta$  – коефіцієнт нечіткості функцій належності.

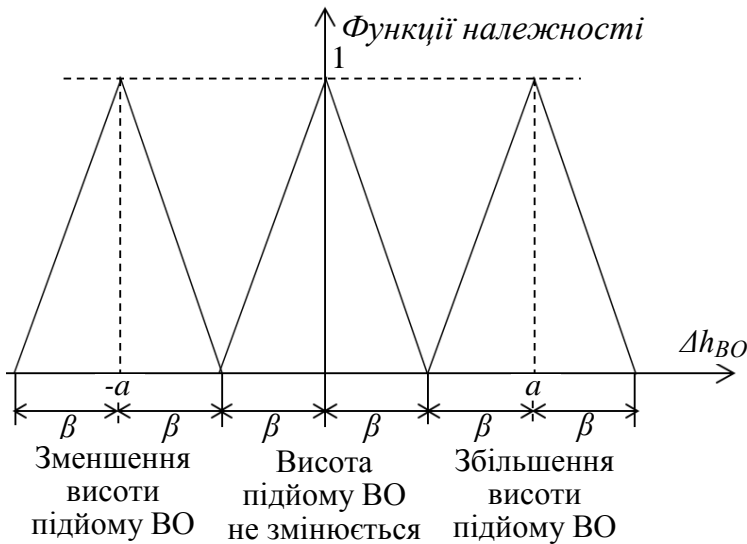


Рис. 16. Графіки функцій належності для термів вихідної величини системи нечіткого автоматичного керування режимом руйнування виконавчим органом прошарку матеріалу біля покрівлі пласта

масиву виділені такі характеристики режиму, як “Енергоефективний режим руйнування” (I) та “Неенергоефективний режим руйнування” (II). Індикативною подією, за якою проводиться ідентифікація характеристик руйнування органом вугільного масиву, є зміна процесу різання вугілля різцями, внаслідок чого відбувається суттєва зміна характеру залежності середніх питомих енерговитрат на руйнування органом масиву від товщини стружки. З урахуванням нестаціонарності цієї залежності через зміну міцності вугілля вздовж забою, як інформативний критерій зміни характеристик даного режиму запропонований відносний показник різності активних потужностей, що усереднені на сусідніх часових інтервалах з завданням на кожному інтервалі різної товщини стружки –  $INF\_CR6$ :

З урахуванням відомої величини керуючого впливу при ідентифікації присутності або відсутності присікання органом породи, функції належності для термів вихідної величини підсистеми прийняті трикутної форми з відсутністю перекриття, симетричним розташуванням відносно осі ординат та рівними коефіцієнтами нечіткості  $\beta$  (рис.16).

За результатами досліджень процесу керування режимом руйнування органом вугільного



$$INF\_CR6 = \frac{P_{cp.1} - P_{cp.2}}{P_{cp.1}},$$

де  $P_{cp.1}$  та  $P_{cp.2}$  – потужність двигуна приводу різання видобувної машини, усереднена, відповідно, на першому та другому часових інтервалах, кВт.

Для різних гірничо-геологічних умов вугільних пластів та конструктивних параметрів видобувних машин досліджений характер розподілу значень інформативного критерію руйнування органом вугільного масиву. Результати дослідження (рис.17) підтверджують ефективність даного критерію, оскільки для енергоефективного та неенергоефективного режимів руйнування масиву має місце розподіл значень критерію за різними інтервалами діапазону зміни значень. Функції належності для відповідних термів вхідної лінгвістичної змінної даної підсистеми отримані шляхом апроксимації гістограм неперервними функціями, графіки яких наведені на рис.17 суцільними лініями.

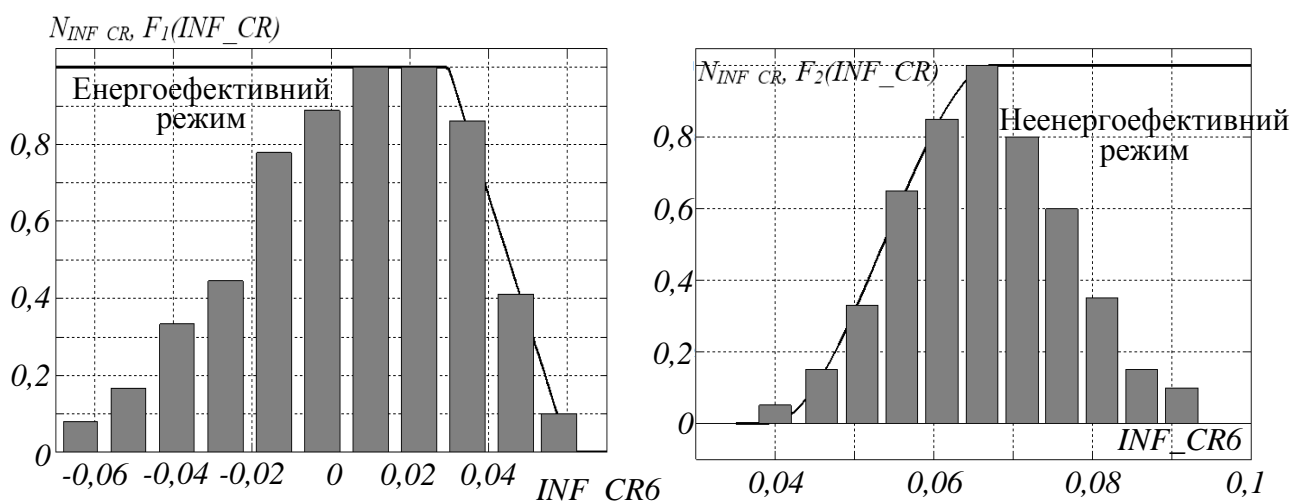


Рис. 17. Гістограми розподілу значень інформативного критерію режиму руйнування масиву

Структура бази правил нечітких продукцій для підсистеми нечіткого керування режимом руйнування масиву вугілля та характер проведення процедури дефазифікації вихідної лінгвістичної змінної підсистеми такі самі, як й у випадку створення алгоритму нечіткого виводу для підсистеми нечіткого керування виконавчим органом за гіпсометрією пласта.

Якщо для керування кожним режимом роботи видобувної машини використовувати запропоновані модифіковані алгоритми нечіткого виводу, будемо мати декілька незалежно працюючих підсистем, що конфліктують одна з одною.

Ця проблема вирішена за рахунок формування правил взаємодії між підсистемами нечіткого керування окремими режимами роботи машини з їх поділом за пріоритетністю та введенням зв'язків між ними, що компенсують вплив підсистем на режими роботи, якими вони не керують. Ці зв'язки введені

через встановлення чітких функціональних залежностей між вихідними змінними підсистем та показані суцільними лініями (рис.18).

Правила взаємодії між підсистемами нечіткого керування (ПНК) окремими режимами роботи видобувної машини передбачають синхронізацію у часі роботи підсистем, коли за умови формування керуючих впливів головними підсистемами підпорядковані підсистеми переводяться на початок циклу зміни станів без формування керуючих впливів, а за умови однакової пріоритетності підсистеми формують керуючий вплив по чергову. Взаємні впливи підсистем за описаними правилами їх взаємодії показані пунктирними лініями (рис.18). Пріоритет підсистем обґрунтований на основі аналізу ступеню їх впливу на основні критерії ефективності роботи машини – продуктивність, зольність вугілля, ступінь його здрібнення, та питомі енерговитрати на видобуток вугілля.

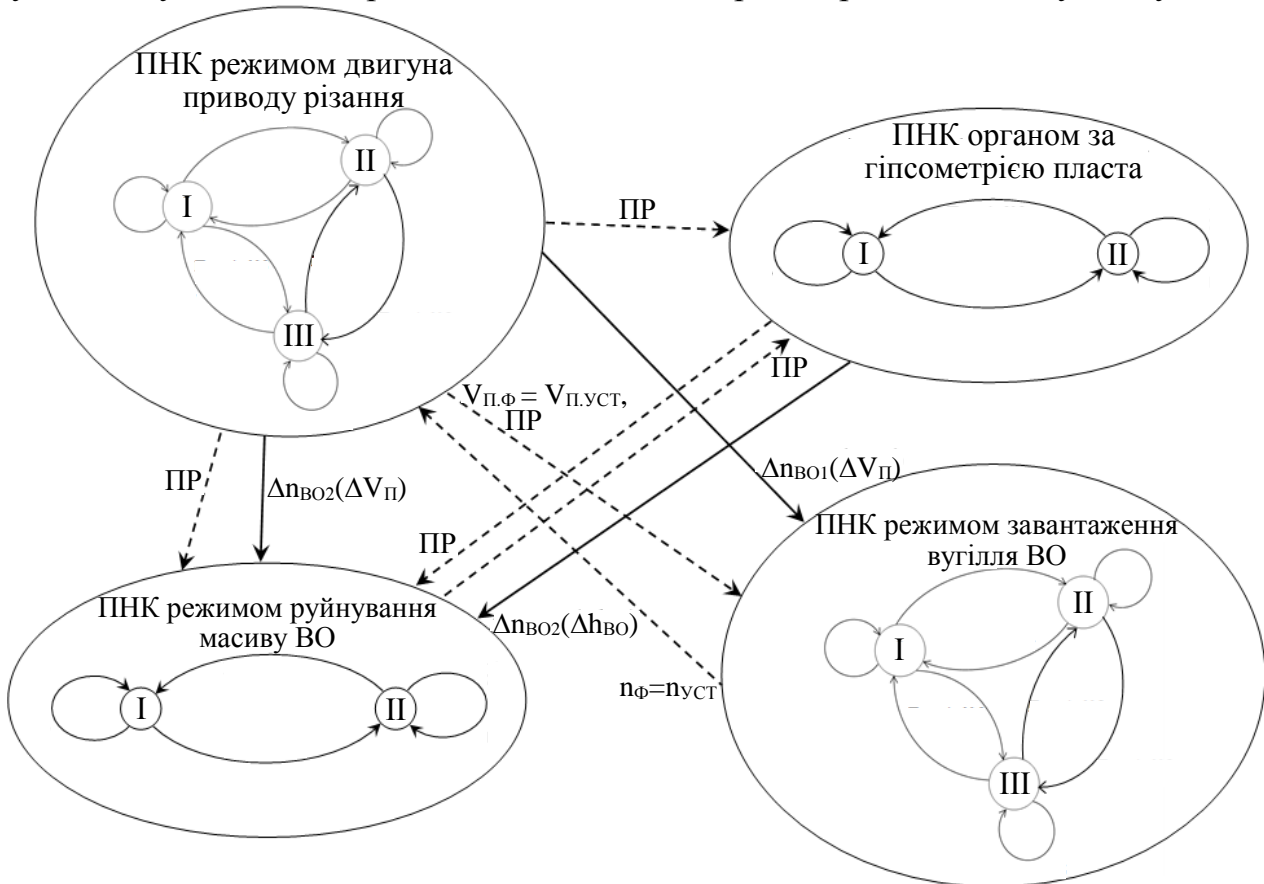


Рис. 18. Схема алгоритму координованого керування підсистемами нечіткого керування режимами роботи видобувної машини як мехатронного агрегата

У п'ятому розділі виконано дослідження ефективності процесу керування режимами роботи видобувної машини за умови використання запропонованої керуючої компоненти у порівнянні з існуючими способами керування.

За результатами обчислювального експерименту встановлено:

- при керуванні режимом роботи двигуна приводу різання використання запропонованої керуючої компоненти у порівнянні з існуючими регуляторами навантаження призводить до погіршення статистичних показників відхилення фактичної потужності двигуна приводу різання від свого стійкого значення на

20-30%, але вони не перевищують допустимий рівень. При цьому середня продуктивність видобувної машини збільшується на 10%. Це відбувається завдяки постійному коригуванню стійкого значення потужності двигуна, у той час, як в регуляторах навантаження стійка потужність залишається незмінною та розрахована для найгіршого випадку (ділянки пласта з міцним вугіллям);

- при керуванні режимом завантаження вугілля органом використання запропонованої керуючої компоненти у порівнянні з існуючою ситуацією на шахтних підприємствах, коли двигун приводу різання є нерегульованим, а оператор реагує на заштибовку органу із запізненням, призводить до зменшення питомих енерговитрат у 2,1 рази, а кількості штибу – у 1,5 рази за рахунок запобігання значної заштибовки органу;

- при керуванні режимом руйнування прошарку матеріалу біля покрівлі пласта використання запропонованої керуючої компоненти у порівнянні з керуванням органом за гіпсометрією пласта оператором призводить до зменшення величини присікання породи у 2,5-3 рази, за рахунок чого зольність вугілля стає практично рівною материнській зольності пласта, у той час, як керування органом оператором збільшує зольність вугілля на 12-16%;

- при керуванні режимом руйнування вугільного пласта використання запропонованої керуючої компоненти у порівнянні з нерегульованим двигуном приводу різання призводить до зменшення питомих енерговитрат на руйнування вугільного масиву у 1,5 рази, а кількість штибу – на 11,3% за рахунок запобігання неенергоєфективного режиму різання масиву різцями.

З урахуванням результатів обчислювального експерименту проведена оцінка ефективності довгострокового проекту впровадження результатів наукових досліджень на основі динамічних показників економічної ефективності. Аналіз економічної ефективності показав, що через значний річний обсяг видобутку вугілля з використанням видобувної машини навіть незначне підвищення вартості вугілля через покращення його якісних показників (зольності на 12%) або продуктивності машини (+10%), які досягаються за рахунок впровадження результатів наукових досліджень, призводить до суттєвого річного прибутку (до 85 млн. грн.), що у десятки разів перевищує разові витрати на впровадження (біля 6 млн грн.).

Для перевірки адекватності створеної комплексної моделі видобувної машини щодо характеристик формування керуючих впливів підсистемами нечіткого керування режимами роботи машини для однакових умов проведені активні фізичні експерименти на основі створеного лабораторного стенду та обчислювальні експерименти на основі моделі. Шляхом підтвердження статистичних гіпотез щодо рівності середніх значень та дисперсій вибірок з відносних відхилень за модулем чітких вихідних змінних підсистем від їх істинних значень, що отримані протягом обчислювального та фізичного експериментів, з рівнем значимості 0,05 доведена адекватність моделі щодо імітування характеру формування керуючих впливів підсистемами нечіткого керування режимами роботи видобувної машини.

За умови впровадження запропонованої керуючої компоненти видобувної машини у структурі системи керування машиною наряду з нижнім рівнем, який фактично є інформаційно-електронною компонентою та складається з чотирьох локальних систем автоматичного керування швидкостями обертання органів, подачі машини та висоти підйому виконавчого органу, з'являється верхній рівень у вигляді керуючої компоненти (рис.19). Програмне забезпечення керуючої компоненти реалізує запропоновані у дисертації алгоритми визначення інформативних критеріїв (ІК) зміни характеристик режимів роботи машини, а також алгоритми нечіткого виводу уставок для регуляторів (рис.19).

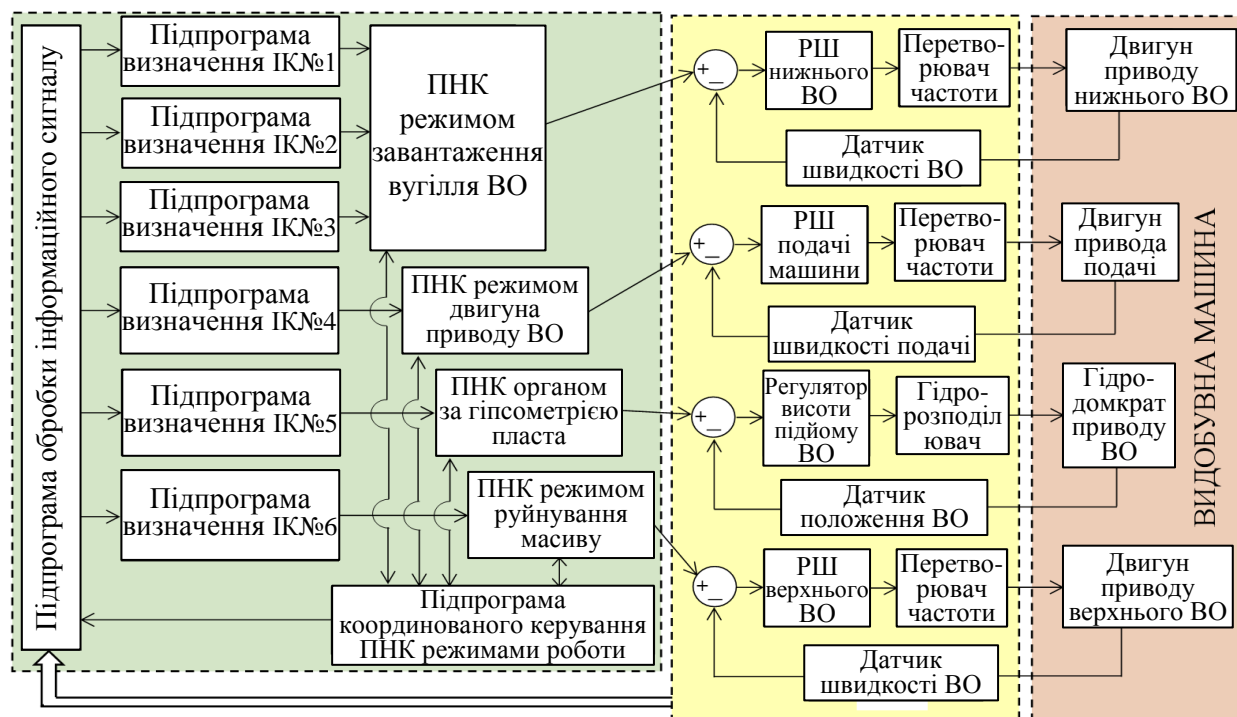


Рис. 19. Структурна схема системи керування видобувною машиною: ВО – виконавчий орган; ПНК – підсистема нечіткого керування; РШ – регулятор швидкості

У **додатках** описані відомі математичні моделі, на основі яких створена комплексна модель видобувної машини, наведені результати фазифікації інформативних критеріїв характеристик режимів роботи машини, описані результати обчислювальних експериментів роботи машини та лабораторний стенд для фізичного моделювання процесів різання й завантаження вугілля органом машини, проведене обґрунтування економічної ефективності впровадження результатів наукових досліджень.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі, яка є завершеною науково-дослідною роботою, вирішена важлива наукова проблема розробки наукових основ автоматизації процесів керування видобувними машинами шляхом одночасного, узгодженого та нечіткого керування декількома конструктивними підсистемами машини через синхронізацію дискретної зміни у часі станів підсистем керування та

компенсацію їх впливів на режими роботи, якими вони не керують, за допомогою встановлених залежностей між їх вихідними чіткими величинами.

Виконані у даній дисертаційній роботі дослідження дали змогу зробити наступні висновки щодо результатів роботи:

1. Встановлено, що в існуючих способах автоматизації процесів керування видобувними машинами здійснюється керування їх окремими конструктивними підсистемами без врахування присутності складних перехресних зв'язків між ними, що властиво для цих машин. З урахуванням цього, розроблені теоретичні основи для переходу від вузько орієнтованих на окремі конструктивні підсистеми систем керування до узагальненого й узгодженого керування усіма підсистемами, що дозволило отримати новий, більш якісний результат у вирішенні проблеми автоматизації процесів керування видобувними машинами.

2. Встановлено, що для автоматизації процесу керування видобувною машиною необхідно одночасно керувати трьома режимами роботи машини – режимом роботи двигуна приводу різання, режимом транспортування й завантаження виконавчим органом зруйнованого матеріалу та режимом руйнування органом вугільного масиву та прошарку породи або вугілля біля покрівлі пласта. Розкладання кожного з цих режимів на сукупність характеристик, що його уточнюють, з визначенням умов зміни характеристик та відповідних дій дозволило впровадити нечітке керування режимами роботи, що є необхідною умовою автоматизації процесу керування машиною через неможливість однозначно ідентифікувати процеси в конструктивних підсистемах.

3. За умови швидкого дискретного вейвлет-перетворення струму статора електродвигуна приводу різання видобувної машини встановлені залежності характерів розподілу значень вейвлет- та масштабних коефіцієнтів від об'єму циркулюючого вугілля у робочому просторі виконавчого органу, які дозволяють ідентифікувати три різні характеристики режиму завантаження вугілля органом видобувної машини, – нормальне завантаження вугілля та завантаження з незначною і значною заштибовкою. Як інформативні критерії цих характеристик запропоновані відносні ступені відмінності графіків функцій, що апроксимують гістограми розподілу значень вейвлет- і масштабних коефіцієнтів на послідовних часових інтервалах.

4. Встановлено, що поява на другому етапі при двоетапному східчастому переміщенні виконавчого органу видобувної машини у вертикальній площині присікання породи з відмінністю опірності різанню у порівнянні з вугіллям на 14% й більше призводить до суттєвої зміни амплітуди коливань струму статора двигуна приводу різання у діапазоні частот від 3 до 6,5 Гц. Це дозволило виділити такі характеристики режиму руйнування матеріалу біля покрівлі пласта органом, як “руйнування біля покрівлі пласта прошарку вугілля” та “руйнування біля покрівлі пласта прошарку породи”. Як інформативний критерій цих характеристик запропонований ступінь розбіжності максимальних

значень графіків функцій, що апроксимують зміну у часі струму статора у діапазоні частот від 3 до 6,5 Гц на окремих етапах переміщення органу.

5. Для керування режимами роботи видобувної машини розроблені алгоритми нечіткого виводу, що мають наступні особливості:

- як функції належності термів для вхідних лінгвістичних величин використані Z та S-подібні функції, які визначені у результаті апроксимації гістограм розподілу значень інформативних критеріїв характеристик режимів роботи видобувної машини, що дозволяє збільшити вірогідність правильної ідентифікації процесів у її конструктивних підсистемах;

- average-агрегування підумов бази правил підсистем нечіткого керування режимами роботи видобувної машини проводиться не за функціями належності, а за вибіркою, що сформована зі значень функцій належності на поточному та попередніх кроках формування керуючих впливів підсистемою, з виділенням максимального чи мінімального елемента вибірки в залежності від підумови, що дозволяє підсистемам формувати керуючі впливи одразу за декількома інформативними критеріями, незважаючи на те, що зміна характеристик режиму фіксувалася у різні моменти часу;

- в алгоритм нечіткого виводу через додаткові правила нечітких продукцій введена умова, що реалізує закономірність зменшення інтенсивності зміни вихідної чіткої величини підсистеми з наближенням до раціональних значень показників ефективності роботи видобувної машини, що дозволяє збільшити час ефективної роботи машини;

- в алгоритм нечіткого виводу введена додаткова умова зміни керуючого впливу підсистемами нечіткого керування, коли зміна характеристик режимів роботи машини ідентифікована два рази поспіль. Завдяки цьому зменшується вірогідність неточної ідентифікації характеристик режимів роботи машини.

6. Встановлено, що через змінні умови роботи видобувної машини параметри функцій належності термів за умови дефазифікації вихідних величин підсистем повинні бути змінними величинами, які залежать від поточних значень швидкостей подачі машини й обертання виконавчих органів, потужностей двигунів приводів різання та їх відхилень від стійкого значення потужності, що дозволяє забезпечити виконання висновків правил нечітких продукцій підсистем нечіткого керування щодо змін режимів роботи машини.

7. Розроблено новий алгоритм координованого керування підсистемами нечіткого автоматичного керування режимами роботи видобувної машини, що дозволив забезпечити сумісну та узгоджену роботу підсистем керування за умови присутності взаємного впливу. Алгоритм заснований на розподіленні у часі процедур формування вибірок інформаційних сигналів та формування керуючих впливів з додаванням процедури повернення підпорядкованої підсистеми на початок циклу зміни станів без зміни керуючого впливу за умови зміни керуючого впливу підсистемою з більшим пріоритетом на поточний момент. При цьому з метою компенсації взаємного впливу підсистем одночасно

відбувається коригування чітких вихідних змінних підпорядкованих підсистем нечіткого керування в залежності від величини зміни чіткої вихідної змінної більш пріоритетної підсистеми.

8. У результаті експериментів з використанням комплексної імітаційної моделі видобувної машини та експериментального стенду для фізичного моделювання процесів руйнування вугільного масиву виконавчим органом та завантаження ним вугілля встановлено, що:

- впровадження підсистеми нечіткого автоматичного керування режимами роботи двигунів приводів різання за рахунок постійного коригування стійкого значення потужності двигуна дозволяє збільшити продуктивність машини у середньому на 10% у порівнянні з існуючим регулятором навантаження двигунів;

- впровадження підсистеми нечіткого автоматичного керування режимом транспортування й завантаження вугілля й породи виконавчим органом за рахунок запобігання заштибовки органу дозволяє зменшити питомі енерговитрати на видобуток вугілля у середньому на 50 %, а питому кількість штибу серед вугілля – на 34% у порівнянні з дистанційним керуванням машиною оператором;

- впровадження підсистеми нечіткого автоматичного керування верхнім виконавчим органом за гіпсометрією пласта за рахунок запобігання присікання породи дозволяє зменшити зольність вугілля у середньому на 14%, а питомі енерговитрати на руйнування масиву вугілля – на 42% у порівнянні з дистанційним керуванням машиною оператором;

- впровадження підсистеми нечіткого автоматичного керування режимом руйнування вугільного пласта виконавчим органом за рахунок запобігання щілинного виду різання масиву вугілля різцями органу дозволяє зменшити питомі енерговитрати на різання вугілля різцями, в залежності від потужності пласта, на 10 – 50 %, а питому кількість штибу серед вугілля – у середньому на 11% у порівнянні з нерегульованою швидкістю обертання виконавчих органів.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

### *Монографії:*

1. Використання імітаційного моделювання для дослідження системи автоматичного керування видобувним комбайном: монографія / В.В. Ткачов, А.В. Бубликов. – Дніпро: НГУ, 2015. – 182 с.

2. Бубликов А. В. Розумні теплові поля: монографія / А.В. Бубликов, О.М. Заславський, С.М. Проценко, В.В. Ткачов ; М-во освіти і науки України, НТУ «Дніпровська політехніка». – Дніпро, НТУ, 2018. – 180 с.

### *Статті у періодичних фахових виданнях України:*

3. Бубликов А. В. Способ уменьшения удельных энергозатрат угольных комбайнов на тонких пластах / А. В. Бубликов // Збірник наукових праць НГУ. – 2011. – № 36(Т.1). – С. 45–51.

4. Бубликов А. В. Идентификация процесса заштыбовки шнека добычных комбайнов на тонких пластах сложного строения / А.В. Бубликов, Н. И. Стадник // Наукові праці Донецького національного технічного університету : загальнодержавний наук. зб. – Донецьк : ДонНТУ, 2013. – Вип. 25. – С. 161 – 175.
5. Бубликов А. В. Идентификация процесса заштыбовки шнека добычных комбайнов на основе статистического анализа мощности электродвигателя привода резания / А. В. Бубликов // Гірничя електромеханіка та автоматика : наук.-техн. зб. – Д. : НГУ, 2013. – Вип. 90. – С. 53 – 57.
6. Бубликов А. В. Исследование переходных процессов в системе автоматического управления добычным комбайном в режиме стабилизации скорости подачи / А. В. Бубликов // Збірник наукових праць НГУ. – Дніпро, 2013. – № 40. – С. 91–97.
7. Бубликов А. В. Энергоэффективный способ автоматизации режимов работы добычных комбайнов на тонких пластах / А. В. Бубликов // Збірник наукових праць НГУ. – Дніпро, 2013. – № 41. – С. 58–64.
8. Бубликов А. В. Исследование переходных процессов в системе автоматического управления перемещением исполнительного органа проходческого комбайна / А. В. Бубликов // Збірник наукових праць НГУ – Д. : НГУ, 2014. – № 45. – С. 120 – 129.
9. Бубликов А. В. Розрахунок та дослідження системи автоматичного керування видобувним комбайном в режимі стабілізації потужності електродвигуна приводу різання / А. В. Бубликов // Гірничя електромеханіка та автоматика : наук.-техн. зб. – Д. : НГУ, 2014. – Вип. 93. – С. 61 – 67.
10. Бубликов А. В. Дослідження технологічних взаємозв'язків гірничих машин очисного механізованого комплексу для видобутку вугілля / А.В. Бубликов, П.Ю. Огеєнко // Збірник наукових праць НГУ. – Дніпро, 2015. – №49. – С. 130-148.
11. Bublikov A. V. Control strategy for a mobile platform with an omnidirectional drive / A. V. Bublikov, G. Gruhler, I.A. Gorlach, G. Sawood // Науковий вісник НГУ. – Дніпро, 2015. – №2. – С. 84–90 (Входить до н.-м. бази «**Scopus**»).
12. Бубликов А. В. Идентификация разрушаемого материала резцами шнека добычного комбайна на основе амплитуды периодической составляющей мощности электродвигателя привода резания / А. В. Бубликов, П. Ю. Огеенко, Р. А Мазур // Гірничя електромеханіка та автоматика : наук.-техн. зб. – Д. : НГУ, 2016. – Вип. 96. – С. 70 – 75.
13. Бубликов А. В. Алгоритм керування обігрівачами за критерієм максимальної синхронізації їх роботи / А. В. Бубликов, С. М. Проценко, О. В. Карпенко, Р. А. Мазур // Збірник наукових праць НГУ. – Дніпропетровськ, 2017. – №50. – С. 252-262.
14. Бубликов А. В. Експертна система нечіткого автоматичного керування видобувним комбайном як частина мехатронної системи / А. В. Бубликов // Гірничя електромеханіка та автоматика : наук.-техн. зб. – Д. : НГУ, 2016. – Вип. 97. – С. 41 – 48.



15. Бубліков А. В. Обґрунтування інформативних критеріїв для експертної системи нечіткого автоматичного управління електромеханічними технологічними комплексами / А. В. Бубліков, В. М. Куваєв // Теорія і практика металургії. – Дніпро, 2017. – №3-4. – С. 147-153.

16. Бубліков А. В. Модифікований алгоритм автоматичного керування електричним опаленням із синхронізацією роботи обігрівачів у часі / А. В. Бубліков, В. В. Надточий // Збірник наукових праць НГУ. – Дніпропетровськ, 2018. – №53. – С. 183-193.

17. Бубліков А. В. Алгоритм фазифікації вхідної величини системи нечіткого автоматичного керування видобувним комбайном на основі гістограм розподілу значень / А. В. Бубліков // Збірник наукових праць НГУ. – Дніпро, 2018. – №56. – С. 199 – 209.

18. Бубликов А.В. Створення бази правил для системи нечіткого автоматичного керування видобувним комбайном за критерієм мінімальних питомих енерговитрат / А.В. Бубликов // Гірнична електромеханіка та автоматика : наук.-техн. зб. – Д. : НГУ, 2018. – Вип. 100. – С. 103 – 108.

19. Bublikov A. Automation of the control process of the mining machines based on fuzzy logic / A.Bublikov, V.Tkachov // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. – 2019. – №3. – Pp. 112–118 (Входить до н.-м. бази «**Scopus**»).

20. Бубліков А. В. Алгоритм фазифікації вхідної величини системи нечіткого автоматичного керування виконавчим органом видобувного комбайна за гіпсометрією вугільного пласта / А. В. Бубліков // Збірник наукових праць НГУ. – Дніпро, 2019. – №57. – С. 114-129.

21. Бубліков А.В. Створення баз правил для систем нечіткого автоматичного керування режимами роботи видобувного комбайна / А.В. Бубліков // Гірнична електромеханіка та автоматика : наук.-техн. зб. – Д. : НГУ, 2019. – Вип. 101. – С. 43 – 50.

22. Бубліков А. В. Система нечіткого автоматичного керування режимом роботи двигуна приводу різання видобувного комбайну / А. В. Бубліков // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2019. – № 30(106). – С. 152–169.

*Статті у закордонних виданнях:*

23. Bublikov A. Development of the algorithm for the automated synchronization of energy consumption by electric heaters under condition of limited energy resource / A. Bublikov, V. Tkachov, G. Gruhler, A. Zaslavski, S. Protsenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2018. – Vol.2, 8 (92). – Pp. 50–61. doi: 10.15587/1729-4061.2018.126949 (Входить до н.-м. бази «**Scopus**»).

24. Bublikov A. V. Control automation of shearers in term of auger gumming criterion / A. V. Bublikov, V.V. Tkachov, M.L. Isakova // Energy efficiency improvement of geotechnical systems – Dnipropetrovs'k : Taylor & Francis Group, 2013. – Pp. 137-145 (Входить до н.-м. бази «**Scopus**»).

25. Bublikov A. V. Automated stabilization of loading capacity of coal shearer screw with controlled cutting drive / A. V. Bublikov, V.V. Tkachov, G. Gruhler //

Theoretical and Practical Solutions of Mineral Resources Mining. – Dnipro : Taylor & Francis Group, 2015. – Pp. 465–477 (Входить до н.-м. бази «Scopus»).

26. Bublikov A. Automatic control of coal shearer providing effective use of installed power / A. Bublikov, V. Tkachev, N. Stadnik // Power Engineering Control & Information Technologies – Dnipro : Taylor & Francis Group, 2015. – Pp. 73–87.

*Патенти:*

27. Патент на корисну модель № 121870 Україна. Спосіб керування електричними нагрівальними пристроями і система для його реалізації/ В.В. Ткачов, О.М. Заславський, С.М. Проценко, А.В. Бубліков – № U201702341, Заявлено 13.03.2017; Опубл. 26.12.2017, Бюл.№24, 2017.

*Тези доповідей:*

28. Bublikov A. V. Research into the operating modes of cutter-loaders on thin beds with the view to reduce specific energy consumption / A. V. Bublikov, V. V. Tkachev, G. Gruhler,, T.Y. Vvedenska // Scientific reports on resource issues (materials of 3th Protodyakonov Colloquium in October 2010 in Dnepropetrovsk) / Medienzentrum der TU Bergakademie Freiberg – Technische University Bergakademie Freiberg, Germany. – Freiberg, 2012. – Vol. 2. – Pp. 60-66 (Дніпро, 21–25 жовтня 2010 р.).

29. Бубликов А. В. Автоматическое управление добычным комбайном в режиме стабилизации скорости подачи / А. В. Бубликов // Проблемы использования информационных технологий в сфере образования, науки и промышленности : X науч. междунар. конф. : Сб. науч. тр. Нац. горн. ун-та. – Дніпро, 2013. – С. 98 – 104 (Дніпро, 30–31 січня. 2013 р.).

30. Бубліков А. В. Імітаційне моделювання фізичних процесів в приводі різання очисних комбайнів / А. В. Бубліков // Математичне та імітаційне моделювання систем : VIII міжнар. науково-практ. конф. : тези допов. / Чернігівський державний технологічний університет. – Чернігів, 2013. – С. 100 – 104 (Чернігів, 24–28 червня 2013 р.).

31. Бубликов А. В. Обоснование энергоэффективного алгоритма автоматического управления добычным комбайном / А. В. Бубликов // Автоматика-2013 : XX Міжнародна конференція з автоматичного керування: тези допов. / Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. – Миколаїв, 2013. – С. 184 – 185 (Миколаїв, 25–27 вересня 2013 р.).

32. Бубліков А. В. Дослідження перехідних процесів в системі автоматичного керування потужністю електродвигуна приводу різання видобувного комбайна / А. В. Бубліков // Проблеми розвитку впровадження інформаційних технологій у наукову та інноваційну сфери освіти: матеріали XI міжнар. конф., 25 листоп. 2014 р. – м. Дніпро, 2014. – С. 16-17 (Дніпро, 25–26 січня 2013 р.).

33. Бубліков А. В. Алгоритм синхронізації споживачів електроенергії за часом із їх розподілом на “основну групу” та “чергу” / А. В. Бубліков, С.Н. Проценко, О.В. Карпенко // Контроль і керування в складних системах (КУСС-2016) : тези доповідей XIII Міжнародної конференції / М-во осв. і наук.

України, Вінницький національний технічний університет, Українська асоціація з автоматичного керування та ін. – Вінниця : ВНТУ. ПП «ТД Едельвейс», 2016. – С. 201 – 203 (Вінниця, 3–6 жовтня 2016 р.).

34. Бубліков А. В. Підхід щодо автоматизації режимів роботи вугільних видобувних комбайнів / А. В. Бубліков // Проблеми використання інформаційних технологій в освіті, науці та промисловості : XII міжнародна конференція. – Д. : Національний гірничий університет, 2017. – С. 33–35 (Дніпро, 23–24 листопада 2016 р.).

35. Бубліков А. В. Обґрунтування структури моделі нечіткої системи автоматичного управління видобувним комбайном / А. В. Бубліков // Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС 2017 : тези доповідей Дванадцятій міжнародної науково-практичної конференції / М-во осв. і наук. України, Нац. Акад. наук України, Академія технологічних наук України, Інженерна академія України та ін. – Чернігів : ЧНТУ, 2017. – С. 172 – 175 (Чернігів, 26–29 червня 2017 р.).

36. Бубліков А. В. Обґрунтування закономірностей інформативних сигналів для ідентифікації режимів роботи видобувних комбайнів як мехатронних систем / А. В. Бубліков, В.В. Надточий // Проблеми використання інформаційних технологій в освіті, науці та промисловості. XIII міжнародна конференція. – Д. : НТУ «Дніпровська політехніка», 2018. – С. 80–84 (Дніпро, 23–24 листопада 2017 р.).

## АНОТАЦІЯ

**Бубліков А.В. Автоматизація процесів керування видобувними машинами на основі алгоритмів нечіткого виводу. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – Автоматизація процесів керування. – Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, 2020.

Дисертацію присвячено вирішенню важливої наукової проблеми розробки наукових основ автоматизації процесів керування видобувними машинами шляхом одночасного, узгодженого та нечіткого керування декількома конструктивними компонентами машини через синхронізацію дискретної зміни у часі станів підсистем керування та компенсацію їх впливів на режими роботи, якими вони не керують, за допомогою встановлених залежностей між їх вихідними чіткими величинами. У дисертації обґрунтовані режими роботи видобувних машин, від яких залежать рішення оператора щодо керування окремими компонентами, та запропоновані характеристики режимів, що їх уточнюють. За умови створення експертних правил нечітких продукцій для кожного режиму роботи видобувної машини визначені умови зміни характеристик та дії, при яких забезпечуються траєкторії зміни характеристик у часі, які відповідають роботі машини з раціональними технологічними та

економічними показниками. З метою ідентифікації характеристик режимів роботи видобувної машини встановлені нові закономірності зміни у часі струмів статорів та активних потужностей двигунів приводів різання, що є унікальними для певних характеристик режимів роботи машини та їх зміни. Розроблений алгоритм координованого керування експертними підсистемами нечіткого керування режимами роботи видобувної машини, заснований на розподіленні у часі процедур формування керуючих впливів підсистемами.

**Ключові слова:** ефективність видобутку вугілля, експертна система, мехатронний підхід, автоматизація процесів керування, видобувна машина, математичне моделювання, стендові дослідження.

### **АННОТАЦІЯ**

**Бубликов А. В. Автоматизация процессов управления добычными машинами на основе алгоритмов нечеткого вывода. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.07 – Автоматизация процессов управления. – Национальный технический университет «Днепровская политехника», Днепро, 2020.

Диссертация посвящена решению важной научной проблемы разработки научных основ автоматизации процессов управления добычными машинами путем одновременного, согласованного и нечеткого управления несколькими конструктивными компонентами машины через синхронизацию дискретного изменения во времени состояний подсистем управления и компенсацию их влияния на режимы работы, которыми они не управляют, с помощью установленных зависимостей между их выходными четкими величинами.

В результате анализа существующих способов автоматизации горных машин установлено, что в настоящее время отсутствует методика создания систем автоматического управления современными горными машинами как мехатронными агрегатами, в которых на основе синергетического подхода объединены несколько компонент с разной физической природой и принципом функционирования.

С целью исследования процессов управления добычной машиной как мехатронным агрегатом на основе мехатронного подхода создана обобщенная математическая модель добычной машины, в которой, с учетом синергетического объединения составляющих машины, имеющих различную физическую природу, выделено пять компонент: информационно-электронную, электротехническую, механическую, гидравлическую, а также геотехническую систему «горный массив - забойный конвейер». В качестве шестой предложено использовать управляющую компоненту, на основе которой решается проблема автоматизации процессов управления добычной машиной как мехатронным агрегатом за счет обеспечения принципиально новых режимов работы машины,

которые невозможно достичь при независимом и локальном управлении отдельными компонентами.

В диссертации обоснованы режимы работы добычных машин, от которых зависят решения оператора при управлении отдельными компонентами, и предложены характеристики режимов, которые их уточняют. При этом установлены новые закономерности изменения во времени токов статора и мощностей двигателей приводов резания, которые являются уникальными для определенных характеристик режимов работы машины и позволяют их идентифицировать. Предложены информативные критерии для выявления этих закономерностей в информационном сигнале при его дискретном вейвлет-преобразовании.

На основе алгоритмов нечеткого вывода разработаны экспертные подсистемы для управления отдельными конструктивными компонентами добычной машины с обеспечением их одновременной и согласованной работы. При создании экспертных правил нечетких продукций для каждого режима работы добычной машины определены условия изменения характеристик режимов работы и действия, обеспечивающие траектории изменения характеристик во времени, соответствующих рациональной работе машины.

Разработан алгоритм координированного управления экспертными подсистемами нечеткого автоматического управления режимами работы добычной машины, который делает возможной совместную и согласованную работу подсистем при достижении каждой из них траектории изменения характеристик режимов, соответствующей рациональной работе машины. В основе алгоритма лежат правила взаимодействия между подсистемами с их разделением по приоритетности и созданием связей между ними, компенсирующих влияние подсистем на режимы работы, которыми они не управляют. Эти связи созданы путем установления функциональных зависимостей между четкими выходными переменными подсистем.

В диссертации исследована эффективность формирования управляющих воздействий предложенными подсистемами нечеткого автоматического управления режимами работы добычной машины. На основе базовых критериев эффективности работы машины (производительность, удельные энергозатраты на добычу угля, его зольность и количество штыба) установлено, что внедрение предложенных подсистем управления режимами работы машины приводит к увеличению производительности машины в среднем на 9,9% за счет постоянной корректировки устойчивого значения мощности двигателя привода резания, уменьшению удельных энергозатрат на транспортировку и погрузку угля исполнительными органами в среднем на 50,7%, и удельного количества штыба на 34% за счет предотвращения заштыбовки органа, уменьшению зольности угля в среднем на 13,4%, и удельных энергозатрат на разрушение угля на 42,4% за счет предотвращения присечки породы у кровли пласта, уменьшению удельных энергозатрат на разрушение угля на 20 - 40%, и

удельного количества штыба на 11,3% за счет предотвращения щелевого вида резания угля резцами органа.

На основе проверки статистических гипотез при сравнительном анализе статистических характеристик формирования управляющих воздействий подсистемами нечеткого автоматического управления режимами работы добычной машины, которые получены при вычислительном и физическом (на лабораторном стенде) экспериментах, доказана адекватность созданной комплексной имитационной модели добычной машины.

**Ключевые слова:** эффективность добычи угля, экспертная система, мехатронный подход, автоматизация процессов управления, добычная машина, математическое моделирование, стендовые исследования.

### ABSTRACT

**Bublikov, A.V. Automation of the control of mining machines based on the fuzzy inference algorithms. - Qualifying scientific work published as a manuscript.**

A Doctoral dissertation thesis for procurement of the D.Sc.Eng. degree in specialty 05.13.07 – Automation of Control Processes, Dnipro University of Technology, Dnipro, 2020.

The dissertation deals with the solution of a topical scientific problem concerning the development of scientific grounds of the automation of mining machinery control by simultaneous, agreed, and fuzzy control of several structural subsystems of a machine by means of the synchronization of a discrete time change in the conditions of control subsystems and compensation of their effect on the operating modes, which they do not control, with the help of the specified dependences between their original clear variables. The dissertation substantiates the operating mode of mining machines, influencing the operator's solutions as for the control of certain subsystems, and proposes the characteristics of the modes specifying them. In terms of the identification of expert rules of fuzzy productions for each operating mode of a mining machine, conditions of the changes in characteristics and the actions providing the trajectory of characteristics changes in time have been identified; in this context, the trajectory corresponds to the machine operation with rational technological and economic indices. New regularities of time changes in the stator current and active power of a cutting drive motors have been defined to identify the characteristics of the operating mode of a mining machine. That is unique for certain characteristics of the operating modes of the machine and their changes. The algorithm of the coordinated control by the expert subsystems of fuzzy control of the mining machinery operation has been developed based on the time distribution of the procedures of the formation of the subsystems' controlling effects.

**Key words:** coal mining efficiency, expert system, mechatronic approach, automation of the control processes, mining machine, mathematical modeling, stand-based studies.

**БУБЛІКОВ Андрій Вікторович**

**АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ КЕРУВАННЯ ВИДОБУВНИМИ  
МАШИНАМИ НА ОСНОВІ АЛГОРИТМІВ НЕЧІТКОГО ВИВОДУ**

(Автореферат)

Підписано до друку 01.09.2020. Формат 60x90/16.

Папір офсет. Ризографія. Ум. друк. арк. 1,5.

Обл.-вид. арк. 1,55. Тираж 100 прим. Зам. №1023

Віддруковано в «Поліграфцентрі» ФОП Кучугурний Ю.М.,  
свідоцтво про державну реєстрацію №2 224 000 0000 073863,

м. Дніпро, вул. Воскресенська, 11, 49000

Тел.: (096)423-60-71